

表面杂质和节瘤缺陷诱导薄膜元件热熔融损伤

余霞,徐娇,张彬

(四川大学电子信息学院,四川成都 610065)

摘要: 在高功率激光系统中,光学薄膜元件表面杂质和体内节瘤缺陷是导致薄膜元件损伤的关键因素。通过建立强激光连续辐照下光学薄膜元件的热分析模型,分析在不同激光辐照时间和功率密度下,表面杂质和节瘤缺陷对光学薄膜元件损伤的影响及其规律。结果表明,在强激光连续辐照下,当表面杂质粒子尺寸处于一定范围内时,随着杂质粒子尺寸的增大,薄膜元件上的最高温度随之升高,且大而浅的节瘤缺陷种子对膜层的温升影响较大。随着激光功率密度的提高和激光辐照时间的增长,表面杂质造成薄膜元件热熔融损伤的粒子尺寸范围越大,节瘤缺陷造成薄膜元件热熔融损伤的种子深度和尺寸范围也越大。

关键词: 激光; 表面杂质; 节瘤缺陷; 薄膜元件; 热熔融

中图分类号: O484 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1243003

Thermal melting damage of thin film components induced by surface impurities and nodule defects

Yu Xia, Xu Jiao, Zhang Bin

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

Abstract: In the high power laser system, surface impurities and nodule defects are the key factors causing laser-induced damage of thin film components. The influences and variations of surface impurities and nodule defects on the laser-induced damage of thin film components for different irradiation time and power density were analyzed by establishing the thermal analysis model of thin film components irradiated by continuous high power lasers. The results indicate that, when the surface impurities are irradiated by continuous high power lasers, and their size localizes within a certain range, the maximum temperature of the film components increases with the increasing of impurity size, and the large and shallow nodule defect seeds have a more obvious influence on the temperature rise of the film. With the increasing of the power density and the irradiation time, the range of the impurity size in which the surface impurities cause the thermal melting damage of the thin film components increases. Simultaneously, the range of the seed depth and size of the nodule defects causing the thermal melting damage of the thin film components is broaden.

Key words: laser; surface impurities; nodule defects; thin film components; thermal melting damage

收稿日期:2018-07-02; 修订日期:2018-08-15

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)

作者简介:余霞(1992-),女,硕士生,主要从事光学薄膜元件损伤方面的研究。Email:yuxia0612@163.com

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

Email: zhangbinff@sohu.com

0 引言

在高功率激光系统中,激光导致的光学元件损伤严重限制了激光系统的使用性能,而对于其中的光学薄膜元件而言,杂质缺陷是造成薄膜元件损伤的关键因素^[1]。因此,研究光学薄膜元件的损伤机理对高阈值薄膜的研制具有重要的意义。对于多层光学薄膜元件,薄膜损伤大致与微米量级的缺陷有关,其中薄膜体内节瘤缺陷是诱导损伤的主要因素^[2]。节瘤缺陷主要是由外界引入的杂质种子在薄膜生长过程中自阴影效应造成的^[3]。同时,在薄膜元件运行过程中也会有灰尘等杂质粒子附着在其表面,表面污染物的存在会加剧光学薄膜元件激光损伤^[4]。当强激光辐照光学薄膜时,由于杂质缺陷对激光能量的吸收比薄膜元件的本征吸收大^[5],导致表面杂质和体内节瘤缺陷种子对激光能量有较强的吸收,从而在短时间内可以达到很高的温度,并通过传热使周围薄膜形成局部高温。当薄膜上的局部温度高于其熔点温度时,就会导致光学薄膜热熔融损伤。

众多的研究者已经对杂质缺陷诱导光学元件损伤过程进行了研究,Martin 等^[6]研究了光学元件中包裹物的激光诱导损伤行为。Sparks 等^[7]研究了在高功率激光作用下杂质吸热导致的局部温升造成材料损伤的情形,并分析了杂质的吸收截面、吸收深度以及温度对吸收的影响。王立斌等^[8]通过实验研究了在三倍频激光辐照下不同表面金属颗粒污染物对熔石英元件损伤阈值的影响,以及对损伤机理进行了理论分析。张耀平等^[9]基于有限元分析方法,数值模拟了节瘤缺陷诱导光学薄膜损伤的温度分布,但未讨论在不同激光辐照时间和不同激光功率密度下节瘤缺陷造成光学薄膜损伤的种子深度和尺寸范围。徐娇等^[10]对表面杂质引起的薄膜元件热应力损伤过程进行了数值模拟和分析,但并未对表面杂质引起的热熔融损伤特性作进一步讨论,且其研究也未涉及体内缺陷对薄膜元件热损伤的影响。

