

表面杂质诱导薄膜元件的热损伤及其统计特性分析

徐娇**, 钟哲强, 黄人帅, 张彬*

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610065

摘要 基于光学薄膜元件的热力学理论,建立了强激光连续辐照下薄膜元件的热分析模型,分析了强激光辐照下不同种类的表面杂质诱导薄膜元件的热熔融损伤和热应力损伤的过程。统计了不同口径和不同表面洁净度等级的薄膜元件上可诱导薄膜元件热损伤的杂质数量,定量分析了杂质诱导薄膜元件热损伤的总面积,计算了薄膜元件上热损伤的面积超过总面积的3%时所需的曝露时间。研究表明,在强激光连续辐照下,尺寸处于一定范围内的杂质会诱导薄膜元件的热熔融损伤和热应力损伤,热损伤的方式与杂质类型密切相关。薄膜元件的口径越大、表面洁净度等级越高,处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质数量越多。单个杂质诱导薄膜元件热应力损伤的损伤点面积比热熔融损伤的更大。

关键词 薄膜; 激光器; 表面杂质; 薄膜元件; 热损伤; 统计特性

中图分类号 O484; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.103101

Thermal Damages on Thin-Film Components Induced by Surface Impurities and Its Statistic Characteristics

Xu Jiao**, Zhong Zheqiang, Huang Renshuai, Zhang Bin*

College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China

Abstract Based on the thermodynamic theory of the optical thin-film components, the thermal analysis model of thin-film components irradiated continuously by a high-power laser is established and the processes of the melting damage and the thermal stress damage induced by different kinds of surface impurities are analyzed. The statistic number of impurities inducing thermal damages on thin-film components with different sizes and different surface cleanliness levels is shown and the total thermal damage area of thin-film components induced by impurities is analyzed quantitatively. The exposure time when the thermal damage area of thin-film components exceeds 3% of the total area is calculated as well. The research results show that, under the high-power laser continuous irradiation, the melting damage and the thermal stress damage on thin-film components can be induced by impurities with sizes within a certain range. The damage way is closely related to the impurity type. The larger the aperture and the higher the cleanliness level of thin-film components, the larger the number of impurities with sizes within a certain range where the thermal damages on thin-film components can be induced. Furthermore, the damage point area of the thermal stress damage induced by a single impurity is larger than that of the melting damage.

Key words thin films; lasers; surface impurities; thin-film components; thermal damage; statistic characteristics

OCIS codes 310.6860; 310.6870; 310.6845; 140.3460; 140.3330

1 引言

随着光学薄膜技术的不断发展,光学薄膜元件已被广泛应用于光电子技术领域,成为高性能激光器、光学望远镜等仪器的关键部件之一。在实际应

用中,曝露在外界环境中的光学薄膜元件通常会受到大气降尘等杂质粒子的污染。元件表面的污染物极易引起元件表面损伤^[1],影响光学薄膜元件的使用性能。当强激光辐照存在表面杂质污染的光学薄膜元件时,杂质的吸收率远大于薄膜元件的。杂质

收稿日期: 2018-05-04; **修回日期:** 2018-05-06; **录用日期:** 2018-05-09

基金项目: 科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)、天津市薄膜光学重点实验室开放基金课题(KJWX170620)

* **E-mail:** zhangbinff@sohu.com; ** **E-mail:** Xu_jiao@163.com

对强激光的吸收将在薄膜表面形成局部高温,产生非均匀的温度梯度,在膜层中产生热应力。若薄膜的温度超过其熔点或膜层中的热应力超过其应力损伤阈值,薄膜元件将会发生热熔融损伤或热应力损伤。当光学薄膜元件上存在由杂质造成的损伤点时,损伤点将会遮挡薄膜元件的可用面积,影响薄膜元件的使用性能。

研究人员针对激光辐照下表面杂质诱导薄膜元件的热损伤进行了大量研究。Walker 等^[2-3]从理论和实验上研究了杂质诱导光学元件的热损伤问题。Génin 等^[4]研究了激光作用下光学元件的表面颗粒污染物诱导元件损伤的主要机理及损伤规律,并分析了光学元件热损伤的损伤阈值。张龙霞等^[5]分析了材料表面缺陷对激光热损伤阈值的影响规律。曾耀等^[6]基于有限元方法,模拟计算了激光辐射下杂质及薄膜元件的温度场和应力场分布,但只讨论了单一杂质对薄膜元件的影响,未结合薄膜元件的应用环境分析多种杂质对薄膜元件的影响。杨芳芳等^[7]采用有限元方法仿真了强激光辐照下杂质的吸收对薄膜温度场分布的影响,但其所用的热分析模型未具体考虑杂质与薄膜元件的热传递方式及过程。郝明明等^[8]研究了杂质诱导磷锗锌晶体光学薄膜热损伤的机理,分析了杂质颗粒的半径与损伤阈值间的关系,但未分析不同表面洁净度等级下不同种类的杂质对薄膜元件热损伤的影响。为了能有效提高薄膜元件的使用性能并预判薄膜元件的有效使用期限,分析不同种类的杂质在不同表面洁净度等级下对薄膜元件热损伤的影响具有重要的研究意义。

