

关于表面污染物对光学元件损伤特性的实验研究

尹宪华 庄亦飞 张 燕 张国文

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

摘要 采用一台输出波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 调 Q 激光器,以不同辐照方式对光学元件表面污染物引起的损伤开展了系统的实验研究。在确定了 K9 玻璃和熔石英元件基板零几率损伤阈值的基础上,针对金属粒子污染物和有机污染物分别进行了元件损伤特性实验研究,分析了表面污染物造成元件损伤阈值下降的诱导机理。

关键词 激光光学; 激光损伤; 金属粒子污染; 有机污染; 损伤阈值

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s102006

Research on the Characteristics of the Optical Element Damage Caused by Surface Pollution

Yin Xianhua Zhuang Yifei Zhang Yan Zhang Guowen

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

Abstract By using a tuning Q Nd:YAG laser with an output laser wavelength of 1064 nm, this article focuses on the systematic research on surface damage situation in optical glass caused by impurities in different irradiation ways. On the basis of a determined zero probability in damage threshold within K9 glass and fused silica component substrate, this article proposes experiments on damage characteristics in metal particle pollutants and organic pollutants, analyzes the inducing mechanism of decreased damage threshold caused by surface pollutants.

Key words laser optics; laser damage; metal particle pollution; organic pollution; damage threshold

OCIS codes 140.3390; 140.3440; 140.6810; 160.3380; 160.6030

1 引 言

提高激光器的输出能力和保持高的运行稳定性始终是高功率激光驱动器研制的目标,然而高功率密度所诱发的光学元件损伤却是实现这一目标的最大瓶颈,导致激光装置口径也越来越大。目前解决这一问题的方法是:1) 控制光束质量,减少自聚焦的形成;2) 分析造成激光元件损伤的原因,改善工作环境,提高损伤阈值。这一点对于已经存在的激光装置提升其输出能力(例如神光 II 装置)尤为重要。多年来,国内外同行相继开展了激光诱发光学元件损伤机制的研究^[1-10],主要方法是模拟激光对光学元件的损伤行为,分析损伤状况,研究损伤机理,这有助于进一步改善激光装置运行环境,提高光学元件的抗激光损伤能力。

本文主要针对光学元件表面污染物引起的损伤展开系统的实验研究。这些污染物可以分为典型的

两类:1) 金属粒子污染物,它主要是由主激光、杂散光和鬼像照射到激光驱动器空间滤波器小孔、金属传输管道和镜架而喷射出的;2) 有机污染物,它主要是激光驱动器大量的真空机组及真空环境下运动机构的润滑脂、导线和密封圈挥发出的。目前,这两类污染物在各国的大型激光驱动器上都存在,如空间滤波器透镜被金属粒子溅射和真空机组油气污染出现破坏,高能拍瓦压缩光栅被压缩室中润滑脂和导线挥发的有机物污染损伤阈值大大下降。基于以上情况,用一台输出波长为 1064 nm 的 Nd:YAG 调 Q 激光器作模拟光源搭建了损伤实验平台。实验发现金属粒子造成元件损伤阈值下降较有机物更明显,K9 玻璃受到金属粒子污染使得激光破坏阈值下降至原来的 35%,有机污染物对损伤阈值的影响更为复杂且与元件温度关系紧密,在元件加热的情况下有机物会造成明显的损伤出现。对表面污染物所

收稿日期: 2013-10-21; 收到修改稿日期: 2013-11-06

作者简介: 尹宪华(1954—),男,高级工程师,主要从事固体激光工程方面的研究。E-mail: yinxianhua99@126.com

* 通信联系人。E-mail: guowenzhang@foxmail.com

产生的元件损伤阈值下降相关诱导因素进行了物理机理分析。

2 实验装置和相干参数

图 1 为真空损伤测试系统示意图。需指出的是在实验中,部分光学样品是放置在大气中,部分是放置在真空环境中。测量方法分别采用 1-on-1 方法(即元件上一个点辐照一次)和 *s*-on-1 方法(用相同的激光能量脉冲,以相同的时间间隔在元件的同一点上辐照 *s* 次),然后通过显微镜观测样品上产生的

损伤点。在给定光参量条件下,光学样品的损伤几率为 m/n (m 是观测到的损伤点个数, n 是辐照点的个数)。与实验相关的光学参量如下:

