

# 表面杂质诱导薄膜元件的热应力损伤

徐 娇, 陈丽霞, 游兴海, 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 基于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,模拟了薄膜元件表面杂质吸热后向周围薄膜进行热传递的过程,并讨论了表面洁净度等级和杂质尺寸对薄膜元件热应力损伤的影响。研究表明:强激光连续辐照下,表面杂质会吸收激光能量产生较大的温升,激光辐照时间越长,功率密度越大,杂质的温升也越大;吸热后,达到熔点的杂质和未达到熔点的杂质分别通过热传导和热辐射的方式向周围薄膜传递热量,通过热传导作用在薄膜元件表面引起的温升明显高于热辐射作用引起的;杂质向周围薄膜传递热量后会在薄膜元件上产生非均匀的温度梯度,进而产生热应力,热应力随着温度梯度的增加而增大,且处于一定尺寸范围内的杂质,更容易诱导薄膜元件热应力损伤;此外,薄膜元件的表面洁净度等级越高,杂质粒子的数目越多,越易于造成薄膜元件的热应力损伤。

**关键词** 激光光学; 表面杂质; 薄膜元件; 热应力

**中图分类号** TN248; O484 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0614003

## Thermal Stress Damage of Thin-Film Components Induced by Surface Impurities

Xu Jiao, Chen Lixia, You Xinghai, Zhang Bin

*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*

**Abstract** Based on the thermodynamic theory of thin-film components, the thermal analysis model of thin-film components continuously radiated by high-power lasers is built up. On this basis, the heat transferring process of the thin-film components from impurities to their surrounding thin-film after the surface impurities absorbing heat is simulated, and the influences of surface cleanliness level and the impurity size on the thermal stress damage of the thin-film components are discussed. The results show that, under the continuous radiation of high-power lasers, the laser-energy-absorption of surface impurities gives rise to the relatively high increase of temperature. And the longer the laser irradiation time and the bigger the power density, the more the temperature of the impurities increases. After absorbing heat, the impurities with and without the reaching of melting points transfer heat to their surrounding thin film by the thermal-conduction and thermal-radiation ways, respectively. The temperature rise of the surface of thin-film components caused by thermal-conduction is obviously higher than that by thermal-radiation. Furthermore, the heat-transfer from impurities to surrounding thin-film results in a non-uniform temperature gradient, which further causes the thermal stress. The thermal stress increases with the increase of the temperature gradient, and the thermal stress damage is more likely to happen if the surface impurities localize within a certain range. In addition, the higher the surface cleanliness level of thin-film components and the more the number of impurities, the more easily the thin-film components are damaged.

**Key words** laser optics; surface impurities; thin-film components; thermal stress

**OCIS codes** 140.3460; 140.3330; 310.6860; 310.6870

收稿日期: 2017-01-17; 收到修改稿日期: 2017-03-02

基金项目: 苏州大学省级重点实验室开放课题(KSJ1404)、科技部创新人才推进计划重点领域创新团队(2014RA4051)

作者简介: 徐 娇(1991—),女,硕士研究生,主要从事光学薄膜元件的损伤、杂质粒子污染方面的研究。

E-mail: Xu\_jiao@163.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,主要从事高功率激光技术、光束传输变换与控制、非线性光学等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

## 1 引 言

在实际应用中,光学薄膜元件的表面通常会受到应用环境中灰尘等杂质粒子的污染。当激光辐照有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吸收率,可在薄膜表面形成局部高温,并产生非均匀的温度梯度,进而在膜层中产生热应力;若膜层中的热应力超过其损伤阈值,则薄膜元件会发生断裂损伤<sup>[1]</sup>,最终影响薄膜元件的性能。

目前,已有不少文献针对强激光辐照下表面杂质诱导薄膜元件的损伤进行了研究:Hoper等<sup>[2]</sup>建立了杂质诱导元件激光损伤的模型,并分析了杂质引起元件损伤的机理;Bonneau等<sup>[3]</sup>对杂质引起的薄膜损伤破坏过程进行了数值模拟;杨芳芳<sup>[4]</sup>用有限元方法仿真了激光辐射下杂质的吸收对薄膜的温度场分布的影响,但未具体分析杂质与薄膜元件之间的热传递方式及其过程;苗心向等<sup>[5]</sup>基于有限元数值方法,结合污染物诱导熔石英损伤机理,给出了熔石英样片在高功率脉冲激光辐照下的温度场和应力场分布,但并未考虑到不同洁净度等级下表面污染对薄膜元件的影响。

