



·光学元件激光损伤·

单晶硅材料强激光损伤吸收波前模型的理论研究

王毕艺¹, 赵万利¹, 向霞², 袁晓东³, 祖小涛², 郑万国³, 邓洪祥²

(1. 电磁空间安全全国重点实验室, 天津 300308; 2. 电子科技大学 物理学院, 成都 610054; 3. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 改进了描述光学材料强激光损伤的吸收波前模型, 在原有模型的基础上引入了杂质缺陷吸收项, 并将一维形式推广到了三维。利用改进后的吸收波前模型, 数值模拟了红外单晶硅光学材料在波长 1064 nm 皮秒激光辐照时杂质源(以金属铁为例)附近材料的温度、损伤半径及损伤阈值等变化情况, 并分析了光学材料初始温度对损伤阈值的影响规律。数值结果显示: (1) 与传统的热传递模型不同, 在损伤阈值附近, 激光场能量密度从低于损伤到达到(或超出)损伤的微小变化导致温度场的巨大变化; (2) 达到损伤能量密度后, 杂质附近的最高温度及利用吸收波前表征的材料损伤半径随着辐照能量密度的增加近似线性增长; (3) 激光损伤阈值随着材料初始温度的增加而降低。研究结果表明改进后的吸收波前模型可以较好地描述光学材料的杂质缺陷诱导强激光损伤: 相比于传统的热超导模型, 吸收波前模型可以更合理的表示损伤阈值附近温度场的突变, 并可定量分析杂质诱导光学材料的强激光损伤尺寸。另外对单晶硅吸收波前模型的研究还显示提升材料的初始温度可以有效降低材料的强激光损伤阈值, 这为提升光电对抗中光电探测器的激光损伤效率提供了一种思路。

关键词: 杂质缺陷; 光学材料; 单晶硅; 吸收波前模型; 强激光损伤

中图分类号: TN248

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202335.220407

A theoretical study on intense laser induced damage of monocrystalline silicon by absorption front model

Wang Biyi¹, Zhao Wanli¹, Xiang Xia², Yuan Xiaodong³, Zu Xiaotao², Zheng Wanguo³, Deng Hongxiang²

(1. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Tianjin 300308, China;

2. School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;

3. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The absorption front model for laser induced damage of optical materials is modified. Different from the original model, the impurity defect absorption term is introduced, and the one-dimensional model is extended to a three-dimensional model. Using the modified absorption front model, temperature distribution near impurity(taking metal iron as an example), damage radius and damage threshold of infrared optical material of monocrystalline silicon are numerically studied, which is irradiated by 1064nm picosecond laser. The influence of initial temperature of the optical material on damage threshold is also studied. Our results show that: (1) Different from the traditional heat thermal transport models, near the damage threshold, a small change of laser field energy density from below to equal to or beyond damage threshold leads to a great change of temperature field in the presently modified absorption front model; (2) The maximum temperature near impurity and damage radius characterized by the absorption front increase approximately linearly with the increase of the irradiation energy density as the laser energy density goes far beyond damage threshold; (3) The laser damage threshold decreases with the increase of the initial temperature of the material. Our results prove that the presently modified absorption front model can better describe the laser damage induced by impurity defects in optical materials. Compared with the traditional thermal transport models, the present absorption front model can represent the sudden change of temperature field near the damage threshold more reasonably, and can quantitatively analyze laser damage size of optical materials induced by impurities. In addition, our results also show

* 收稿日期: 2022-12-28; 修订日期: 2023-03-22

基金项目: 电磁空间安全全国重点实验室基金项目 (JCKY2022210C005); 国家自然科学基金委员会与中国工程物理研究院联合基金项目 (U1830204)

联系方式: 王毕艺, wangbiyi530@163.com。

通信作者: 邓洪祥, denghx@uestc.edu.cn。

that increasing the initial temperature of the material can effectively reduce its laser damage threshold, which provides a way to improve the laser damage efficiency of photodetectors in photoelectric countermeasures.

