

·激光技术·

## 纳秒激光在真空环境下对石英玻璃的激光损伤研究

刘强虎, 王毕艺, 李建峰, 张晓光

(光电信息控制和安全技术重点实验室, 河北 三河 065201)

**摘要:**介绍了模拟空间环境条件下激光辐照效应实验方法, 搭建实验平台, 用纳秒级高峰值功率YAG激光对石英玻璃进行了激光损伤实验, 分别测量了低真空和高真空条件下石英玻璃的损伤阈值, 对损伤斑微观区域的形貌和化学成分进行了对比分析, 给出了激光脉冲能量沉积函数和冲击波膨胀压强的表达式, 解释了相应的损伤形貌和损伤阈值变化成因, 实验结果与理论分析相符。

**关键词:**真空环境; 石英玻璃; 激光损伤形貌; 冲击波

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-02-0032-04

## Research on Laser-induced Damage to Silica Glass by Nanosecond Laser in Vacuum Condition

LIU Qiang-hu, WANG Bi-yi, LI Jian-feng, ZHANG Xiao-guang

(Science and Technology on Electro-optical Information Security Control Laboratory, Sanhe 065201, China)

**Abstract:** Experimental methods of laser irradiation effect in simulation space condition are introduced. Experimental platforms are built and laser-induced damage experiments are performed to silica glass by YAG laser with nanosecond pulse high peak power. Laser-induced damage thresholds of silica glass in low and high vacuum condition are measured respectively. The morphology and chemical compositions of micro-region in damage speckle are compared and analyzed. The function of laser pulse energy deposition and the express of shock wave expansion pressure are given. Corresponding damage morphology and reasons of threshold change are explained. Experimental results are in accordance with theoretical analysis.

**Key words:** vacuum condition; silica glass; morphology of laser-induced damage; shock wave

在模拟空间环境条件下, 研究了纳秒级高峰值功率YAG激光对石英玻璃损伤的热力学过程, 测量了低真空和高真空环境下的损伤阈值, 对损伤斑微观区域的形貌和化学成分进行了分析, 给出了高斯脉冲沉积能量的分布函数和激光等离子体产生冲击波的压强表达式, 分析脆性玻璃材料的损伤形貌并探讨真空条件下强激光对石英类光学元件的损伤问题。

### 1 实 验

实验测试系统由空间环境模拟系统(前级泵可

提供至  $10^{-3}$  Pa 左右的低真空度, 低温泵可获得高真空度  $10^{-5}$  Pa)、纳秒量级YAG激光器(波长  $1.064 \mu\text{m}$ , 脉宽 10 ns, 重复频率 1~40 Hz 可调(备有外时统接口), 单脉冲能量  $\leq 3$  J, 近高斯分布)、准直光源、汇聚透镜、分束镜、EPM1000 能量计、PE50BB 能量探头、电动平移台(二维可调, 步进精度  $10 \mu\text{m}$ )、光学显微镜、电子显微镜及 EDS 测量仪组成。激光能量实时监测并由 LABVIEW 编程自动记录数据。

模拟空间环境系统下激光损伤测试实验系统如图 1 所示。

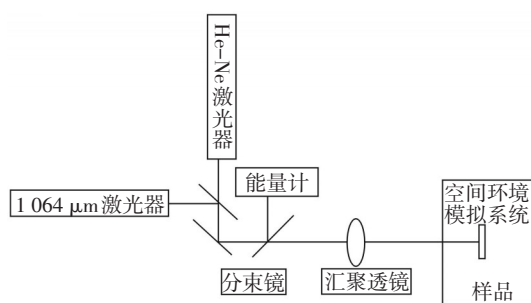


图1 实验系统示意图

通过二维平移台移动分束镜可以移动激光束在样品上的位置,以及激光汇聚点在 $Z$ 方向的移动,用 $r$ -on-1 损伤方式进行测量,即用等比例增加以相同的时间间隔在同一点上辐照多次,直至发生损伤。分束镜将一定比例(7%)的激光能量导入能量计,以此间接测量激光能量,通过散射光测量法检测样品的激光损伤<sup>[1-2]</sup>。使用电子显微镜和光学显微镜观察损伤形貌以及EDS测量损伤前后损伤区域的元素分布。

激光器输出能量的稳定性和主光束能量的测量是激光损伤阈值测试准确性的重要保证。在损伤测试之前,需要确定分束镜分出的光束能量与主光束能量的比值,用Labview 编程自动记录测量结果如图2所示。

