

不锈钢膜对激光诱导熔石英表面损伤的影响

冯 峰^{1,2}, 肖 峻¹, 贺少勃², 袁晓东², 蒋 勇^{1,2}, 罗成思^{1,2}

(1. 电子科技大学光电信息学院, 四川 成都 610054; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要:在高功率激光系统中,对于光学元件的激光损伤阈值和损伤增长的研究意义重大。采用磁控溅射方法在熔石英基片上镀12 nm厚的不锈钢膜,使用椭偏仪和紫外-可见光分光光度计测量其厚度和透过率,分别使用S-on-1和R-on-1方法测量样品损伤阈值,比较后证明S-on-1测量方法较为科学。使用S-on-1方法进行激光损伤增长实验,发现损伤点横向尺寸和纵向深度随辐照次数均以e指数形式变化,且相比洁净熔石英基片,样品损伤点横向尺寸损伤增长因子高出41%,样品损伤点纵向深度损伤增长因子高出39%。在激光辐照一定发次后,损伤点纵向深度继续增长,损伤点横向尺寸增长速度不断减缓,最终停止增长,此时样品损伤点横向尺寸与纵向深度比逐渐下降。

关键词:激光诱导损伤;损伤形貌;损伤阈值;损伤增长;不锈钢膜污染物

中图分类号:TN24 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.04.010

Stainless steel film's contamination effects on laser-induced damage to fused silica surface

FENG Feng^{1,2}, XIAO Jun¹, HE Shao-bo², YUAN Xiao-dong², JIANG Yong^{1,2}, LUO Cheng-si^{1,2}

(1. University of Electronic Science and Technology of China, School of Opto-electronic Information, Chengdu 610054, China;

2. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Laser-induced optical damage often determines the service lifetime of an optic components in a high power laser system. A set of fused silica windows were artificially contaminated by sputtering the thin film material (Stainless steel) onto the surface to simulate target chamber contamination of optical components. The samples were tested by R/1 and S/1 at 355 nm with a SAGA-S laser to measure the damage threshold. The value of the damage threshold tested by S/1 is relatively accurate by comparing the S/1 and R/1 tests. The growth in lateral diameter and depth has an exponential relationship with the shot number of times. And experimental results show that the exponential growth coefficient of lateral diameter of sample is larger by 41% than that of the clear fused silica. The exponential growth coefficient of depth is larger by 39% than that of the clear fused silica. The speed of the lateral diameter damage growth slowed down and stopped after 20 shots.

Key words: laser-induced damage; damage morphology; damage threshold; damage growth; film contamination of stainless steel

1 引 言

在大型高功率激光装置运行过程中,由杂散光照射金属管壁所溅射出的金属粒子或蒸汽往往会在光学元件表面附着,形成颗粒状和膜状污染物,这些污染物严重降低了光学元件的损伤阈值和透射率,

从而降低了其负载能力,缩短了使用寿命^[1]。由于

基金项目:国家高技术支撑项目(No. 405085)资助。

作者简介:冯 峰(1985-),男,硕士研究生,从事激光放大器内污染物致光学元件表面损伤的研究。E-mail: bluemaple_ff@163.com

收稿日期:2011-08-15

熔石英材料在激光装置中的广泛应用,熔石英光学元件的激光诱导损伤问题被深入研究。美国劳伦斯里弗莫尔实验室(LLNL)F. Y. Genin 等人通过激光诱导表面污染物致损伤实验得到污染物颗粒横向尺寸与光学元件损伤阈值关系^[2],苗心向等人研究了激光诱导熔石英表面具有 Cu 膜和 Al 膜污染物时的损伤阈值和损伤增长问题^[3-4],但是对于激光装置中光学元件表面存在的不锈钢膜污染物致损伤以及损伤增长过程中损伤点纵向深度增长的问题还未有报道,同时对不同测量损伤阈值方法在激光诱导表面膜状污染物致损伤情况下的适用性缺乏研究。本文将利用磁控溅射的方法在熔石英表面镀一层不锈钢膜来模拟不锈钢膜污染物,通过 R-on-1 和 S-on-1 两种方法测量熔石英损伤阈值并进行比较,还将对损伤增长时损伤坑横向尺寸和深度随辐照次数的变化进行分析。

2 实验过程

实验采用的熔石英基片为康宁公司生产,基片直径为 30 mm,厚度为 5 mm,纯净基片在 355 nm 波长下的损伤阈值为 11 J/cm²。在使用酒精擦拭熔石英基片表面后,利用磁控溅射的方法在基片上镀一层 304 不锈钢薄膜。