Key words: impurity defect, optical materials, monocrystalline silicon, absorption front model, laser induced damage

红外光电探测器已被广泛应用于红外成像、红外侦察、红外制导、红外预警等诸多方向,高效地损伤红外光电探测器在光电对抗中具有重要价值。红外光学材料是红外光电探测器的基本材料,在光电对抗中,采用高能激光束对探测器进行辐照使得探测器材料出现永久损伤(硬破坏)是一种高效的损伤方法,因此研究红外材料的强激光损伤具有重要意义。

国内外诸多学者已经对红外光学材料及对应的红外探测器强激光辐照损伤进行了广泛而深入的研究,并取得了一系列重要的成果^[1-6]。对于光学材料强激光损伤机理的研究显示:当激光脉宽大于几十皮秒时,光学材料的损伤主要以热损伤为主要损伤机制,并且杂质缺陷是造成损伤的主要因素^[7]。在红外光学材料加工制备过程中,总是不可避免地会引入杂质和缺陷(如:机械加工引入的Fe,制备过程中形成的空位),这些杂质缺陷通常会对激光产生强烈的吸收(吸收远大于材料母体的吸收),成为光学强激光辐照损伤的前驱体和薄弱环节,因此当辐照激光的脉宽大于几十皮秒时,杂质缺陷诱导强激光损伤是红外光学材料激光辐照损伤的主要形式,在理论上需要建立相应的损伤模型进行分析^[8-10]。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室的Carr等人提出了杂质缺陷诱导损伤的吸收波前模型(Absorption Front Model, AF)^[11]。这个模型认为激光辐照过程杂质缺陷不仅会吸收激光能量,而且在吸收激光能量时还会升温,其温度将向四周的光学材料传递,引起光学材料升温,随着温度的升高,光学材料带隙降低直至塌陷,对激光的吸收系数急剧增加(热激发吸收),会吸收大量的激光能量。这个模型更真实地处理了杂质高温在基体中的传播过程。模型中除了有常规的声子传导过程外,还考虑了电子(等离子体)扩散引起的热传导过程,并且考虑了温度对于基体吸收系数的影响(热激发吸收)。Shen等人设计了一个验证吸收波前模型的实验,他们发现理论模拟结果与实验获得的损伤坑尺寸可以定性地吻合,并且发现只有杂质与基体结合很紧密时,才会引发基体中吸收波前(AF)的产生^[12]。虽然Carr等人提出的吸收波前模型在实验上得到了一定的验证,但仍然具有较明显的局限性:(1)在Carr等人的工作中,对于杂质缺陷吸收激光场能量的过程及其升温过程没有涉及,只是假定杂质缺陷一开始就具有很高的温度或者用另外一个高功率的激光替代杂质缺陷,因此无法分析具体杂质缺陷引起的损伤过程;(2)模型为一维形式,与实际三维的杂质缺陷损伤的情况有区别^[4]。

针对现有吸收波前模型的不足,本文进行了改进和发展,主要包括:(1)在模型中引入了描述杂质缺陷的吸收项;(2)将一维形式推广到了三维。在此基础上我们以红外光材料单晶硅为例模拟了红外光学材料存在铁金属杂质颗粒时的强激光损伤,分析了在波长1064 nm皮秒激光辐照时铁金属杂质附近材料母体的温度、熔化半径及损伤阈值等变化情况,并研究了材料初始温度对损伤阈值的影响规律,从杂质诱导损伤的角度系统研究了红外光学材料的强激光损伤。

1 理论分析

1.1 理论模型

当激光辐照在含有杂质的红外光学元件上时,由于不含杂质的区域吸收很小,吸收引起的温度变化也很小,因此通常不先发生强激光损伤。光学材料中的杂质通常由于对激光能量有强烈的吸收,因此是损伤的“前驱体”。

以红外光学材料硅为例,硅材料在加工过程中,通常需要进行机械加工,并在材料上残留一些铁的微小颗粒,这些杂质颗粒强烈吸收激光能量,造成材料的强激光损伤。传统的热传导方程中通常认为材料的各种热力学参数不随温度变化而变化^[13],并且热导主要是声子传递。但由于激光辐照时,杂质缺陷吸收激光场能量后可以达到很高的温度^[14-15],杂质的高温将会使附近的光学材料热力学参数发生极大的改变,另外高温还会引起材料能隙收缩,进而激发出大量的自由电子,当杂质温度达到一定量值时,这些自由电子在后续的传导中将起主导作用,当自由电子被明显激发后可以认为吸收波前产生了,并且材料发生了损伤,吸收波前传播的距离代表了损伤的尺寸^[11]。