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。采用ANSYS软件计算了不同尺寸的表面杂质在不同激光辐照时间和不同功率密度下吸收激光能量而产生的温升,以及杂质传递热量给光学薄膜元件后所引起的薄膜元件的温度变化及热应力分布。通过详细分析杂质吸热后与薄膜元件的热传递过程,比较了不同的热传递方式对薄膜元件温升及热应力的影响。在此基础上,探讨了薄膜元件在不同表面洁净度等级下不同尺寸的杂质对薄膜元件热应力损伤的特性。

## 2 理论分析

### 2.1 热分析模型

针对光学薄膜元件的热分析问题,本文采用ANSYS有限元分析软件,根据实际情况设定相应的边界条件,采用等效热源的方式来模拟材料对激光能量的吸收。在热源的等效过程中,如果忽略膜层的影响,只考虑杂质对激光能量的吸收,其热源可采用在元件表面加载面热流的方式:

$$Q(x, y) = AI(x, y), \quad (1)$$

式中  $A$  为膜系的总吸收率,  $I(x, y)$  为入射激光的光强分布,  $Q$  为材料吸收的能量。

当考虑膜层的影响时,膜层中任一位置处单位时间、单位体积内沉积的激光能量即为膜系所吸收的能量,在ANSYS中可据此对每一个膜层建立相应的热源<sup>[6]</sup>,即

$$Q_n(x, y) = \frac{d[I(x, y)A_n]}{dz}, \quad (2)$$

式中  $A_n$  为每一层膜的吸收率,  $Q_n$  为每一层膜吸收的能量。

表面杂质吸收热量后,会通过热传导和热辐射两种热传递方式<sup>[7]</sup>向外传递热能。

热传导可定义为完全接触的两个物体之间或一个物体的不同部分之间由于温度梯度而引起的内能交换,遵循傅里叶定律:

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (3)$$

式中  $q$  为热流密度,  $k$  为导热系数,  $\partial T / \partial n$  为温度梯度,负号表示热量流向温度较低的方向。

热辐射是指物体发射电磁能,并被其他物体吸收而转变为热能的热量交换过程。在工程应用中,通常考虑两个或两个以上物体之间的辐射,而系统中每个物体将同时辐射并吸收热量。物体之间的净热量传递可用斯蒂芬-玻尔兹曼方程来计算:

$$Q_0 = \epsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4), \quad (4)$$

式中  $Q_0$  为热流率;  $\epsilon$  为吸收率;  $\sigma$  为斯蒂芬-玻尔兹曼常数,约为  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $A_1$  为辐射面 1 的面积;  $F_{12}$  为由辐射面 1 到辐射面 2 的形状系数;  $T_1$  为辐射面 1 的绝对温度;  $T_2$  为辐射面 2 的绝对温度。

物体因温度变化而引起的附加应力称为热应力,而热应变则是用来描述物体在受力时任意部位变形的物理量。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<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_x = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_x - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_y = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_y - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_z = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_z - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \tau_{xy} = 2G\epsilon_{xy}, \tau_{yz} = 2G\epsilon_{yz}, \tau_{xz} = 2G\epsilon_{xz} \end{cases}, \quad (5)$$

式中  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  为正应力,  $T$  为绝对温度,  $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  为对应的正应变,  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  为切应力,  $\epsilon_{xy}, \epsilon_{yz}, \epsilon_{xz}$  为对应的切应变,  $\zeta = E\mu / [(1 + \mu)(1 - 2\mu)]$ ,  $G = E / [2(1 + \mu)]$ ,  $\alpha$  为膨胀系数,  $G$  为剪切弹性模量,  $\mu$  为泊松比,  $E$  为杨氏模量。光学薄膜元件为三维实体结构, 在后续处理时可选择 von Mises 等效应力来表征薄膜元件的受力情况<sup>[8]</sup>。