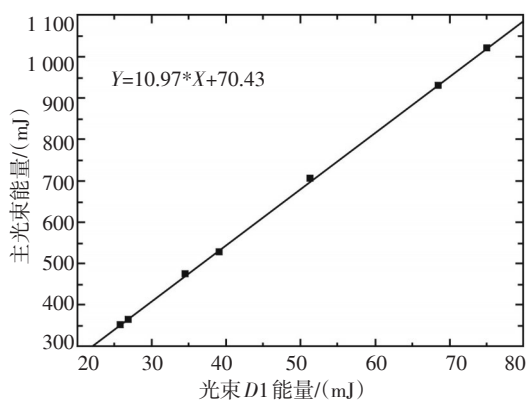


图2 能量标定拟合曲线

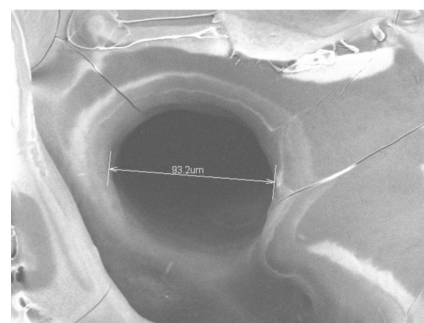
从拟合的曲线可以得到通过 $D1$ 的能量计算主光束能量的公式

$$Y=10.97*X+70.43 \quad (1)$$

其中, $Y$ 表示主光束能量, $X$ 表示分光束 $D1$ 的能量。在激光器稳定输出的电压范围内电压与激光器输出能量成线性关系,是激光损伤阈值测试的重要保证。

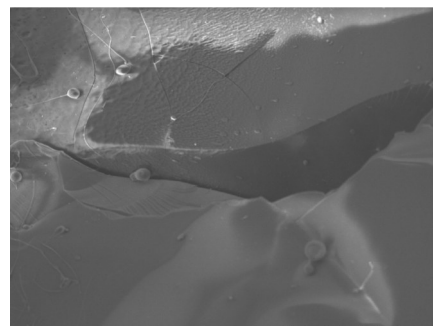
## 2 实验结果及分析

石英玻璃属于高脆性介质,纳秒量级激光脉冲聚焦到介质时,其能量在空间的沉积规律会影响激光等离子体产生冲击波的压强分布,从而影响激光损伤形貌。冲击波在介质中传播时,会出现以较低速度传播的破坏层,其边界的传播就构成“破坏波”。图3和图4是电子显微镜观察到的样品初始损伤点的微观形貌。



TM-1000 2009-03-20 16:08 x1.0 K 100 μm

图3 损伤区域中心



TM-1000 2009-03-20 16:01 x1.0 K 100 μm

图4 炸裂区

由图3、图4可见,初始损伤点内存在大量的裂纹,这些裂纹会对入射光产生调制作用,局部的光波场强度显著增加从而超出该处的损伤阈值导致损伤进一步发展。损伤斑中心有熔融物,周围有断裂特征,说明材料破坏不但有热的作用,而且还有力学效应。材料局部区域具有高强度的电场,无论是材料还是杂质都容易电离,离子区形成后,大量的激光能量会被吸收,局部区域温度急剧升高,光吸收所产生的高压使熔石英材料密度增大且结构发生变化。可以看到,损伤中心坑底部有材料致密现象,进一步增强了材料吸收光的能力。

初始损伤点在后继脉冲作用下会继续增长,10

个脉冲后损伤斑形貌通过光学显微镜观察如图5所示。关于高脆性介质裂纹的增长原理有很多不同的理论解释<sup>[3-4]</sup>,比较普遍的内部缺陷理论认为,脆性

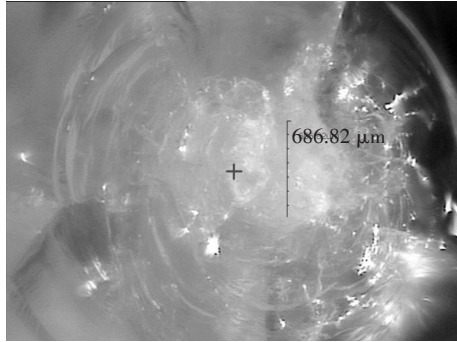


图5 表面损伤点损伤增长图像

玻璃自身带有大量的内部缺陷等,成为石英玻璃在

高压作用下裂纹蔓延增长和增多的基础。裂纹的增长速度随压强变化而变化<sup>[5]</sup>,当外界压强高于最高弹性应力(HEL)时(石英玻璃的HEL一般在8.4-9.16 GPa),其扩散速度随压强变化不大,发生完全断裂的同时还会发生结构的相变和熔化<sup>[6]</sup>。当外界压强低于HEL时,随压强的增大而增大,大量裂纹的扩散也会形成一个破坏波,其速度小于冲击波的速度<sup>[7]</sup>。由以上分析并如图3所示,激光等离子产生的冲击波对介质的作用效果可以分为激光等离子体通道、挤压熔化、膨胀断裂、裂纹末端的塑性变化四种。