文中建立了强激光辐照下光学薄膜元件的热分析模型,采用 ANSYS 软件模拟分析了光学薄膜元件表面杂质和内部节瘤缺陷受激光辐照吸热升温的过程,研究了不同尺寸的表面杂质及不同深度、不同尺寸的节瘤缺陷种子对光学薄膜温升分布的影响。在

此基础上,讨论了在不同激光辐照时间和不同激光功率密度下,表面杂质造成光学薄膜热熔融损伤的粒子尺寸范围,以及节瘤缺陷造成光学薄膜热熔融损伤的种子深度和尺寸范围。

1 理论模型

1.1 表面杂质热分析模型

在激光辐照光学薄膜过程中,由于薄膜表面杂质对激光的吸收远远大于其本征吸收,因而薄膜元件所吸收的能量相对于表面杂质所吸收的能量可以忽略。杂质吸收的激光能量可以表示为^[4]:

$$Q_v(x, y, z, t) = \frac{P[t](1-R)\alpha}{\pi \cdot r^2} \times \exp[-(x^2 + y^2)/r^2] \exp(-\alpha z) \quad (1)$$

式中: Q_v 为杂质吸收的激光能量; $P[t]$ 为入射激光功率密度; r 为激光光斑半径; R 为杂质表面反射率; α 为杂质的吸收系数; t 为激光辐照时间。

薄膜元件表面杂质受激光辐照积累热量,并同时向周围薄膜放热,杂质主要以热传导和热辐射方式向周围薄膜放热^[10]。

当表面杂质主要以热传导方式向周围薄膜放热时,薄膜元件的温升可以由热传导方程^[11]确定,即:

$$\rho c_p \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_v \quad (2)$$

式中: T 为薄膜元件的温升; t 为时间; ρ 、 c_p 、 k 分别为薄膜材料的密度、比热容和热导系数。

当表面杂质主要以热辐射方式向周围薄膜放热时,薄膜元件的温升可以由斯蒂芬-玻耳兹曼方程^[12]来确定:

$$\phi = \varepsilon \sigma A_1 F_{12} (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

式中: ϕ 为热流率; ε 为发射率; σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数; A_1 为杂质辐射面面积; F_{12} 为杂质辐射面对薄膜元件辐射面角系数; T_1 和 T_2 分别为杂质和薄膜元件辐射面表面绝对温度。

1.2 节瘤缺陷热分析模型

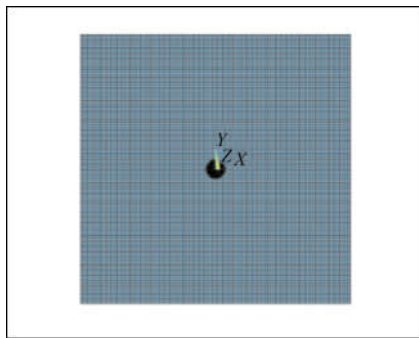
假设薄膜材料和基底对激光能量的吸收可以忽略,体内节瘤缺陷吸收激光能量产生温升,同时传热给周围膜层,致使周围薄膜温度升高,缺陷及其周围薄膜材料的温升可以近似由热传导方程^[13-16]确定:

$$\begin{aligned} \rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} &= k_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q, \quad r < a \\ \rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} &= k_s \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad r > a \\ T_i &= T_s, \quad k_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = k_s \frac{\partial T_s}{\partial r}, \quad r = a \end{aligned} \quad (4)$$

式中： ρ 、 c 、 k 分别代表质量密度、比热容、热传导系数；下标 i 代表缺陷， s 代表薄膜材料； a 为杂质颗粒的半径； q 为单位体积缺陷吸收的激光功率；温度 T 为相对于外界环境的温升。