## 2.2 仿真模型

灰尘是一种混合物, 其成分可能有金属、木屑、纤维、SiO<sub>2</sub> 或硒的氧化物等。表面杂质污染定义为暴露在外界环境中物体表面沉积的微米量级的可见粒子或粒子聚合物<sup>[9]</sup>。本文以 SiO<sub>2</sub> 小球模型<sup>[4]</sup>杂质为例, 讨论薄膜表面不同尺寸的杂质对薄膜性能的影响。在多层介质薄膜中, 针对不同的膜系, 存在相应的最佳膜对数, 本文以 ZnS/YbF<sub>3</sub> 高反射膜系为例, 膜系结构: Sub/(LH)<sup>8</sup>/Air (Sub 为 Si, H 为 ZnS, L 为 YbF<sub>3</sub>)。基底厚度为 2 cm, 薄膜元件口径为 10 cm。膜系和杂质的热物理参数<sup>[10-11]</sup>见表 1。图 1(a) 为存在表面杂质的光学薄膜元件几何模型, 图 1(b) 为局部薄膜元件的 ANSYS 有限元模型。

表 1 膜系和杂质热物理参数

Table 1 Thermo-physical parameters of film components and impurities

Material	Density / (kg · m <sup>-3</sup> )	Specific heat / [J · (kg · K) <sup>-1</sup> ]	Heat conductivity / [W · (m · K) <sup>-1</sup> ]	Coefficient of thermal expansion /K <sup>-1</sup>	Young modulus /GPa	Poisson ratio
ZnS	4080	1927	0.19	7.10 × 10 <sup>-6</sup>	74.50	0.29
YbF <sub>3</sub>	8150	361	0.051	1.89 × 10 <sup>-5</sup>	75.79	0.28
Si	2329	733	173.6	4.15 × 10 <sup>-6</sup>	130.91	0.266
SiO <sub>2</sub>	2100	787	3.53	5.80 × 10 <sup>-7</sup>	73.10	0.17

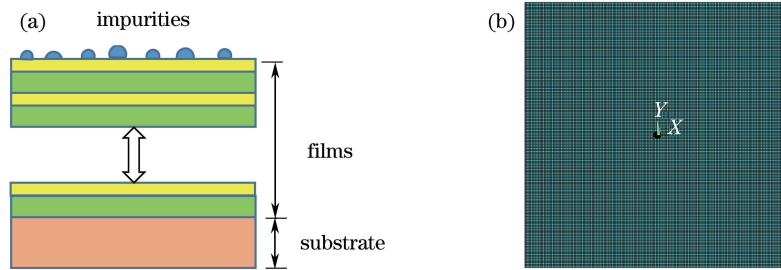


图 1 薄膜元件仿真模型。(a)几何模型; (b)有限元模型

Fig. 1 Simulation model of thin-film components. (a) Geometric model; (b) finite-element model

## 3 强激光辐照下光学薄膜元件的热分析

### 3.1 理想薄膜元件的温升与热应力

激光入射到无表面杂质的理想光学薄膜元件表面时, 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, 从而致使反射薄膜元件内部激光能量难以到达基底<sup>[10]</sup>。因此, 在连续激光辐照光学元件时, 只考虑膜层对激光的吸收, 而忽略基底的吸收。假设入射激光功率密度为 3000 W/cm<sup>2</sup>, 激光连续辐照时间为 30 s, 元件初始温度为 20 °C。图 2(a) 为激光辐照下理想薄膜元件表面的温度分布, 图 2(b) 为理想薄膜元件表面的 von Mises<sup>[8]</sup>等效应力图。

由图 2(a) 可知, 激光辐照 30 s 后, 理想光学薄膜元件表面的中心温度较边缘温度高, 但总体上光学薄膜元件表面的温度变化较小, 其最高温升约为 3.89 °C。由图 2(b) 可知, 薄膜元件中心处等效应力最大, 约为 2.44 MPa, 且其应力从中心到边缘逐渐减小。对比图 2(a)、(b) 可以看出, 应力分布与薄膜表面的温度分布

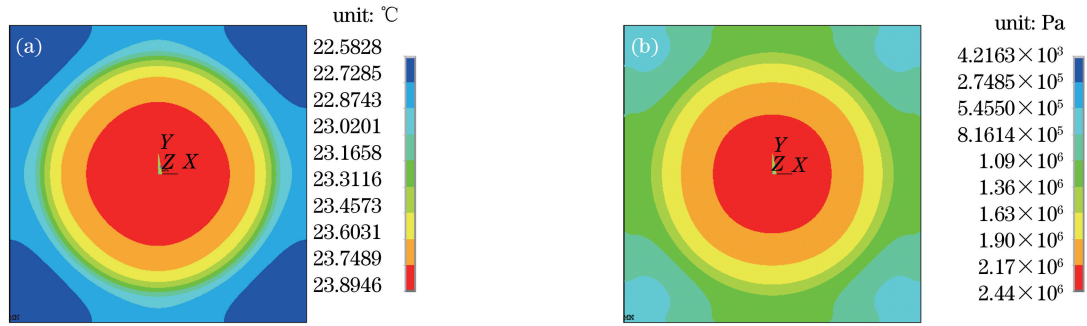


图 2 理想薄膜元件的表面分布。(a)温度分布；(b)应力分布

Fig. 2 Surface distribution of ideal thin-film components. (a) Temperature distribution; (b) stress distribution