对损伤斑微观区域的化学成分进行了X射线能谱分析(EDS测量),并与实验室环境下进行了对比,结果如图6所示。

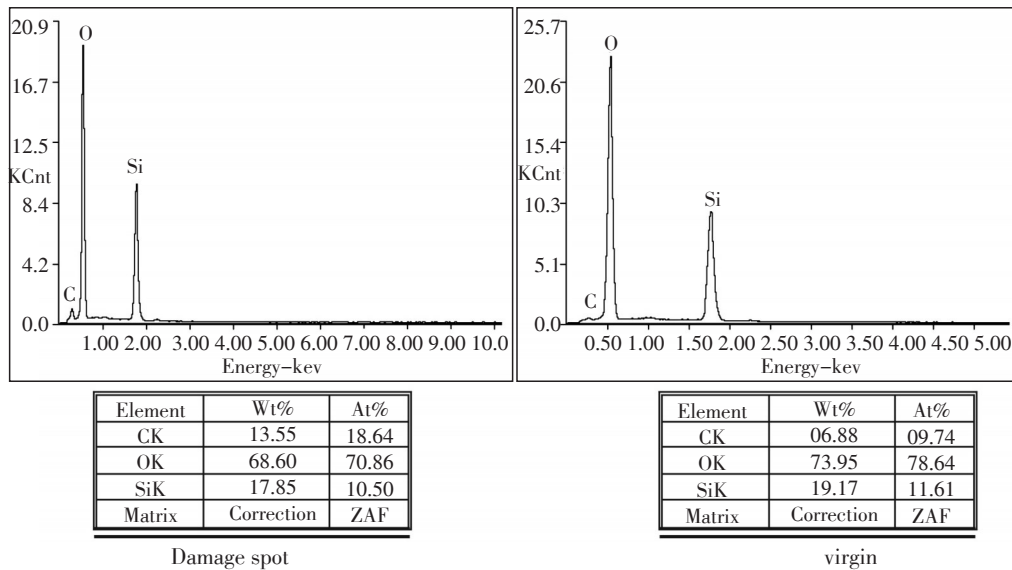


图6 损伤斑化学成分EDS测量

从图6中可以看出,在真空环境下,损伤坑的O:Si原子数比例下降,氧含量降低说明石英表面发生光化学反应形成SiO<sub>x</sub>(x<2),导致透射率降低,根据moving breakdown模型<sup>[8]</sup>,高斯脉冲汇聚到介质上时,在空间任意一点产生损伤的时刻是瑞利距离、脉宽以及脉冲能量的函数。在各个点上被损伤的时间是不同的,在焦点处首先被破坏,后随着远离焦点的方向逐步后移。设在焦点的位置坐标为0,则不同位置发生损伤的时间为

$$t(z) = - \left\{ \frac{1}{4 \ln 2} \ln \left[ \beta \left( 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$z$ 是距离焦点的距离, $t(z)$ 为 $z$ 处发生击穿的时刻, $\tau_p$ 是脉冲宽度,实验所用的激光脉冲为高斯型,可表示为

$$P(t) = P_{\max} \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{t}{\tau_p} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中, $P_{\max}$ 是脉冲峰值功率, $\tau_p$ 是脉冲宽度, $t$ 是脉冲作用时间。则作用于任意两点 $z_1, z_2$ 之间的激光能量可以写为

$$\frac{Q_2 - Q_1}{z_2 - z_1} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P(t) dt}{z_2 - z_1} \quad (4)$$

式中,脉冲作用时间 $t$ 是 $z$ 的函数,从实验中发现,光

化学反应形成 $\text{SiO}_x(x<2)$ ,激光能量透过率会迅速下降,在脉冲强度的时间分布上观察到后续脉冲强度被截断<sup>[9-10]</sup>。沉积在介质中的激光脉冲能量不是脉冲的全部能量,脉冲强度分布越集中,沉积的能量越大。在脉冲单位长度激光能量的沉积量决定于激光脉冲的峰值功率和产生损伤的位置。

聚焦的空间高斯脉冲的强度分布为

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{2r^2}{w^2}\right) \quad (5)$$

