

文章编号: 1001-3806(2009)03-0297-03

## 利用紫外激光处理提高熔石英损伤阈值的研究

黄进, 吕海兵, 王海军, 赵松楠, 王韬, 蒋晓东, 袁晓东, 郑万国

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 为了研究紫外脉冲激光预处理对熔石英表面形貌的影响, 验证其对熔石英元件抗紫外激光损伤能力的提升效果, 利用输出 355nm 3 倍频紫外脉冲激光的 YAG 激光器, 采用光栅式扫描的方式对熔石英表面进行了全口径能量周期递增的激光预辐照处理, 并在处理结束后研究了表面形貌的变化, 考核了其在 355nm 脉冲激光作用下的损伤阈值。结果表明, 石英基片在经过紫外脉冲激光预处理后表面杂质得到有效清除并暴露了低阈值缺陷, 处理后的石英基片零几率损伤阈值平均提高 24% 左右, 50% 损伤阈值提高约 19%。结果表明, 紫外激光预处理是增强熔石英元件紫外激光负载能力的有效方法, 可有效缓解高功率固体激光装置 3 倍频输出的负载瓶颈, 具备较高的工程运用价值。

**关键词:** 激光技术; 激光预处理; 光栅扫描; 损伤阈值; 熔石英

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

### Research of enhancing damage-thresholds of fused silica using UV laser treatment

HUANG Jin, LÜ Hai-bing, WANG Hai-jun, ZHAO Song-nan, WANG Tao,  
JIANG Xiao-dong, YUAN Xiao-dong, ZHENG Wan-guo

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

**Abstract:** In order to study the influence of UV pulse laser pre-treatment on surface image of fused silica and validate its upgrade effect on anti UV laser damage ability of fused silica, using 355nm YAG laser raster to scan fused silica optics by means of power increase by degrees periodically, the change of surface image was studied and its anti-laser damage threshold at 355nm was measured. Test results showed that surface impurity was cleaned out and it was found that the zero probability damage-threshold increased 24% and 50% probability damage-threshold increased 19%. The result proves UV laser pre-treatment is an effective method to increase anti UV laser damage ability and break through the bottleneck of high power laser output at 355nm, laser pre-treatment have practical value in engineering.

**Key words:** laser technique; laser pre-treatment; raster scanning; damage-threshold; fused silica

## 引言

熔石英材料因具备吸收小、化学性质稳定、抗损伤能力强的优点而被广泛应用于高功率固体激光用户装置的 3 倍频组件中, 因此, 其对紫外脉冲激光的负载能力对用户装置的稳定运行显得尤为重要。熔石英材料在加工过程中会在表面、亚表面留下划痕、坑洞等加工缺陷, 缺陷中不可避免的埋入了诸如抛光粉、研磨剂等杂质, 另外, 运输、传递过程中也容易被 2 次污染, 进一步减低了表面洁净度, 传统的超声波清洗以及酒精清洗仍无法完全有效去除熔石英表面的附着杂质, 这部

分顽固杂质会在实际的使用过程中成为紫外脉冲激光能量的超强吸收点, 从而影响熔石英元件的紫外脉冲激光负载能力<sup>[1]</sup>。利用紫外脉冲激光对熔石英表面进行预辐照处理, 可有效去除常规手段无法去除的表面杂质、改善电场结构, 并暴露亚表面隐藏的加工缺陷, 该方法有助于提升石英元件负载能力, 其缺陷暴露机制也已成为后期利用 CO<sub>2</sub> 激光对表面缺陷进行修复的必要前提手段<sup>[2-3]</sup>。国内高功率固体激光装置的建设方兴未艾, 开展紫外脉冲激光预处理研究, 对于保障用户装置的稳定运行, 显得尤为重要。

作者利用倍频产生的 355nm 紫外脉冲激光对石英基片表面进行全口径能量递增的预辐照扫描, 通过光学显微镜发现修复后表面缺陷嵌入的顽固杂质得到了有效清除, 损伤阈值测试也表明, 预处理后的各类石英元件其负载能力得到了一定程度的提高。

