

## 熔石英亚表面杂质对激光损伤概率的影响

高翔<sup>1</sup>, 邱荣<sup>1</sup>, 周国瑞<sup>2</sup>, 姚科<sup>2</sup>, 蒋勇<sup>1</sup>, 周强<sup>1</sup>

(1. 西南科技大学 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010; 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:** 基于 Mie 理论和热传导方程, 结合 ICP-OES 对熔石英亚表面杂质粒子的主要成分测量, 建立了计算吸收性杂质粒子诱导熔石英光学元件表面损伤概率的模型。通过该模型理论研究了不同种类的杂质粒子诱导损伤所需的临界能量密度随粒子尺寸的变化, 以及不同尺寸分布的杂质粒子诱导熔石英表面的损伤概率。通过损伤实验测试获得了不同光斑尺寸的 355 nm 激光辐照作用下熔石英表面的损伤概率, 与理论计算结果进行对比, 在相同粒子分布参数下, 分析了三种杂质粒子对损伤概率的贡献(Cu>Al>CeO<sub>2</sub>)。通过该模型能够分析光学基底或薄膜亚表面中不同潜在的杂质吸收性粒子对光学元件损伤概率的影响。

**关键词:** 熔石英; 杂质粒子; 临界能量密度; 激光损伤概率

中图分类号: O437 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0406002

## Effect of subsurface impurities of fused silica on laser induced damage probability

Gao Xiang<sup>1</sup>, Qiu Rong<sup>1</sup>, Zhou Guorui<sup>2</sup>, Yao Ke<sup>2</sup>, Jiang Yong<sup>1</sup>, Zhou Qiang<sup>1</sup>

(1. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology—Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621010, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Based on Mie theory and heat equation, combined with the measurement of the main components for impurities on the subsurface of fused silica by ICP-OES, a model for calculating laser-induced damage probability on the surface of optical components by absorbing impurities was presented. Based on this theoretical model, the critical fluence required to initiate damage by various impurities as a function of particle radius and the damage probability on the surface of fused silica induced by the impurities with different distribution were investigated. The damage probability on the surface of fused silica was measured under the irradiation of 355 nm laser with different beam sizes. Comparison of the calculated and experimental results was conducted. The contribution to laser-induced damage probability for these three impurities was analyzed (Cu > Al > CeO<sub>2</sub>) with same particle distribution parameters. Through the model, the effect of various potential absorbing impurities embedded in the subsurface of optical substrates or films on damage probability can be analyzed.

**Key words:** fused silica; impurities; critical fluence; laser induced damage probability

收稿日期: 2016-08-06; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61505170, 61505171); 国家自然科学基金联合基金(U1530109)

作者简介: 高翔(1985-), 男, 讲师, 博士, 从事高功率激光损伤问题方面的研究。Email: gaoxiang6969@163.com

## 0 引言

当前,在大口径高能激光系统中,紫外激光对熔石英表面的损伤问题一直是限制大口径高功率激光系统发展的主要因素<sup>[1-4]</sup>。在光学元件的亚表面层,抛光过程产生的杂质粒子能够吸收光子能量远低于其带隙的激光,引起材料的温升并诱导材料的损伤<sup>[5-9]</sup>。由于这些杂质粒子是纳米尺度的以及其分布的密度非常小<sup>[9]</sup>,并不能通过常规的光学技术直接检测到,使得实验上观察杂质粒子诱导损伤发生的过程非常困难。许多实验结果已经间接反应了纳米尺寸的杂质粒子是熔石英表面损伤发生的起源:损伤阈值随着光学元件表面的纯化而提高<sup>[10-11]</sup>,损伤阈值随辐照样品不同区域而变化<sup>[12-13]</sup>,损伤阈值随波长和光斑面积的变化而变化<sup>[14-15]</sup>。