可知,激光脉冲光强分布随 $r$ 的增加而迅速减小,脉冲能量主要集中在脉冲的中心部分。从损伤图像来看,焦点处的激光等离子体通道的宽带最大,与焦点半径相当,等离子体向外膨胀就产生所谓的冲击波。冲击波产生的高温高压使得玻璃的近邻介质发生熔化和断裂<sup>[11]</sup>。当介质在外界压强下膨胀时,从破坏图像上看,玻璃的裂纹是向四周发散的。压强所做的功和被压缩的体积有以下关系

$$W = \int P dV = \int P \cdot d(L\pi r^2) = L \int P \cdot d(\pi r^2) \quad (6)$$

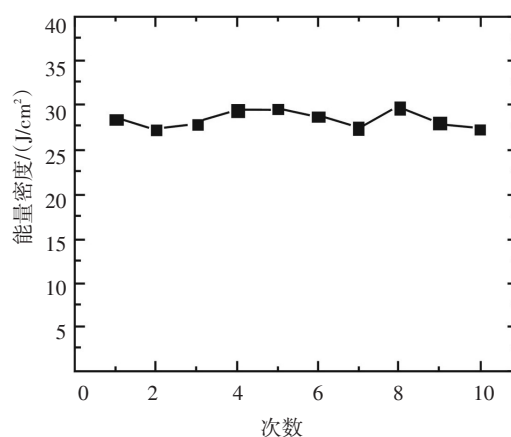
进一步推导可以得到任意一点 $z$ 的压强表达式

$$P_z(r) = \frac{K(z)}{\pi r^2} \quad (7)$$

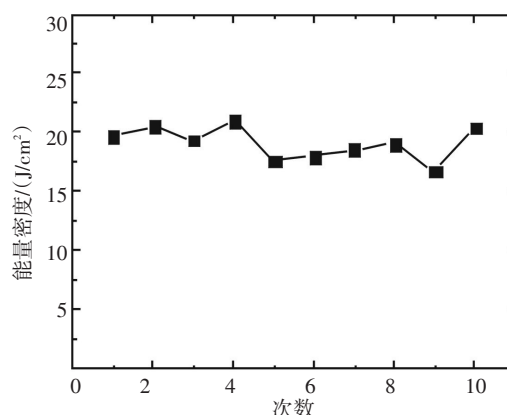
式中, $K(z)$ 为脉冲单位长度激光能量的沉积量,可见激光能量的空间沉积特点决定了对应点压强的分布特点。从压强分布看,在真空环境下,损伤坑的O:Si原子数比例下降,光化学反应形成 $\text{SiO}_x(x<2)$ 导致的透射率降低,单位长度激光能量沉积量的剧烈增加,导致冲击波在任意点的压强提高,使材料损伤阈值进一步下降。

利用He-Ne激光为探测光束,通过脉冲激光辐照前后He-Ne激光反射光能的改变判断样品表面是否出现损伤<sup>[12]</sup>。分别测试了在低真空( $10^{-3}$  Pa)和高真空( $10^{-5}$  Pa)环境下高峰值 $1.064 \mu\text{m}$ 激光对石英玻璃的损伤阈值,得到低真空( $10^{-3}$  Pa)和高真空( $10^{-5}$  Pa)条件下10次石英玻璃的损伤阈值测量结果分布如图7所示。

从图7中可以看出,在真空环境下石英玻璃对 $1.064 \mu\text{m}$ 高峰值YAG激光的损伤阈值明显低于大气环境下(零损伤阈值为 $48.32 \text{ J/cm}^2$ ),在高真空条件下更为明显,与理论分析的结果一致,也就是说石英光学元件在真空环境下使用时,发生损伤的几率明显高于大气环境下。



(a)低真空( $10^{-3}$  Pa)下损伤阈值



(b)高真空( $10^{-5}$  Pa)下损伤阈值

图7 真空条件下石英元件的损伤阈值

### 3 结 论

从实验和理论上分析了模拟空间环境下高功率固定脉宽为纳秒级的YAG激光脉冲聚焦对熔石英玻璃激光损伤的热力学过程,测量了低真空和高真空环境下的损伤阈值,对损伤斑微观区域的形貌和化学成分进行了分析,有如下结论:(1)强激光与玻璃介质相互作用过程可以分为介质的非线性电离过程、激光能量沉积过程、激光等离子体膨胀过程。激光等离子体产生的冲击波对介质的作用效果可以分为激光等离子体通道、挤压熔化、膨胀断裂、裂纹末端的塑性变化四种。(2)激光能量沉积到等离子通道后向外膨胀,冲击波的压强不同对临近介质破坏作用也不同。当压强大于10 GPa,石英玻璃将熔化;当压强大于玻璃的最高弹性应力,玻璃将完全断裂;当压强小于玻璃的最高弹性应力时,主要是微裂纹的增长和扩散。在裂纹末端的塑性变化使得玻璃折射率发生改变。(3)针对纳秒高斯型激光光束聚焦到介