作者简介: 黄进 (1980-), 男, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术研究。

E-mail: huangj-88@tom.com

收稿日期: 2008-01-30; 收到修改稿日期: 2008-08-28

### 1 紫外脉冲激光预处理作用机理

目前相关研究已经证实,利用紫外脉冲激光提前对待使用的熔石英元件进行预辐照扫描,可达到几个方面的目的:(1)熔石英加工表面存在着的部分顽固杂质(研末填充物、水分、其它污染物)在紫外脉冲激光的作用下产生等离子体冲击,并使得部分杂质发生离子分解,从而去除表面异物,清洁表面,该作用效果明显减少了熔石英表面的强激光吸收点,从而有利于提高元件的损伤阈值<sup>[4]</sup>;(2)如图1所示,熔石英表

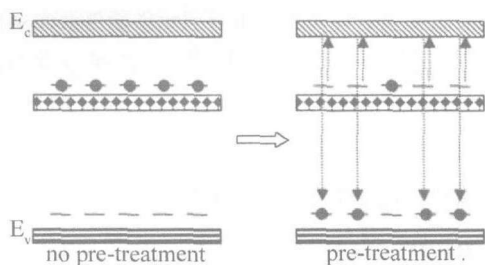


Fig. 1 Mechanism of reducing electronic defect by means of laser pre-treatment

面由于加工带来的表面破坏(化学结构缺陷、杂质嵌入)使其电场结构中存在缺陷电子能级,这使得原本宽禁带的石英带隙减小,缺陷电子能级上的电子在激光激发下较容易跃迁到导带,从而增加了自由电子数量,容易引发材料损伤;在小能量紫外脉冲激光的预处理作用下,缺陷电子能级上的电子提前跃迁至导带,然后衰减至深能级,这样一来,即便在后续强激光的作用下也难以进入导带,从而减少了其发生多光子电离和雪崩电离破坏的几率<sup>[5]</sup>;(3)由于表面填充物的去除使得熔石英表面的加工缺陷(划痕、坑洞)得以充分暴露,表面的损伤阈值薄弱区也会得到提前引爆,为利用CO<sub>2</sub>激光预处理修复表面加工缺陷创造好了必要条件<sup>[6]</sup>。

### 2 研究方法

#### 2.1 激光预处理光路排布

实验中利用 YAG 脉冲激光器输出 10Hz 的 1064nm 的基频激光,3 倍频后得到优质的 355nm 紫外脉冲光源,脉宽 6.3ns,利用透镜进行聚焦,通过控制待处理熔石英元件的离焦量,使预处理光斑在靶面上的大小为 3mm<sup>2</sup> 左右,扫描过程中利用衰减器控制辐照激光能量,以使预处理能量密度满足预先设定的要求。具体光路排布如图2所示。

实验中待预处理样品放置于电动平移台上,由计算机按照预先设定的平移路径控制平移台移动,达到让激光在样品表面进行扫描的目的,根据光斑大小和激光器频率设定合适的扫描速度和行间距,以使得预

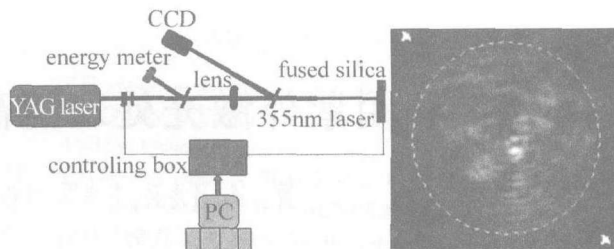


Fig. 2 Experimental arrangement of laser pre-treatment and facula distribution

处理光斑可以均匀覆盖整个元件表面,具体扫描路径如图3所示。

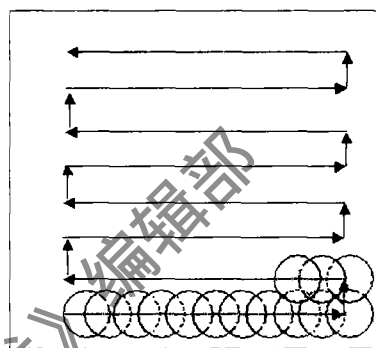


Fig. 3 Sketch map of raster scanning

#### 2.2 预处理过程控制

由于清除熔石英表面不同杂质所需的激光能量不同,因此,紫外激光预处理要求在低于石英基片 R:1 损伤阈值的能量密度下实现对样品表面能量密度周期递增的扫描,直至达到扫描能量上限。处理前采用 R:1<sup>[7]</sup> 的方法测量出石英基片的损伤阈值,然后按照表1中给出的扫描能量依次对元件表面进行处理。