本文基于光学薄膜元件的热力学理论,建立了强激光连续辐照下薄膜元件的热分析模型,分析了空气中沉降在光学元件表面的主要杂质类型,并模拟了不同种类的杂质吸收激光能量后以不同的热传递方式向薄膜元件传递热量的过程,研究比较了不同种类的表面杂质诱导薄膜元件热熔融损伤和热应力损伤的尺寸范围。统计分析了不同口径和不同表面洁净度等级的薄膜元件上处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质粒子数量,研究了杂质诱导薄膜元件热熔融损伤和热应力损伤的损伤点的面积,并定量分析了杂质诱导薄膜元件热损伤的总面积。在此基础上,进一步将光学元件的表面洁净度等级和空气洁净度等级相关联,得出不同空气洁净度等级下光学元件的工作面洁净度与曝露时间之间的关系。在实际应用中,当已知元件的表面洁净度等级时,可计算出在某一空气洁净度等级下薄膜元

件在空气中允许曝露的天数,以预判薄膜元件的有效使用期限。

2 物理模型

2.1 洁净度模型

被粒子污染的薄膜元件表面的洁净度常用美国红石兵工厂在 1992 年制定的 MIL-STD-1246C 标准来衡量。元件表面洁净度等级用单位面积上分布的最大粒子的微米尺寸来衡量,元件表面的粒子尺寸分布满足关系^[9]

$$\lg M = C[(\lg a)^2 - (\lg i)^2], \quad (1)$$

式中 i 为粒子的尺寸(μm); a 为元件表面洁净度等级; M 为元件表面每平方英尺上(约 929.0304 cm^2 , 全文同)尺寸大于或等于 i 的粒子数目; C 为归一化常数,在 MIL-STD-1246C 标准下 C 等于 0.926。

空气洁净度等级可根据美国联邦标准(FED-STD-209E)^[10]的定义,由低到高划分为 10 级、100 级、1000 级、10000 级等多个等级,等级越高表明空气质量越差。10 级表示空气几乎没有受到任何污染,百万级表示空气污染严重。当光学元件放置在外界环境中时,沉积在元件表面的污染粒子数目与空气洁净度等级有关。以光学元件工作面水平向上放置为例,元件表面洁净度与空气洁净度的函数关系^[10]为

$$\lg(0.02r\rho N_c^{0.773}t) = C[(\lg a)^2 - (\lg b)^2] + \lg\left(\frac{\lg a}{\lg b}\right), \quad (2)$$

式中 r 、 ρ 为两个归一化常量, r 等于 1, ρ 在普通洁净室的取值为 2851; t 为光学元件曝露在空气中的时间,单位为天(d); b 为每立方英尺空气中最小尺寸粒子的粒径,单位为 μm ; N_c 为空气洁净度等级。

光学元件上的污染粒子数量与其放置方向有关^[10]。当光学元件垂直放置时,垂直表面上附着的污染微粒数量约为水平向上放置时的 10%;当元件工作面水平向下放置时,附着的污染微粒数量约为水平向上放置时的 1%。即在相同的曝露时间和空气洁净度等级下,光学元件水平向上放置时污染程度最严重,垂直放置次之,水平向下的污染程度最低。

2.2 热分析模型

利用 ANSYS 有限元分析软件模拟光学薄膜元件的热分析问题,在计算中根据实际情况设定相应的边界条件。材料温度的变化引起薄膜热应力的改变,在应力低于比例极限的情况下,固体中的应力与

应变成正比,满足广义 Hooke 定律^[11]。由于光学薄膜元件为三维实体结构,在后续处理时选择 von Mises 等效应力来表征薄膜元件的受力情况^[12]。膜系以 ZnS/YbF₃ 高反射膜系为例,其膜系结构为

Sub/(LH)⁸/Air,其中 Sub 为 Si,H 为 ZnS,L 为 YbF₃。杂质模型以小球模型^[7]为例,杂质颗粒附着在薄膜元件的表面,图 1 所示为表面杂质及光学薄膜元件的几何模型。

