

纳秒脉冲激光诱导的区域缺陷破坏模型

于振坤^{1,2} 齐红基¹ 赵元安¹ 贺洪波¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 完善了由缺陷吸收引起温升导致材料破坏的激光损伤模型。从热传导方程入手, 该模型在单杂质缺陷模型基础上, 利用米氏散射理论计算杂质缺陷的吸收截面, 根据材料基质和杂质缺陷的热物性能参数, 计算了杂质相互之间的有效作用距离, 即材料的热扩散长度范围。结果表明, 考虑周围杂质的影响, 基质材料损伤阈值更接近实际情况, 同时基质表面的损伤阈值与实验上所得的时间标尺 $F \propto t^{0.5}$ 非常吻合。

关键词 激光光学; 紫外激光破坏; 损伤阈值模型; 热效应; 缺陷

中图分类号 O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1214001

A Model of Region Defects under Nanosecond Pulsed Laser

Yu Zhenkun^{1,2} Qi Hongji¹ Zhao Yuan'an¹ He Hongbo¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Shanghai 201800, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An improved laser induced damage (LID) model of absorbing defects causing temperature rise in material is given. Starting with the equation of heat conduction and based on the single-defect LID model, this model gives the absorption cross section of inclusions by Mie theory. The effective interaction distance of defects in the substrate, namely the thermal diffusion length of substrate which is determined by the thermal properties of substrate material and inclusions, is calculated. The result shows that, considering the influence of inclusions in the substrate, the obtained LID threshold (LIDT) is closer to the result of experiment than single-defect model. Meanwhile, the result of surface LIDT is very consistent with the experimental time scale of $F \propto t^{0.5}$.

Key words laser optics; ultraviolet laser damage; damage threshold model; thermal effect; inclusion

OCIS codes 140.3538; 140.3610; 140.7240

1 引 言

随着激光系统能量的不断提高, 光学元件表面需要承受的激光辐照强度也随之增强, 光学元件尤其是紫外薄膜元件的损伤问题更加严重。对于不同的材料、激光参数和作用模式, 破坏过程和损伤机理都有很大差异。针对纳秒脉冲, 最基本的作用机理是热吸收过程^[1~10], 光通过本征吸收、杂质吸收和非线性吸收转化为热, 由热熔融或热力耦合导致材料的最终损伤。经过 40 年的发展, 各国研究者对激光导致材料破坏的研究有了很大的进展。综合起

来, 其中比较成熟的理论有材料中杂质引起温升的杂质缺陷吸收理论^[1~5,9]以及考虑材料本征吸收引起的温升多光子吸收理论^[6,7]和雪崩离化理论^[6]。通常激光的光斑为高斯分布, 材料的损伤几率^[10]与激光光斑大小及材料的缺陷种类密不可分。本文在前人研究的基础上, 从杂质缺陷吸收入手, 根据米氏散射理论和热传导理论, 在单缺陷温度场分布的基础上, 考虑空间内存在多个缺陷, 建立多杂质缺陷吸收模型。并通过与实验上所得的时间标尺进行对照, 得到很好的验证。

收稿日期: 2011-05-17; 收到修改稿日期: 2011-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60878045)资助课题。

作者简介: 于振坤(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事紫外激光损伤机制等方面的研究。E-mail: akbar@siom.ac.cn

导师简介: 齐红基(1979—), 男, 副研究员, 主要从事光学薄膜等方面的研究。E-mail: qhj@siom.ac.cn

2 缺陷模型的相关原理

2.1 单杂质缺陷损伤模型

缺陷损伤最常用的模型为各向同性的材料中嵌

入一个各向同性的均匀球形吸收杂质。在激光辐照下,在激光脉冲时间内($t > 0$),小球的表面温升可以根据球坐标下的热传导方程的解析解得出^[1]:

$$T = \frac{a^2 A}{K_1} \left\{ \frac{1}{3} \frac{K_1}{K_2} - \frac{2b}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp[(-y^2 t)/\gamma_1]}{y^2} \frac{(\sin y - y \cos y) \sin y}{(c \sin y - y \cos y)^2 + b^2 y^2 \sin^2 y} dy \right\}, \quad r = a, \quad (1)$$