Table 1 Energy control of pre-treatment

proceed of scanning	scanning energy density (damage threshold of R:1)	repeat times
scanning of low energy	20%	3
scanning of middle energy	50%	3
scanning of high energy	80%	3

由于最高预处理能量已经接近熔石英的损伤阈值,因此预处理结束后,样品表面的部分伤阈值薄弱点已经暴露出来。如图4所示。

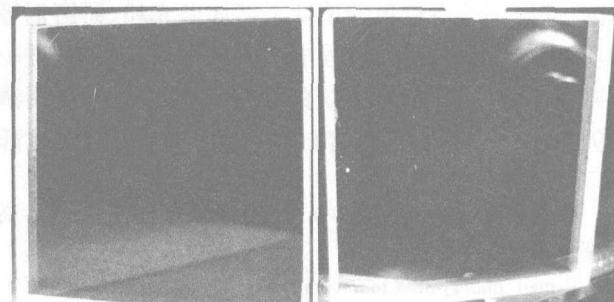


Fig. 4 Contrast of appearance before and after pre-treatment

从图中可以看出,经过预处理后的石英基片,局部缺陷点增加,原本存在的划痕变得更加明显,阈值薄弱

区的充分暴露为 CO<sub>2</sub> 激光修复处理创造好了条件。

### 3 研究结果

#### 3.1 紫外脉冲激光预处理对元件表面形貌的影响

为验证该预处理工艺的缺陷(杂质)清除机制,分别利用高倍率光学显微镜和扫描探针显微镜对比了熔

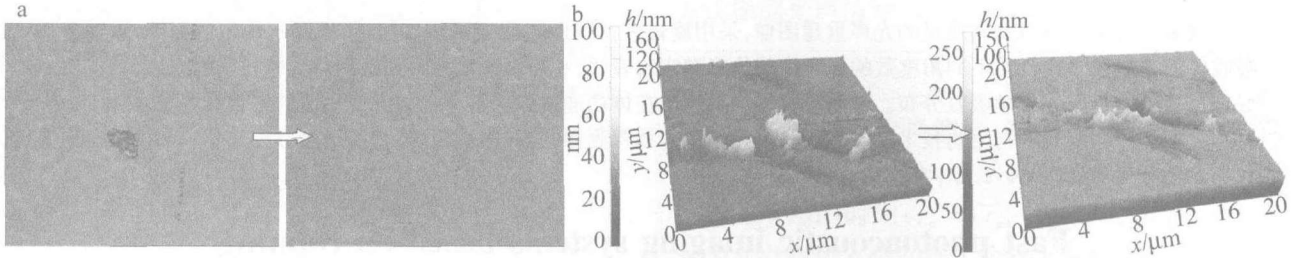


Fig. 5 Surface microscopic image change of bare fused silica before and after pre-treatment

a—impurity on surface was cleaned after pre-treatment(right) b—impurity in scratch was cleaned after pre-treatment(right)