由于在光学元件的亚表面中杂质粒子的分布位置是不确定的,所以光学元件的表面损伤有一个统计的特点<sup>[13-14]</sup>。先前的理论模型基于热传导方程研究了由内含物的温升造成光学元件破坏的损伤阈值<sup>[5,9]</sup>。Hopper 和 Uhlmann 首先提出一个经典的理论模型描述光学元件损伤与内含粒子温升之间的关系<sup>[5]</sup>。Laurent Gallais 进一步基于 Mie 理论分析内含粒子的吸收对粒子尺寸和折射率的依赖,计算了损伤阈值与粒子尺寸和折射率的关系<sup>[9]</sup>。这些模型虽然很好地解释了光学元件的损伤阈值与杂质粒子特征参数间的关系,但是由于缺乏对杂质粒子空间分布了解,并不能解释实验中所观察到的损伤概率的统计特点。近年来,Laurent Gallais 基于杂质粒子在样品亚表面和体内的尺寸分布规律提出了一个计算损伤概率的模型,该模型的计算结果很好地解释了实验测量的含有 Hf 杂质粒子的 HfO<sub>2</sub> 薄膜的损伤概率对辐照光斑尺寸和波长依赖<sup>[14]</sup>。

文中详细地描述了计算含有杂质粒子的光学元件表面的损伤概率曲线的理论模型。首先,通过 Mie 理论求解球形粒子的吸收,进而结合热传导方程求解杂质粒子引起周围材料的温升,得到不同尺寸的杂质粒子诱导损伤发生所需的临界能量密度。基于杂质粒子的尺寸分布规律,计算了不同分布参数的 CeO<sub>2</sub> 粒子诱导的损伤概率。其次,测量了在脉宽为 10 ns、波长为 355 nm 的不同光斑尺寸的激光作用下

的熔石英表面的损伤概率,并采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测量了样品亚表面主要杂质粒子的含量。最后,选择相同的粒子分布参数计算了不同种类的杂质粒子诱导的损伤概率,并与实验结果相比较分析了这些杂质粒子对熔石英表面损伤概率的影响。

## 1 损伤概率的计算模型

在光学元件的表面打磨、抛光和清洗过程中,不可避免会在其亚表面残留下杂质粒子,其中最常见杂质粒子包括 Al、Cu 和 CeO<sub>2</sub> 等<sup>[15]</sup>。随着表面加工技术的提高,常规光学技术能够检测到的几百纳米的杂质粒子能够去除掉,因此在该模型中粒子尺寸的计算尺度在 1 μm 内。尽管杂质粒子有不同的形状<sup>[16]</sup>,然而在该模型中仅考虑球形的杂质粒子以简化计算。在计算中所使用材料的热学和光学参数如表 1 所示<sup>[17]</sup>。

表 1 材料的热学和光学参数

Tab.1 Material thermal and optical parameters

Materials	Fused silica	Al	Cu	CeO <sub>2</sub>
Real index	1.48	0.39	1.29	2.0
Imaginary index	0	4.3	1.91	0.2
Diffusivity/ m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup>	9.40×10 <sup>-7</sup>	9.79×10 <sup>-5</sup>	9.97×10 <sup>-5</sup>	7.13×10 <sup>-7</sup>
Conductivity /W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	1.40	237	401	2.0

### 1.1 临界能量密度

考虑单个吸收性的杂质粒子嵌入在透明的光学元件中,其吸收的激光能量为  $Q = \sigma I$ ,  $I$  为激光功率密度,  $\sigma = \pi R^2 \times \alpha$  为吸收截面,  $\alpha$  为吸收系数,  $R$  为粒子半径。基于 Mie 理论吸收系数可以表示为<sup>[18]</sup>:

$$k_{\text{ext}} = \frac{2}{x} \sum_{n=1}^{N_{\text{stop}}} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (1)$$

$$k_{\text{sca}} = \frac{2}{x} \sum_{n=1}^{N_{\text{stop}}} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (2)$$

$$\alpha = k_{\text{ext}} - k_{\text{sca}} \quad (3)$$

式中:  $k_{\text{ext}}$  和  $k_{\text{sca}}$  分别为消矢系数和散射系数;  $x = 2\pi NR/\lambda$  为尺寸参数,  $N$  为周围介质的折射率,  $\lambda$  为辐照激光的波长;  $N_{\text{stop}} = x + cx^{1/3} + b$  为计算截止参数,  $c$  的