式中 k, K, T 分别为热扩散率、热导率和温度,下标 1, 2 分别表示缺陷和材料, A 为热源项, a 为杂质缺陷的半径, T_0 为激光辐照前周围环境的温度。热源项可根据入射激光能量密度 (I , 单位 W/cm^2) 和吸收截面 (Q , 单位 cm^2) 确定

$$A = \frac{3QI}{4\pi t_p a^3}, \quad 0 < t < t_p, \quad (2)$$

其中吸收截面 Q 利用米氏散射理论计算^[11], t_p 为激光脉宽。以上各式要求杂质缺陷的吸收截面和材料的热物性不随温度的变化而变化。

传统的温度场仅仅考虑了单个杂质对材料阈值的影响,图 1 所示为单个杂质大小与损伤阈值的关系,其中基底材料为熔石英(参数见表 1),杂质缺陷为同种材质的 SiO_2 , 消光系数 $k_e = 0.01$ 。相应的激

熔点为判断依据,熔石英材料的熔点约为 1940 K。显而易见,杂质大小在一定范围内,对材料的阈值影响最大,这与 Feit 等^[2]对杂质缺陷大小与激光损伤阈值关系的分析相符。但当材料的杂质缺陷种类确定后,考虑材料表面损伤阈值与激光脉冲的对应关系^[12], $F \propto t^\tau$, τ 值在 0.5 附近,单个杂质模型却体现出良好的线性关系,两者之间的差异很大(图 2)。

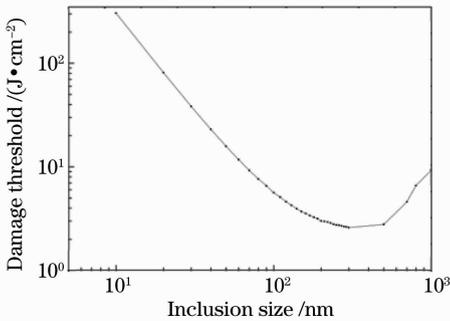


图 1 杂质大小与材料损伤阈值的关系

Fig. 1 Damage threshold of substrate vary with the inclusion size

表 1 材料和杂质缺陷(铂)参数

Table 1 Relevant parameters of the substrate and the inclusion (Pt)

Type	Substrate	Inclusion
Thermal conductivity / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	0.018	0.8
Density / ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	2.2	21.45
Capacity / ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.753	0.146
Refractive index	1.47	0.92
Extinction coefficient	0	2.5
Melting point / K	1940	2040
Size / nm	∞	10

光参数如表 2 所示,材料的损伤阈值以达到材料的

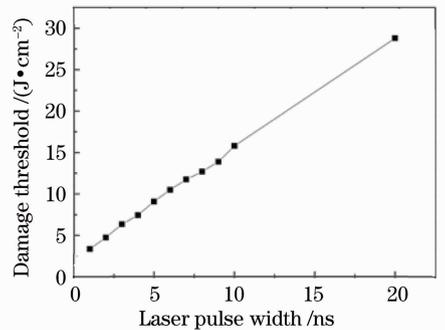


图 2 单个杂质损伤阈值随脉宽变化

Fig. 2 Damage threshold of single inclusion vary with laser pulse

表 2 激光参数

Table 2 Laser parameters

Energy density / ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.5
Diameter / μm	300
Pulse width / ns	8
Wavelength / nm	355

2.2 多杂质缺陷损伤模型

单杂质缺陷损伤模型仅仅考虑了单个杂质对材料基质造成的影响。但是实际上材料中的缺陷不是单独存在的,因而研究材料损伤时,不同杂质之间的相互作用必须加以考虑。图 3(a)为选定区域热作用范围的俯视图。材料内部随机分布着各种类型及大小的杂质,在激光辐照下,缺陷的存在改变了其自身及周围的温度变化。选定一个作用区域,在这个作用范围内,球心周围杂质对球心处杂质有有效热能传播;边界处,与作用面接触部分对球心杂质存在有效热能传播;若杂质在选定区域之外,对球心杂质的热能传播非常小,可以忽略不计。图 3(b)为选定

区域热作用范围的截面图。杂质分布的随机性,决定了各个位置处杂质距离高斯激光中心的位置不同,因而处在各个位置处的杂质实际受到的激光辐照能量也不相同。同时,由于材料本身存在吸收,造成在沿激光入射方向上,随着入射深度的不同,各个位置上的缺陷受到的激光辐射也各不相同。这些缺