#### 3.2 紫外脉冲激光预处理对元件损伤阈值的影响

为充分考核该工艺对各类熔石英元件的适用性,实验采用同一种预处理工艺对来自不同厂家的4类石英基片进行了激光预处理,处理后利用S:1的损伤考

石英表面缺陷在预处理前后的形貌变化,结果如图5所示。

由图5可以看出,经过紫外脉冲激光预处理后,熔石英表面缺陷得到了有效清除,划痕内填埋的杂质也被基本去处,这充分证实了该工艺洁净表面、暴露缺陷的预处理机制。

核方法验证不同损伤几率下的负载通量的变化情况,横轴代表不同的损伤概率,纵轴表示相应损伤概率下的激光辐照能量密度。结果如图6所示。

由图6可以看出,紫外脉冲激光预处理对这4类

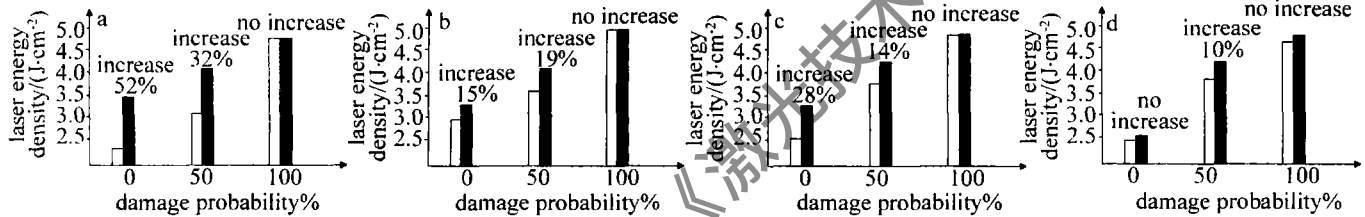


Fig. 6 Contrast of anti-damage ability of fused silica before and after pre-treatment

不同加工品质的石英基片均具备不同程度的抗损伤能力提升效果,零几率和50%几率损伤阈值分别平均提高了24%和19%;另一方面,相同预处理工艺对不同类型元件的损伤阈值提升效果有较大差异,这应该与待处理元件表面抛光质量和缺陷、杂质分布的类型和程度有关,理论上来说,元件表面缺陷、杂质分布越多,就越能体现预处理对损伤阈值的提升效果。4种元件的100%几率损伤阈值均无改善,证明紫外脉冲激光预处理并不能明显改变元件的本征阈值,缺陷清除机制仍是该工艺提高元件抗损伤能力的主要原因。

#### 3.3 紫外脉冲激光预处理对 CO<sub>2</sub> 激光预处理效果的影响

CO<sub>2</sub> 激光预处理已被证明是提高熔石英负载能力最有效的手段之一,其必须依靠紫外激光预处理进行充分的表面缺陷暴露,才能达到最佳效果<sup>[8]</sup>。由图7可以看出,只单纯依靠紫外脉冲或 CO<sub>2</sub> 激光预处理所带来的抗损伤能力提升效果都比较有限,而先期利用紫外激光预处理工艺清洁表面、暴露加工缺陷和低阈值点后,再进行 CO<sub>2</sub> 激光熔融修复处理,可极大的提高熔石英的负载能力,这充分证实了紫外脉冲激光预

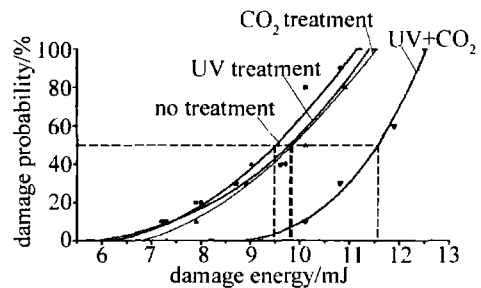


Fig. 7 Influence of different pre-treatment measures on damage-threshold of fused silica

处理的重要性。

### 4 结论

紫外脉冲激光预处理可有效提升熔石英光学元件的抗紫外激光损伤能力,该效果主要得益于预辐照过程中的杂质、缺陷清除机制,其对熔石英表面缺陷电子能级的影响还需要通过另外的研究加以佐证;另外,该预处理工艺可有效地暴露熔石英的加工缺陷和表面低损伤阈值点,使其成为了利用 CO<sub>2</sub> 激光熔融修复表面缺陷(划痕、坑洞)前必不可缺的辅助手段。在研究过程

(下转第313页)

振荡。比较图4a和图4b可知,对于o光,随着介质折射率 $n$ 的增大, $\Delta f(y)$ 振荡的幅度逐渐变小,即棱镜对单模高斯光束光强分布的影响减小;相比之下,对于e光, $\Delta f(y)$ 先减小,在 $n > 1.5$ 的区域又有增加的趋势。总的来看,介质折射率 $n$ 在1.45~1.54范围内取值时, $\Delta f(y)$ 对于o光最大不超过 $8.5 \times 10^{-3}$ ,e光最大不超过 $1.0 \times 10^{-2}$ ,可见胶合层介质折射率的变化对透射光束光强分布的影响很小。