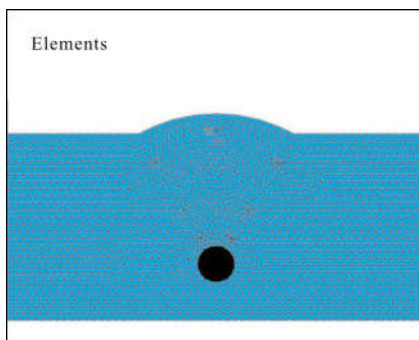
1.3 有限元模型

采用 ANSYS 有限元分析软件建立了表面杂质有限元模型和体内节瘤缺陷有限元模型。图 1(a)所示为局部表面杂质有限元模型，图 1(b)所示为局部体内节瘤缺陷有限元模型。



(a) 表面杂质

(a) Surface impurities



(b) 节瘤缺陷

(b) Nodule defects

图 1 局部有限元模型

Fig.1 Local finite element model

文中以 ZnSe/YbF₃ 高反膜系为例，其膜系结构为 Sub/(LH)⁸/Air(Sub 为 Si, H 为 ZnSe, L 为 YbF₃)。表面杂质以 Al₂O₃^[17] 杂质小球模型为例，研究了其对薄膜

元件性能的影响。节瘤缺陷的种子源一般分为两类：一类种子源是膜料中引入的杂质、基片表面的残余物以及镀膜过程真空室的污染^[18]；而膜料往往存储于含有金属 Pt 的制备容器^[5]，则考虑金属 Pt 节瘤缺陷的常见种子源。另一类种子源是在薄膜沉积过程中，蒸发源本身在蒸发过程中产生的膜料喷溅^[18]。因此也考虑介质 ZnSe 是形成节瘤缺陷的常见种子源。对此，主要选取了种子为金属 Pt 和介质 ZnSe 为例，分析了其对薄膜元件损伤的影响及其规律。表 1 给出了相关材料的热物理参数^[19-21]。

表 1 相关材料的热物理参数

Tab.1 Thermo-physical properties of related materials

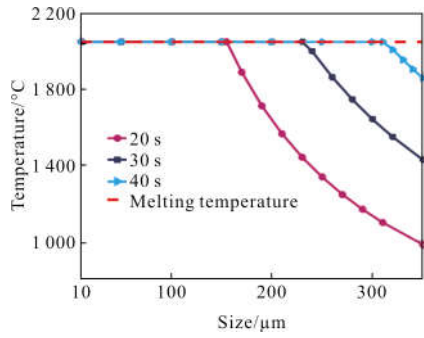
Material	Density /kg · m ⁻³	Specific heat /J · (kg · K) ⁻¹	Heat conductivity /W · (m · K) ⁻¹
Si	2 330	714	140
ZnSe	5 420	339	13
YbF ₃	8 168	442	5.1
Al ₂ O ₃	3 980	800	30
Pt	21 450	132.6	80

2 杂质诱导光学薄膜元件热损伤分析

2.1 表面杂质诱导薄膜元件热损伤分析

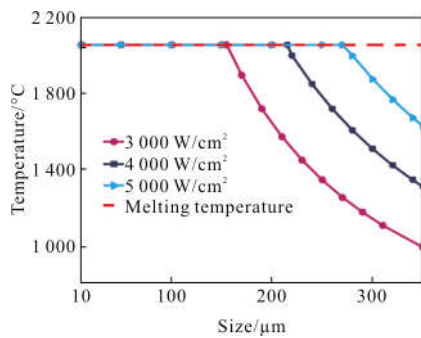
在强激光连续辐照下，激光能量被 Al₂O₃ 杂质吸收而在其内部大量沉积，导致杂质在较短的时间内快速升温。在这一过程中，达到其熔点温度(2 050 °C^[22])的表面杂质主要以热传导的方式向周围薄膜传热，而没有达到其熔点温度的杂质主要以热辐射的方式向周围薄膜传热^[10]。杂质向周围薄膜传热后，光学薄膜元件表面会形成局部高温。当薄膜上的温度高于其熔点温度 (ZnSe/YbF₃ 高反膜系的熔点温度为 1 157 °C^[23])时，薄膜元件就会产生热熔融损伤。

在高功率激光系统中，随着激光功率密度和辐照时间的不同，杂质粒子尺寸对薄膜元件损伤的影响有所不同。图 2(a)所示为当激光功率密度为 3 000 W/cm² 时，不同尺寸杂质在不同激光辐照时间后的温度。图 2(b)则为当激光辐照时间为 20 s 时，不同尺寸杂质在不同激光功率密度下受激光辐照后的温度。