- 1) 激光波长(辐照样品) $\lambda=1064\text{ nm}$;
- 2) 平均激光能量 $E=30\sim 120\text{ mJ}$;
- 3) 激光脉宽 $\tau=12\text{ ns}$;
- 4) 有效光斑面积约 $S=0.134\text{ mm}^2$;
- 5) 光学样品的基板是 K9 玻璃和熔石英玻璃,几何尺寸为 $\Phi 30\text{ mm}\times 6\text{ mm}$;
- 6) 真空度为 10^{-3} Pa 。

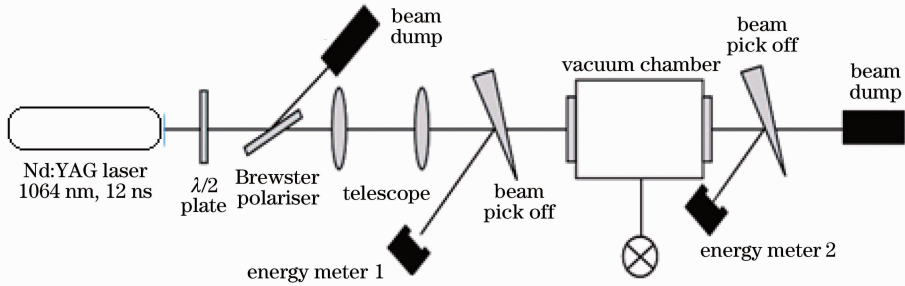


图 1 真空损伤测试系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser induced damage measurement system

3 实验结果及分析

3.1 无污染光学样品的激光损伤

分别对 K9 玻璃和熔石英玻璃样品的“零几率损伤阈值”进行了测定。测量方法是采用 1-on-1 方法,对应每个人射激光能量,分别辐照同一光学样品上 10 个点,共 10 种能量,100 个测量点。然后在显微镜下观测损伤点。

3.1.1 K9 玻璃光学样品的激光损伤

K9 玻璃样品测试结果如表 1 所示,对表 1 进行最小二乘法的数学处理可得图 2。图内的二次方程是拟合曲线方程,解该方程,可得 K9 玻璃“零几率

损伤阈值”能量密度 $E_{th}=19\text{ J/cm}^2$ 。

表 1 真空中 K9 玻璃的 1-on-1 测试结果

Table 1 1-on-1 test results of K9 glass in vacuum

No.	Laser energy /mJ	Laser energy density /(J/cm ²)	Incident surface		Exit surface	
			damage points	damage points	damage points	damage points
1	25.5	19	0	0		
2	30.47	22.7	3	3	2	2
3	32.2	24	4	4	0	0
4	33.81	25.23	2	2	0	0
5	39.1	29.18	6	6	6	6
6	44.62	33.3	8	8	9	9
7	55.13	44.14	10	10	10	10
8	66.7	49.78	10	10	10	10
9	78.43	58.52	10	10	10	10
10	87.6	65.37	10	10	10	10

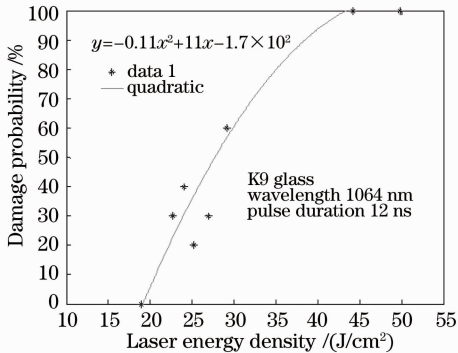


图 2 真空中 K9 玻璃的损伤阈值及损伤几率拟合曲线

Fig. 2 K9 glass damage threshold and damage probability fitting curve in vacuum

3.1.2 熔石英玻璃光学样品的激光损伤

真空中熔石英玻璃 1-on-1 测试结果如表 2 所示,用同样方法对表 2 数据进行处理并解图内的曲线拟合方程,可得熔石英“零几率损伤阈值”能量密度为 $E_{th}=22\text{ J/cm}^2$,如图 3 所示。

实验中观测到两种光学材料的光学出射面会出现不同程度的损伤,甚至有时入射面无损伤,而出射面却出现损伤,或者出射面比入射面损伤严重,这种现象在光学样品较厚的情况时更明显。