### 3 结论

由于光的干涉效应,导致了单模高斯光束通过洛匈棱镜后,棱镜会对透射光束的光强分布产生影响,这种影响除了与入射光本身的性质,如波长、腰斑半径等有关以外,还与棱镜的结构角、胶合层的厚度以及胶合层介质的折射率有关,当三者确定其二时,这种影响均会随另一参量的变化而呈现周期性振荡,且振荡的状态也会相应的发生变化。其物理原因是在胶合层中,两次反射光束与直接透射光束的光程差会随这一参量呈周期性改变,这一现象对干涉后的出射光束产生周期性的影响。总体上看,棱镜对透射光束光强分布的影响均小于1%,所以,在要求不是太严格的情况下,可以忽略洛匈棱镜对高斯光束光强分布的影响。

(上接第299页)

中也进一步发现,预处理过程中部分关键参量如扫描能量增幅、扫描能量上限值等,对最终的预处理效果有着明显的影响,紫外脉冲激光预处理的最佳工艺参量,还需要进一步加以研究。

#### 参考文献

- [1] CHEN F, MENG Sh X. Damage mechanism of optical material [J]. *Physics Evolvement*, 1998, 18(2): 198-206 (in Chinese).
- [2] BRUSASCO R M, BUTLER J A, HRUBESH L W, *et al.* CO<sub>2</sub> laser polishing reducing of 351nm surface damage initiation in fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. <http://www.osti.gov/dublincore/ecd/servlets/purl/15004628-Ys6Db3/native/15004628.pdf>.
- [3] BRUSASCO R M, HRUBESH L W, BULTER J A, *et al.* Localized CO<sub>2</sub> laser treatment for mitigation of  $3\omega$  damage growth on fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. [www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15002005-8yk6fj/native/15002005.pdf](http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15002005-8yk6fj/native/15002005.pdf).

#### 参考文献

- [1] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Technology and Science Press of Shaanxi, 1986: 497-521 (in Chinese).
- [2] WANG T, WU F Q, MA L L. Effect of air-gap polarizing prism on distribution of light intensity of single-mode Gaussian beam [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1335-1339 (in Chinese).
- [3] TANG H J, WU F Q, DENG H Y. Transmittance comparison of Glan-Taylor prism and Glan-Foucault prism [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 215-217 (in Chinese).
- [4] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, *et al.* Ternary parallel beam splitter combined combined of iceland and glass [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(3): 311-312 (in Chinese).
- [5] NI Zh B, SONG L K, LIU J P, *et al.* The design and performance analysis of modular structural reflected polarizing prism of equal splitting angl [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 151-153 (in Chinese).
- [6] WANG T, WU F Q, MA L L, *et al.* Effects of Nicol prism on the intensity distribution of single-mode Gaussian light beam [J]. *Physics Experimentation*, 2008, 28(4): 1-5 (in Chinese).
- [7] JIA P, LI G H, PENG H D. New design of turning composite parallel splitting prism [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(2): 154-156 (in Chinese).
- [8] WU F Q, ZHENG Ch H, XUE D. Characteristic study of backward-use of the rochan prism [J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 2002, 13(10): 1010-1012 (in Chinese).
- [9] BORN M, WOLF E. Principles of optics [M]. Beijing: Science Press, 1978: 61-71 (in Chinese).
- [10] ZHOU B K, GAO Y Zh, CHEN T R, *et al.* Laser principle [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 71-74 (in Chinese).

- [4] HUANG J, ZHAO S N, LÜ H B, *et al.* Damage-threshold increase of pickoff optics using 1064nm wavelength laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(5): 728-732 (in Chinese).
- [5] BRUSASCO R M, PENETRANTE B M, PERTSON J E, *et al.* UV laser conditioning for the reduction of 351nm damage initiation in fused silica [EB/OL]. [2008-08-10]. <http://www.osti.gov/energycitations/servlets/purl/15005418-qybuky/native/15005418.pdf>.
- [6] MENDEZ E, BAKER H J, NOWAK K M, *et al.* Highly localised CO<sub>2</sub> laser cleaning and damage repair of silica optical surface [J]. *SPIE*, 2005, 5647: 165-175.
- [7] ZHU Y N. Discussion of the measurement methods for laser induced damage threshold of optics coating [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5): 532-535 (in Chinese).
- [8] HUANG J, LÜ H B, YE L, *et al.* Damage threshold improvement of fused silica chip by CO<sub>2</sub> laser pretreatment [J]. *Chinese Journal of Laser*, 2007, 34(5): 723-727 (in Chinese).