在Carr等人的工作中,没有涉及到杂质缺陷在激光辐照过程中的升温过程,其方程中也没有关于杂质缺陷的源项。实验中已经发现,经过动态刻蚀处理后的光学材料,造成光学材料强激光损伤的主要是纳米级的杂质颗粒^[16]。我们采用电磁理论中的Mie散射理论对这些纳米级颗粒进行分析与计算。根据Mie理论^[17-18],杂质颗粒对激光的

吸收截面计算公式如下

$$\begin{cases} \sigma_{\text{abs}} = \sigma_{\text{ext}} - \sigma_{\text{sca}} \\ \sigma_{\text{ext}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) [\text{Re}(a_n + b_n)] \\ \sigma_{\text{sca}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2) \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ_{abs} 为颗粒的吸收截面； σ_{ext} 为消光截面； σ_{sca} 为散射截面； a_n 和 b_n 为 Mie 散射系数； λ 为激光波长。Mie 散射理论可以用来计算各种材质（金属、半导体、绝缘材料等）和任意尺寸均匀球形杂质对激光的散射和吸收能力。当杂质尺寸远小于激光波长时，非球形纳米级杂质可近似看成球形，可采用 Mie 散射理论来进行计算。但当杂质尺寸和激光波长差不多时，如果杂质不是球形，此时需要考虑杂质形状对 Mie 散射理论的修正。

在获得杂质缺陷吸收项的信息后，我们将吸收源的信息代入到修正后的三维热爆模型方程中，其修正后的热爆模型形式如下

$$[c(T, t)\rho] \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_{\text{PH}}(T, t, \vec{r}) \cdot \nabla^2 T + \nabla T \cdot \nabla \kappa_{\text{PH}}(T, \vec{r}, t) + G_{\text{FE}}(\vec{r}, t, T) + I_{\text{L}}(\vec{r}, t) \alpha_{\text{INT}}(T, t) + S(r, t, I) \quad (2)$$

式中： $c(T, t)$ 是材料的比热容（是温度与时间的函数）； $\kappa_{\text{PH}}(T, \vec{r}, t)$ 是声子热传导率； $G_{\text{FE}}(\vec{r}, t, T)$ 是材料热激发产生的自由电子扩散对热传导的贡献； $\alpha_{\text{INT}}(T, t)$ 是材料的吸收系数（温度的函数）； $S(r, t, I)$ 是吸收源。我们采用有限时域差分法对公式(2)进行数值计算，其差分形式为（考虑球坐标形式）

$$\begin{aligned} [c(T)\rho] \cdot \frac{T(r, \Delta t + t) - T(r, t)}{\Delta t} = & K_{\text{PH}}(T) \cdot \frac{2}{r} \left[\frac{T(r+l, t) - T(r, t)}{\Delta r} \right] + K_{\text{PH}}(T) \cdot \left[\frac{T(r+l, t) + T(r-l, t) - 2T(r, t)}{\Delta r^2} \right] + \\ & \left[\frac{T(r+l, t) - T(r, t)}{\Delta r} \right]^2 \cdot \frac{dK_{\text{PH}}(T)}{dT} + G_{\text{FE}}(r) + I_{\text{L}} \alpha_{\text{INT}}(T) + S(r, t, I) \end{aligned} \quad (3)$$

对于金属杂质和硅基体之间的边界条件，我们采用文献 [13] 中的耦合边界条件进行处理（热传递方程的第一类和第二类边界条件的耦合），耦合边界条件形式如下

$$\begin{cases} T_a(a) = T_h(a) \\ K_a \left(\frac{\partial T_a}{\partial r} \right)_{r=a} = K_h \left(\frac{\partial T_h}{\partial r} \right)_{r=a} \end{cases} \quad (4)$$

式中：初始条件为 $T_a(r, t=0) = T_h(r, t=0) = 300 \text{ K}$ ；这里 T_a 、 T_h 分别为杂质（这里为金属杂质）和光学材料母体（这里为硅基体）的温度； K_a 、 K_h 分别为杂质和光学材料母体的热传导系数； $r = a$ 为金属杂质的半径。