膜层厚度通过 SE850 型椭偏仪测定,测量光源波长范围为 300 ~ 800 nm,测得膜层厚度为 12 nm;使用 TU-1810 型紫外-可见分光光度计测量不锈钢膜透过率,测量范围为 300 ~ 1100 nm,测量结果如图 1 所示,其在 355 nm 波长下的透过率为 17.6%。

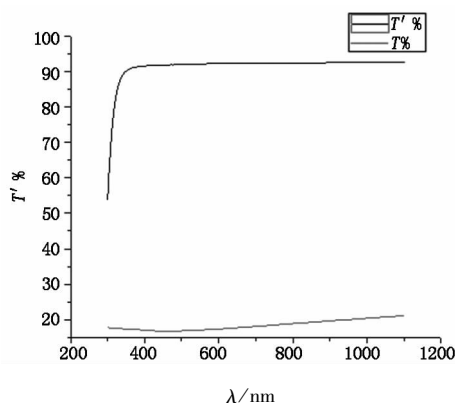


图 1 样品(曲线“T%”)和纯净熔石英基片(曲线“T' %”)透射率随波长变化关系

Fig. 1 transmission probability vs wavelength for fused silica with contamination (line “T%”) and without contamination (line “T' %”)

实验光路如图 2 所示,He-Ne 激光为准直光,

实验测量所用激光器为 SAGA-S 单纵模调 Q 激光器,表 1 给出了相应的激光器参数,输出激光能量大小可由能量卡计获得,SAGA-S 激光经过透镜聚焦后辐照样品,不锈钢污染膜处于熔石英样品入射表面,两个 CCD 摄像装置同时监测样品的入射和出射表面损伤情况,激光聚焦于样品前方,通过调试样品与透镜间距离可控制光斑大小,实验时测得样品前表面光斑大小为 0.23 mm²。

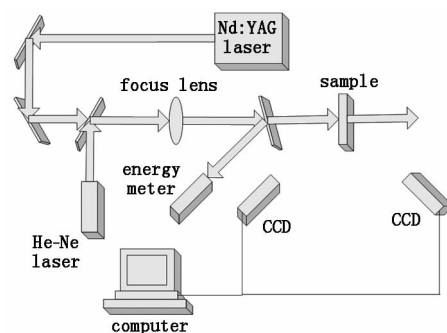


图 2 熔石英激光损伤测试装置

Fig. 2 laser induced damage of fused silica testing set-up

表 1 SAGA-S 激光器参数

Tab. 1 parameters of SAGA-S laser

λ/nm	Pulse-Width/ns	Frequency/Hz	Max of pulse energy/J
355	6.4	1	1

样品损伤阈值测量方法:采用 R-on-1 和 S-on-1 两种方法来测量被污染基片的损伤阈值,R-on-1 测量损伤阈值方法为在一个点以不同的能量辐照,初始能量应较低,随辐照次数激光能量按固定值增加,直至损伤出现,测量后计算得出单点损伤阈值,然后通过相同方法辐照 10 个点求出平均值以得到基片损伤阈值。S-on-1 测量损伤阈值方法为以相同激光能量在 10 个点分别辐照 10 次,等到在该激光能量下的损伤几率,然后改变其辐照能量,重复以上过程,得出不同能量下的损伤几率,损伤阈值应为 50% 损伤几率下的激光能量密度。

样品损伤增长的测量方法:使用平均能量密度为 11 J/cm² 的激光来制造初始损伤点,损伤点间隔为 3 mm(如图 3 所示),然后采用 6 J/cm² 的激光利用 S-on-1 方法来进行损伤增长实验,并观察洁净熔石英和附着不锈钢膜污染物的熔石英表面损伤的增长情况。激光辐照次数视损伤增长情况而定,当损伤点横向尺寸不再增长时停止辐照。损伤点横向尺寸可由 CCD 在线观察,损伤点纵向深度则由显微镜离线观察得出。

