

# 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响

王立斌<sup>1</sup> 马伟新<sup>1</sup> 季来林<sup>1</sup> 赵东峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)  
<sup>2</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要** 高功率激光器中,金属颗粒作为元件表面污染的一种,对熔石英元件寿命的影响早已得到关注。为了定量得到金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响,在中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心的标准损伤测试平台上,对未被污染的以及被 3 种不同金属颗粒(Al、Cu、Fe)污染的熔石英元件的损伤阈值进行了测量。研究发现,被金属颗粒污染的熔石英元件,损伤阈值会降低为原来的 20%~30%;吸收系数高的金属颗粒更容易诱导损伤,损伤形貌与未污染的熔石英损伤形貌也有很大的差别;离线观测样品形貌,可以从微观的角度观察到损伤的概率行为。参考损伤的爆炸模型,粗略地模拟了温度随时间的变化。

**关键词** 激光器;激光损伤;阈值;金属颗粒;熔石英

**中图分类号** TN204 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0502004

## Influence of Metal Particles on Damage Threshold of Fused Silica at 3 $\omega$

Wang Libin<sup>1</sup> Ma Weixin<sup>1</sup> Ji Lailin<sup>1</sup> Zhao Dongfeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering Physics, Shanghai 201800, China)  
(<sup>2</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** In high-power laser, as a kind of contamination on the surface of fused silica, the metal particles has been long concerned. In order to measure the influence of metal particles on damage threshold of fused silica quantitatively, damage threshold of uncontaminated and contaminated (by Al, Cu, Fe) Corning7980 fused silica is tested on the standard damage test platform in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences. Research finds that, the damage threshold of contaminated fused silica is reduced to 20%~30% compared to the uncontaminated, the higher-absorption-coefficient metal particles induce damage more easily, and damage morphology is very different. The uncertain behavior and probability of damage is offline observed from microscopics point of view. Refer to the damage explosion model, the temperature changes over time is roughly simulated.

**Key words** lasers; laser damage; threshold; metal particles; fused silica

**OCIS codes** 140.3440; 140.3070; 140.3380; 160.6030

## 1 引 言

高功率激光驱动器中,熔石英光学元件的负载能力一直是研究人员所关注的问题,是限制高功率激光驱动器进一步提高能量输出的瓶颈。根据国家点火装置(NIF)的设计指标<sup>[1,2]</sup>,激光运行传输通量要达到 8.0 J/cm<sup>2</sup> (351 ns, 5 ns),而国内神光 II 正常运行通量在 1.0 J/cm<sup>2</sup> (351 ns, 3 ns)以下<sup>[3,4]</sup>,建造

中的神光 III 目标通量也只有 3.0~3.5 J/cm<sup>2</sup> (351 ns, 3 ns)。即使激光系统运行在设计通量下,元件也经常出现损伤,一直以来这都是研究人员十分关注的问题。熔石英光学元件的损伤大致可以分为两个方面:本征损伤和诱导损伤<sup>[5,6]</sup>。本征损伤是元件在没有任何缺陷激光作用下的损伤,当激光到达一定的能量,会引发多光子吸收、自聚焦等非线

收稿日期: 2011-12-14; 收到修改稿日期: 2012-02-06

基金项目: 国家 863 计划(2011AA8044067)资助课题。

作者简介: 王立斌(1987—),男,硕士研究生,主要从事熔石英材料激光损伤方面的研究。E-mail: wlbstc@126.com

导师简介: 马伟新(1965—),男,研究员,主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: herrmawx@sohu.com

(通信联系人)

性效应,导致电子雪崩,引起元件的破坏;诱导损伤是由表面的污染物或者亚表面的凹坑、划痕、杂质等引起的热破坏和场破坏。本征损伤只有在极高的激光功率下才会发生,在实际的工程应用中一般不会出现,人们通常研究的损伤大多是诱导损伤。诱导损伤产生的原因有很多,本文主要关注金属颗粒污染物的激光诱导损伤。