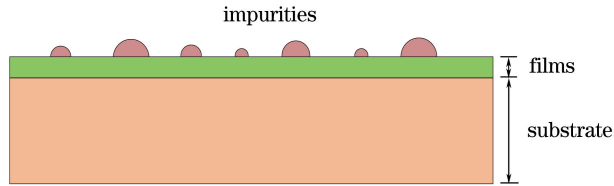


图 1 表面杂质及光学薄膜元件的几何模型

Fig. 1 Geometric models of surface impurities and optical thin-film components

3 数值模拟和分析

当光学元件放置在外界环境中时,大气中的杂质粒子落在光学元件的表面形成大气降尘,降尘的存在会影响元件的使用性能。大气降尘是大气中粒径大于 10 μm 的杂质粒子因重力和雨水的冲刷作用沉降到地面的大气颗粒物。降尘尘源主要为表土

尘、路尘、建筑尘、煤尘,降尘的成分主要有 SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、CaO 等杂质粒子,其质量分数分别为 48.46%,13.62%,6.40%,5.84%^[13]。大气降尘中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 杂质粒子最多,其他种类的杂质粒子相对较少。因此,以 SiO₂ 和 Al₂O₃ 为例,对光学元件在大气中的热损伤及其统计特性进行分析,膜系材料和杂质的热物理参数见表 1^[12,14]。

表 1 膜系和杂质的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of films and impurities

Material	Density / (kg·m ⁻³)	Specific heat / [J·(kg·K) ⁻¹]	Heat conductivity / [W·(m·K) ⁻¹]	Coefficient of thermal expansion / (10 ⁻⁷ K ⁻¹)	Young modulus /GPa	Poisson ratio
ZnS	4080	1927	0.19	71.0	74.50	0.29
YbF ₃	8150	361	0.051	189.0	75.79	0.28
Si	2329	733	173.6	41.5	130.91	0.266
SiO ₂	2100	787	3.53	5.8	73.10	0.17
Al ₂ O ₃	3990	765	34.1	59.0	372.00	0.26

3.1 不同种类的杂质诱导薄膜元件的热损伤

当激光辐照镀有高反射膜系的薄膜元件时,将在膜层内部形成驻波场。该驻波场主要存在于靠近空气层的几个膜层内,致使激光能量难以到达元件基底。由文献[12]可知,当激光辐照无表面杂质的薄膜元件时,考虑膜层内部驻波场影响的薄膜元件的温升和应力均较小。当薄膜元件上存在表面杂质时,杂质对激光能量的吸收远大于薄膜元件的吸收,杂质所在区域的温度剧烈升高^[15],引起的温升和应力较大。因此,当薄膜元件的表面存在杂质时,可忽略薄膜元件对激光能量的吸收。

假设入射激光的功率密度为 4000 W/cm²,激光波长为 1.06 μm,激光连续辐照时间为 30 s,元件初始温度为 20 °C。当激光波长为 1.06 μm 时,SiO₂ 和 Al₂O₃ 的吸收率分别为 0.04 和 0.03^[16]。在强激光连续辐照下,元件表面的降尘杂质会吸收大量的激光能量,积累热量。图 2 所示为强激光辐照时间

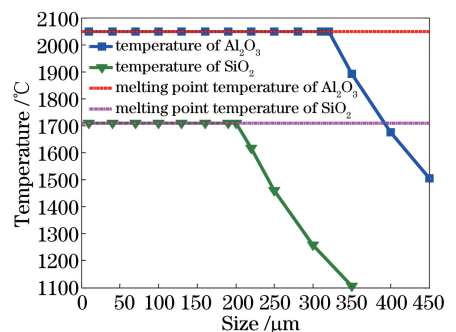


图 2 30 s 激光辐照后杂质的温度变化

Fig. 2 Temperature variation of impurities after laser irradiation for 30 s

30 s 内不同尺寸的杂质的温度变化。

SiO₂ 杂质和 Al₂O₃ 杂质的熔点温度分别为 1710 °C 和 2050 °C^[17-18]。由图 2 可知,在一定的激光辐照时间内,能达到熔点温度的杂质存在一定的尺寸范围,不同种类的杂质达到熔点温度的最大杂质的尺寸不同,Al₂O₃ 杂质能达到熔点温度的尺寸

范围比 SiO_2 杂质的更大。

当杂质吸收激光能量后,会将自身积累的热量以热传导和热辐射两种方式传递给周围薄膜,不同种类的杂质在不同尺寸下向周围薄膜传递热量的方

式不同。图 3(a)、(b)所示分别为在强激光辐照时间 30 s 内,尺寸为 $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质和 Al_2O_3 杂质将热量传递给周围薄膜后其薄膜上的温度分布的局部放大图,其中 XY 为坐标系。