陷在激光辐照下的共同作用,使得温度的变化和分布不同于单个缺陷存在的情况。

考虑材料的热扩散长度^[13],以一个杂质为坐标原点,建立激光辐照下该杂质和其周围杂质影响条件下的温升模型

$$T = \sum_{i=1}^n \frac{a^2 A_i}{K_1} \exp\left(-\frac{x_i^2}{4Dt_p}\right) \left\{ \frac{1}{3} \frac{K_1}{K_2} - \frac{2b}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\exp[(-y^2 t)/\gamma_1]}{y^2} \frac{(\sin y - y \cos y) \sin y}{(c \sin y - y \cos y)^2 + b^2 y^2 \sin^2 y} dy \right\},$$

$$x \leq 2\sqrt{Dt_p}, \quad (3)$$

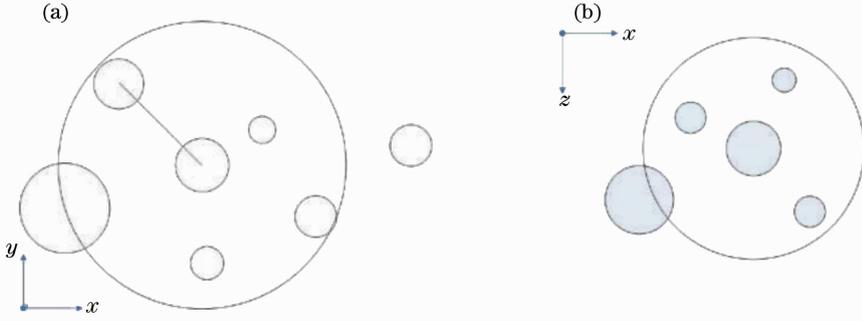


图3 (a)区域损伤俯视图;(b)区域损伤截面图

Fig. 3 (a) Plan view of the substrate; (b) sectional view of the substrate

式中 A_i 表示各个杂质受激光辐射后产生的热源项, $\exp\left(-\frac{x_i^2}{4Dt_p}\right)$ 表示各个杂质在激光脉冲时间内传播到坐标原点杂质位置的热能, $D = \frac{k_1}{\rho c}$ 表示热扩散系数, k, ρ, c 分别表示材料的扩散率、密度和热容。

考虑各个缺陷的空间位置不同,得出实际各个位置处杂质所接受到的辐照激光强度

$$I = I_0 \exp(-x^2/R^2), \quad (4)$$

式中 x, R 分别表示杂质到激光中心点的距离和激光光斑的有效半径。

作用区域的大小由热扩散长度决定。热扩散长度表示热量有效传播的距离,任意时间任意位置 x 处的温度为

$$T(x, t) = T(0, t) \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (5)$$

t 不变时,在 $x = 2\sqrt{Dt}$ 处,由(5)式可以得出

$$\frac{T(x)}{T(0)} = \frac{1}{e}. \quad (6)$$

近似可以认为,在距离热源 $2\sqrt{Dt}$ 范围内材料被加热,在 $2\sqrt{Dt}$ 以外材料没有受到热源的加热。 $2\sqrt{Dt}$ 即热扩散长度。

3 理论分析和验证

为便于研究多杂质缺陷模型的作用,考虑材料表面杂质分布对于损伤阈值的影响。假设激光光束中心点有一个缺陷,其他缺陷分布在原点缺陷的周围(图3)。采用表1中的材料(熔石英)、杂质缺陷(金属铂)参数^[14]和表2的固定激光参数进行模拟。

图4为未考虑空间缺陷存在时,由单个杂质造成温升的结果。杂质内部,越靠近杂质表面,温度有下降的趋势;杂质外,由于热传导系数的变化,使得温度急剧下降。杂质内部最高温度约为1450 K,尚未达到材料或者杂质的熔点,不足以形成破坏。当周围存在1个距离原杂质30 nm的杂质缺陷时(如图5所示),原杂质位置处受周边杂质的影响,温升发生相应的变化。可以看到,由于该杂质的存在,使得原杂质的最高温度约为2500 K,远远高于单个杂质作用下所造成的温升,而且温升结果超过材料的熔点,对基底产生破坏。由于周边杂质对坐标原点的杂质的影响受热扩散长度的限制,且其传导关系满足(6)式,因此随着两个杂质距离的变化,对原点处杂质温升的影响也不尽相同。随着两个杂质距离的增大,相互之间的影响越来越小(图6),直到超出热扩散长度后,两个杂质缺陷相互间的影响才可以

忽略不计。图 7 表示坐标原点周围存在 3 个同类型的杂质时原点处温升的变化, 最高温度约为 4700 K, 远远超过材料的熔点, 累积效果更加严重, 相应的损伤阈值更低。