取值范围在 4~4.05 之间,  $b$  的取值范围在 1~2 之间;  $a_n$  和  $b_n$  为连续性关系决定的散射系数。

图 1 表示嵌入在熔石英中的 Al、Cu 和 CeO<sub>2</sub> 杂质粒子在 355 nm 激光辐照下的吸收系数。当粒子半径小于 45 nm 时, Al 和 Cu 粒子相比于 CeO<sub>2</sub> 粒子有较大的吸收系数, 其中 Cu 粒子的吸收系数最大; 随着粒子尺寸的增大, CeO<sub>2</sub> 粒子的吸收系数超过 Al 粒子。当粒子尺寸超过 175 nm, CeO<sub>2</sub> 粒子的吸收系数超过 Cu 粒子。

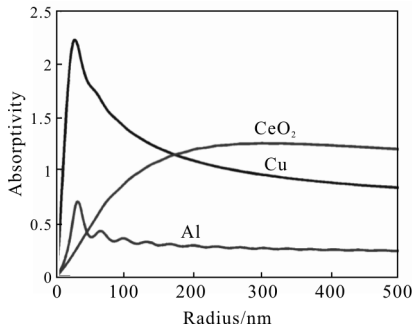


图 1 熔石英亚表面中杂质粒子的吸收系数随粒子半径的变化

Fig.1 Absorptivity as a function of particle radius for various impurities in the subsurface of fused silica

为了计算不同半径的粒子诱导损伤发生所需要的能量密度, 即临界能量密度, 温度分布的求解是必要的。结合 Mie 理论计算得到的杂质粒子的吸收, 通过求解热传导方程能够获得该模型的温度分布<sup>[9]</sup>:

$$\frac{1}{D_i} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \theta_i}{\partial r} \right) + \frac{\sigma I_0}{C_i V} f(t) \eta(R-r) \quad (4)$$

式中:  $\theta = T - T_0$  为材料的温升,  $T_0 = 300$  K 为材料的初始温度;  $C$  和  $D$  分别为热传导系数和热扩散系数; 下标  $i=p$  表示杂质粒子,  $i=s$  表示周围介质;  $I_0$  和  $f(t)$  分别为最大光强和实时脉冲形状。为了和实验条件相一致, 考虑实时高斯分布的光强  $f(t) = \exp[-4(t^2/\tau^2)]$ ,  $\tau$  为高斯脉冲的宽度(1/e)。  $\eta(x)$  定义为:  $x < 0, \eta(x) = 0$ ;  $x \geq 0, \eta(x) = 1$ 。  $V = (4/3)\pi R^3$  为杂质粒子的体积,  $R$  为杂质粒子的半径。将方程(4)进行傅里叶变换可以表示为:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial \hat{\theta}_i}{\partial r} \right) + \beta_i^2 \hat{\theta}_i = -\frac{\sigma I_0 \eta(R-r)}{2VC_i} \sqrt{\pi} \tau \exp\left(-\frac{\tau^2 \omega^2}{16}\right) \quad (5)$$

式中:  $\beta_i = (\omega/2D_i)^{1/2} \cdot (1+i)$ 。利用限制条件( $r \rightarrow \infty, \hat{\theta}_i$  有

限;  $r \rightarrow \infty, \hat{\theta}_s = 0$ ), 得到方程(5)的解为:

$$\hat{\theta}_p(r, \omega) = \frac{A_p I_0}{r} [\exp(i\beta_p r) - \exp(-i\beta_p r)] - \frac{\sigma I_0}{2V\beta_p^2 C_p} \sqrt{\pi} \tau \exp\left(-\frac{\tau^2 \omega^2}{16}\right) \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_s(r, \omega) = \frac{A_s I_0}{r} \exp(i\beta_s r) \quad (7)$$

将杂质和周围材料温升的边界条件( $\hat{\theta}_p(R) = \hat{\theta}_s(R), C_p \partial \hat{\theta}_p / \partial r|_{r=R} = C_s \partial \hat{\theta}_s / \partial r|_{r=R}$ )代入方程(6)和(7)中可以得到  $A_p$  和  $A_s$ 。进一步将方程(6)和(7)进行数值傅里叶逆变换可以得到杂质粒子和周围材料的温度场分布。脉冲作用过程中, 杂质粒子与周围材料交界处的最大温度超过了周围材料发生损伤的临界温度  $T_c$  (对于熔石英而言, 临界温度为 2 200 K<sup>[19]</sup>), 光学元件的损伤就会发生。由此达到临界温度所需要的临界能量密度可以表示为:

$$F_c = (\pi)^{\frac{3}{2}} R \tau T_c \left\{ \max_i \left[ \sum_{\omega=N}^N A_s \exp(i\beta_s R - i\omega t) \Delta \omega \right] \right\}^{-1} \quad (8)$$

