

文章编号:1001-5078(2012)10-1098-05

· 综述与评论 ·

污染物致光学元件损伤特性研究进展

冯 峰^{1,2}, 贺少勃¹, 袁晓东¹, 肖 峻²

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

摘 要:总结了致损伤污染物的分类和污染物致光学元件表面损伤的原理, 介绍了污染物诱导光学元件表面损伤的物理过程, 阐述了近几年污染物致损伤研究所取得的进展, 并提出了污染物致损伤研究过程中仍然存在的相关问题及发展方向。

关键词:表面损伤; 损伤增长; 损伤阈值; 损伤增长阈值; 污染物

中图分类号: TN24 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2012.10.002

Study on optic components' surface damage due to contamination

FENG Feng^{1,2}, HE Shao-bo¹, YUAN Xiao-dong¹, XIAO Jun²

(1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-988-5, Mianyang 621900, China;

2. University of Electronic Science and Technology of China, School of Opto-electronic Information, Chengdu 610054, China)

Abstract: The mechanism of optic components' surface damage by typical contamination and classification of contamination are analyzed and summarized. The physical process of optic components surface is introduced. The current problems and further trend of protecting components' surface damage by contamination are discussed.

Key words: surface damage; damage growth; damage threshold; damage growth threshold; contamination

1 引 言

在大型高功率固体激光装置运行过程中, 光学元件会出现不同程度的损伤, 这一问题自 1973 年开始便引起了科学家的重视^[1-7]。在激光入射通量较小时(约为 1 J/cm^2), 损伤并不明显, 但是当通量提高到 $6 \sim 7 \text{ J/cm}^2$ 时, 损伤影响将表现的十分严重, 不同形状的损伤点不仅会使激光透过率下降, 并且会严重影响激光传输质量, 这些因素共同制约了装置的负载能力和高通量稳定运行能力, 成为一个必须面对的问题。造成光学元件损伤的机理有很多^[8]: 包括光压造成的表面破坏; 强光非线性效应自聚焦引起的破坏; 受激布离渊散射激发超生波引起破坏; 材料体内杂质、结构缺陷以及材料表面由于抛光引起的凹坑、划痕、污染物造成光学元件的热破坏等。本文将主要对其中污染物诱导光学元件损伤机理以及研究进展进行讨论。

2 污染物致损伤的原理

2.1 污染物的分类

在高功率激光装置中, 定义能够降低其中光学元件损伤阈值和透过率的物质为高功率激光放大器中的污染物。由污染物在光学元件表面上所呈现出的形貌, 一般可将污染物分为: 颗粒状污染物和膜状污染物。污染物的主要成分为金属(Cr, Al, Cu 等)以及烷烃、苯类等有机物, 对光学元件表面清洗后遗留残余以及由于强杂散光照射金属腔壁而溅射出金属粒子^[9-10]应是光学元件表面污染物存在的主要原因。

美国科学家在 Beamlet 激光器运行过程中发

基金项目: 国家高技术支持项目(No. 405085)资助。

作者简介: 冯 峰(1985 -), 男, 硕士研究生, 从事高功率激光装置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: 2012-02-17

现,每运行一发后,激光腔内都会有大量的气溶胶出现,气溶胶是指悬浮在大气中的多种固体微粒和液体微小颗粒,这些气溶胶微粒附着在或靠近光学元件表面,在激光或氙灯作用下,可以看作是很小的喷发火球,由于激光介质低的热冲击参数和高的热梯度而造成光学元件表面的损伤。气溶胶产生的原因可能为短脉冲激光照射时冲击引起的释放、粒子熔化或低分解温度材料的热解作用等。

2.2 污染物致损伤的原理

2.2.1 颗粒状污染诱导损伤机理

当高功率激光装置运行时,其内部光学元件将接受氙灯或激光辐照,例如在美国国家点火装置(NIF)的放大器(如图1所示)中,其辐照在光学元件表面的氙灯通量约为 10 J/cm^2 ,最大激光脉冲通量约为 18 J/cm^2 ,激光波长为 1053 nm 。而附着在光学元件表面的污染物粒子由于通常有较大的吸收系数,所以在强光辐照下污染粒子将会大量吸收光能量并转换为热能,这一现象促使污染粒子在短时间内快速升温,形成高温金属熔融物或等离子体,高温等离子体以紫外光和X软射线的方式向外辐射能量。紫外光和X软射线被熔石英样品吸收后形成色心,开始大量吸收后续的激光脉冲能量并沉积在熔石英表面,这一作用促使光学元件表面局部区域形成热梯度,最终产生光学元件表面不均的应力场,当表面应力超过元件表面的抗张强度时,便会引起元件表面的破坏^[11]。