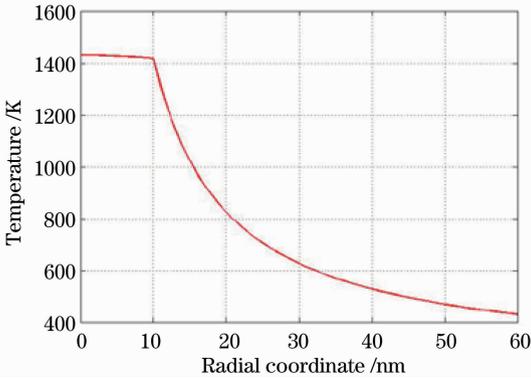


图 4 单个杂质周围无其他杂质影响条件下的温度变化
Fig. 4 Temperature rise in the inclusion without any inclusion in the ambient environment

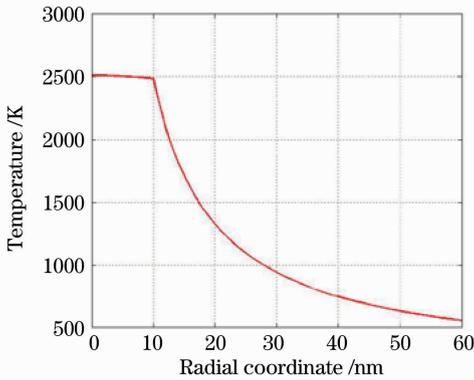


图 5 单个杂质周围有一个杂质影响条件下的温度变化
Fig. 5 Temperature rise in the inclusion with one inclusion interaction in the ambient environment

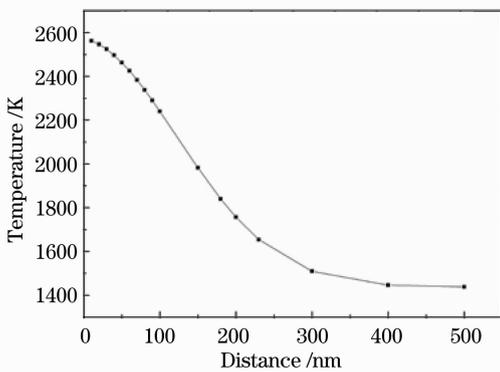


图 6 温度随杂质距离远近的变化

Fig. 6 Temperature vary with distance between two inclusions

根据以上分析, 在热扩散长度范围内, 周边杂质的存在对坐标原点处的温升有重要贡献。考虑缺陷

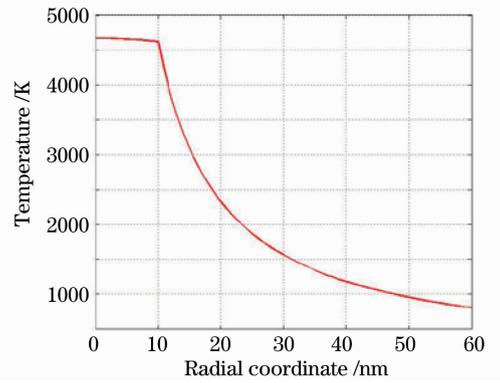


图 7 杂质周围存在三个随机杂质时的温度变化
Fig. 7 Temperature rise in the inclusion with three inclusions interaction in the ambient environment

密度达到一定程度时, 存在多种杂质缺陷共同作用, 缺陷相互之间的作用对材料破坏的影响不能忽略。

实验中证实材料的损伤阈值 F 与激光脉冲时间 t 满足 $F \propto t^{0.5}$ 。为确保多杂质缺陷损伤模型的准确性和适用性, 以此进行验证。缺陷密度的选取与材料和缺陷本身的各项物理性能有关, 考虑实际可能存在的情况, 假设熔石英材料中的缺陷为 SiO_2 , 其密度^[15]为 $2 \times 10^9 \text{ mm}^{-2}$, 且缺陷的大小相同, 均为 50 nm, 消光系数 k 分别取 0.01, 0.005 和 0.001。相应的杂质缺陷参数如表 3 所示, 激光参数同表 2。注意本文以达到基底材料的熔点为损伤发生的判断标准, 约为 1940 K, 但实际损伤发生的温度可能比这个值还要低。

表 3 杂质缺陷参数

Table 3 Inclusion parameters

Type	Inclusion		
	A	B	C
Extinction coefficient	0.01	0.005	0.001
Density / mm^{-2}	2×10^9	2×10^9	2×10^9
Size /nm	50	50	50