(a) 不同激光辐照时间

(a) Different laser irradiation time



(b) 不同激光功率密度

(b) Different laser power densities

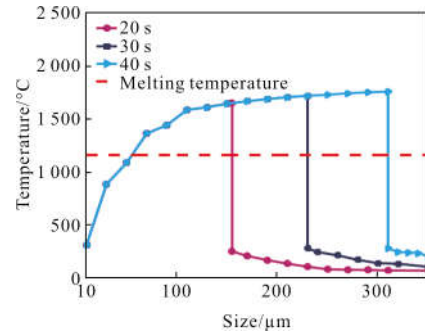
图 2 不同尺寸杂质经激光辐照后的温度

Fig.2 Temperature of different sizes of impurities with laser irradiation

由图 2(a)可知,当激光功率密度为 3 000 W/cm²,激光辐照时间分别为 20、30、40 s 时,杂质能达到熔点温度的最大粒子尺寸分别为 155、230、310 μm,即当激光功率密度相同时,对于不同的激光辐照时间,仅在一定尺寸范围内的杂质粒子能达到熔点温度,且能达到熔点温度的最大杂质尺寸也不同。进一步由图 2(b)可知,当激光辐照时间为 20 s,激光功率密度分别为 3 000、4 000、5 000 W/cm² 时,杂质能达到其熔点温度的最大粒子尺寸分别为 155、215、270 μm。由此可见,当杂质粒子大于一定尺寸时,则难以吸收足够的激光能量达到其熔点温度。

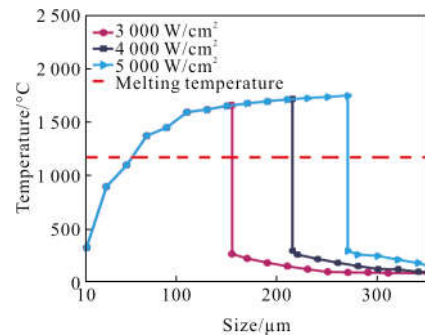
在强激光连续辐照下,杂质吸热后向周围薄膜传递热量,能达到其熔点温度的杂质主要以热传导的方式向周围薄膜传热,而没有达到其熔点温度的杂质主要以热辐射的方式向周围薄膜传热。图 3(a)为当激光功率密度为 3 000 W/cm² 时,在不同激光辐照时间下薄膜元件上的最高温度与杂质尺寸的关系。

图 3(b)则为当激光辐照时间为 20 s 时,在不同激光功率密度下薄膜元件上的最高温度与杂质尺寸的关系。



(a) 不同激光辐照时间

(a) Different laser irradiation time



(b) 不同激光功率密度

(b) Different laser power densities

图 3 薄膜元件上的最高温度与杂质尺寸的关系

Fig.3 Relationship of maximum temperature of the film and impurities sizes

从图 3 可以看出,对于给定的激光功率密度和辐照时间,当杂质粒子小于一定尺寸时,薄膜元件上的最高温度随着粒子尺寸的增大而升高。由图 3(a)可知,当激光功率密度为 3 000 W/cm²,激光辐照时间分别为 20、30、40 s 时,能够造成光学薄膜热熔融损伤的杂质粒子尺寸范围分别为 60~155 μm、60~230 μm、60~310 μm。因此,当激光辐照时间越长时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的杂质粒子尺寸范围越大。进一步由图 3(b)可知,当激光辐照时间为 20 s,激光功率密度分别为 3 000、4 000、5 000 W/cm² 时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的杂质粒子尺寸范围分别为 60~155 μm、60~215 μm、60~270 μm。由此可见,表面杂质以热辐射方式向薄膜传热时,薄膜元件上的最高温度远远低于薄膜元件的熔点温度,而不足以造成光学薄膜热熔融损伤。薄膜元件上的最高温

度与入射激光功率密度和激光辐照时间密切相关,即激光功率密度越大,激光辐照时间越长,杂质吸收的能量越多,温升越剧烈,则能够造成薄膜元件热熔融损伤的粒子尺寸范围更大。