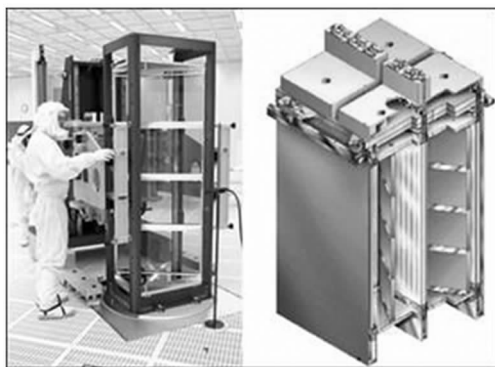


图1 NIF放大器示意图

Fig.1 amplifiers in NIF

2.2.2 膜状污染诱导损伤机理

当强光辐照附着膜状污染物的光学元件时,污染膜层将会吸收大量入射光能量,在膜层形成大量热沉通,又由于传导和扩散的作用在膜层与基底交界处形成放射状的热冲量,热冲量作用于交界处时,分别以热应力和反射弹性波的形式对膜层和基底造

成冲击(如图2所示),从而造成了光学元件表面的烧蚀或畸变现象,如图3(a)所示。

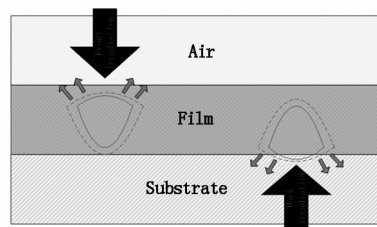


图2 激光诱导表面附着膜状污染物光学元件损伤示意图

Fig.2 Illustration showing laser-induced surface damage with film contamination

美国劳伦斯里弗莫尔实验室(LLNL)F. Y. Genin等人通过将Cu,Au等材料溅射到熔石英基片表面的方法来模拟膜状污染物,在 355 nm 激光照射下,实验结果表明基片损伤阈值均有所下降,并通过将光吸收模型与热扩散模型相结合的方法得出了初步的膜状污染物致损伤的理论模型^[12],其中热扩散长度为:

$$l = \sqrt{\tau\chi}$$

其中, τ 为脉冲宽度; χ 为热扩散系数。基底表面温度(单位K)可表示为:

$$T = AF / (c\rho \sqrt{\tau\chi})$$

其中, A 为污染膜吸收率; F 为激光脉冲能量; c 为基底材料比热容; ρ 为基底材料密度。在污染物膜厚为纳米量级范围时,理论模型所得结果与实验结果基本一致。

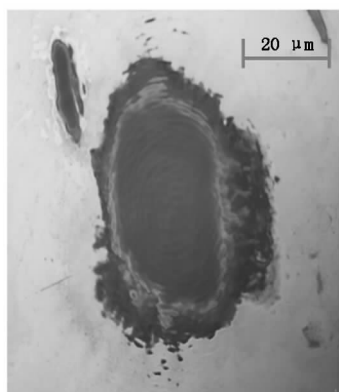
2.2.3 污染物引起的光调制

污染物造成光学基质损伤的过程不仅仅为热破坏,还有后续衍射等现象所带来的光调制^[13-14](如图4所示)。即满足一定尺寸的前表面污染物对激光有强烈的调制作用,在光学元件后表面附近形成了分布不均的光场,其中加强的光场区便可能对后表面和后续元件产生破坏性的损伤,如图3(b)所示,光调制所造成的损伤有时比热破坏所形成损伤更为严重。法国CEA研究中心(Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine)S. Mainguy等人实验得出颗粒污染物对后表面光场的影响结果,并给出了调制因数的理论计算模型^[13]:

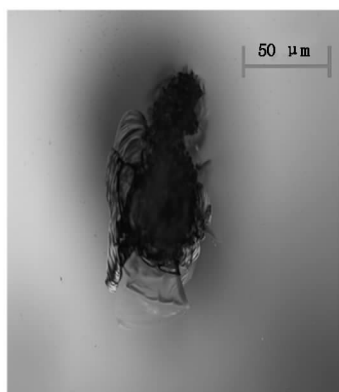
$$I(z) = 1 + 4\sin^2\left(\frac{n\pi\delta(z)}{\lambda}\right) + 4\sin\left(\frac{n\lambda\delta(z)}{\lambda}\right) \cdot \cos\left(\frac{n\pi\delta(z)}{\lambda} + \frac{\pi}{2} - \varphi\right)$$