铝合金、不锈钢等金属材料广泛应用于高功率激光器中,比如激光传输的真空管道、光学元件的支架、光阑等,它们构成了高功率激光系统的“骨架”。如果对杂散光、鬼像等处理不当,或者受到光束传输系统中的光阑作用,激光会不可避免地照射到金属材料表面。实验发现,金属的损伤阈值比熔石英元件的损伤阈值低 1~2 个数量级,而且在激光器运行的过程中,金属材料被激光照射喷溅出来的金属颗粒很有可能会附着到熔石英元件表面。金属颗粒等污染物对熔石英元件的影响很早就已经被关注<sup>[7,8]</sup>,国内对这方面的研究也在探索之中<sup>[9,10]</sup>。本实验对金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响进行了研究,得出了定量的结论,并对在这个过程中损伤机理进行了分析。

## 2 样品制备及实验装置

### 2.1 样品制备

为了研究金属颗粒对熔石英玻璃损伤阈值的影响,需要对未被污染以及涂有金属颗粒的熔石英元件的损伤阈值进行分别测量。实验样品:清洗过的康宁 7980 熔石英 4 片(直径  $\phi=50$  mm,厚度  $d=8$  mm),铝粉、铁粉、铜粉[-300 目( $48 \mu\text{m}$ )]以及乙醇。准备 3 个试剂瓶,均放有 20 mL 的乙醇,用镊子分别夹取少量的铝、铁、铜金属粉末放入 3 个试剂瓶中;搅拌试剂瓶的溶液,金属颗粒会大量悬浮在乙醇中,用吸管吸取少量的 3 种乙醇溶液分别滴到 3 片熔石英样品后表面,并使溶液均匀散开,乙醇挥发后金属颗粒会附着在样品表面。图 1 所示为在 80× 显微镜下观测到的涂有铝金属颗粒的熔石英样片,颗粒大致均匀分布,尺寸为  $1\sim 10 \mu\text{m}$ ,密度为  $15\sim 40 \text{mm}^{-2}$ 。

### 2.2 实验装置及参数

所用实验装置为中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心搭建的符合 ISO11254 国际损伤测试标准的自动化激光损伤测试平台。该平台由 Nd:YAG 调 Q 激光器、He-Ne 光源、偏振衰减器、分光光楔、三维可移动平台、损伤探测系统、光束质量监测系统及计算机自动控制系统等组成。平台装置原

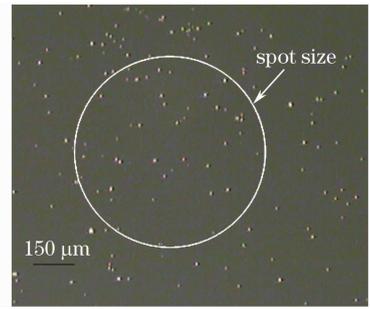


图 1 80× 显微镜下观测到的涂有铝颗粒的熔石英样片

Fig. 1 Observation of melting quartz coated with aluminum particles under 80× microscopy

理图如图 2 所示。Nd:YAG 激光脉冲由衰减器调节到指定能量后,经透镜聚焦于被测样品表面。光路中插入分光光楔,其前后表面分出的两束低能量激光,其中一束用于监测激光脉冲的能量,另一束用于观察光斑的空间分布及光斑面积。He-Ne 光源用于光路准直以及损伤探测的方法,损伤诊断系统采用 CCD 在线探测。ISO11254 国际标准将 150× 相衬显微镜下观测到的光学元件表面的任何变化视为损伤,而本实验将 CCD 连接显示器可以观测到的光学元件表面的任何变化视为损伤。损伤以后表面为准,若无特殊交代,本文所提损伤均指后表面损伤。测试激光波长为 355 nm,脉宽 6 ns,样品处光斑面积为  $0.62 \text{mm}^2$ (图 1 中标记了光斑辐照在样品表面的大小),入射角度为近正入射。测试方法为 1-on-1 测试,每个能量台阶取样点数为 15 个。

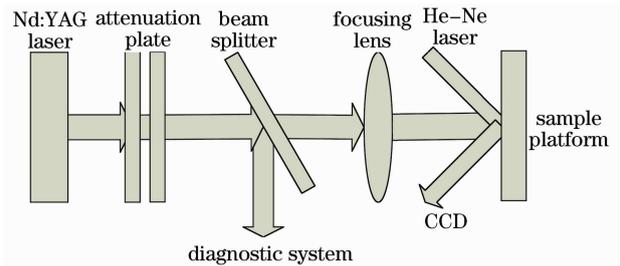


图 2 损伤测试平台原理图

Fig. 2 Schematic of experimental setup

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 实验结果

4 块样品的损伤测试结果如图 3 所示。图 3(a) 为未污染的熔石英样品在不同能流下的损伤几率,利用线性外推法获得零几率损伤阈值,大约为  $6.9 \text{J}/\text{cm}^2$ 。涂有 Al、Cu、Fe 金属颗粒的康宁 7980 熔石英元件在不同能流下的损伤几率如图 3(b)~(d) 所示,零几率损伤阈值分别为  $1.5 \text{J}/\text{cm}^2$ 、