在实际工作中,灰尘等杂质粒子会不断在光学薄膜元件表面沉积,在给光学薄膜元件带来永久损伤的同时会造成薄膜元件透过率的下降^[24]。在强激光连续辐照下,表面杂质对激光能量的强吸收会引起薄膜元件表面的熔融变形,热扩散效应会使得薄膜元件的损伤面积大于杂质污染物的面积^[25],需要指出的是,当薄膜元件表面发生破坏时,还将会改变透射/反射光场的分布而导致局部光场加强,使得光学薄膜元件发生损伤的几率更大^[26]。

2.2 节瘤缺陷诱导薄膜元件热损伤分析

当光学薄膜元件存在节瘤缺陷种子时,节瘤缺陷对激光能量吸收较强,使得能量快速沉积而引起节瘤缺陷处温度剧增,且随着热量向外扩散,引起周围薄膜产生温升。当薄膜温度达到其熔点温度 1 157 °C 时,就会造成光学薄膜热熔融损伤。

在光学薄膜元件中,不同类型的种子其热传导率等热力学参数不同,对能量的吸收和传导能力不同,致使种子附近薄膜材料的温升也不同。图 4 给出了当激光功率密度为 5 000 W/cm²,激光辐照时间为 1 s 时,直径 1 μm、深度 1.5 μm 的不同类型种子沿径向的温升分布。

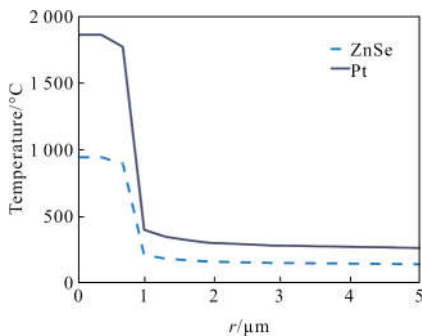


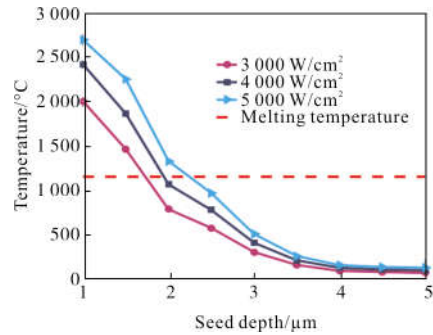
图 4 不同类型的种子沿径向的温升分布

Fig.4 Temperature rise distribution of different kinds of seeds in radial direction

从图 4 可以看出,节瘤缺陷种子 Pt 对入射激光能量有较强的吸收,对周围薄膜材料的温升影响较大,而节瘤缺陷种子 ZnSe 附近薄膜材料的温升则相对较小。由此可见,在强激光连续辐照下,当薄膜元

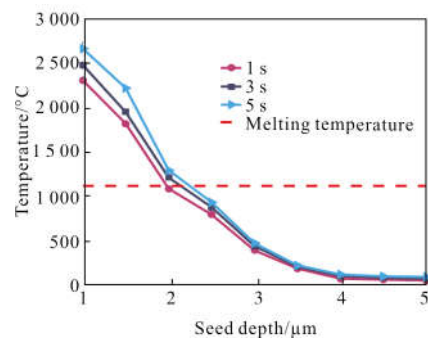
件同时存在由种子 Pt 和 ZnSe 自阴影效应形成的节瘤缺陷时,种子 Pt 对薄膜元件热损伤的影响更大。因此,在后续的讨论中,主要研究了节瘤缺陷种子 Pt 对薄膜元件热损伤规律。

在强激光连续辐照下,当节瘤缺陷种子直径一定时,在不同的激光功率密度和激光辐照时间下能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子深度范围不同。图 5 给出了当节瘤种子直径 1 μm 时,薄膜元件上的最高温度与种子深度的关系。图 5(a)所示为当激光辐照时间为 5 s 时,在不同激光功率密度下薄膜元件上的最高温度与种子深度的关系。图 5(b)所示为当激光功率密度为 5 000 W/cm² 时,在不同激光辐照时间下薄膜元件上的最高温度与种子深度的关系。