表 2 真空中熔石英玻璃 1-on-1 测试结果

Table 2 1-on-1 test results of fused silica in vacuum

No.	Laser energy /mJ	Laser energy density /(J/cm^2)	Incident surface damage points	Exit surface damage points
1	127.56	95.2	10	9
2	123	92	10	10
3	115	85.7	8	8
4	92	68.5	5	4
5	60.7	45.3	2	2
6	43.9	32.8	1	0
7	37.3	27.9	0	0
8	31.7	23.67	0	0
9	27	20.17	0	0
10	25.7	19.2	0	0

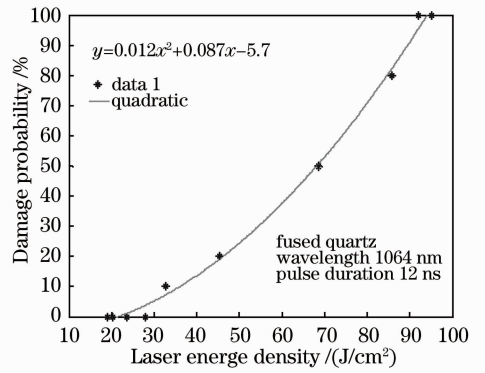


图 3 真空中熔石英的损伤阈值及损伤几率拟合曲线
Fig. 3 Fused silica damage threshold and damage probability fitting curve in vacuum

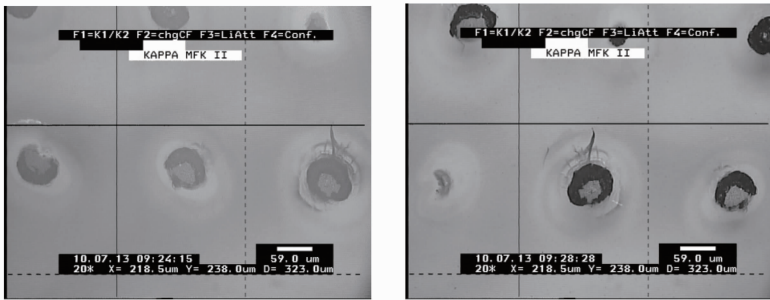


图 4 K9 玻璃的入射/出射面

Fig. 4 Incidence surface/ exit surface of K9 glass

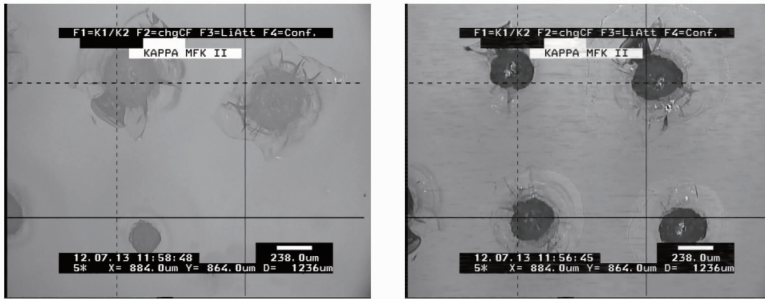


图 5 熔石英的入射/出射面

Fig. 5 Incidence surface/ exit surface of fused silica

把这种现象归结为两种原因：1) 作用于光学样品表面的激光压力 P_L 由动量守恒定律决定，对于垂直入射情况下，样品出射面光强 P_{L2} 和入射面光强 P_{L1} 之比为

$$\frac{P_{L2}}{P_{L1}} = \frac{4n^2}{(n+1)^2}, \quad (1)$$

式中 n 为样品的折射率。因样品的折射率 $n > 1$ ，所以出射面的光强大于入射面的光强。假设玻璃样品的两个面的机械性能一样，玻璃的入射面在发生损伤时只吸收了小部分激光脉冲能量，则其出射面可能发生更严重的损伤。2) 若入射光是会聚光，则输出面更易破坏。