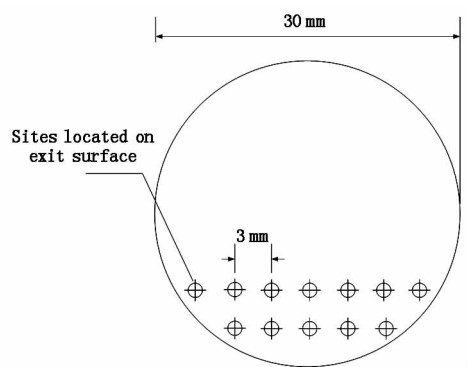


图3 基片示意图

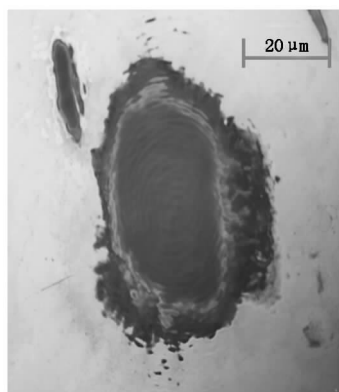
Fig. 3 sample geometry

3 实验结果和讨论

3.1 激光损伤的表面形貌和阈值

3.1.1 激光损伤表面形貌

在激光辐照样品表面时,基底首先损伤的部位为出射面,由出射面与入射面光压比为: $P_2:P_1 = 4n^2:(n+1)^2$ (熔石英折射率 $n = 1.46$) 可知,输出面所受力为输入面的 1.4 倍,这与出射面先发生损伤结果相一致。随着激光能量的不断加强,入射面也出现相应损伤点,损伤形貌如图 4 所示。



(a) on the input surface



(b) on the exit surface

图4 不锈钢膜污染物致熔石英基底入射和出射表面损伤形貌

Fig. 4 damage morphologies of the input and exit surface for the fused silica with film contamination of stainless steel

从损伤形貌可以看出在出射面的损伤点形成主要原因应为光压造成的表面破坏,即基片样品表面在强激光照射下出现融化、蒸发、升华、原子间价键断裂等一系列过程。而前表面损伤点则表现出了比较明显的烧蚀现象,这种现象产生原因应为不锈钢膜污染物在吸收了大量的激光能量后转化为热能,并在一定区域内形成明显的热梯度,从而导致基片表面损坏,样品在 355 nm 波长下只有 17.6% 的透过率也证实了膜层对激光能量的强烈吸收,在激光多次辐照后损伤点附近同时出现了新的损伤点,其原因应为激光辐照前表面污染膜产生的二次污染物所引起^[4]。

3.1.2 不同测量损伤阈值方法讨论

由于首先出现损伤点的位置均在样品出射表面,所以样品损伤阈值定为 50% 几率样品出射面出现损伤点时的激光能量密度。由 R-on-1 方法得到样品损伤阈值为 9.8 J/cm^2 ,由 S-on-1 得到的样品损伤几率随激光能量变化关系如图 5 所示,由图 5 可以看出在 50% 损伤几率下激光能量密度为 8.6 J/cm^2 ,此实验结果与 J. J. Adams 在 DKDP 晶体上进行的损伤实验^[5] 结果曲线相似,从实验结果可知由 R-on-1 和 S-on-1 方法测量得到样品的损伤阈值结果均低于洁净基片的损伤阈值 11 J/cm^2 ,由此可看出不锈钢膜状污染物对基片损伤阈值产生了不利影响,其中 R-on-1 方法所得损伤阈值比洁净基片损伤阈值下降约 11%, S-on-1 所得样品损伤阈值下降约 22%。S-on-1 方法测得损伤阈值结果下降幅度为 R-on-1 方法的 2 倍,其原因应为在 R-on-1 方法测量过程中,由于激光初始能量较小,其辐照在样品表面时对不锈钢污染物产生了清洗效果^[6-7],使样品表面状况比较接近纯净基片表面状况,从而提高了样品的损伤阈值;而 S-on-1 方法由于在一个点上辐照激光

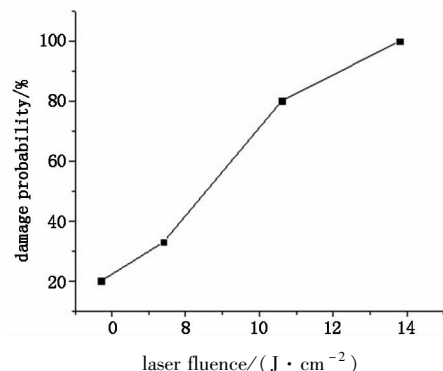


图5 熔石英样品损伤几率随激光通量变化关系

Fig. 5 damage probability of fused silica vs laser fluence with contamination

通量不变,首发便可能引起表面不锈钢膜状污染物的烧蚀现象,即不锈钢膜状污染物对基片损伤阈值的影响仍然存在,所以 S-on-1 方法测得的损伤阈值较小。

R-on-1 方法测量样品损伤阈值时所产生的激光清洗现象应是产生误差主要原因,且在多脉冲激光辐照实验过程中,每次辐照过后提高固定的激光能量难以实现,由于初始能量较小而无法造成微观缺陷的扩大^[1],这些因素也对 R-on-1 方法测量结果的准确性产生了一定影响,所以使用 S-on-1 方法测量所得样品损伤阈值应比 R-on-1 方法更为科学准确。