1.2 吸收波前模型的数值仿真

我们以红外光学材料单晶硅为例，利用改进后的吸收波前模型对铁杂质颗粒诱导的硅强激光损伤进行了数值仿真研究。数值仿真采用时域有限差分法 (FDTD) [19] 进行计算（如图 1 所示），在计算过程中选用的激光波长为 1064 nm，脉宽 400 ps。为了真实地反映铁杂质颗粒升温对周围光学材料参数的影响，在数值计算过程中，铁杂质颗粒的尺寸为 200 nm，采用的硅材料参数都是温度的函数。

所采用的单晶硅在 (300~1700 K) 不同温度下的摩尔热容为 $C_p = 23.5 + 3.05 \times 10^{-3} T - 2.93 \times 10^{-7} T^2 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ，密度为 $\rho = 2.33 - 2.19 \times 10^{-5} T \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})$ ；液态硅在不同 (1700~2500 K) 温度下的热容为 $C_p = 29.0 \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ ，密度为 $\rho = 2.54 - 2.19 \times 10^{-5} T - 1.21 \times 10^{-8} T^2 \text{ (g} \cdot \text{cm}^{-3})$ [20]。数值计算中单晶硅母体对激光的吸收系数随着温度变化由公式(4)可得

单晶硅在不同温度下的吸收系数由下式可得 [21]

$$\alpha(h\nu, T) = A \sum_{j=1}^4 P_j \left[\frac{(h\nu - E_g(T) + E_p)^2}{\exp(E_p/kT) - 1} + \frac{(h\nu - E_g(T) - E_p)^2}{1 - \exp(-E_p/kT)} \right] \quad (5)$$

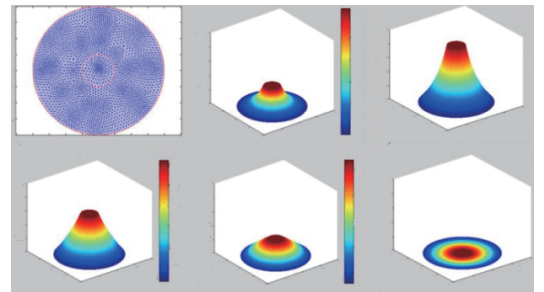


Fig. 1 Schematic diagram for mesh dividing of FDTD on absorption front (AF) model

图 1 AF 模型有限时域差分法的网格划分示意图

式中:下标 1、2、3、4 代表单晶硅不同声子类型的声子辅助带间光吸收,其中 1 代表纵声学声子,2 代表横声学声子,3 代表横光学声子,4 代表纵光学声子, E_{P_j} 为不同类型声子在 $\langle 100 \rangle$ 方向的能量, T 为硅材料的温度, $E_g(T)$ 为硅材料在不同温度时的能隙; A 和 P_j (不同类型声子辅助吸收比例参数) 为吸收参数,其值由实验确定。对于单晶硅由实验确定的参数如下: $P_1 = 1, P_2 = 0.033, P_3 = 0.063, P_4 = 0.063, E_{P_j} = k\theta_j, \theta_1 = 212 \text{ K}, \theta_2 = 670 \text{ K}, \theta_3 = 1050 \text{ K}, \theta_4 = 1420 \text{ K}, E_g(T) = E_g(0) - BT^2/(C+T), B = 4.73 \times 10^{-4} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}, C = 635 \text{ K}, E_g(0)$ 为 0 K 时的带隙值,其值为 1.155 eV。