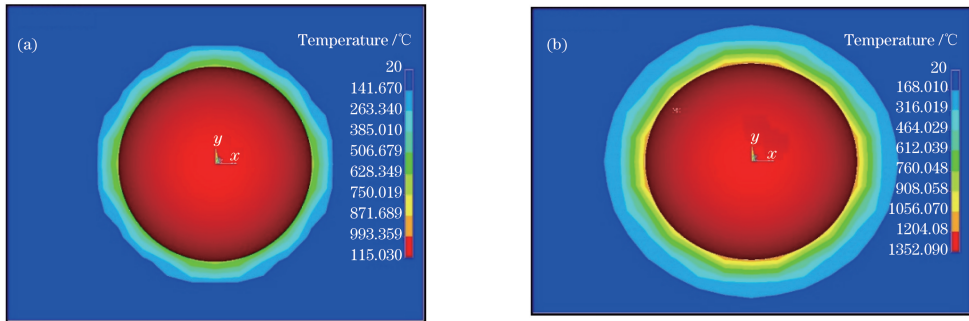


图 3 杂质周围薄膜的温度分布。(a) $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质;(b) $80\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 杂质

Fig. 3 Temperature distributions of films around impurities. (a) $80\ \mu\text{m}$ SiO_2 impurities; (b) $80\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 impurities

由图 3 可知, $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质和 Al_2O_3 杂质熔化时放出大量的热,导致周围薄膜的温度急剧升高,薄膜上产生非均匀的近似呈圆形对称分布的温度梯度。对比图 3(a)、(b)可知,强激光辐照下杂质将热量传递给周围薄膜元件后, Al_2O_3 杂质周围薄膜上的温度比 SiO_2 杂质的高,且 Al_2O_3 杂质周围薄膜上的最高温度($1204\ \text{°C}$)已超过 ZnS/YbF_3 薄膜的熔

点温度($1157\ \text{°C}$)^[19],会造成薄膜元件的热熔融损伤; SiO_2 杂质周围薄膜上的最高温度为 $750\ \text{°C}$,未达到薄膜的熔点温度,不会造成薄膜的熔融损伤。

杂质将热量传递给周围薄膜元件后,薄膜上产生非均匀的温度梯度,致使膜层中产生热应力。尺寸为 $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质和 Al_2O_3 杂质周围薄膜上的应力分布分别如图 4(a)、(b)所示。

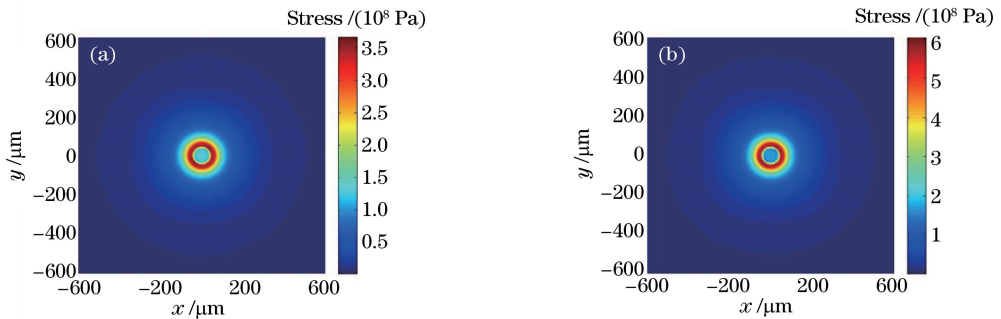


图 4 杂质周围薄膜的应力分布。(a) $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质;(b) $80\ \mu\text{m}$ 的 Al_2O_3 杂质

Fig. 4 Stress distributions of films around impurities. (a) $80\ \mu\text{m}$ SiO_2 impurities; (b) $80\ \mu\text{m}$ Al_2O_3 impurities

由图 4(a)、(b)可知,两种杂质周围的薄膜中均产生了较大的热应力,应力分布近似呈圆形对称分布,且 Al_2O_3 杂质周围薄膜上的应力比 SiO_2 杂质周围薄膜上的大。 $80\ \mu\text{m}$ 的 SiO_2 杂质周围薄膜的最大热应力($360\ \text{MPa}$)和 Al_2O_3 杂质周围薄膜上最大热应力($600\ \text{MPa}$)均已超过 ZnS/YbF_3 薄膜的热应力损伤阈值($100\ \text{MPa}$ 量级)^[20],说明两种杂质均会造成薄膜的热应力损伤。

张翠娟等^[21]模拟分析了连续激光辐照下含 Pt 杂质的多层膜滤光片的温升。苗心向等^[22]采用有限元分析方法,结合污染物诱导熔石英损伤机理,给出了熔石英样片在强激光辐照下的温度场和应力场分布。