(a) 不同激光功率密度

(a) Different laser power densities



(b) 不同激光辐照时间

(b) Different laser irradiation time

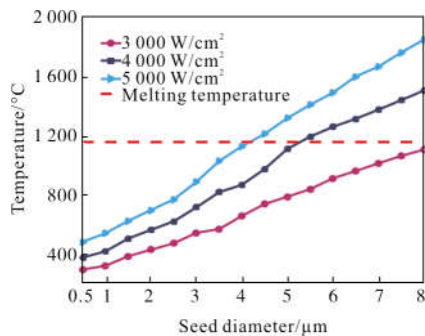
图 5 薄膜元件上的最高温度与种子深度的关系

Fig.5 Relationship of maximum temperature of the film and seed depth

从图 5 可以看出,当节瘤缺陷种子直径一定时,随着种子深度的增加,薄膜元件上的最高温度随之降低。由图 5(a)可知,当激光辐照时间为 5 s,激光功率密度分别为 3 000、4 000、5 000 W/cm² 时,能够造

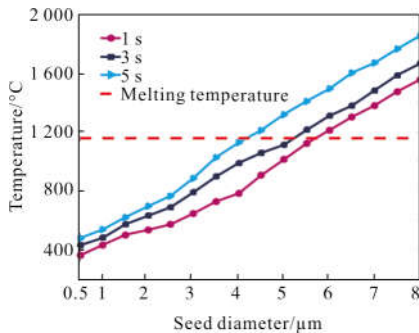
成薄膜元件热熔融损伤的种子最大深度分别为 1.7、2、2.4 μm 。进一步由图 5(b)可知,当激光功率密度为 5 000 W/cm^2 ,激光辐照时间分别为 1、3、5 s 时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子最大深度分别为 2、2.2、2.4 μm 。由此可见,节瘤缺陷造成薄膜元件热熔融损伤开始发生在薄膜表层,随着激光功率密度的提高及激光辐照时间的增长,损伤的深度会有所增加,呈现出由表层向内层损伤的趋势。

在光学薄膜元件中,当节瘤缺陷种子深度一定时,在不同的激光辐照时间和激光功率密度下,能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子尺寸范围也有所不同。下面以尺寸范围在 0.5~8 μm ^[27-28]的种子为例来讨论其在激光辐照下对光学薄膜损伤的影响。图 6 给出了节瘤种子深度为 3 μm 时,薄膜元件上的最高温度与种子尺寸关系。图 6(a)为当激光辐照时间为 5 s 时,在不同激光功率密度下薄膜元件上的最高温度与种子尺寸关系。图 6(b)为当激光功率密度为 5 000 W/cm^2 时,在不同激光辐照时间下薄膜元件上最高温度与种子尺寸关系。



(a) 不同激光功率密度

(a) Different laser power densities



(b) 不同激光辐照时间

(b) Different laser irradiation time

图 6 薄膜元件上的最高温度与种子尺寸关系

Fig.6 Relationship of maximum temperature of the film and seed diameter

从图 6 可以看出,当节瘤种子深度一定时,随着种子尺寸的增大,薄膜元件上的最高温度随之升高,且薄膜元件上的最高温度与种子尺寸近似成线性关系。由图 6(a)可知,当激光辐照时间为 5 s、激光功率密度为 3 000 W/cm^2 时,薄膜元件上的最高温度均低于其熔点温度,没有造成薄膜元件热熔融损伤。然而,当激光功率分别为 4 000 W/cm^2 和 5 000 W/cm^2 时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的粒子尺寸范围分别为 5.3~8 μm 和 4.1~8 μm 。由此可见,当激光功率密度越高时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子尺寸范围越大。进一步由图 6(b)可知,当激光功率密度为 5 000 W/cm^2 ,激光辐照时间分别为 1、3、5 s 时,能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子尺寸范围分别为 5.7~8 μm 、5.2~8 μm 和 4.1~8 μm 。由此可见,随着激光辐照时间的增长,能够造成薄膜元件热熔融损伤的种子尺寸范围越大。

进一步分析图 5 和图 6 可知,节瘤缺陷种子处在薄膜元件较表层的位置时,薄膜元件上的最高温度较高,而随着种子深度的增加,薄膜元件上的最高温度逐渐降低。并且,薄膜元件上的最高温度随着种子尺寸的增大总是逐渐升高的。由此可以推知,大而浅的节瘤缺陷对膜层的温升影响较大,且更易引起薄膜元件的表层发生损伤。同时,薄膜体内节瘤缺陷种子在吸收激光能量后,其温度骤然升高,种子及其附近的薄膜会熔融汽化,产生很大的局部张应力,而当应力超过薄膜材料的屈服极限时,即可在光学材料中产生损伤,更有甚者,局部损伤的产生将使损伤处的光吸收率急剧增加,进一步加剧损伤进程,最终对薄膜元件产生灾难性的破坏^[29]。