1.8 J/cm<sup>2</sup>、2.3 J/cm<sup>2</sup>。由此可见,覆有金属颗粒污染物的熔石英样片,损伤阈值降低明显,至少会降为未污染的 1/3 (Fe),甚至接近 1/5 (Al);在颗粒大

小、分布相同的条件下,铝颗粒比铁颗粒对熔石英的损伤破坏作用更为明显。

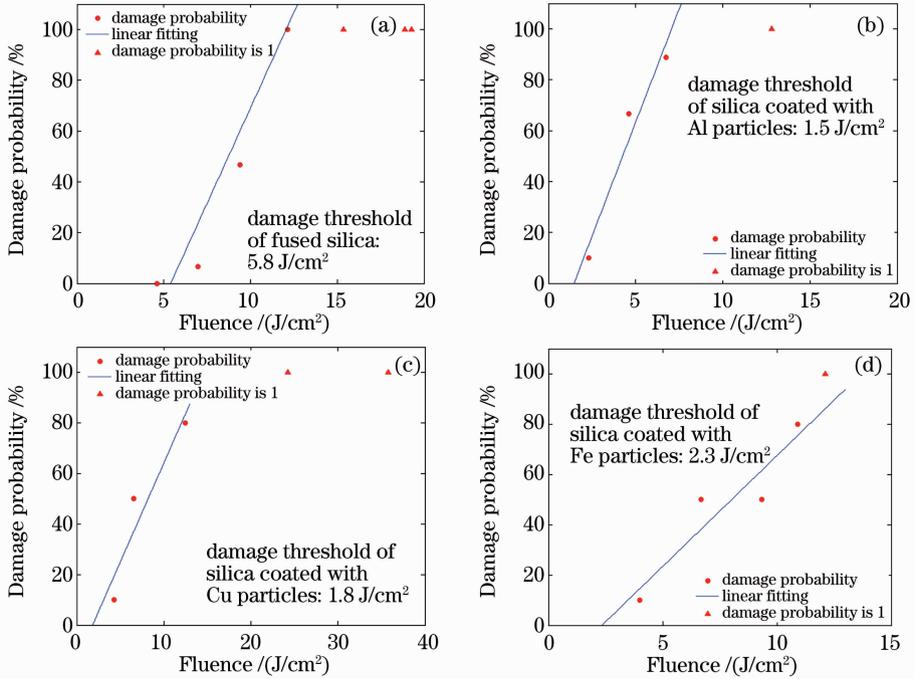


图3 不同处理的康宁7980熔石英的损伤阈值。(a)未处理;(b)涂有铝颗粒;(c)涂有铜颗粒;(d)涂有铁颗粒  
Fig. 3 Damage threshold of fused silica under different condition. (a) Untreated; (b) coated with aluminum particles; (c) coated with cuprum particles; (d) coated with ferrum particles

### 3.2 损伤形貌及分析

图4是在350×显微镜下观察到的损伤形貌,可以看出被金属颗粒污染的熔石英元件与未污染的熔石英形貌有很大的差别。图4(a)所示为未被污染的熔石英损伤形貌,呈现为麻点和坑状损伤,这些损伤主要由亚表面的缺陷或杂质诱导产生的。实验发现,当通量在7~10 J/cm<sup>2</sup>时,损伤主要发生在后表面;当通量大于10 J/cm<sup>2</sup>时,在元件前表面也出现了损伤。这是由于光束从空气入射到介质中会发生相位反转<sup>[11]</sup>,介质出射面与入射面的光强比为