(下转第82页)



转向锁定箔条<sup>[1]</sup>。

箔条用于对抗单脉冲雷达时,至少需要在两个跟踪波束内形成多个目标。这会使方位、仰角和距离跟踪电路产生误差信号<sup>[2]</sup>。多个箔条目标持续使雷达产生方位和仰角跟踪误差,最终形成了中断跟踪的条件,使威胁雷达转向锁定箔条。当箔条在波束内形成目标时,可使单脉冲雷达产生最大的角跟踪误差,因此对抗效果最佳。

现代雷达采用某种多普勒滤波技术能有效抑制箔条和其他杂波的影响。脉冲多普勒雷达和连续波雷达基于目标相对雷达的速度跟踪目标。采用动目标指示器的雷达利用目标的相对速度来区分目标和杂波。箔条投放后,箔条云的速度在瞬间降到了与周围空气相同的速度,其相对雷达的速度立刻接近于零。为了使自卫箔条有效,飞机相对雷达的速度也必须接近于零(这种情况发生在飞机机身与雷达成90°时)。飞行员要利用好飞机机身与多普勒雷达成90°的这个雷达性能“凹口”来对抗雷达,因为受多

普勒频移的影响,雷达在这个位置无法分辨目标<sup>[3]</sup>。

### 3 结束语

箔条是一种古老而有效的脉冲雷达对抗措施。箔条的基本特性(雷达截面、频率覆盖范围、散开速度、多普勒特性、极化特性和留空时间)决定了箔条的干扰效果。箔条投放的主要战术(掩护和自卫)的目的都是使箔条对威胁雷达系统产生不利影响。自卫箔条、自卫有源干扰和飞机机动协同使用,常常是对抗致命性威胁雷达系统的“最后的防线”。

### 参考文献

- [1] 杨超. 雷达对抗工程基础[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2006.
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安: 西北电讯工程学院出版社, 1985.
- [3] 杨超. 雷达对抗基础[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2012.

(上接第35页)

质时的情况,引入单位长度激光能量沉积函数和冲击波的压强函数,解释了石英玻璃在真空中损伤阈值降低的原因。结果表明,石英玻璃在真空环境下使用时,发生损伤的几率明显高于大气环境下,在高真空条件下更为明显,并且随着辐照时间的增加出现损伤点的加重及扩展。

### 参考文献

- [1] 刘强, 林理彬, 祖小涛, 等. 强激光辐照损伤判别方法[J]. 激光杂志, 2002, 23: 4-8.
- [2] ZHANG D W. The application of ion beam cleaning on the laser film[J]. Optical Technique, 2005, 31 (2): 238 - 240 .
- [3] Guignard F, Autric M, Baudinaud V. Damage mechanisms and transparency changes in CO<sub>2</sub> laser irradiated glass [A]. Proc of SPIE[C]//. 1998, 3244: 176-187.
- [4] Tien A C, Backus S, Kapteyn H, et al. Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration [J]. Phys Rev Lett, 1999, 82(19): 3883 ~ 3886.
- [5] Rasorenov S V, Kanel G I, Fortov V E. Shock-wave phenomena and the properties of condensed matter[M]. New

York: Springer, 2004.

- [6] Gamaly E G, Juodkasis S, Nishimura K, et al. Optical heating in semiconductors[J]. Phys. Rev. B, 2006, 73: 80.
- [7] Bartoli F. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors[J]. Appl. Phys, 1976, 47(7): 2878.
- [8] Docchio F, Regondi P, Capon M R C, et al. Analysis of the plasma starting times[J]. Appl. Opt., 1988, 27: 3661-3668.
- [9] Zeng X Z, Mao X L, Mao S S, et al. Laser-induced shock-wave propagation from ablation in a cavity[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88: 061502.
- [10] 季忠刚, 邓蕴沛, 冷雨欣, 等. 飞秒激光多脉冲烧蚀研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2003, 40(9): 14-20.
- [11] Zel'dovich, Raizer. Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena [M]. New York: Dover Publications, 2002.
- [12] Hu Junjiang, Zhang Lei, Chen Wei, et al. Experimental investigation on laser-induced surface damage threshold of Nd-doped phosphate glass[J]. Chinese Optics Letters, 2012 (4): 10.