3.1.3 两种测试方法结果比较分析

下面比较了熔石英玻璃在不同的测试方式下的损伤几率。图 6 是 1-on-1 方式测试的结果，图 7 是 s-on-1 方式测试的结果，实验参数同上。可以看到：在相同的激光参数下，s-on-1 方式比 1-on-1 方式更容易引起材料的破坏。这是因为多脉冲激光损伤是一个热积累和损伤叠加过程，在热积累过程中玻璃样品的损伤阈值会下降。积累方程可以表示为

$$J_N = J_1 \times N^{s-1}, \quad (2)$$

式中 J_1 是单脉冲损伤阈值， N 是脉冲个数， s 是与材料特性有关的参数， J_N 是 N 个脉冲的损伤阈值。

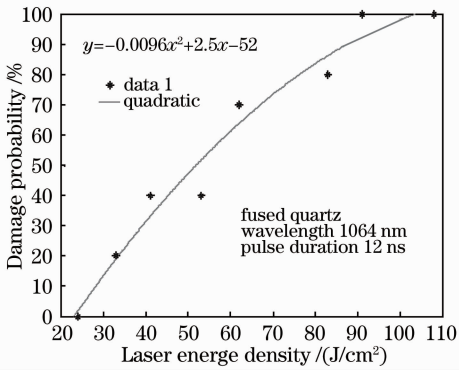


图 6 1-on-1 方式测得熔石英的损伤阈值及损伤几率拟合曲线

Fig. 6 Damage threshold and damage probability fitting curve of fused silica with 1-on-1 test method

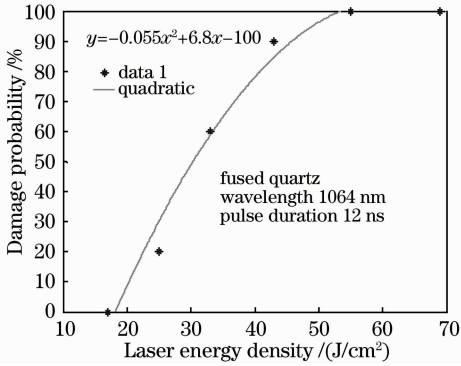


图 7 s-on-1 方式测得熔石英的损伤阈值及损伤几率拟合曲线 (s=10)

Fig. 7 Damage threshold and damage probability fitting curve of fused silica with s-on-1 test method (s=10)

由于测量的阈值是样品尺寸和表面光洁度的函数,为了得到更接近惯性约束聚变(ICF)实验的“零几率损伤阈值”,上述测量方法要求被辐照光学元件的尺寸要尽可能大。理论上说,熔石英材料的禁带宽度(约 8.9 eV)远大于 1064 nm 光子的能量(1.1 eV),发生本征破坏几率很小。激光介质材料的破坏阈值下降主要是光学表面(或亚表面)的缺陷或杂质引起的,而非材料本身的问题。关于表面缺陷诱导激光损伤的机理主要归结为三个方面:1) 缺陷中包含有大量的吸收性杂质导致的热破坏;2) 表面缺陷对入射光场的调制引起的场破坏;3) 表面缺陷使得光学元件的表面机械性能下降,损伤阈值降低。

由于光学元件表面的杂质和缺陷分布是随机的,这也使测得的损伤阈值有随机性。一发光面积为 S 的激光入射在光学元件表面,测得的损伤阈值由 S 范围内损伤阈值最低的杂质决定。光斑尺寸越大,表面缺陷被光束照射的概率越大,出现损伤几

率越大,损伤阈值也可能越低^[11-13]。另外,激光核聚变实验中激光脉宽一般在 1~3 ns 范围,而实验中采用的激光脉宽却是 12 ns。虽然入射激光的脉宽在纳秒范围内,大多数光学元件及材料的激光损伤阈值 E_{th} 均较好符合著名的 $\tau^{1/2}$ 标度律,即损伤阈值大致与 $\tau^{1/2}$ 成正比(对于石英玻璃是 $\tau^{0.35}$)。但实验测得值与标度律推测值之间还是有误差。因此只能通过这些实验,了解一些损伤机制和损伤规律,并不能确定玻璃样品绝对损伤值。

3.2 金属粒子污染引起的光学样品损伤

在高功率激光装置的运行过程中,杂散光照射在金属管壁上^[14-15],溅射出的金属颗粒和金属蒸气沉积在光学元件表面,引起光学元件的污染。污染物吸收激光能量,导致光学元件表面吸热过高而引起光学材料的损伤阈值下降。实验主要针对 ICF 装置中常见的金属(铝、铜和不锈钢),探究在波长 1064 nm 辐照下金属碎粒诱导 K9 玻璃的损伤现象。用能量低于无污染材料破坏阈值的激光脉冲照射不同金属粒子污染的光学样品。并且设定金属粒子位于光学样品基底的激光辐照入射面时,称其为样品的前表面,反之为后表面,分两种表面测试(如图 8 所示)。与实验相关的光学参量为:激光波长(辐照样品) $\lambda = 1064$ nm,激光脉宽 $\tau = 14$ ns,光学样品的基板是 K9 玻璃,实验是在大气中进行的。