为说明所提方法的有效性和正确性,利用所提的热分析模型在文献[21-22]给出的相关参数下复算了杂质周围材料的温升和应力。复算结果表明,材料在强激光辐照下会发生热熔融损伤和热应力损伤,与文献[21-22]中实验观察到的材料表面出现“熔坑”和裂纹的现象相一致,验证了所提方法的有效性。

薄膜元件吸收杂质传递的热量后温度会上升,局部温度的上升使材料的应力发生改变,热和力的相互作用导致材料发生熔融、碎裂等损伤^[23]。薄膜元件产生热损伤的方式与薄膜材料的热物理性质^[24]及杂质传递给薄膜元件的热量有关。当薄膜材料的熔点较高且力学性质较脆时,若杂质传递给

薄膜的热量较小不足以使其发生热熔融损伤,薄膜元件可能只有热应力损伤。元件表层的损伤会降低材料的强度和激光损伤阈值,影响光学元件的稳定

性和使用寿命^[25]。不同种类的杂质在不同尺寸下其周围薄膜上的最高温度和最大热应力分布分别如图5(a)、(b)所示。

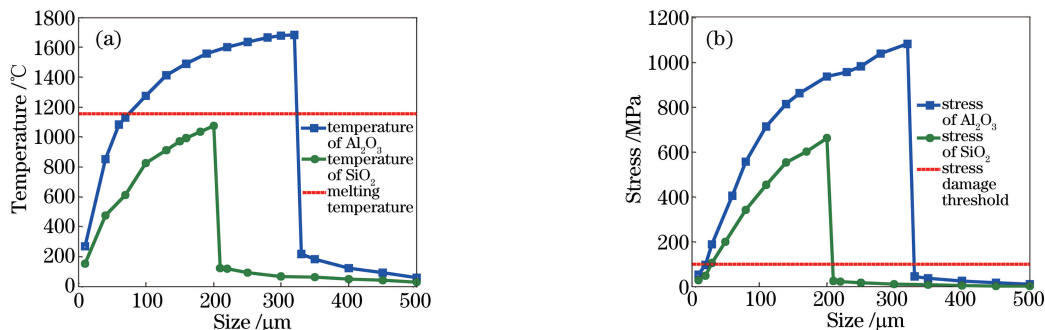


图5 不同尺寸杂质周围薄膜的最高温度与最大热应力分布。(a)最高温度;(b)最大热应力

Fig. 5 Maximum temperature and maximum thermal stress distributions of films around impurities with different sizes. (a) Maximum temperature; (b) maximum thermal stress

由图5(a)可知,当 Al_2O_3 杂质的尺寸处于 $70\sim 320\ \mu\text{m}$ 范围内时,其周围薄膜的温度会超过薄膜的熔点温度,造成薄膜的热熔融损伤; SiO_2 杂质周围薄膜的温度均未达到薄膜的熔点温度,不会造成薄膜元件的热熔融损伤。在相同的激光辐照条件下, Al_2O_3 杂质传递给薄膜元件的热量比 SiO_2 杂质的多,更易于诱导薄膜元件的热熔融损伤。由图5(b)可知,当 SiO_2 杂质的尺寸处于 $30\sim 200\ \mu\text{m}$ 范围内

或 Al_2O_3 杂质的尺寸处于 $20\sim 320\ \mu\text{m}$ 范围内时,均会造成薄膜元件的热应力损伤。

3.2 杂质诱导薄膜元件的热损伤及其统计特性分析

根据(1)式,不同口径的光学元件在不同表面洁净度等级下,两种杂质按各自比例沉降在光学元件表面时(SiO_2 杂质的质量分数为 78.06% , Al_2O_3 杂质的质量分数为 21.94%)处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质数量的计算结果见表2。

表2 处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质数量

Table 2 Number of impurities with sizes within a certain range where thermal damages of thin-film components can be induced

Size / (cm×cm)	300 level		500 level		750 level	
	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	SiO_2	Al_2O_3
10×10	3.85×10^2	1.02×10^3	4.45×10^3	1.18×10^4	3.61×10^4	9.54×10^4
30×30	3.47×10^3	9.15×10^3	4.01×10^4	1.06×10^5	3.25×10^5	8.58×10^5
50×50	9.63×10^3	2.54×10^4	1.11×10^5	2.94×10^5	9.03×10^5	2.38×10^6
70×70	1.89×10^4	4.98×10^4	2.18×10^5	5.76×10^5	1.77×10^6	4.67×10^6
300×300	3.47×10^5	9.15×10^5	4.01×10^6	1.06×10^7	3.25×10^7	8.58×10^7

由表2可知,在不同口径和不同表面洁净度等级的薄膜元件上,处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质数量不同。对比同一口径和同一表面洁净度等级下薄膜元件上的 SiO_2 杂质和 Al_2O_3 杂质可知, Al_2O_3 杂质的数量多于 SiO_2 杂质的数量。此外,元件的表面洁净度等级越高、口径越大,处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的杂质粒子数量越多。