3 结 论

文中从杂质缺陷对激光能量的热吸收机制出发,建立了强激光辐照下薄膜元件的热分析模型,用有限元方法模拟计算了表面杂质和节瘤缺陷附近的瞬态温度场分布,并详细讨论了在不同的激光辐照时间和激光功率密度下不同尺寸的表面杂质,以及不同深度和尺寸的节瘤缺陷种子对薄膜元件温度场的影响。分析结果表明:(1) 激光功率密度越高,激光辐照时间越长,表面杂质能达到熔点温度的粒子尺寸范围越大,能够造成薄膜元件热熔融损伤的杂质

粒子尺寸范围也越大;(2)大而浅的节瘤缺陷种子对膜层的温升影响较大,随着激光功率密度的提高,激光辐照时间的增长,节瘤缺陷造成薄膜元件热熔融损伤的种子深度和尺寸范围越大;(3)在强激光连续辐照下,表面杂质和节瘤缺陷较易引起薄膜元件表层发生损伤。

参考文献:

- [1] Liu Zhichao, Zheng Yi, Pan Feng, et al. Effect of 1 064 nm laser conditioning on damage morphology change process on HfO₂/SiO₂ reflective film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0606003. (in Chinese)
刘志超, 郑轶, 潘峰, 等. 1 064 nm 激光预处理对 HfO₂/SiO₂ 反射膜损伤形态转化影响研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0606003.
- [2] Zhao Yuan'an, Hu Guohang, Liu Xiaofeng, et al. Laser conditioning technology and its applications [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(12): 2938–2947. (in Chinese)
赵元安, 胡国行, 刘晓凤, 等. 激光预处理技术及其应用[J]. 光学精密工程, 2016, 24(12): 2938–2947.
- [3] Tuniyazi Abudusalamu, Cheng Xinbin, Bao Ganghua, et al. Laser induced damage characteristics of nodules in thin-film polarizers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2461–2466. (in Chinese)
阿卜杜萨拉木·图尼亚孜, 程鑫彬, 鲍刚华, 等. 偏振分光膜中节瘤的激光损伤特性 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(8): 2461–2466.
- [4] Miao Xinxiang. Metal pollution-induced mechanism of fused silica surface damage [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2009: 40–50. (in Chinese)
苗心向. 金属污染诱导熔石英表面损伤机理研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2009: 40–50.
- [5] 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. (in Chinese)
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.
- [6] Martin P, Morono A, Hodgson E R, et al. Laser induced damage enhancement due to stainless steel deposition on KS-4V and KU1 quart glasses[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2004, 332(329–333): 1442–1445.
- [7] Sparks M, Duthler C J. Theory of infrared absorption and material failure in crystal containing inclusion[J]. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44(7): 3038–3045.
- [8] Wang Libin, Ma Weixin, Ji Lailin, et al. Influence of metal particles on damage threshold of fused silica at 3[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(5): 22–26. (in Chinese)
王立斌, 马伟新, 季来林, 等. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 22–26.
- [9] Zhang Yaoping, Xu Hong, Ling Ning, et al. Study on the surface defect density of infrared laser thin film [J]. *Applied Laser*, 2005, 25(3): 165–168. (in Chinese)
张耀平, 许鸿, 凌宁, 等. 红外激光薄膜表面缺陷研究[J]. 应用激光, 2005, 25(3): 165–168.
- [10] Xu Jiao, Chen Lixia, You Xinghai et al. Thermal stress damage of thin film components caused by surface impurities [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(6): 0614003. (in Chinese)
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.
- [11] Cao Dingxiang. Study on thermal effects and thermal management in high power solid laser [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
曹丁象. 高功率固体激光系统的热效应及热管理研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- [12] Li Qin, Liu Haidong, Zhu Minbo. Application of thermal simulation in the structural design of electronic system [J]. *Electronics Process Technology*, 2006(3): 165–167, 181. (in Chinese)
李琴, 刘海东, 朱敏波. 热仿真在电子设备结构设计中的应用[J]. 电子工艺技术, 2006(3): 165–167, 181.
- [13] Hu Peng, Chen Faliang. Inclusion damage mechanisms of optical glass under laser irradiation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7): 961–965. (in Chinese)
胡鹏, 陈发良. 激光辐照下杂质诱导光学玻璃损伤的两种机理[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(7): 961–965.
- [14] Shan Y, He H, Wei C, et al. Thermomechanical analysis of nodule damage in HfO₂/SiO₂ multilayer coatings [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(10): 103101–103104.
- [15] Dijon J, Poulingue M, Hue J. Thermomechanical model of mirror laser damage at 1.06 μm: I. Nodule ejection [C]// *Laser-Induced Damage in Optical Materials*, International Society for Optics and Photonics, 1999: 387–397.
- [16] Fan Zhengxiu, Shao Jianda, Yi Kui, et al. Optical Coating and Application [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2014: 509–510. (in Chinese)
范正修, 邵建达, 易葵, 等. 光学薄膜及其应用 [M]. 上海:

- 上海交通大学出版社, 2014: 509–510.
- [17] Liu Guangtong. Atmospheric dust fall source analysis in Hohhot [D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2008. (in Chinese)
- 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.
- [18] Ma Hongping, Cheng Xinbin, Zhang Jinlong, et al. Damage growth characteristics of artificial nodules prepared by different processes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0521001. (in Chinese)
- 马宏平, 程鑫彬, 张锦龙, 等. 不同工艺制备的人工节瘤的损伤生长特性[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 0521001.
- [19] Liu Hongbing, Tao Jie, Zhang Pingze, et al. Simulation of residual stress in functionally gradient Al_2O_3 coatings [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(8): 26–32. (in Chinese)
- 刘红兵, 陶杰, 张平则, 等. 功能梯度 Al_2O_3 涂层残余热应力分析[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 26–32.
- [20] Lin Dawei. Research on extreme low loss mid-infrared reflect film [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- 林大伟. 低损耗中红外薄膜的研究 [J]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2008.
- [21] 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. (in Chinese)
- 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.
- [22] Qiao Yanxin, Zhou Yang, Chen Shujin, et al. Effect of bobbin tool friction stir welding on microstructure and corrosion behavior of 6061-T6 aluminum alloy joint in 3.5% NaCl solution [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(11): 1395–1402. (in Chinese)
- 乔岩欣, 周洋, 陈书锦, 等. 双轴肩搅拌摩擦焊对 6061-T6 铝合表面组织及其在 3.5%NaCl 中腐蚀行为的影响 [J]. 金属学报, 2016, 52(11): 1395–1402.
- [23] Huang Wei. 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.
- [24] Ma Jing, Zhu Funan, Zhou Yanping, et al. Detection device of optical surface pollution for satellite and ground [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1878–1883. (in Chinese)
- 马晶, 朱福南, 周彦平, 等. 星地两用光学表面污染检测装置[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1878–1883.
- [25] Sun Xiaoyan, Lei Zemin, Lu Xingqiang, et al. Mechanism of original damage of thin optical components induced by surface particle contamination [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(13): 136–144. (in Chinese)
- 孙晓艳, 雷泽民, 卢兴强, 等. 表面颗粒污染物诱导薄光学元件初始损伤的机理[J]. 物理学报, 2014, 63(13): 136–144.
- [26] Wang Libin. Research on the influence of metal particles on damage threshold of fused silica at 3 [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2012. (in Chinese)
- 王立斌. 三倍频激光下金属颗粒对熔石英元件损伤阈值影响的研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2012.
- [27] Ling X, Shao J, Fan Z, et al. Thermal-mechanical modeling of nodular defect embedded within multilayer coatings [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2009, 27(2): 183–186.
- [28] Wang Ying, Zhang Yueguang, Liu Xu, et al. Analysis of laser intensification by nodular defects in mid-infrared high reflectance coatings [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(11): 6588–6591. (in Chinese)
- 王颖, 章岳光, 刘旭, 等. 节瘤缺陷对中红外高反射膜电场增强影响的数值分析[J]. 物理学报, 2007, 56(11): 6588–6591.
- [29] Ye Jingfeng. Experimental investigation in laser induced damage to diamond-like carbon film [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- 叶景峰. 类金刚石薄膜抗激光辐照性能实验研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.