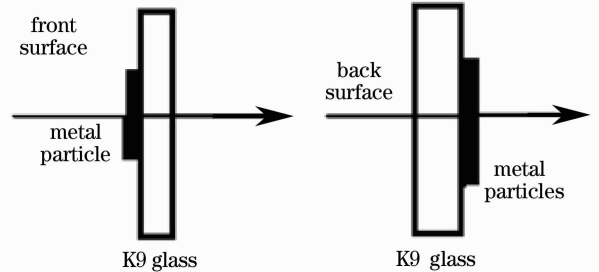


图 8 金属粒子在光学样品的前后表面示意图

Fig. 8 Schematic diagram for metal particles on the front and back surfaces of glass sample

实验结果如下:

1) 用能量密度约 5.6 J/cm² 激光辐照没有污染的 K9 光学样品,采用 1-on-1 测试方式,共辐照 50 个点,每个点辐照 1 次。在显微镜下观测损伤点,结果没有发现损伤。

2) 用同样能量密度的激光辐照有金属粉末污染的 K9 光学样品,样品表面随机撒上 300 目(48 μm) 不锈钢粉末,如图 9(a) 所示,入射面是前表面,共辐照 50 个点,每个点辐照 1 次。然后在显微镜下观测,结果发现输入面有明显损伤点,如图 9(b) 所示,

出射面没有损伤。在相同条件下,当后表面入射时,玻璃的输入表面没有损伤,如图 9(c)所示,出射面却有损伤。

3) 提高激光能量密度至 13 J/cm^2 , 采用 s-on-1 测试方法辐照一块镀铝膜的 K9 玻璃样品, 每个点辐照 5 次, 分别按前表面和后表面入射测试, 然后观

察玻璃损伤情况, 结果如图 10 所示。当输入面为前表面(入射面为镀铝面)时, 输入面[图 10(a)]损伤比出射面[图 10(b)]严重; 当输入面为后表面(出射面为镀铝面)时, 出射面损伤[图 10(d)]比输入面[图 10(c)]严重。并且后表面入射测试破坏面积比前表面入射测试大。



图 9 K9 玻璃观测图(激光能量密度为 5.6 J/cm^2)

Fig. 9 Observation pictures of K9 glass (laser energy density is 5.6 J/cm^2)

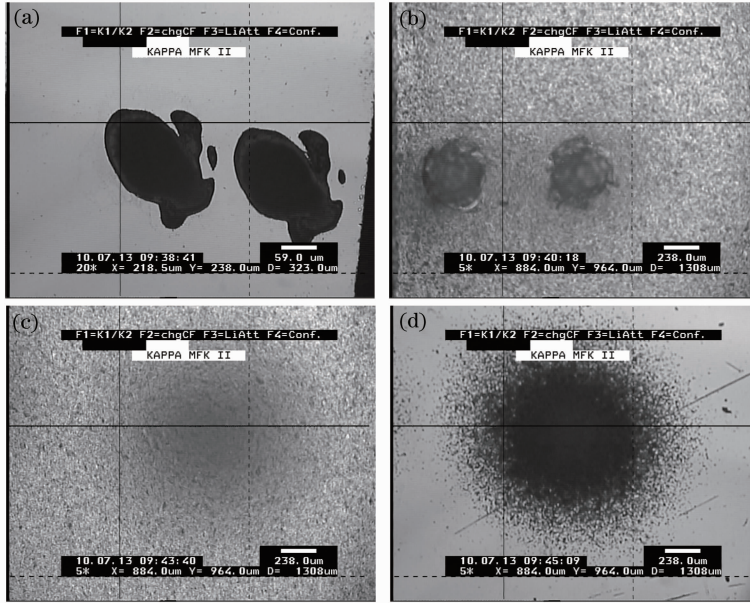


图 10 K9 玻璃观测图(激光能量密度为 13 J/cm^2)

Fig. 10 Observation pictures of K9 glass (laser energy density is 13 J/cm^2)