3.2 样品的损伤增长

3.2.1 样品损伤点横向尺寸增长

通过 S-on-1 方法对样品和洁净熔石英基片进行激光诱导损伤增长实验后我们发现,样品输出面损伤点横向尺寸大小随辐照次数关系与洁净基片相似^[8]:

$$d = d_0 e^{\alpha N}$$

其中, d 为损伤点横向尺寸; d_0 为初始损伤点横向尺寸; N 为激光辐照次数; α 为损伤增长因子。通过 Origin 软件拟合出损伤点横向尺寸随辐照次数的增长曲线,如图 6 所示,其中样品损伤增长因子 α 为 0.31,而洁净熔石英基片的损伤增长因子为 0.22,样品的损伤增长因子比洁净熔石英基片的损伤增长因子高出约 41%。

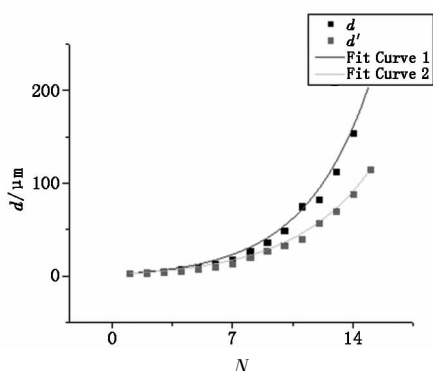


图 6 样品(曲线 d)和洁净熔石英基片(曲线 d')的损伤点横向尺寸随辐照次数变化关系
Fig. 6 change in lateral diameter per shot for fused silica with contamination(line " d ") and without contamination(line " d' ")

3.2.2 样品损伤点深度增长

通过 S-on-1 方法对附着不锈钢膜污染物样品和洁净熔石英基片进行激光诱导损伤增长实验,实验发现损伤点纵向深度随激光辐照次数也为 e 指数

关系增长:

$$h = h_0 e^{\beta N}$$

其中, h 为损伤点纵向深度; h_0 为初始损伤深度; β 为纵向深度的损伤增长因子; N 为激光辐照次数。使用 Origin 软件拟合增长曲线后(如图 7 所示),可以得到样品损伤点纵向深度的损伤增长因子 β 为 0.25,洁净熔石英基片的损伤增长因子为 0.18,样品损伤点纵向深度损伤增长因子比洁净熔石英基片高出约 39%。

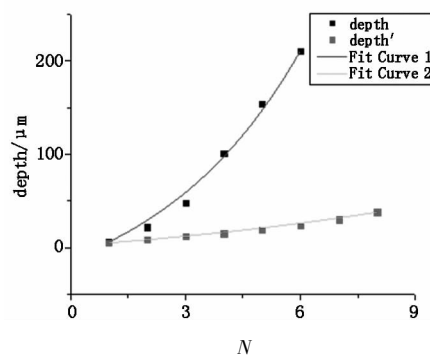


图 7 样品(曲线 $depth$)和洁净熔石英基片(曲线 $depth'$)的损伤点纵向深度随辐照次数变化关系
Fig. 7 change in crater depth per shot for fused silica with contamination(line " $depth$ ") and without contamination(line " $depth'$ ")

3.2.3 讨论

通过损伤增长实验可以发现:在激光辐照损伤点最初的几十发中,样品和纯净基片的损伤点的横向尺寸和纵向深度都随激光辐照次数以 e 指数形式发生变化,其中样品损伤点横向尺寸的损伤增长因子比洁净熔石英基片高出约 41%,纵向深度的损伤增长因子比洁净熔石英基片高出约 39%,证明不锈钢膜状污染物对损伤点的横向尺寸和纵向深度的增长均产生了不利影响。

在辐照数十发后,实验发现继续辐照样品和洁净基片时,损伤点横向尺寸增长速度明显减缓,最终停止增长,横向尺寸增长速度减缓的原因应为:①损伤坑横向尺寸超过了光斑直径,在激光不可直接作用区域难以造成表面损伤;②由于激光能量固定,当损伤坑尺寸增大到一定量时,损伤坑内的散射光能量已经难以造成损伤的进一步扩大。