2 计算结果与分析

2.1 激光能量密度与杂质附近的温度关系

图 2 是材料初始温度为 300 K, 激光波长为 1064 nm, 脉宽为 400 ps 的不同激光能量密度 0.2、0.24、0.32、0.36 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 辐照后杂质源附近的温度场分布(含杂质的一个截面)。由图可以发现随着激光能量密度的增加铁杂质附近的温度逐渐升高,并呈现球状分布,这与文献报道一致^[11]。图 3 显示的是在这些能量密度激光辐照时硅母体与铁杂质接触处的最高温度,也即杂质表面的最高温度。在论文中我们以光学材料在纳秒激光辐照时常见的火山型损伤类型为考虑对象(与文献[11]所考虑的损伤类型一致),因此采用硅基体的熔化温度作为损伤判据。由图可以发现:当能量密度低于 0.24 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,最高温度低于单晶硅的熔点 1400 K,此时材料未发生损伤;当能量密度在 0.24 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 附近时,此时材料刚发生损伤;当能量密度大于 0.28 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,此时材料的最高温度已经远超熔点,随着能量密度的增长,最高温度随着能量密度的增长近似于线性增长,并且增长幅度远大于能量密度较低时的情况。需要注意的是,在数值计算过程中,我们考虑了硅基体熔化后的材料热力学参数变化(见公式 5),但由于金属铁杂质的熔点高于硅基体,为了方便计算,我们未考虑杂质在高于损伤阈值区域的熔化。在硅基开始熔化,但铁杂质未熔化的阶段(高于损伤阈值不太远的能量区域),相关材料参数仍可以使用,但当激光能量很大时就需要进一步考虑杂质的熔化过程(此时杂质也熔化了)。因此在高于损伤阈值的附近区域(离损伤阈值不太远的区域),线性关系有一定的合理性,但如果激光能量继续增加,杂质出现熔化,线性关系就需要进一步修正。图 4 为 0.28 $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ 能量密度激光辐照后杂质附近的温度场分布,此时杂质表面最高温度为 2400 K 左右,远超单晶硅熔点 1400 K。因此可以发现