还观测到被金属粉末污染的 K9 玻璃其损伤阈值不仅与金属粒子成份有关, 还与金属粒子在被辐照玻璃表面的局部密度有关, 密度越大, 破坏越严重。这也说明了杂质的几何尺寸也是损伤阈值的函数。由于实验中采用的激光束截面很小, 无法瞄准玻璃表面单个污染粒子(粒子直径为几十微米), 因此无法测金属粒子污染引起的玻璃损伤阈值。但实验结果显示: 由于金属粒子污染(在显微镜条件下观测到), K9 玻璃损伤阈值至少下降 65%。金属粉末之所以会使玻璃损伤阈值降低, 原因是金属具有强烈的热吸收特性。附着在玻璃表面的金属粉末被激

光加热后, 会将热能传递给玻璃。采用热吸收模型作一些简化计算, 可知金属粉末在吸收激光脉冲后温度可达 3000 K 以上, 这一温度足以引起与其接触的的玻璃表面发生碎裂。

分析以上实验结果, 得出以下结论: 同一块玻璃在激光辐照下, 有金属粒子污染的面损伤阈值很低, 容易出现损伤现象, 并且相比无污染面损伤更严重, 这是由于金属粒子会吸收大部分入射能量。随着激光能量密度的提高, 前表面污染时会导致后表面发生损伤, 原因是前表面污染物对激光束有调制作用。如果是后表面污染并且激光很强, 会在出射面产生

等离子体。等离子体一方面对光有强烈吸收,并沿着光传播的反方向传播,对表面产生压力,有烧蚀作用。另一方面等离子体对入射光有散射作用,可能对输入面和玻璃体内引起破坏。

3.3 有机污染引起的光学样品损伤

3.3.1 未加热的有机物污染

有机污染是真空与空间环境中光学元件激光损伤的重要原因。有机污染的主要来源是真空和空间系统中材料的放气,法国激光组合线(LIL)激光系统报道了相关测试结果,指出有机污染物主要是芳香类的化合物及硅树脂^[16-23]。这些污染物通过挥发过程沾污在光学元件表面,当激光通过光学元件表面,诱发光学元件损伤。

下面分别用新鲜的(未加热过的)703 硅胶和真空润滑油随机涂在 K9 玻璃的样品的某一面,形成一个膜层,然后用不同的脉冲能量辐照光学表面,采用 *s-on-1* 方式辐照,每一个点为 50 次,脉冲能量密度为 $E=15 \text{ J/cm}^2$,结果没有发现明显损伤点。如图 11 所示。

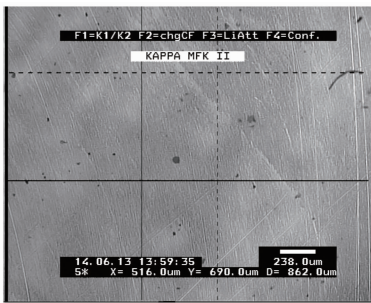


图 11 被激光辐照后的 703 硅胶污染的光学表面
Fig. 11 703 silica contaminations on the incidence surface of optical sample after laser irradiation

同样用 Formblin 润滑脂作污染源给出的结果是相似的。这一结果与国内外同行报道的结果一致^[20,23-25],即有机污染损伤机理不同于金属粒子污染,因为有机污染物对光的吸收量太小,不能马上提高温度至破坏阈值。即使用 *s-on-1* 方式辐照,辐照次数小于 1000 次,在硅胶没有被分解成其他有活性的化学基团之前,也很难观测到损伤现象。通常硅酮类有机化合物只有在加热的条件下演变成二氧化硅或其他缺氧基团粒子,才能产生损伤现象^[19]。

3.3.2 加热后的有机物污染

有关文献报道说^[19]:只有在加热条件下,原来硅酮变为二氧化硅时才会发生。对一面涂 703 硅胶的 K9 玻璃进行加热至 350 K,采用 *s-on-1* 方式进行激光辐照,观察损伤状况。实验条件为:激光能量密

度 $E=14 \text{ J/cm}^2$, $s=50$,其他条件同上述实验一样。实验结果是光学材料表面出现损伤点(实际辐照 2 个点),如图 12 所示。