在强激光辐照下,表面杂质诱导薄膜元件热损伤时,会在薄膜元件表面产生损伤点,一旦光学薄膜受到损伤,整个光学系统的性能会大大降低^[26],因此,及时发现损伤点并对损伤程度进行准确评估对改善光学元件的使用性能具有重要的意义。以杂质为中

心沿 x 方向上薄膜元件的热应力分布如图6所示。

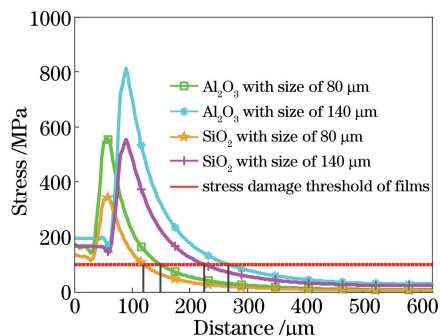


图6 以杂质为中心沿 x 方向的薄膜元件的应力分布

Fig. 6 Stress distributions along x direction and around impurities of thin-film components

由图 6 可知,距杂质中心不同距离处的薄膜元件的热应力分布不同;相同尺寸时 Al_2O_3 杂质周围薄膜的热应力大于 SiO_2 杂质周围薄膜的;杂质诱导薄膜热应力损伤的位置距离杂质的中心较远,热应力损伤点的面积较大。对于相同种类的杂质,杂质的尺寸越大,热应力损伤点的面积越大;相同尺寸时 Al_2O_3 杂质诱导薄膜元件热应力损伤的损伤点面积比 SiO_2 杂质的大。

Al_2O_3 杂质既会诱导薄膜元件热熔融损伤又会诱导薄膜元件热应力损伤,在两种损伤方式下,薄膜元件上损伤点的损伤面积不同。以 Al_2O_3 杂质为中心沿 x 方向上薄膜的温度分布如图 7 所示。

由图 7 可知,杂质尺寸越大,诱导薄膜热熔融损伤的范围越大,损伤点的面积也越大。进一步分析图 7 和图 6 可知,对于相同尺寸的 Al_2O_3 杂质,热应力损伤的损伤点的面积大于热熔融损伤的。

在强激光辐照下,薄膜元件表面损伤点的出现会使元件的挡光面积增大,可用面积减小。杂质诱导薄膜元件热损伤的损伤点的总面积为

$$S = \sum_{i=1}^n N_i \cdot S_i, \quad (3)$$

表 3 杂质诱导薄膜元件热损伤的总面积

Table 3 Total thermal damage areas of thin-film components induced by impurities

Aperture of thin-film component /cm	300 level	500 level	640 level	750 level
10	7.57×10^{-6}	8.76×10^{-5}	3.08×10^{-4}	7.17×10^{-4}
30	6.81×10^{-5}	7.87×10^{-4}	2.81×10^{-3}	6.40×10^{-3}
50	1.89×10^{-4}	2.18×10^{-3}	7.71×10^{-3}	1.77×10^{-2}
70	3.71×10^{-4}	4.27×10^{-3}	1.51×10^{-2}	3.48×10^{-2}
300	6.81×10^{-3}	7.89×10^{-2}	2.77×10^{-1}	6.39×10^{-1}

由文献[10]可知,元件表面洁净度等级越高,污染越严重,当表面洁净度等级为 300、500 和 750 时,对应的元件表面污染程度分别为轻度污染、中度污染和重度污染。由表 3 可知,薄膜元件的口径越大、表面洁净度等级越高,损伤面积越大。当光学元件上的损伤导致挡光面积达到 3% 时,该元件达到使用寿命^[27],元件需要修复或更换。当薄膜元件的表面洁净度等级为 640 时,杂质粒子诱导薄膜元件热损伤的总面积(挡光面积)超过了该元件面积的 3%,元件使用性能明显下降,需要修复或更换。

光学元件的表面洁净度等级与空气洁净度等级、元件放置方向及曝露时间密切相关。由(2)式可知,当已知元件的表面洁净度等级时,可计算出在某一空气洁净度等级下元件在空气中曝露的时间容限。在所采用的激光参数和模型下,当光学薄膜元

式中 N_i ($i=1,2,\dots,n$, n 为自然数) 为一定口径薄膜元件在某一表面洁净度等级下处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的粒径为 i 的杂质粒子数量; S_i ($i=1,2,\dots,n$) 为处于可诱导薄膜元件热损伤尺寸范围内的粒径为 i 的杂质周围薄膜上热损伤的损伤点的面积。