当嵌入在熔石英中的杂质粒子(Al, Cu 和 CeO<sub>2</sub>) 受到脉宽为 10 ns, 波长为 355 nm 的激光辐照时, 诱导损伤发生的临界能量密度随着粒子半径的变化如图 2 所示。

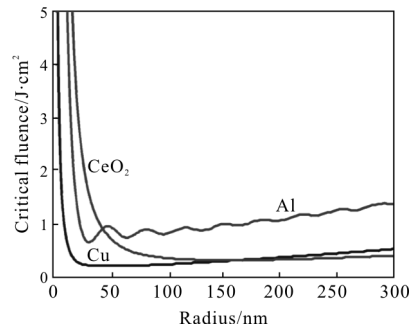


图 2 熔石英亚表面中临界能量密度随着杂质粒子半径的变化关系

Fig.2 Change of the critical fluence with the radius of impurities in the subsurface of fused silica

从图 2 可以看出, 对于较小的粒子, 随着粒子半径的增加, 诱导损伤所需的临界能量密度迅速下降, 这是由于在这段尺寸范围内的杂质粒子的吸收系数随尺寸增加而迅速增加(如图 1 所示)。然而对于较大的粒子, 随着粒子半径继续增加, 临界能量密度缓慢增加, 这是由于大粒子包含较多的质量, 而纳

秒脉冲作用时间太短不能将它们加热到较高的温度<sup>[17]</sup>。即对于不同种类的杂质粒子都存在一个临界半径,该尺寸的杂质粒子引起损伤所需要的激光能量密度最小。计算结果表明,Cu 粒子的临界半径相比 Al 粒子和 CeO<sub>2</sub> 粒子更小。

### 1.2 激光损伤概率

考虑上述杂质粒子诱导损伤的临界能量密度随着粒子尺寸的变化关系,结合杂质粒子尺寸分布规律,可以得到光学元件表面的损伤概率的统计规律。对于杂质粒子或团簇而言,幂指数的分布规律典型的存在于光学元件的亚表面<sup>[16]</sup>:

$$\rho(R) = \frac{(\gamma-1)n_0}{R_{\min}^{1-\gamma} - R_{\max}^{1-\gamma}} R^{-\gamma} \quad (9)$$

式中: $\gamma$ 为与粒子分布规律相关的常数; $n_0$ 为粒子数密度(单位面积内); $R$ 为粒子半径的范围, $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ 。当嵌入在光学元件亚表面的杂质粒子受到超过临界能量密度的辐射时,就会产生缺陷。临界能量密度是随着粒子尺寸的变化而变化的,结合杂质粒子的尺寸分布规律,即可将单位面积的缺陷密度表示为:

$$\int_0^{\infty} g(F_c) dF_c = n_0 \quad (10)$$

式中: $g(F_c)$ 表示当损伤的临界能量密度在  $F_c$  和  $F_c + dF_c$  时单位面积的缺陷密度。辐照光斑范围内产生的缺陷数量  $N(F)$  为:

$$N(F) = \int_0^F g(F_c) S_{F_c}(F) dF_c \quad (11)$$

式中: $S_{F_c}(F)$ 为激光能量密度  $F$  超过临界能量密度  $F_c$  的光斑面积, $S_{F_c}(F) = (\pi\omega_0^2/2) \ln(F/F_c)$ , $\omega_0$ 是光斑半径。激光损伤概率  $P(F)$  为杂质粒子位于超过其诱导损伤所需临界能量密度的辐照面积内的概率<sup>[14]</sup>:

$$P(F) = 1 - \exp[-N(F)] \quad (12)$$

在实验的激光能量密度变化范围内,通过计算临界能量密度随着粒子尺寸的变化关系可以得到诱导损伤的粒子尺寸的下限  $R_{\min}$ <sup>[20]</sup>。粒子尺寸的上限  $R_{\max}$  对于计算结果的影响很小<sup>[16]</sup>,所以为了方便计算,对于不同种类的杂质粒子均选取 30 nm 的粒子尺寸上限。考虑不同的粒子分布参数  $\gamma$  和  $n_0$ ,就可以计算得到杂质粒子诱导光学元件表面的损伤概率。