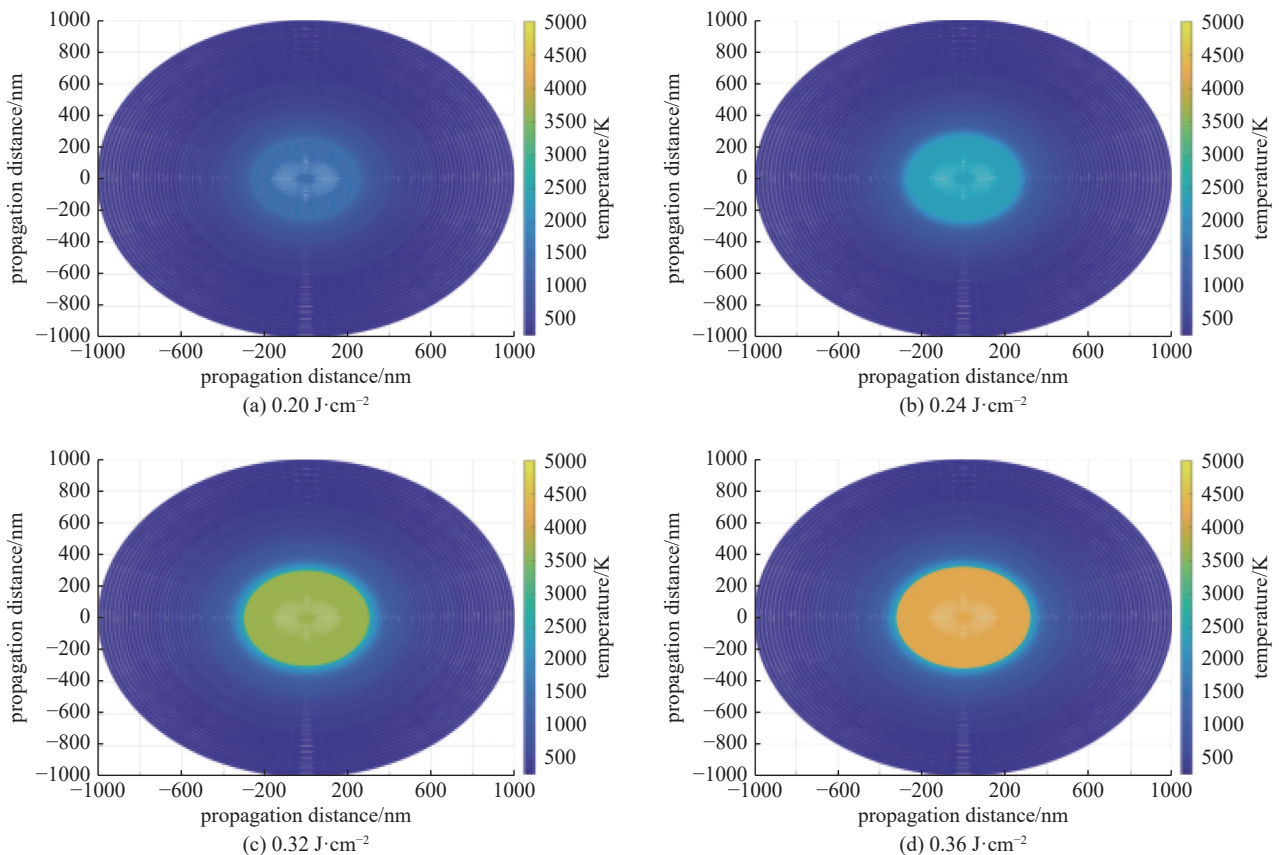


Fig. 2 Temperature fields near impurity source after different laser irradiation at different laser energy densities (material's initial temperature 300 K, laser wavelength 1064 nm, pulse width 400 ps; irradiation time 400 ps)

图 2 不同激光能量密度照射后杂质源附近的温度场分布(材料初始温度 300 K, 激光波长 1064 nm、脉宽 400 ps; 辐照时间 400 ps)

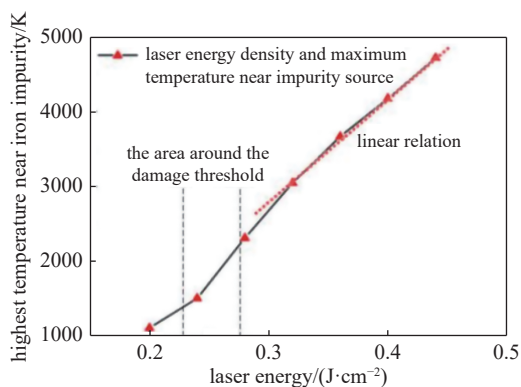


Fig. 3 Highest temperature near iron impurity after irradiation at different laser energy densities (0.2, 0.24, 0.28, 0.32, 0.36, 0.40, 0.45 J·cm⁻²) (initial material temperature 300 K, laser wavelength 1064 nm, pulse width 400 ps)

图3 不同激光能量密度(0.2, 0.24, 0.28, 0.32, 0.36, 0.40, 0.45 J·cm⁻²) 辐照后铁杂质附近的最高温度(材料初始温度 300 K, 激光波长 1064 nm, 脉宽 400 ps)

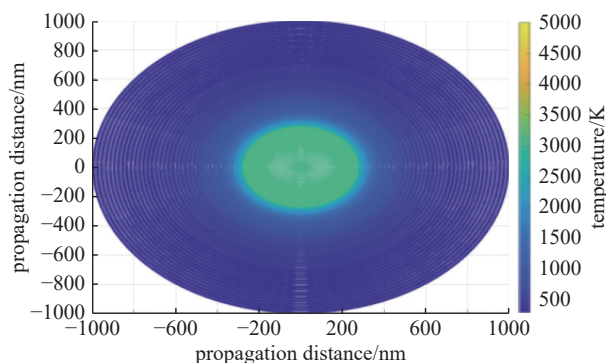


Fig. 4 Temperature field near impurity source after laser radiation. Here the initial temperature of material is 300 K, laser pulse width is 400 ps, wavelength is 1064 nm, laser energy is 0.28 J·cm⁻² (irradiation time 400 ps)

图4 材料初始温度 300 K, 激光脉宽 400 ps, 波长 1064 nm, 激光能量为 0.28 J·cm⁻² 的激光辐照后, 杂质源附近的温度分布(辐照时间 400 ps)

损伤阈值附近, 能量密度的微小变化, 将会导致温度场急剧变化。这与光学材料强激光损伤的特点相吻合, 即低于某个能量密度时材料不发生损伤, 但大于某个临界值后, 损伤突然发生。