形状类似,薄膜元件的中心温度较高,热应力较大,而边缘处温度较低,热应力也较小。由文献[12]可知,介质薄膜的应力阈值约为 100 MPa,而激光辐照下理想薄膜元件表面的最大应力约为 2.44 MPa,远低于薄膜的应力损伤阈值,因而不会造成理想薄膜元件的热应力损伤。

### 3.2 表面杂质对薄膜元件的影响

#### 3.2.1 表面污染与洁净度等级

受污染的薄膜元件表面杂质粒子数目可根据美国红石兵工厂在 1992 年制定的 MIL-STD-1246C 标准<sup>[13]</sup>来确定,元件表面洁净等级用单位面积上分布的最大粒子的微米尺寸来衡量,较大尺寸的粒子在该单位面积上出现的频率较小,而小尺寸的粒子出现的频率很高。元件表面的粒子尺寸分布满足<sup>[14]</sup>

$$\lg N(M) = C [(\lg M_1)^2 - (\lg M)^2], \quad (6)$$

式中  $M$  是粒子的尺寸( $\mu\text{m}$ ); $M_1$  是表面洁净等级; $N(M)$ 是每平方英尺上尺寸大于或等于  $M$  的粒子数目; $C$  是一个归一化常数,在 MIL-STD-1246C 标准下等于 0.926。

光学薄膜元件反射面光能量或信号强度损失的程度与污染物占元件表面面积的百分比(即粒子表面覆盖率)有关。由文献[9]可知,元件表面洁净度等级越高,粒子表面覆盖率越大,污染越严重。本文以薄膜元件表面洁净度等级为 300、500 和 750 为例(粒子表面覆盖率分别约为 0.03%、0.3%和 2.7%,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),研究表面杂质对薄膜元件的影响。

#### 3.2.2 表面杂质诱导光学薄膜元件热应力损伤

强激光辐照在表面带有杂质的薄膜元件时,由于  $\text{SiO}_2$  杂质比周围薄膜的吸收率大很多,杂质因积累大量的热量而不断升温,此过程可看作一个杂质的吸热过程。若杂质吸热后温度达到其熔点,则会导致杂质熔化,并通过热传导的方式向周围薄膜传递能量;若杂质吸热后温度不能达到其熔点,则通过热辐射的方式向周围薄膜传递能量。 $\text{SiO}_2$  杂质与周围薄膜进行热传递时可看作一个杂质的放热过程,杂质放热后,薄膜元件产生非均匀温度梯度,进而在膜层中产生热应力,若该热应力超过薄膜的应力损伤阈值,则会造成薄膜的热应力损伤。具体流程如图 3 所示。

##### 1) $\text{SiO}_2$ 杂质吸热

假设激光连续辐照时间为 30 s,初始温度为 20  $^\circ\text{C}$ 。由文献[15]可知, $\text{SiO}_2$  杂质的熔点温度为 1710  $^\circ\text{C}$ 。图 4(a)为当入射激光功率密度为 3000  $\text{W}/\text{cm}^2$  时,不同尺寸杂质的温度变化;图 4(b)为当杂质的尺寸为 100  $\mu\text{m}$ 时,不同激光功率密度下杂质的温度变化。

从图 4(a)可以看出, $\text{SiO}_2$  杂质吸收激光能量后,其温度随着时间的增加而明显升高。并且,不同尺寸杂质达到其熔点温度所用的时间不同,杂质尺寸越小,达到熔点温度所用的时间越短。从图 4(b)可以看出,对于一定尺寸的杂质,激光功率密度越大,杂质的温升越大,达到熔点温度所用的时间越短。

对于不同激光功率密度,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,激光功率密度不同,能达到熔点温度的最大杂质尺寸不同。

图 5 为不同尺寸的杂质经 30 s 激光辐照后在不同激光功率密度下的温度。可以看出,激光功率密度越大,能达到熔点温度的杂质尺寸越大。当杂质大于一定尺寸时,其温度不能达到熔点,不足以造成杂质熔化,