图 3 表示选择不同的粒子分布参数以及辐照光斑半径为 200  $\mu\text{m}$  计算所得到的 CeO<sub>2</sub> 粒子诱导熔石英表面的激光损伤概率曲线。从计算结果可以看出,对于相同的粒子分布规律参数  $\gamma$ ,粒子数密度  $n_0$  越大,损伤概率越大,这是由于单位面积的粒子数密度  $n_0$  越大,在激光辐照光斑面积内能够引起缺陷产生的粒子数也就越多,因而损伤概率也就越大;对于相同的粒子数密度  $n_0$ ,粒子分布规律参数  $\gamma$  越大,损伤概率越小,这是由于粒子分布规律参数  $\gamma$  越大,单位面积内小尺寸的粒子数也就越多,因为这些小尺寸的粒子需要更大的激光能量密度才能引起光学元件的损伤(如图 2 所示),所以损伤概率也就越小。

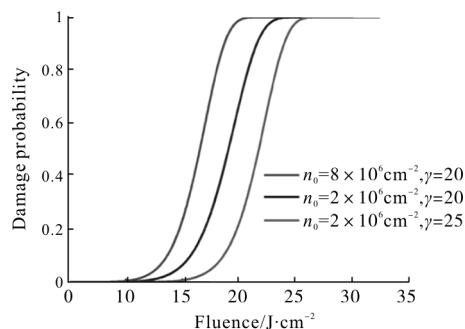


图 3 CeO<sub>2</sub> 粒子诱导的熔石英表面的损伤概率

Fig.3 Laser damage probability calculated for the surface of fused silica containing CeO<sub>2</sub> inclusions

## 2 实验和分析

图 4 为激光损伤测试的实验装置。激光系统输出波长为 355 nm,脉宽为 10 ns (1/e) 的基模高斯光束,采用氦氖激光器监测损伤测试的过程,光电二极管用于测量实时的脉冲形貌,能量探测器(PE25)用于探测激光的能量。通过调节衰减片套装以微调激光的能量。连接有光学系统的 CCD 相机用于分析光

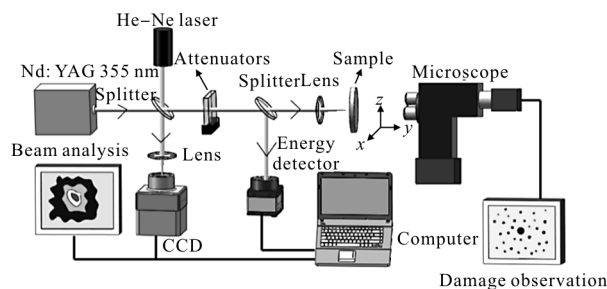


图 4 损伤测试的实验装置图

Fig.4 Experimental setup for laser induced damage test

斑形貌。样品被放置在电脑控制的三维移动平台上。光学显微镜被放在样品后用于实时地观察样品的损伤。为了验证理论模型中辐照光斑半径对损伤概率的影响,实验中分别采用聚焦光斑半径为  $200\ \mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ) 和  $550\ \mu\text{m}$  ( $1/e^2$ ) 的激光光束辐照样品。

采用 1-on-1 的损伤测试模式,在  $4\sim 20\ \text{J}/\text{cm}^2$  激光能量密度的变化范围下,计数每一能量密度下在 50 个不同区域的损伤点的数目,可以得到损伤概率曲线。为了获得熔石英亚表面层杂质的成分,采用 ICP-OES 测量了熔石英亚表面主要杂质的种类和含量。实验中选用氧化铈抛光的熔石英样品(Corning HPFS 7980),其尺寸为  $35\ \text{mm}\times 35\ \text{mm}\times 3\ \text{mm}$ 。经过精确的称量和厚度测量,在 7 min 时间内厚度大约为  $1\ \mu\text{m}$ ,质量为  $0.0218\ \text{g}$  的熔石英被溶解在 35 mL 高纯度的 HF 溶液中。待样品完全溶解后,蒸发尽氢氟酸并将蒸干后的样品稀释定容为 25 mL 作为待测液。取等量的氢氟酸溶液作为空白对照,并将空白溶液做同样处理以排除溶解液引入的杂质对光谱分析结果的影响。最后将定容后的溶液进行光谱分析获得熔石英亚表面杂质粒子的种类和含量。由于测量得到的 Ce 元素存在于  $\text{CeO}_2$  中,可以计算得到  $\text{CeO}_2$  的含量。表 2 给出了测量主要杂质粒子的含量。