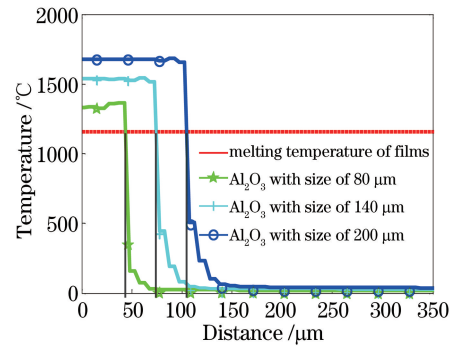


图 7 以杂质为中心沿 x 方向的薄膜元件的温度分布
Fig. 7 Temperature distributions along x direction and around impurities of thin-film components

在所采用的激光参数和模型下,计算出不同口径薄膜元件在不同表面洁净度等级下杂质诱导薄膜元件热损伤的总面积,结果见表 3。

件的表面洁净度等级为 640 时,元件需要修复或更换。图 8 所示为在不同的空气洁净度等级、不同的元件工作面放置方向下,光学元件表面洁净度等级

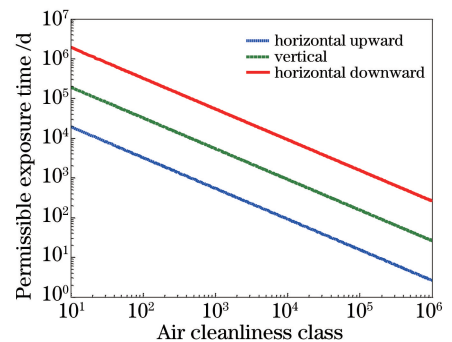


图 8 薄膜元件在空气中曝露时间的容限
Fig. 8 Exposure time tolerance of thin-film components in the air

达到 640 时元件在空气中的曝露时间。

由图 8 可知,空气的洁净度等级越高,污染越严重,元件允许的曝露天数越短,需要越早进行清洁和维护。光学元件水平向上放置时允许的曝露时间最短,垂直放置次之,水平向下允许的曝露时间最长。在实际应用中,可在达到允许曝露天数之前擦拭或清洁光学元件,对光学元件采取一定的防尘保护措施,延长其使用寿命。

4 结 论

当空气中的颗粒物沉降在光学元件的表面时,强激光作用下表面杂质粒子会诱导薄膜元件热损伤,影响光学薄膜元件的使用性能。为了提升薄膜元件的使用性能,模拟计算了表面杂质诱导薄膜元件热损伤的方式及其作用效果,统计分析了薄膜元件热损伤后的损伤面积。研究表明:1) 强激光连续辐照下,尺寸处于一定范围的表面杂质会诱导薄膜元件热应力损伤和热熔融损伤;2) 杂质种类不同,其诱导薄膜元件热损伤的方式也不同, SiO_2 杂质可诱导薄膜元件的热应力损伤, Al_2O_3 杂质可诱导薄膜元件的热应力损伤及热熔融损伤, Al_2O_3 杂质诱导薄膜元件热应力损伤的尺寸范围比 SiO_2 杂质的更广;3) 薄膜元件的口径越大、表面洁净度等级越高,元件表面杂质粒子的数目越多,且 Al_2O_3 杂质的数量多于 SiO_2 杂质的;4) 在杂质诱导薄膜元件热损伤时,单个杂质粒子诱导薄膜元件热应力损伤的损伤点面积比热熔融损伤的大;5) 当薄膜元件的表面洁净度等级为 640 时,元件上热损伤的总面积超过了该元件面积的 3%,元件需要修复或更换。