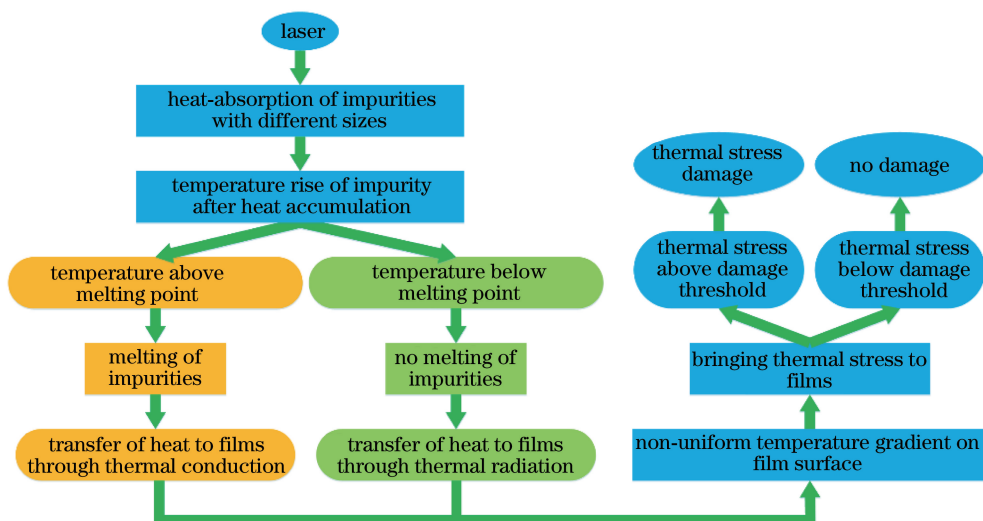


图 3 强激光辐照下 SiO<sub>2</sub> 杂质诱导光学薄膜元件热应力损伤流程图

Fig. 3 Flow chart of thermal stress damage of thin-film components induced by SiO<sub>2</sub> impurities under radiation of high-power lasers

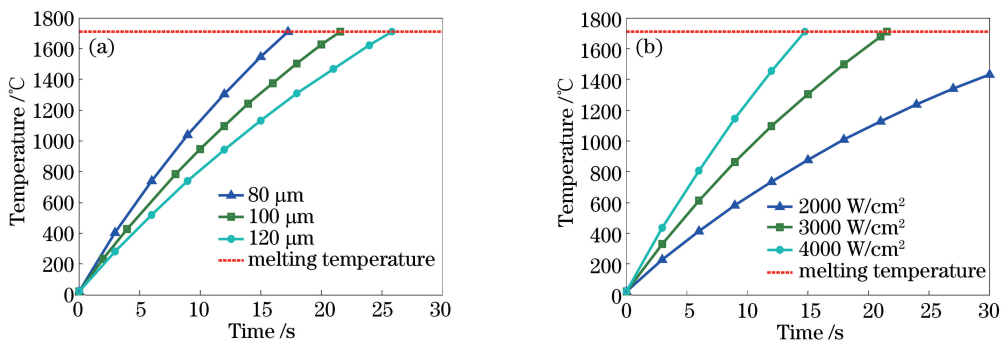


图 4 不同条件下杂质的温度随时间的变化。(a)不同尺寸；(b)不同激光功率密度

Fig. 4 Temperature of impurities versus time under different conditions.

(a) Different sizes; (b) different laser power densities

且随着杂质尺寸的增大,杂质温升明显减小,对薄膜的影响也会减小。

### 2) SiO<sub>2</sub> 杂质向周围薄膜放热

以 100 μm 的杂质为例,讨论当入射激光功率密度为 3000 W/cm<sup>2</sup>,激光连续辐照时间为 30 s 时,表面杂质对薄膜元件的影响。由图 5 可知,SiO<sub>2</sub> 杂质的尺寸小于 140 μm 时,杂质的温度可达到熔点,从而导致杂质熔化,并将自身的热量主要以热传导的形式传递给周围薄膜。图 6 为杂质放热后其周围薄膜温度分布的

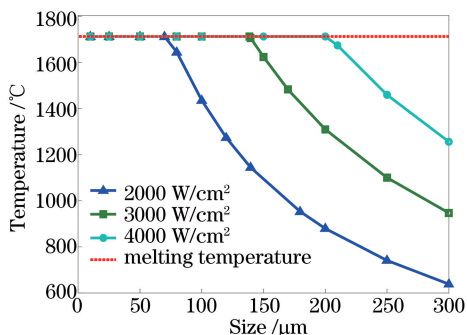


图 5 不同尺寸杂质经 30 s 激光辐照后的温度变化

Fig. 5 Temperature change of impurities with different sizes after laser irradiation for 30 s