$\left(\frac{2n}{n+1}\right)^2$ ,将熔石英折射率  $n=1.5$  代入式子可以与实验得到一致的结果。对于被金属颗粒污染的熔石英元件,从图4(b)可以看出,损伤只发生在金属颗粒出现的位置,这说明由于金属颗粒的存在改变了光场强度的分布,光场能量大多被金属颗粒吸收。损伤点的大小是金属颗粒的5~10倍,而且在损伤点周围会发现从中心向外扩散的树杈状损伤。当激光辐照到元件表面时,金属颗粒由于具有强烈的吸收而瞬间升温,当温度到达一个阈值,颗粒会发生爆

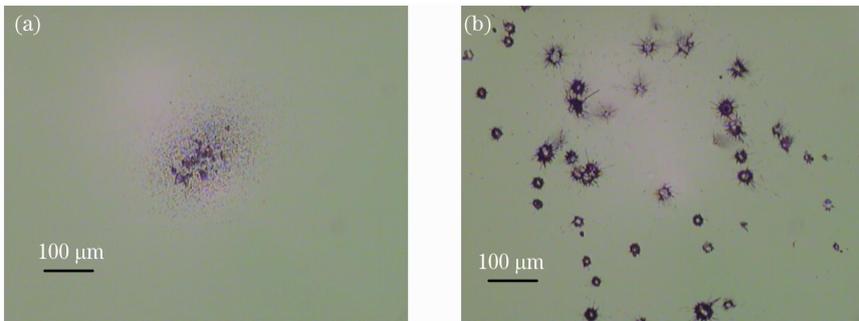


图4 350×显微镜下观测到的损伤形貌。(a)未污染的熔石英;(b)铝颗粒污染的熔石英

Fig. 4 Observation of damage morphology under 350× microscopy. (a) Uncontaminated fused silica; (b) fused silica contaminated by aluminum

炸产生高温高压,其温度足以对元件表面产生破坏,主要表现为热烧蚀。当通量大于  $10 \text{ J/cm}^2$  时,前表面也发生了损伤,这与未污染熔石英前表面的损伤阈值是一样的,说明后表面的处理并不影响前表面的损伤阈值。

### 3.3 损伤的概率行为

图 5(a)~(d) 表示 4 个激光能流下,覆有铝颗粒熔石英样品的典型损伤形貌图样变化,可以明显地看到损伤概率与激光辐照通量密度的关系:当以  $12.8 \text{ J/cm}^2$  通量密度辐照时,光斑范围内几乎所有的铝颗粒都能导致熔石英表面损伤;而以  $2.3 \text{ J/cm}^2$  通量密度辐照时,损伤程度明显降低,只有在光斑中

心的几个铝颗粒引发损伤。还可以发现,在图 5(a) 中,即使辐照通量比较高,也可以找到没有引发损伤的铝颗粒。从损伤原理上分析,不管是在元件表面还是亚表面,表面污染物和亚表面缺陷都是引起元件损伤的原因,而污染物、缺陷诱导损伤的发生具有一定的概率性,即使在能量很高的情况下,也有可能不产生诱导损伤。不仅如此,损伤测量也具有不确定性<sup>[12]</sup>,这种不确定性跟光斑和脉宽等因素有关<sup>[13]</sup>,在同一能量级下,不同辐照点的金属颗粒诱导损伤的概率并不是一样的,大致可认为呈正太分布,而图 5(a)~(d) 反映的是实验统计结果中的平均水平。

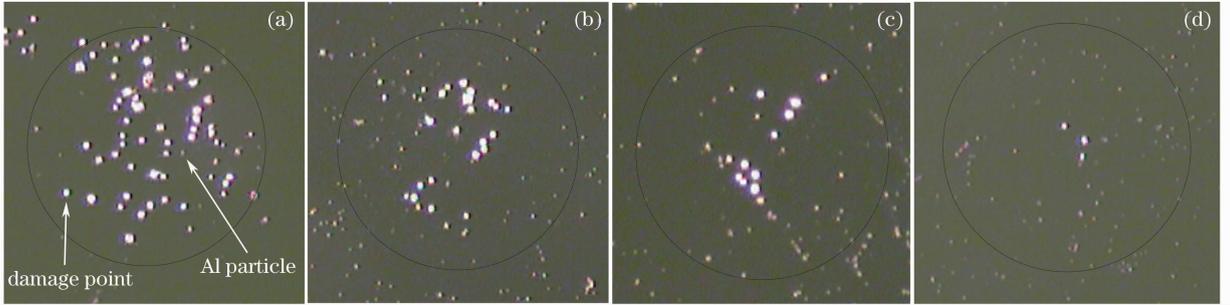


图 5 离线观测不同能量流下的损伤概率(80×)。(a)  $12.8 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $6.7 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $4.6 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $2.3 \text{ J/cm}^2$   
Fig. 5 Damage probability of different energy levels under offline observation (80×). (a)  $12.8 \text{ J/cm}^2$ ; (b)  $6.7 \text{ J/cm}^2$ ; (c)  $4.6 \text{ J/cm}^2$ ; (d)  $2.3 \text{ J/cm}^2$