考虑周围其他杂质相互影响, 其激光损伤阈值随激光脉冲的变化关系如图 8 所示。随着激光脉冲的增大, 杂质缺陷的热扩散长度增大, 在缺陷密度固定的情况下, 热扩散长度范围内所包含的杂质缺陷个数越多, 相互之间的影响越大, 因而损伤阈值与脉冲宽度之间不再是线性变化关系(图 2), 而是随着脉冲宽度的增大, 损伤阈值非线性增加。表 3 给出的缺陷密度在激光脉冲变化的条件下, 热扩散长度内的有效杂质个数满足表 4 所示关系。根据计算结果(图 8), 拟合后 τ 约为 0.50, 与材料激光损伤的时间标尺非常符合。

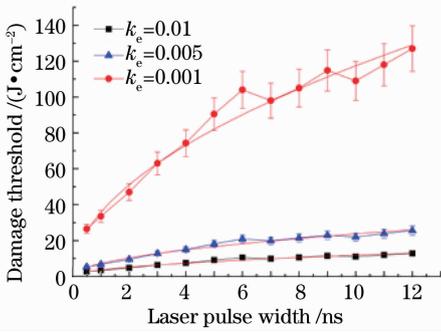


图8 考虑周围杂质影响条件下,损伤阈值随激光脉冲的变化

Fig.8 Damage threshold vary with the laser pulse width when considering the influence of surrounding inclusions

表4 周围杂质个数随脉冲变化关系

Table 4 Number of inclusions around a single inclusion vary with the change of laser pulse width

Laser pulse width /ns	1~6	7~9	10~12
Number	0	1	2

4 结 论

从传统热传导方程入手,根据有效热扩散长度建立一个区域范围内的杂质吸收模型。考虑由激光脉冲宽度变化引起的缺陷热扩散长度的变化,造成周边对温升有贡献的缺陷数目发生改变,进而影响材料的损伤阈值。模拟材料的损伤阈值与激光脉冲的对应关系,结果表明模型非常吻合实验得出的时间标尺 $F \propto t^{0.5}$ 。

参 考 文 献

- 1 H. Goldenberg, C. J. Tranter. Heat flow in an infinite medium heated by a sphere[J]. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1952, **3**(9): 296~298
- 2 M. D. Feit, A. M. Rubenchik. Implications of nanoabsorber initiators for damage probability curves, pulselength scaling and laser conditioning[C]. *SPIE*, 2003, **5273**: 74~82

- 3 R. W. Hopper, D. R. Uhlmann. Mechanism of inclusion damage in laser glass[J]. *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**(10): 4023~4037
- 4 F. Bonneau, P. Combis, J. Vierende *et al.*. Simulations of laser damage of SiO₂ induced by a spherical inclusion[C]. *SPIE*, 2001, **4347**: 308~315
- 5 Zhao Yuan'an, Wang Tao, Zhang Dongping. Pulsed laser induced damage model of optical coatings with absorbing inclusion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1372~1374
赵元安,王涛,张东平. 脉冲激光辐照光学薄膜的缺陷损伤模型[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1372~1374
- 6 A. Vaidyanathan, T. W. Walker, A. H. Guenther. Relative roles of avalanche multiplication and multi-photon absorption in laser-induced damage of dielectrics[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1980, **16**(1): 89~93
- 7 C. B. Schaffer, A. Brodeur, E. Mazur *et al.*. Laser-induced breakdown and damage in bulk transparent materials induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(11): 1784~1794
- 8 H. Krol, L. Gallais, C. Grezes-Basset *et al.*. Investigation of nanoprecursors threshold distribution in laser-damage testing[J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**(1-3): 184~189
- 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 Li Dawei, Zhao Yuan'an, He Hongbo *et al.*. Exponential fitting of laser damage threshold and analysis of testing errors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 273~275
李大伟,赵元安,贺洪波等. 光学元件激光损伤阈值的指数拟合法以及测试误差分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 273~275
- 11 P. W. Barber, S. C. Hill. Light Scattering by Particles: Computational Methods[M]. New York: World Science Publishing, 1998
- 12 M. J. Soileau. 40 year retrospective of fundamental mechanisms[C]. *SPIE*, 2008, **7132**: 713201
- 13 赵伊君. 激光烧蚀导弹壳体时可能产生的压强脉冲[M]. 赵伊君院士从教五十周年纪念文集(下卷),长沙:国防科学技术大学出版社,2002. 20~30
- 14 Moriaki Wakaki. Physical Properties and Data of Optical Materials[M]. Zhou Haixian, Cheng Yun Transl.. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. 266~270
Moriaki Wakaki. 光学材料手册[M]. 周海宪,程云译. 北京:化学工业出版社,2009. 266~270
- 15 L. Lameignere, T. Donval, M. Loiseau *et al.*. Accurate measurements of laser-induced bulk damage density[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(9): 095710

栏目编辑:韩峰