2.2 激光能量密度与损伤半径的关系

我们在图 5 中展示了数值模拟得到的硅材料在不同能量密度激光作用下的损伤熔化半径变化情况。由图 5 可以发现, 材料的损伤半径随着激光能量密度的增长而增大。当激光能量密度大于 0.28 J·cm⁻² 后损伤半径与激光能量密度也存在线性关系, 这与文献报道一致^[16]。在吸收波前模型中, 损伤半径与吸收波前的传播密切相关, 在图 6 中我们计算了 0.25 J·cm⁻² 与 0.28 J·cm⁻² 激光能量辐照时吸收波前的传播情况。由图可以发现激光能量密度高的吸收波前传播速度要明显大于能量密度低的吸收波前传播速度, 这就是激光能量密度越高损伤半径越大的内在机制。

2.3 材料初始温度对损伤阈值的影响

图 7 展示的是单晶硅不同初始温度时, 杂质附近最高温度在不同激光(激光脉宽 400 ps, 波长 1064 nm)能量密度(0.2、0.24、0.28 J·cm⁻²)下的情况。

从中可以得出, 随着初始温度的增加, 不同能量密度激光辐照后的杂质附近最高温度显著上升, 这将导致材料的损伤阈值下降。在图 8 中, 我们计算了不同初始温度情况下单晶硅的损伤阈值, 由图可以发现随着初始温度的

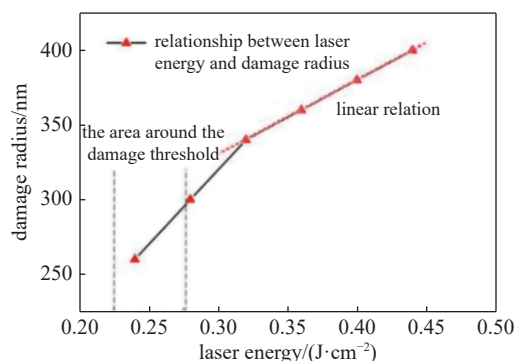


Fig. 5 Damage radius of monocrystalline silicon after the irradiation of different laser energy densities. Here, initial temperature of the material is 300 K, laser wavelength is 1064 nm, and pulse width is 400 ps

图5 材料初始温度 300 K, 波长 1064 nm, 脉宽 400 ps, 不同激光能量密度情况下, 辐照过后单晶硅损伤半径变化

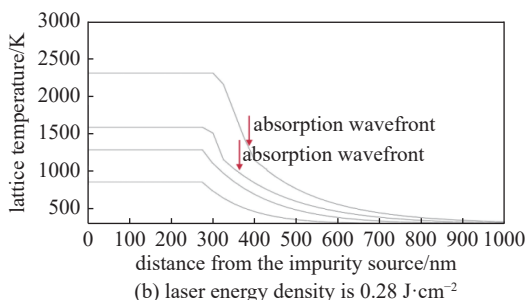
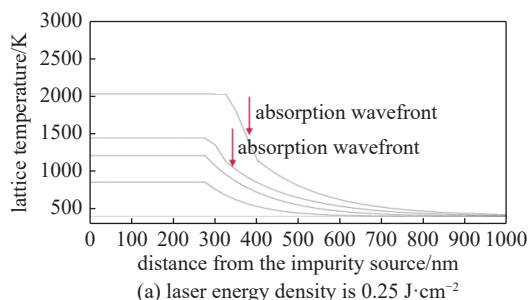


Fig. 6 Propagation of absorption front during laser irradiation (time interval of each curve is 100 ps)

图6 激光辐照时吸收波前的传播情况(每条曲线时间间隔 100 ps)

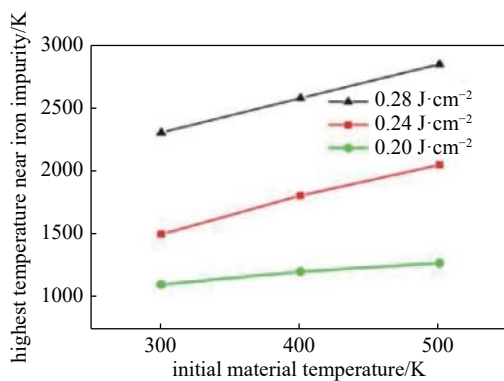


Fig. 7 Maximum temperature near iron impurity after laser (400 ps, 1064 nm) irradiation at different initial temperatures of monocrystalline silicon