### 3.4 金属颗粒诱导损伤的热力学分析

金属颗粒之所以会使熔石英损伤阈值降低,最重要的原因是金属具有强烈的热吸收特性。熔石英介质对波长  $355 \text{ nm}$  的激光能量吸收很少,可以忽略。对于金属,从宏观的非涅耳衍射分析金属的吸收系数:金属复折射率  $\tilde{n} = n(1 + i\kappa)$  ( $\kappa$  为衰减系数),对于正入射的激光,其反射率  $R = \left(\frac{\tilde{n} - 1}{\tilde{n} + 1}\right)^2 = \frac{(1 - n)^2 + \kappa^2}{(1 + n)^2 + \kappa^2}$ ,吸收系数  $\alpha = 1 - R = \frac{4n}{(1 + n)^2 + \kappa^2}$ ,吸收系数跟波长有很大的关系,铝的吸收系数在  $355 \text{ nm}$  激光辐照下约为  $0.1$ ,相比熔石英是很强烈的;从微观角度来看,本实验中金属颗粒大小与辐照波长在同一个数量级上,属于米氏散射的范围,吸收系数  $\alpha$  约为  $0.5$ <sup>[14]</sup>。从图 3 测量的结果可以发现被铁污染的熔石英的阈值比被铝污染的熔石英阈值高  $60\%$ ,由于颗粒的大小、分布基本相同,因此可以认为其主要原因是在  $355 \text{ nm}$  波长下铝颗粒的吸收系数  $\alpha$  更高,更容易引发损伤。

对于介质中的金属颗粒在激光辐照下吸热的过程,M. D. Feit 等<sup>[14,15]</sup> 已经有了比较系统的理论研究,并提出了热吸收爆炸模型。本实验中金属颗粒

附着在熔石英介质表面,金属颗粒被激光加热后将能量传导给周围的介质,忽略空气的影响,理想地认为金属颗粒只与熔石英介质发生了作用,满足金属颗粒表面与介质接触面温度相同的边界条件,可以用热吸收爆炸模型,粗略计算金属颗粒的温度变化。对于基底介质有:

$$\frac{\partial T_h}{\partial t} = D_0 \nabla^2 T_h, \quad (1)$$

式中热扩散系数  $D_0 = \frac{K_h}{\rho_h C_h}$ ,  $K_h$ ,  $\rho_h$  和  $C_h$  分别表示基底介质的热导率、密度和热容。 $T_i$  和  $T_h$  分别表示金属颗粒和基底介质的温度,对于杂质,在边界  $r = a$  处,  $T_i = T_h = T$ , 满足方程:

$$\alpha_i I(t) = -4K_h \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{4}{3} a \rho_i C_i \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right), \quad (2)$$

式中  $I$  为光强功率,  $\alpha_i$  为金属颗粒的吸收系数,  $\rho_i$  和  $C_i$  分别为金属颗粒的密度和热容。联立(1),(2)式可以得到接触面温度的解:

$$T(a, t) = T_0 [1 - \exp(-t/\tau_0)], \quad (3)$$

式中  $T_0 = \frac{aIa}{4K_h}$ ,  $\tau_0 = \frac{a^2 \rho_i C_i}{3K_h}$ 。将本实验中的介质与金属颗粒的参数代入到(3)式中,可以大致估计金属

颗粒温度的变化。图6为半径大小为 $1\ \mu\text{m}$ 的铝颗粒温度随着激光辐照时间的变化趋势,可以看出当辐照 $3\times 10^{-7}\ \text{s}$ 后,颗粒温度渐近 $5\times 10^5\ \text{K}$ 。实际上计算可以发现,在激光辐照 $1\ \text{ns}$ 时颗粒温度就已经达到 $5\times 10^4\ \text{K}$ ,在如此高温下金属颗粒早已爆炸或者气化(金属的气化温度在 $10^3\ \text{K}$ 数量级),颗粒瞬间爆炸所带来的高温、高压足以对熔石英产生损伤。