表2 熔石英亚表面层主要内含物的含量 (单位:  $\mu\text{g}/\text{g}$ )

Tab.2 Contents of main impurities from subsurface layer of fused silica (Unit:  $\mu\text{g}/\text{g}$ )

$\text{CeO}_2$	Cu	Al	Fe	Cr
25.2	17.6	20.1	0.03	0.007

从表2 中可以看出,该样品中 Al、Cu 和  $\text{CeO}_2$  杂质粒子的含量相比 Fe 和 Cr 杂质粒子高很多,因此在计算中仅考虑 Al、Cu 和  $\text{CeO}_2$  杂质粒子对损伤概率的影响。由于杂质粒子在熔石英表面分布的不均匀性,单位面积的粒子数密度  $n_0$  很难通过实验测量得到。为了分析不同种类的杂质粒子对损伤概率的影响,可以设定相同的粒子分布参数计算不同种类的杂质粒子诱导的损伤概率。

图 5 表示在两种不同光斑尺寸( $200\ \mu\text{m}$  和  $550\ \mu\text{m}$ ) 的  $355\ \text{nm}$  激光辐照下实验测量的损伤概率曲线和设置参数  $n_0=2\times 10^6\ \text{cm}^{-2}$  和  $\gamma=25$  计算得到的 Al、Cu 和  $\text{CeO}_2$  杂质粒子诱导的损伤概率曲线。图 5 的实验结

果表明,辐照光斑半径越大,在辐照光斑面积内造成缺陷产生的粒子数越多,因而损伤概率也就越大且损伤阈值更低。从计算结果可以看出,在相同的粒子分布参数下,Cu 粒子对损伤概率的贡献最大,其次是 Al 粒子,对损伤概率贡献最小的是  $\text{CeO}_2$  粒子。因此在熔石英光学元件加工过程中应尽量避免 Cu 杂质粒子的引入,以提高光学元件表面的抗损伤能力。

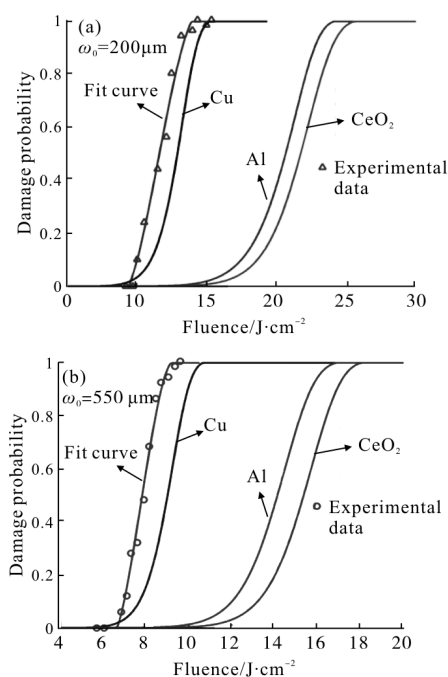


图 5 熔石英表面的损伤概率的实验数据与杂质粒子诱导的损伤概率计算曲线

Fig.5 Experimental curves of laser damage probability and calculation curves induced by various impurities in subsurface of fused silica

### 3 结论

文中详细描述了计算熔石英表面激光损伤概率的理论模型。选择不同的粒子尺寸分布参数  $n_0$  和  $\gamma$ , 计算了在  $355\ \text{nm}$  激光辐照下包含  $\text{CeO}_2$  粒子的熔石英表面的损伤概率,结果表明,熔石英表面的损伤概率随着粒子数密度  $n_0$  的增大而增大,而随着粒子分布规律参数  $\gamma$  增大而减小。选择两种不同辐照光斑尺寸的  $355\ \text{nm}$  激光,测量获得了损伤概率曲线,实验结果表明光斑半径越大,损伤概率越大。在这两种辐照光斑作用条件下,选择相同的粒子分布参数计算了包含 Al、Cu 和  $\text{CeO}_2$  杂质粒子诱导的熔石英表