其中, n 为基片折射率; $\delta(D,z) = z / \cos(\arctan(D/$

$(2z)) - 1)$, $\varphi = 2\pi(1 - n_{\text{part}})e_{\text{part}}/\lambda$, n_{part} 为污染物折射率; λ 为激光波长; e_{part} 为污染物厚度; D 为污染物直径。



(a) on the input surface



(b) on the exit surface

图 3 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. 3 damage morphologies of the input and exit surface for the fused silica with film contamination of stainless steel

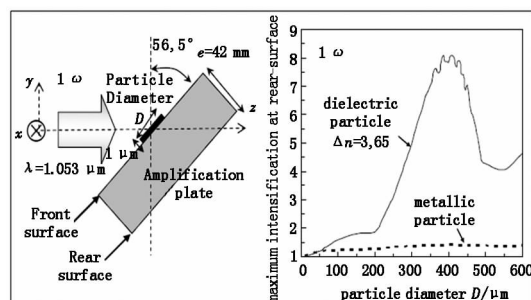


图 4 1 倍频激光辐照附着有金属或绝缘类颗粒污染物的厚度为 42 mm 且倾斜角为 56.5° 的放大器光学元件所得调制因数计算结果^[13]

Fig. 4 intensification factors calculations for front-surface metallic and dielectric pollution particles at 1ω on a 42-mm thick 56.5°-tilted laser amplification plate^[13]

3 污染物诱导光学元件表面损伤物理过程

在激光或氙灯辐照条件下, 污染物致光学元件表面损伤的过程(如图 5 所示)主要为: ①激光或氙

灯光辐照附着污染物的光学元件表面致初始损伤; ②损伤点随辐照发生增长; ③损伤点增长停止。而评价光学元件抗损伤能力的最主要因素为: ①光学元件的初始损伤阈值; ②光学元件的损伤增长阈值。



图 5 激光或氙灯辐照附着污染物光学元件表面致损伤物理过程

Fig. 5 the physical progress of damage of optic components surfaces with contamination by laser or flashlamp light

3.1 初始损伤

在高功率激光装置中, 在强激光与氙灯等强光辐照条件下均有可能产生光学元件的表面初始损伤, 而判断污染物是否对光学元件造成不利影响的主要因素为光学元件的损伤阈值, 其损伤阈值定义为 50% 光学元件损伤几率下所输出的激光能量密度大小。测量损伤阈值的方法主要为“1-on-1”, “S-on-1”, “R-on-1”三种方法^[11], 而在实际测量中, 由于使用 R-on-1 测量时初始能量一般较小, 光学元件表面将会产生激光清洗现象, 光学元件表面环境发生改变, 所测阈值将不再是真实值, 所以在测量附着表面污染的光学元件损伤阈值时, 一般采用“1-on-1”或“S-on-1”方法较为准确。

激光测量损伤阈值和损伤增长的一般实验装置如图 6 所示, He-Ne 激光为准直光, 输出激光能量大小可由能量卡计获得, Nd:YAG 激光经过透镜聚焦后辐照样品, 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, 通过调试样品与透镜间距离可控制光斑大小。

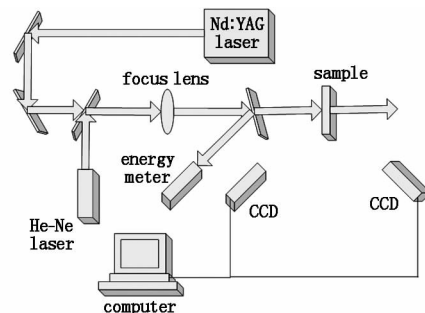


图 6 熔石英激光损伤测试装置

Fig. 6 laser induced damage of fused silica testing set-up

从实际测得附着污染物样品的损伤阈值中我们可以看出其损伤阈值明显低于纯净样品的损伤阈值, 证明所测这些污染物的确造成了光学元件损伤阈值的下降。美国 F. Y. Genin 等人首先建立了光

学元件损伤阈值与表面颗粒污染物尺寸之间的关系^[15-16]:

$$\Phi_0(d) = \Phi_{0,\text{dirt}} + (\Phi_{0,\text{optic}} - \Phi_{0,\text{dirt}})e^{-\frac{d}{d_0}}$$

其中, d 为颗粒污染物尺寸; d_0 为典型颗粒污染物尺寸, 一般为 $40 \mu\text{m}$; $\Phi_0(d)$ 为基片表面附着尺寸大小为 d 的颗粒污染物时的损伤阈值; $\Phi_{0,\text{dirt}}$ 为附着颗粒污染物的基片表面出现损伤时的激光能量; $\Phi_{0,\text{optic}}$ 为纯净基片出现损伤时的激光能量。