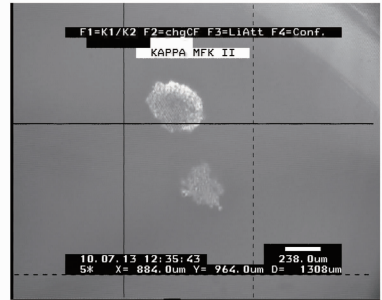


图 12 加热后 703 硅胶引起的激光损伤
Fig. 12 Damage caused by heated 703 silica

不考虑光学加工过程中产生光学元件表面瑕疵这一因素时,污染是导致光学元件损伤阈值下降的主要因素^[15,26-29]。关于有机污染损伤机理说法有很多,每种说法都局限于给定的实验条件。其中一种说法是^[16]:真空系统中光学器件发生快速激光损伤的原因之一是光化学机制。这种光化学损伤机制可能包括两个方面:1) 在激光作用下多光子或双光子导致污染物发生化学反应,从而蚀刻光学表面产生损伤;2) 在化学反应过程中又产生了许多有活性的中间基团和离子,这些中间基团继续参与化学反应从而导致损伤。还有的研究人员认为污染与缺陷的相互耦合作用导致光学元件的破坏。当光学样品表面吸附有机污染时,缺陷与吸附的有机污染可能相互耦合,缺陷处较高的电场与温度场可能导致吸附的有机污染发生光解或高温分解,从而产生了一些高吸收性的基团,最终污染与缺陷的相互耦合作用导致光学薄膜的破坏。这个实验结果可能是由于部分硅胶经加热反应,其分子结构发生分解,产生许多有活性的中间基团和离子,这些基团形成一个加热中心,最终导致激光损伤。

4 结 论

讨论了波长为 1064 nm、脉宽为 12 ns 的脉冲激光诱发光学玻璃损伤的实验结果。金属粒子污染比油脂污染的危害性更大,肉眼能分辨的金属碎片可以导致光学元件灾难性破坏。因此严格执行实验室洁净度措施,合理排布光路,防止杂散光或鬼像辐照到金属元件上,能够从源头降低金属污染物的产生。虽然油脂污染和其他有机污染对玻璃的直接破坏性比金属粒子污染小,但油脂蒸气会对光学元件表面光学膜层空隙进行渗透,导致膜层的光学性能下降。

对于在真空装置中的光学元件,其附近的其他元件材料的物理挥发性和环境的洁净度应有严格标准。光学元件表面的固有缺陷或被污染是导致光学元件抗激光损伤能力下降的直接原因,为了提高 ICF 装置的输出通量和运行的稳定性、可靠性,必须提高光学元件的加工质量和保证装置运行环境的洁净标准。