在整个损伤增长实验过程中,样品损伤点的横向尺寸与纵向深度比(如图 8 所示)呈下降趋势,在径深为 1:1 时,横向尺寸停止增长,但随发次增加纵向深度增长并未停止,径深比在前 20 发下降幅度较为缓慢,在 20 发后下降趋势突然加快,原因应为横向尺寸增长幅度开始减缓,而纵向深度的增长趋势

并没有变化。

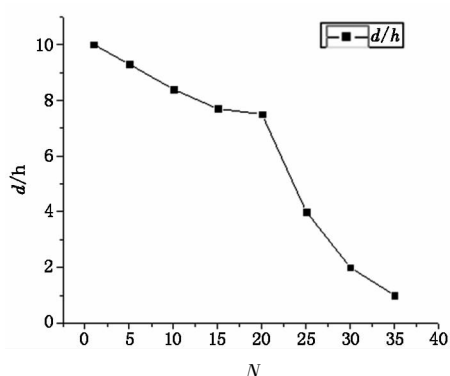


图8 样品损伤点径深比随辐照次数的变化关系

Fig. 8 change in d/h ratios per shot for fused silica with contamination

通过对样品损伤增长的分析可知,不锈钢污染物对样品损伤点的损伤增长影响严重,这一影响同时意味着在激光辐照下,附着有不锈钢污染物的熔石英元件的负载能力和寿命都会同时降低,所以在大型高功率激光装置中,对污染物激光诱导损伤熔石英损伤的研究有着重大意义,同时也为光学元件的洁净工作提供了参考依据。

4 总 结

本文分别采用 R-on-1 和 S-on-1 两种方法测量了表面附着有不锈钢膜污染物熔石英样品的损伤阈值,通过比较分析得出 S-on-1 方法测量应较为准确。通过实验可以得出:在实际打靶前,若首先低能量发射数次,应可有效清除光学元件上的不锈钢膜状污染物。利用 S-on-1 方法进行损伤增长实验,实验结果表明:制备样品和洁净熔石英基片损伤点的横向尺寸和纵向深度均随辐照次数呈 e 指数形式变化,样品损伤点损伤增长速率要明显快于洁净熔石英基片,其中样品横向尺寸损伤增长因子比洁净基片高出 41%,样品纵向深度损伤增长因子比洁净熔石英基片高出 39%,在激光辐照一定发次后,样品和洁净基片损伤点横向尺寸增长速度均开始减缓,最终停止增长。

参考文献:

[1] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser

irradiation effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 280 - 286. (in Chinese)

孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 280 - 286.

[2] Genin F Y, Kozlowski M R, Brusasco R, et al. Catastrophic failure of contaminated fused silica optics at 355 nm [C]. Proc of SPIE, 1997, 3047: 978 - 986.

[3] Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Wang Chengcheng, et al. Laser induced damage infused silica contaminated by Al film [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1653 - 1656. (in Chinese)

苗心向, 袁晓东, 王成程, 等. 表面 Al 膜污染物诱导熔石英表面损伤特性 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1653 - 1656.

[4] Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Wang Haijun, et al. Experiment of laser induced damage threshold for fused silica initiated at thin film contamination of Cu on surface [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(9): 1483 - 1486. (in Chinese)

苗心向, 袁晓东, 王海军, 等. 熔石英表面铜膜污染物诱导损伤实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(9): 1483 - 1486.

[5] Adams J J, Jarboe J A, Feit M D, et al. Comparison between S/1 and R/1 tests and damage density vs. fluence ($\rho(\varphi)$) results for unconditioned and sub-nanosecond laser-conditioned KD2P04 crystals [C]. Proc of SPIE, 2008, (6720): 1 - 12.

[6] Wang Hongrui. Principle and applied research on laser cleaning [J]. Cleaning World, 2006, 22(9): 20 - 23. (in Chinese)

王宏睿. 激光清洗原理与应用研究 [J]. 清洗世界, 2006, 22(9): 20 - 23.

[7] Tian Bin, Zou Wanfang, Liu Shujing, et al. Introduction of rust removed by dry laser cleaning [J]. Cleaning World, 2006, 22(8): 33 - 38. (in Chinese)

田彬, 邹万芳, 刘淑静, 等. 激光干式除锈 [J]. 清洗世界, 2006, 22(8): 33 - 38.

[8] Norton M A, Carr A V, Carr C W, et al. Laser damage growth in fused silica with simultaneous 351 nm and 1053 nm irradiation [C]. Proc of SPIE, 2008, (7132): 1 - 6.