2004 年, 美国 J. Honig 等人在 F. Y. Genin 的研究基础上提出了激光诱导表面附着颗粒污染物的熔石英损伤情况下损伤几率与损伤阈值之间的关系^[17], 其损伤阈值:

$$f(\Phi) = 0.5[1 + \text{erf}(\gamma(\Phi - \Phi_0))]$$

其中, Φ 为输入激光能量密度; $f(\Phi)$ 为损伤几率; $\gamma = 0.6 \text{ cm}^2/\text{J}$ 。

由 J. Honig 与 F. Y. Genin 所建立的模型我们可以轻易找出损伤阈值、损伤几率以及颗粒污染物尺寸之间的相互关系, 为颗粒污染物的实验研究提供了依据, 同时也将损伤与光学元件表面洁净等级联系起来^[18-19] (如图 7 所示), 为实际的光学元件洁净工作提供了理论依据。

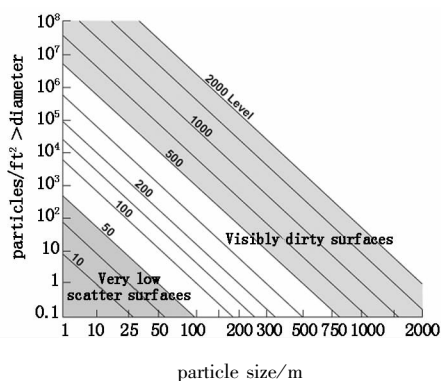


图7 污染物尺寸分布与洁净级别关系^[20]

Fig. 7 contamination size distribution for cleanliness levels^[20]

3.2 损伤增长

损伤点在接受后续高能激光或氙灯光辐照时, 辐照光在损伤点内发生散射, 散射光发生干涉后在局部形成高出原激光能量密度数倍的调制光并作用在损伤点内微观缺陷, 造成了缺陷的再扩大并可能发生爆炸, 从而促使损伤点尺寸进一步增长。但是在实验中可以发现, 激光脉冲能量必须大于基片的损伤增长阈值, 否则材料中便不会发生微观损伤, 损伤点也不会发生增长现象。

苗心向等人在对 Al 膜污染物致光学元件损伤

增长实验中发现后表面损伤点面积随激光辐照次数以 e 指数形式增长, 而前表面损伤点则以线性形式增长, 且附着污染物的基片损伤增长因子大于洁净熔石英基片的损伤增长因子^[21]。冯峰等人在对不锈钢膜污染物致光学元件损伤增长实验中发现后表面损伤点横向尺寸随激光辐照次数以 e 指数形式增长 (如图 8 所示), 这一结果与苗心向等人所作实验结果类似, 且发现损伤点纵向深度随激光辐照次数同样以 e 指数形式增长 (如图 9 所示), 这一结果也与在洁净熔石英上所得激光诱导损伤增长规律一致^[22]。

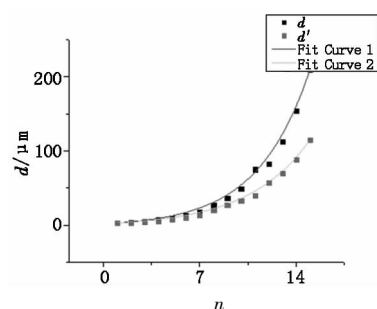


图8 样品(曲线 d)和洁净熔石英基片(曲线 d')的损伤点横向尺寸随辐照次数变化关系

Fig. 8 change in lateral diameter per shot for fused silica with contamination (line " d ") and without contamination (line " d' ")

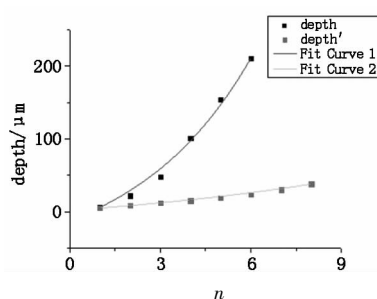


图9 样品(曲线 depth)和洁净熔石英基片(曲线 depth')的损伤点纵向深度随辐照次数变化关系

Fig. 9 change in crater depth per shot for fused silica with contamination (line " depth ") and without contamination (line " depth' ")