参 考 文 献

- 1 S Z Xu, X T Zu, X D Jiang, *et al.*. The damage mechanisms of fused silica irradiated by 355 nm laser in vacuum[J]. Nucl Instrum Meth B, 2008, 266(12): 2936–2940.
- 2 P Allenspacher, W Riede, H Schroder, *et al.*. Laser-induced hydrocarbon contamination in vacuum[C]. SPIE, 2005, 5991: 59910H.
- 3 S Becker, A Pereira, P Bouchut, *et al.*. Laser-induced contamination of silica coatings in vacuum[C]. SPIE, 2007, 6403: 64030J.
- 4 G Guéhenneux, Ph Bouchut, M Veillerot, *et al.*. Impact of outgassing organic contamination on laser-induced damage threshold of optics; Effect of Laser conditioning[C]. SPIE, 2005, 5991: 59910F.
- 5 M A Norton, Eugene E Donohue, W G Hollingsworth, *et al.*. Growth of laser initiated damage in fused silica at 527 nm[C]. SPIE, 2004, 5273: 236–243.
- 6 M A Norton, Eugene E Donohue, W G Hollingsworth, *et al.*. Growth of laser initiated damage in fused silica at 1053 nm[C]. SPIE, 2005, 5647: 197–205.
- 7 Guo Shaofeng, Lu Qisheng, Deng Shaoyong, *et al.*. Experimental study on ns pulsed laser induced damage in K9 glass[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(7): 817–820.
郭少锋,陆启生,邓少永,等. ns 激光对 K9 玻璃的破坏实验[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(7): 817–820.
- 8 Gan Rongbing, Lin Libin, Lu Yong, *et al.*. Laser induced bulk damage of UBK7 glass owing to its rear-surface defects[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(5): 603–606.
甘荣兵,林彬彬,卢勇,等. UBK7 玻璃后表面缺陷诱导体内激光损伤[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(5): 603–606.
- 9 Hu Jianping, Zhang Wenhui, Duan Lihua, *et al.*. Laser-induced damage of transmission optics at 1064 nm [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2006, 4(6): 49–51.
胡建平,张问辉,段利华,等. 透射光学元件的 1064 nm 激光损伤特性[J]. 光学与光电技术, 2006, 4(6): 49–51.
- 10 Huang Jin, Lü Haibing, Zhao Songnan, *et al.*. Damage threshold improvement of fused silica chip by CO₂ laser pretreatment[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(5): 723–727.
黄进,吕海兵,赵松楠,等. 利用 CO₂ 激光预处理提高熔石英基片的损伤阈值[J]. 中国激光, 2007, 34(5): 723–727.
- 11 F Y Genin. Catastrophic failure of contaminated fused silica optics at 355 nm[C]. SPIE, 1997, 3047: 1–9.
- 12 J Honig, M A Norton, W G Hollingsworth, *et al.*. Experimental study of 351-nm and 527-nm laser-initiated surface damage on fused silica surfaces due to typical contaminants [C]. SPIE, 2005, 5647: 128–135.
- 13 M D Feit, A M Rubenchik, M R Kozlowski, *et al.*. Extrapolation of damage test data to predict performance of large-area NIF optics at 355 nm[C]. SPIE, 1998, 3578: 77–86.
- 14 Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin, *et al.*. Influence of metal particle on damage threshold of fused silica at 3 ω [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0502004.
王立斌,马伟新,季来林,等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502004.
- 15 R W Hopper, D R Uhlmann. Mechanism of inclusion damage in laser glass[J]. J Appl Phys, 1970, 41(10): 4023–4037.
- 16 C Scurlock. A phenomenological study of the effect of trace contaminants on lifetime reduction and laser-induced damage for optics[C]. SPIE, 2005, 5647: 82–93.
- 17 P Tighe, F Pettazzi, J Alves, *et al.*. Growth mechanisms for laser induced contamination on space optics in vacuum[C]. SPIE, 2008, 7132: 71321L.
- 18 G Guéhenneux, M Veillerot, I Tovenà. Evaluation of the airborne molecular contamination inside the LIL [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, 557(2): 676–683.
- 19 F E Hovis, B Shepherd, C Radcliffe, *et al.*. Mechanisms of contamination induced optical damage in lasers[C]. SPIE, 1995, 2428: 72–83.
- 20 Pereira, J G Coutard, S Becker, *et al.*. Impact of organic contamination on 1064 nm laser induced damage threshold of dielectric mirrors[C]. SPIE, 2007, 6403: 64030I-1.
- 21 S G Demos, M R Kozlowski, M C Staggs, *et al.*. Mechanisms to explain damage growth in optical materials[C]. SPIE, 2001, 4347: 277–284.
- 22 M A Norton, L W Hrubesh, Z Wu, *et al.*. Growth of laser initiated damage in fused silica at 351 nm[C]. SPIE, 2001, 4347: 468.
- 23 Ling Xiulan, Zhao Yuanan, Li Dawei, *et al.*. Laser-induced damage of optical films in vacuum environments[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2322–2326.
凌秀兰,赵元安,李大伟,等. 真空环境下光学薄膜的激光损伤[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2322–2326.
- 24 K Bien-Aime, C Belin, L Gallais, *et al.*. Impact of storage induced outgassing organic contamination on laser induced damage of silica optics at 351 nm [J]. Opt Express, 2009, 17(21): 18703–18713.
- 25 Li Dawei, Zhao Yuanan, 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,贺洪波,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.
- 26 H Bercegol, P Grua, D Hebert, *et al.*. Progress in the understanding of fracture related laser damage of fused silica[C]. SPIE, 2007, 6720: 672003.
- 27 K Bien-Aimé, J Néauport, I Tovenà-Pecault, *et al.*. Laser induced damage of fused silica polished optics due to a droplet forming organic contaminant[J]. Appl Opt, 2009, 48(12): 2228–2235.
- 28 B Bertussi, P Cormont, S Palmier, *et al.*. Initiation of laser-induced damage sites in fused silica optical components[J]. Opt Express, 2009, 17(14): 11469–11479.
- 29 J Neauport, L Lampaignere, H Bercegol, *et al.*. Polishing-induced contamination of fused silica optics and laser induced damage density at 351 nm [J]. Opt Express, 2005, 13(25): 10163–10171.