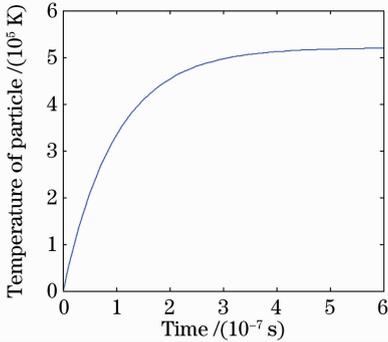


图6 铝颗粒温度随时间的变化

Fig. 6 Temperature varies with time of Al particles

## 4 结 论

通过测量未污染以及被金属颗粒污染的康宁7980熔石英样品的损伤阈值,发现金属颗粒污染物在高功率激光器中对熔石英元件起着严重的破坏作用,大大影响元件的抗激光损伤能力。因此,严格要求高功率激光器的工作环境是十分必要的,同时,合理的光路排布,防止激光鬼像<sup>[16]</sup>、杂散光等辐照到金属管道或金属支架上,可以从源头上降低金属颗粒污染物的产生。

**致谢** 特别感谢中国科学院上海光学精密机械研究所薄膜中心赵元安副研究员,胡国行、刘晓凤博士对本课题实验的大力支持。

## 参 考 文 献

- 1 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National ignition facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 2 B. M. Van Wonterghem, S. C. Burkhart, C. A. Haynam *et al.*. National ignition facility commissioning and performance [C]. *SPIE*, 2004, **5341**: 55~65

- 3 Zhao Dongfeng, Wang Li, Lin Zunqi *et al.*. Experimental study of 351 nm propagation with high fluence on No. 9 system of SG-II laser facility[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702001
- 赵东峰, 王利, 林尊琪等. 在神光II装置第九路系统开展351 nm波长激光高通量传输的实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702001
- 4 Lin Zunqi. Progress of laser fusion[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 林尊琪. 激光核聚变的发展[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2202~2207
- 5 M. J. Soileau. 40 year retrospective of fundamental mechanisms [C]. *SPIE*, 2008, **7132**: 713201
- 6 A. A. Manenkov. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: understanding after 40 years of research[J]. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, 2008, **7132**: 713202
- 7 I. A. Fresman, L. D. Khazov. The effect of surface cleanliness of optical elements on their radiation resistance [J]. *Soviet Journal of Optical Technology*, 1971, **37**: 627~635
- 8 F. Y. Genin, M. R. Kozlowski, R. Brusasco *et al.*. Catastrophic failure of contaminated fused silica optics at 355nm [C]. *SPIE*, 1997, **3047**: 978~986
- 9 Wei Chaoyang, He Hongbo, Shao Jianda *et al.*. Thermodynamics damage of optical coatings induced by absorbing inclusion thermal irradiation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 809~812
- 魏朝阳, 贺洪波, 邵建达等. 吸收杂质热辐射诱导光学薄膜破坏的热力机制[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 809~812
- 10 Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Wang Haijun *et al.*. Experiment of laser induced damage for different thin film contamination of Cu and Fe on fused silica surface[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2009, **7**(2): 90~93
- 苗心向, 袁晓东, 王海军等. 铜膜和铁膜污染物诱导熔石英表面损伤行为的对比研究[J]. *光学与光电技术*, 2009, **7**(2): 90~93
- 11 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 273~274
- 郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 273~274
- 12 J. W. Arenberg. Investigation of the accuracy and precision of the damage-frequency method of measuring laser damage threshold [C]. *SPIE*, 1993, **1848**: 72~85
- 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*, 1999, **3578**: 226~234
- 14 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Implication of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulselength scaling and laser conditioning [C]. *SPIE*, 2003, **5273**: 74~83
- 15 R. W. Hopper, D. P. Uhlmann. Mechanism of inclusion damage in laser glass [J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(10): 4023~4037
- 16 Li Yinzhu, Li Liangyu, Dai Yaping *et al.*. Ghost reflection analysis for the high power laser system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(8): 677~680
- 李银柱, 李良钰, 戴亚平等. 高功率激光装置中的鬼点反射分析 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(8): 677~680