面的损伤概率。将计算结果与实验结果相比较可以看出,在相同的粒子分布参数下,Cu 粒子对损伤概率的贡献最大,其次是 Al 粒子,对损伤概率贡献最小的是 CeO<sub>2</sub> 粒子。通过该模型能够分析不同潜在的吸收性粒子对损伤概率的影响,为改进光学元件表面的加工技术提供指导,以提高光学基底或者薄膜表面的抗损伤能力。

#### 参考文献:

- [1] Miller P, Bude J, Suratwala T, et al. Fracture-induced subbandgap absorption as a precursor to optical damage on fused silica surfaces [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(16): 2702-2704.
- [2] Han Jinghua, Feng Guoying, Yang Liming, et al. Laser induced damage morphology of K9 glass with nanosecond pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 37-41. (in Chinese)  
韩敬华, 冯国英, 杨李茗, 等. 纳秒激光诱导 K9 玻璃损伤形貌研究[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 37-41.
- [3] Manenkov A A. Fundamental mechanisms of laser-induced damage in optical materials: today's state of understanding and problems[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(1): 010901.
- [4] Huang J, Zhou X, Liu H, et al. Influence of subsurface defects on damage performance of fused silica in ultraviolet laser[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(2): 024203.
- [5] Hopper R, Uhlmann D. Mechanism of inclusion damage in laser glass [J]. *Journal of Applied Physics*, 1970, 41(10): 4023-4037.
- [6] Huang C H, Sun X H, Sun Y H. The temperature field caused by sphere inclusion in dielectric irradiated by single pulse laser[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 423(6): 448-451.
- [7] Liu H J, Huang J, Wang F R, et al. Subsurface defects of fused silica optics and laser induced damage at 351 nm[J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 12204-12217.
- [8] Pu Yunti, Wang Gang, Qiao Zhao, et al. Damage mechanisms of optical glass with gold nano-defects under laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3229-3233. (in Chinese)  
蒲云体, 王刚, 乔翌, 等. 激光辐照下金纳米缺陷诱导光学玻璃损伤特性[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3229-3233.
- [9] Gallais L, Voarino P, Amra C. Optical measurement of size and complex index of laser-damage precursors: the inverse problem [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2004, 21(5): 1073-1080.
- [10] Liu H J, Ye X, Zhou X, et al. Subsurface defects characterization and laser damage performance of fused silica optics during HF-etched process[J]. *Optical Materials*, 2014, 36(5): 855-860.
- [11] Zhai Lingling, Feng Guoying, Gao Xiang, et al. Mechanism of laser damage induced by inclusions in fused silica [J]. *High Power Laser Particle Beams*, 2013, 25(11): 2836-2840. (in Chinese)  
翟玲玲, 冯国英, 高翔, 等. 杂质诱导熔石英激光的损伤机理[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(11): 2836-2840.
- [12] Natoli J Y, Gallais L, Akhouayri H, et al. Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(16): 3156-3166.
- [13] Krol H, Gallais L, Grezes B C, et al. Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing [J]. *Optics Communications*, 2005, 256(3): 184-189.
- [14] Gallais L, Capoulade J, Natoli J Y, et al. Investigation of nanodefekt properties in optical coatings by coupling measured and simulated laser damage statistics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(5): 0531201-0531209.
- [15] Gao X, Feng G Y, Han J H, et al. Investigation of laser-induced damage by various initiators on the subsurface of fused silica[J]. *Optics Express*, 2012, 20(20): 22095-22101.
- [16] Trenholme J B, Feit M D, Rubenchik A M. Size-selection initiation model extended to include shape and random factors[C]//SPIE, 2005, 5991: 599100-599112.
- [17] Weber M J. Handbook of Optical Materials [M]. Florida: CRC Press, 2002.
- [18] Hulst H C. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Wiley Press, 1957.
- [19] Carr C W, Bude J D, DeMange P. Laser-supported solid-state absorption fronts in silica[J]. *Physical Review B*, 2010, 82(18): 1843041-1843047.
- [20] Feit M D, Rubenchik A M. Implications of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulselength scaling, and laser conditioning[C]//SPIE, 2004, 5273: 74-82.