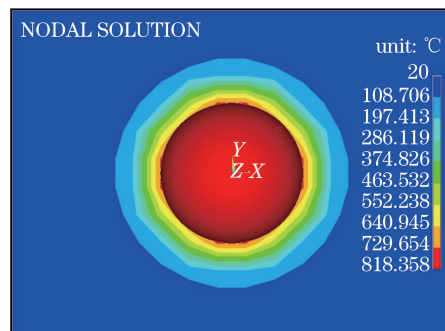


图 6 尺寸为 100 μm 的杂质周围薄膜的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution of film around impurities with size of 100 μm

局部放大图。

由图 6 可知,  $100\ \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  杂质熔化时放出的大量热会导致周围薄膜的温度急剧升高, 从而使薄膜上出现非均匀的温度梯度, 进而在膜层中产生热应力, 当该热应力超过薄膜的损伤阈值, 则会造成薄膜的热应力损伤。

当  $\text{SiO}_2$  杂质的尺寸大于  $140\ \mu\text{m}$  时, 杂质的温度不能达到熔点, 由于杂质不会熔化, 此时, 杂质将自身的热量以热辐射的形式传递给周围薄膜, 致使膜层温度升高而产生热应力。为了便于观察杂质与薄膜之间热辐射的温度与应力, 在 XOY 平面上建立了杂质与局部薄膜元件的 ANSYS 有限元剖面模型。图 7 为  $140\ \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2$  杂质向周围薄膜热辐射能量后的有限元剖面温度图。

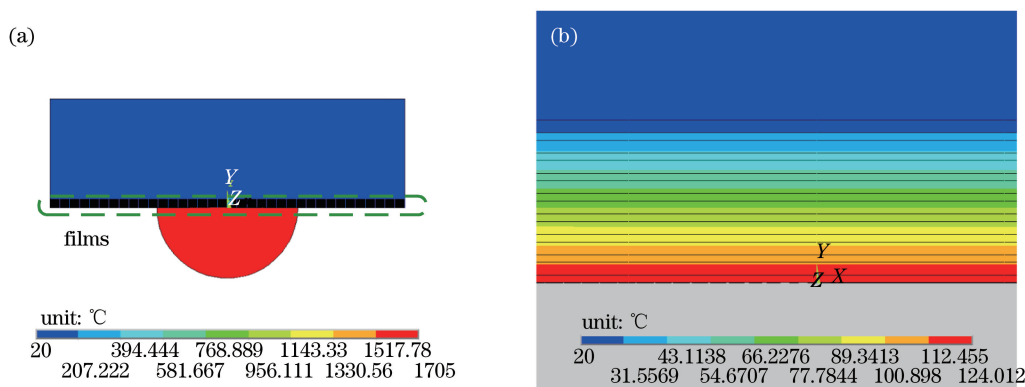


图 7  $\text{SiO}_2$  杂质向薄膜元件热辐射温度图。(a)热辐射剖面图; (b)膜层温度局部放大图

Fig. 7 Temperature distribution of thermal-radiation from  $\text{SiO}_2$  impurity to thin-film components.

(a) Profile of thermal-radiation; (b) partially-enlarged drawing of film-layer temperature distribution

从图 7 可以看出, 杂质将热量以热辐射的形式传递给周围薄膜后, 薄膜的温度有所升高, 离杂质越近的膜层其温度越高, 相应的热应力也越大。

对比图 6 与图 7(b)可知, 杂质以热传导形式向周围薄膜传递的热量大于以热辐射形式传递的热量, 致使热传递方式下的薄膜温度明显高于热辐射方式下的薄膜温度。当杂质将热量传递给周围薄膜后, 薄膜元件会产生非均匀的温度梯度, 从而导致膜层中产生热应力, 产生的热应力随着温度梯度的增大而增大, 若热应力超过薄膜元件的抗拉极限则会造成薄膜元件的损坏<sup>[16]</sup>。张翠娟等<sup>[17]</sup>模拟分析了连续激光辐照下含有 Pt 杂质的多层膜滤光片的温升, 并通过实验观察到滤光片表面出现了“熔坑”和膜层裂纹的现象。根据文献<sup>[17]</sup>给定的相关参数, 采用上述热分析模型, 对文献给出的杂质和滤光片的温度进行了复算, 得到的结果与文献结果基本一致。同时, 通过模拟计算得出该文献中杂质周围多层膜滤光片的最大热应力, 且热应力已经超过了损伤阈值。由此表明, 该结果与文献中实验观察到的热应力损伤现象吻合, 进而可以进一步说明本文研究方法的正确性和有效性。