4 总结和展望

本文介绍了光学元件表面污染物致损伤的原理及其物理过程, 但污染物致光学元件损伤现象仍有许多问题有待研究: ①国内外目前对激光诱导污染物致光学元件表面损伤问题研究比较深入, 但是对高功率激光装置中的氙灯光诱导污染物致光学元件损伤问题研究还不够透彻; ②在已知污染物中, 对装置中的气溶胶污染物致光学元件表面损伤特性规律还缺乏认识; ③还需要系统的建立各种污染物的损

伤增长模型,从而找出污染物相关参数与损伤点最终尺寸大小关系。解决以上三个问题将是研究污染物致光学元件损伤问题的主要方向。

通过对于污染物致光学元件损伤研究可以发现,污染物存在时光学元件的损伤阈值均发生了严重下降,严重影响了高功率激光装置稳定运行能力和光学元件的高通量负载能力,所以该方向研究对于高功率激光装置的发展具有重大意义。

参考文献:

- [1] N L Boling, G Dube, M D Crisp. Laser surface damage studies on several glasses [C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, NBS-SP, 1973:387.
- [2] N L Boling, J A Ringlien, G Dube. Q-switched laser induced surface damage at 1 μm [C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, NBS-SP, 1974, 414:119.
- [3] R A House, J R Bettis, A H Guenther. Subsurface structure and laser damage threshold [C]. IEEE J. of Quant. Electronics QE-13, 1977:363.
- [4] H Vora, R H Anderson, R J Stokes. Surface finishing using soft abrasives [C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, NBS-SP, 1981, 638:262.
- [5] H Vora, W H Lowdermilk, J E Swain. Effect of surface finishing on the damage threshold of fused silica at 1.06 μm [C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, NBS-SP, 1982, 669:146.
- [6] Y Namba. Float polishing and defects of fused silica [C]. Laser Induced Damage in Optical Materials, NBS-SP, 1982, 669:138.
- [7] Y Namba, M Saeki, M shiokawa, et al. Ultraviolet-laser-damage threshold of optical glasses finished by various methods [C]. Summaries of Papers Presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, IEEE Cat. No. 95 CH35800, 410, 1995.
- [8] Chen Fei, Meng Shaoxian. Damage mechanism of optical materials [J]. Progress in Physics, 1998, 18 (2): 187-206. (in China)
陈飞, 孟绍贤. 光学材料破坏机理[J]. 物理学进展, 1998, 18(2):187-206.
- [9] Hovis F E, Sherperd B A, Radcliffe C T, et al. Mechanisms of contamination induced optical damage in pulse laser[C]//Proc of SPIE, 1994, 2428:72-81.
- [10] Hovis F E, Sherperd B A, Radcliffe C T, et al. Contamination damage in pulse 1 μm laser [C]//Proc of SPIE, 1995, 2714:707-715.
- [11] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, et al. Laser irradiation effect [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in China)
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.
- [12] F Y Genin, A M Rubenchick, A K Burnham, et al. Thin film contamination effects on laser-induced damage of fused silica surfaces at 355 nm [J]. Proc. of SPIE, 1998, 3492.
- [13] S Mainguy, I Toven-Pécault, B Le Garrec. Propagation of LIL/LMJ beams under the interaction with contamination particles [J]. Proc. of SPIE, 2005, 5991.
- [14] F Y Genin, M D Feit, M R Kozlowski, et al. Rear-surface laser damage on 355 nm silica optics owing to fresnel diffraction on front-surface contamination particles [J]. Applied Optics, 2000, 39 (21) 3654-3663.
- [15] Genin F Y, Kozlowski M R, Furr J, et al. Massive laser damage of fused silica at 355 nm and 1064 nm initiated by surface contamination [R]. UCRL - JC - 124878, 1996.
- [16] F Y Genin, M R Kozlowski, R Brusasco. Catastrophic failure of contaminated fused silica optics at 355 nm [C]. Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, Proc. Of SPIE, 1997, 3047:978-986.
- [17] 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]. UCRL-PROC-207942, 2004.
- [18] Hunt J S. National ignition facility performance review 1999 [R]. UCRL-ID-138120-99, 2000.
- [19] John Honig. Cleanliness improvements of NIF (national ignition facility) amplifiers as compared to previous large-scale lasers [C]. UCRL-JRNL-204678, 2004.
- [20] Stowers I F, Horvath J A, Menapace J A, et al. Achieving and maintaining cleanliness in NIF amplifiers [C]//Third International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion, SPIE, 1998, 3492: 609-620.
- [21] 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 China)
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.
- [22] M A Norton, J J Adams, C W Carr. Growth of laser damage in fused silica: diameter to depth ratio [J]. Proc. of SPIE Vol. 6720 67200H-2, 2007.