参 考 文 献

- [1] Miao X X, Yuan X D, Lü H B, *et al.* Experimental study of laser-induced damage of optical components surface owing to particle contamination in high power laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0602001.
苗心向,袁晓东,吕海兵,等.激光装置污染物诱导光学元件表面损伤实验研究[J].中国激光,2015,42(6): 0602001.
- [2] Walker T, Guenther A, Nielsen P. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings: Part II: Theory[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(10): 2053-2065.
- [3] Walker T, Guenther A, Nielsen P. Pulsed laser-induced damage to thin-film optical coatings: Part I: Experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1981, 17(10): 2041-2052.
- [4] Génin F Y, Feit M D, Kozłowski M R, *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.
- [5] Zhang L X, Zhu X B, Li F Y, *et al.* Laser-induced thermal damage influenced by surface defects of materials[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0914001.
张龙霞,朱晓冰,李风雨,等.材料表面缺陷对激光热损伤的影响[J].光学学报,2016,36(9): 0914001.
- [6] Zeng Y. Laser thermal damage research of thin films based on finite element method[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013.
曾耀.基于有限元方法的激光薄膜热损伤研究[D].西安:西安工业大学,2013.
- [7] Yang F F. Study on laser damage of optical thin film induced by inclusion absorption based on ANSYS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008.
杨芳芳.基于 ANSYS 的杂质诱导光学薄膜激光损伤的研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [8] Hao M M, Lu G G, Wang L N, *et al.* Study on laser damage of optical thin films on zinc-germanium diphosphide crystal induced by inclusion[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 0607001.
郝明明,路国光,汪丽娜,等.杂质诱导磷锗锌晶体光学薄膜激光损伤的研究[J].中国激光,2015,42(6): 0607001.
- [9] Spyak P R, Wolfe W L. Scatter from particulate-contaminated mirrors. Part 4: Properties of scatter from dust for visible to far-infrared wavelengths[J]. Optical Engineering, 1992, 31(8): 1775-1785.
- [10] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, *et al.* Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2864: 4-15.
- [11] Chen L X, Hu X C, Zhang B, *et al.* Fatigue damage characteristics of deformable mirrors for wavefront correction[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1105002.
陈丽霞,胡小川,张彬,等.波前校正变形镜的疲劳损伤特性[J].中国激光,2016,43(11): 1105002.
- [12] Xu J, Chen L X, You X H, *et al.* Thermal stress damage of thin-film components induced by surface impurities[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6):

0614003.
徐娇, 陈丽霞, 游兴海, 等. 表面杂质诱导薄膜元件的热应力损伤 [J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0614003.
- [13] Liu G T. Atmospheric dust fall and source analysis in Hohhot[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008.
刘广通. 呼和浩特市大气降尘及源分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2008.
- [14] Sheng X J. The simulation and experimental analysis of laser-controlled thermal stress cutting of alumina ceramic [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
盛晓军. 氧化铝陶瓷激光热应力切割数值仿真与实验分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [15] Wang H X, Shen L, Li C F, *et al.* Analysis and experimental investigation of laser induced damage of optics[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0302006.
王洪祥, 沈璐, 李成福, 等. 光学元件激光诱导损伤分析及实验研究 [J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0302006.
- [16] Tolochko N K, Khlopkov Y V, Mozzharov S E, *et al.* Absorptance of powder materials suitable for laser sintering[J]. Rapid Prototyping Journal, 2000, 6(3): 155-161.
- [17] Henley S J, Carey J D, Silva S R P. Pulsed-laser-induced nanoscale island formation in thin metal-on-oxide films[J]. Physical Review B, 2005, 72(19): 195408.
- [18] Weber M J. Handbook of optical materials[M]. Boca Raton: CRC press, 2002.
- [19] Huang W. Study on thin films technology for mid-far-infrared laser coatings[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005.
黄伟. 中远红外激光薄膜技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2005.
- [20] Chopra K L, Kaur I. Thin film phenomena [M]. New York: McGraw-Hill, 1969.
- [21] Zhang C J, Fu B, Zhang D Y, *et al.* Damage mechanisms of multiplayer films filters under continuous laser irradiation[J]. Applied Laser, 2009, 29(5): 431-434.
张翠娟, 付博, 张大勇, 等. 连续激光作用下滤光片熔坑形成机理研究 [J]. 应用激光, 2009, 29(5): 431-434.
- [22] Miao X X, Yuan X D, Cheng X F, *et al.* Thermal stress simulation of laser induced damage of fused silica by contamination on the surface[J]. Laser Technology, 2011, 35(2): 285-288.
苗心向, 袁晓东, 程晓锋, 等. 表面污染物诱导熔石英损伤的热力学数值模拟 [J]. 激光技术, 2011, 35(2): 285-288.
- [23] Chen L Z. The simulation and experimental research on laser induced damage of optical materials [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
陈力子. 光学材料激光诱导损伤的模拟与实验研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] Xia J J, Gong H, Cheng L, *et al.* CW laser induced thermal and mechanical damage in optical window materials[J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(1): 20-23.
夏晋军, 龚辉, 程雷, 等. 光学材料连续波激光热-力破坏效应 [J]. 光学学报, 1997, 17(1): 20-23.
- [25] Wang H D, Zhang T H. Research progresses on characterization and detection technology of subsurface damages in optical materials[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 100003.
王华东, 张泰华. 光学材料亚表面损伤的表征与检测技术的研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 100003.
- [26] Su J H, Lü N, Ge J M. Characteristics of plasma shock waves in laser-induced film damage[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(12): 1203003.
苏俊宏, 吕宁, 葛锦蔓. 激光薄膜损伤中等离子体冲击波特征 [J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1203003.
- [27] Hunt J S. National ignition facility performance review 1999 [R]. Lawrence Livermore National Laboratory, 2000: 15013275.