在不同表面洁净度等级下的薄膜元件, 其表面杂质粒子的数目不同。薄膜元件的表面洁净度等级越高, 表面杂质粒子数目越多, 则杂质对薄膜元件的影响越大。图 8(a)为薄膜元件在不同表面洁净度等级下, 不同尺寸杂质的周围薄膜的最高温度, 图 8(b)为对应的最大等效热应力。

由图 8(a)可知, 不同尺寸的杂质, 其周围薄膜的最高温度不同。薄膜元件的表面洁净度等级越大, 杂质放热后薄膜的温度越高。当杂质尺寸小于  $140\ \mu\text{m}$  时, 杂质可以达到熔点温度, 杂质周围薄膜的温度随着杂质尺寸的增加而增大。当杂质尺寸大于  $140\ \mu\text{m}$  时, 杂质不能达到熔点温度, 则杂质传递给周围薄膜的热量较少。

由图 8(b)可知, 薄膜元件的表面洁净度等级越高, 热应力越大。不同尺寸的杂质, 其周围薄膜的最大等效热应力不同。当杂质的尺寸小于  $140\ \mu\text{m}$  时, 杂质周围薄膜的温度较高, 热应力较大。并且, 当杂质大于一定尺寸时, 其周围薄膜的最大等效热应力可超过薄膜的应力损伤阈值, 从而造成薄膜的热应力损伤。而当杂质尺寸大于  $140\ \mu\text{m}$  时, 杂质周围薄膜的温度较低, 热应力较小。

由此可见, 当杂质位于多层介质薄膜表面时, 在连续激光辐照下, 杂质诱导薄膜元件的热应力损伤存在

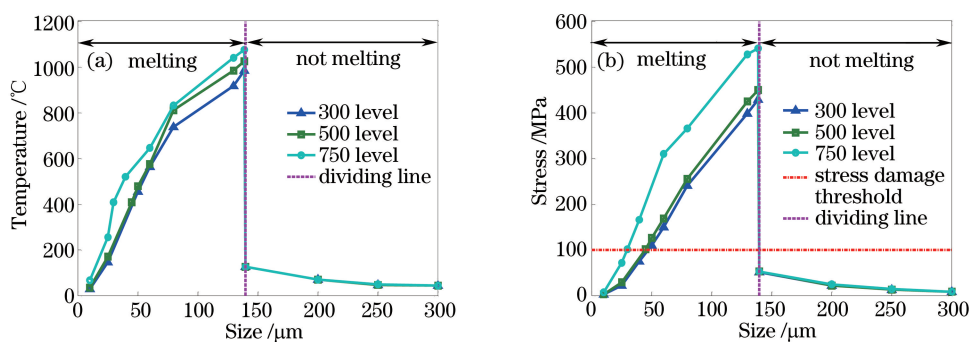


图 8 薄膜元件在不同表面洁净度等级下,薄膜的(a)最高温度与(b)最大热应力随杂质尺寸的变化

Fig. 8 (a) Maximum temperature and (b) maximum thermal stress of films versus impurities size under different surface cleanliness levels of thin-film components

一定的尺寸范围,处于此范围内的杂质才会引起薄膜的热应力损伤。例如,在薄膜元件的表面洁净度等级为 300 的情况下,当入射激光功率密度为  $3000 \text{ W/cm}^2$ ,激光连续辐照时间为 30 s 时,能造成薄膜元件热应力损伤的  $\text{SiO}_2$  杂质尺寸范围为  $50 \sim 140 \mu\text{m}$ 。具体来说,当杂质的尺寸小于  $140 \mu\text{m}$  时,杂质可达到其熔点温度,杂质熔化后主要以热传导的形式将热量传递给周围薄膜,致使在薄膜上产生非均匀的温度梯度,且随着杂质尺寸的增加,杂质周围薄膜的温度也会升高,进而在膜层中产生的热应力增大。当杂质尺寸大于  $50 \mu\text{m}$  时,杂质周围薄膜的最大等效热应力可达到热应力损伤阈值。尺寸大于  $140 \mu\text{m}$  的杂质,在 30 s 激光辐照时间内不能达到其熔点温度,此时,杂质将自身的热量主要以热辐射的形式传递给周围的薄膜。由于热辐射的能量较小,则传递给周围薄膜的热量较少,薄膜元件的温度较低,热应力较小,不足以造成薄膜的热应力损伤。

## 4 结 论

强激光连续辐照下薄膜元件上的表面杂质会影响其使用性能,并对薄膜元件造成一定的损伤。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,讨论了不同尺寸的表面杂质吸收激光能量和热传递的过程,并定量比较了薄膜元件在不同表面洁净度等级下杂质周围薄膜的温升与应力。研究表明:1)在强激光连续辐照下,理想薄膜元件的热应力远小于其热应力损伤阈值,不会造成薄膜的热应力损伤;2)当光学薄膜元件表面存在杂质时,在相同的激光辐照条件下,小尺寸的杂质比大尺寸的杂质温度升高更快,且杂质尺寸处于一定范围时会造成薄膜的热应力损伤;3)在杂质与周围薄膜进行热传递时,能达到熔点温度的杂质和不能达到熔点温度的杂质分别以热传导和热辐射的形式将自身积累的热量传递给周围的薄膜,且热传导引起的周围薄膜的温升远高于热辐射引起的;4)薄膜元件的表面洁净度等级越高,杂质粒子的数目越多,薄膜温度越高,温度梯度越大,膜层中的热应力越大,越易造成薄膜元件的热应力损伤。

## 参 考 文 献

- [1] Zeng Yao. 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.
- [2] Hopper R W, Uhlmann D R. Mechanism of inclusion damage in laser glass[J]. Journal of Applied Physics, 1970, 41(10): 4023-4037.
- [3] Bonneau F, Combis P, Rullier J L, *et al.* Study of UV laser interaction with gold nanoparticles embedded in silica[J]. Applied Physics B, 2002, 75(8): 803-815.
- [4] Yang Fangfang. 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.
- [5] Miao Xinxiang, Yuan Xiaodong, Cheng Xiaofeng, *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, 程晓峰, 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.

- [6] Hu Xiaochuan, Peng Jiaqi, Zhang Bin. Thermal distortion of deformable mirror and its influence on beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42 (1): 0102003.  
胡小川, 彭家琪, 张 彬. 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0102003.
- [7] Hu Renxi. ANSYS14.0 thermodynamic finite element analysis from entry to master[M]. Beijing: China Machine Press, 2013: 8.  
胡仁喜. ANSYS14.0 热力学有限元分析从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013: 8.
- [8] Chen Lixia, Hu Xiaochuan, Zhang Bin, *et al.* Fatigue damage characteristics of deformable mirrors for wavefront correction[J]. Chinese J 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.
- [9] Tribble A C, Boyadjian B, Davis J, *et al.* Contamination control engineering design guidelines for the aerospace community[C]. SPIE, 1996, 2864: 4-15.
- [10] Wu Shuang, He Yehuan, Zhang Bin. Analysis of thermal distortion of resonator mirror with high reflective coatings in different clamping ways[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 021402.  
吴 双, 贺也洹, 张 彬. 不同夹持方式下不同高反膜系腔镜的热形变分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 021402.
- [11] Peng Jiaqi, Hu Xiaochuan, Chen Lixia, *et al.* Effect of structural parameters of deformable mirrors on phase characteristics of high-power laser[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0514001.  
彭家琪, 胡小川, 陈丽霞, 等. 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0514001.
- [12] Chopra K L, Kaur I. Thin film phenomena[M]. New York: McGraw-Hill, 1969.
- [13] Borson E N, Swales A. IEST-STD-CC1246D: Product cleanliness levels and contamination control program[S]. Rolling Meadows: Institute for Environmental Science and Technology (IEST), 2002.
- [14] 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): 1775-1784.
- [15] 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.
- [16] Ling Xiulan, Wang Gao, Liu Xiaofeng. Investigation of the intrinsic damage mechanisms for optical thin film in vacuum environments[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(5): 053101.  
凌秀兰, 王 高, 刘晓凤. 真空环境下光学薄膜的本征损伤机理研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(5): 053101.
- [17] Zhang Cuijuan, Fu Bo, Zhang Dayong, *et al.* Damage mechanisms of multiplayer films filters under continuous laser irradiation[J]. Applied Laser, 2009(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(5): 431-434.