图 7 单晶硅不同初始温度时激光 (400 ps, 1064 nm) 辐照后铁杂质附近最高温度

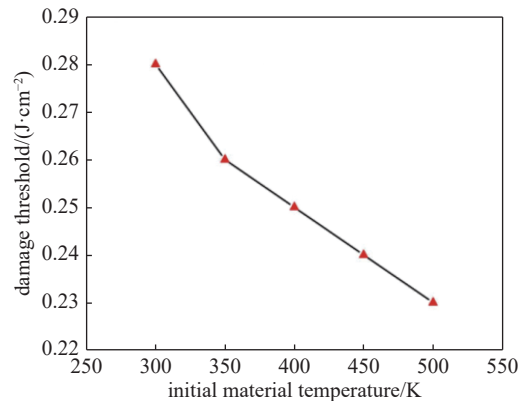


Fig. 8 Relationship between damage threshold and initial temperature of monocrystalline silicon (laser wavelength 1064 nm, pulse width 400 ps)

图 8 单晶硅损伤阈值与初始温度的关系 (激光波长为 1064 nm, 脉宽为 400 ps)

下降, 红外光学材料单晶硅的损伤阈值显著下降。这意味着在光电对抗中, 若能先提升红外光电探测器中红外光学材料的初始温度, 如: 将红外波长的连续激光(或毫秒、微秒激光)与脉冲激光一起(纳秒、皮秒)辐照, 利用连续激光提升光学材料的初始温度, 就可以有效提升脉冲激光对光电探测器的损伤效率。

3 结 论

在论文中, 我们对现有描述光学材料损伤的吸收波前模型进行了改进和发展, 在方程中引入了杂质缺陷吸收源项, 并将一维形式推广到了三维。利用改进后的吸收波前模型, 我们对红外光学材料单晶硅的皮秒激光辐照损伤进行了数值仿真, 分析了铁杂质颗粒诱导单晶硅的强激光损伤。数值结果显示: (1) 与传统的热传递模型不同, 在损伤阈值附近, 激光场能量密度从低于损伤到达到(或超出)损伤的微小变化导致温度场的巨大变化; (2) 达到损伤能量密度后, 杂质附近的最高温度及利用吸收波前表征的材料损伤半径随着辐照能量密度的增加近似线性增长; (3) 激光损伤阈值随着材料初始温度的增加而降低。我们的研究表明包含杂质缺陷项的吸收波前模型可以更合理的表示损伤阈值附近温度场的突变, 并可定量分析杂质诱导光学材料的强激光损伤尺寸。另外材料初始温度对损伤阈值影响的研究表明: 提升红外光电探测器中红外光学材料的初始温度, 可以有效降低脉冲激光对红外光学材料的损伤阈值, 进而提升激光对探测器的损伤效率。

参考文献:

- [1] 王东, 王非, 白冰, 等. 10.6 μm 脉冲激光对多晶硅探测器干扰损伤实验[J]. *激光与红外*, 2015, 45(9): 1084-1087. (Wang Dong, Wang Fei, Bai Bing, et al. Experiment study on the jamming and damage thresholds of polycrystalline silicon detector irradiated by 10.6 μm pulsed CO₂ laser[J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(9): 1084-1087)
- [2] 栗兴良, 牛春晖, 马牧燕, 等. 单脉冲激光损伤CCD探测器的有限元仿真[J]. *激光技术*, 2016, 40(5): 730-733. (Li Xingliang, Niu Chunhui, Ma Muyan, et al. Finite element simulation of damage characteristics of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation[J]. *Laser Technology*, 2016, 40(5): 730-733)
- [3] Malik R, Mills B, Price J H V, et al. Determination of the mid-IR femtosecond surface-damage threshold of germanium[J]. *Applied Physics A*, 2013, 113(1): 127-133.
- [4] Liu Yang, Liu Lisheng, Tang Wei, et al. Experimental study on the damage of optical materials by out of band composite laser[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 3578.
- [5] Lee H. Picosecond mid-IR laser induced surface damage on gallium phosphate (GaP) and calcium fluoride(CaF₂) [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2007, 21(7): 1077-1082.
- [6] Wang X, Zhu D H, Shen Z H, et al. Surface damage morphology investigations of silicon under millisecond laser irradiation[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(5): 1583-1588.
- [7] Stuart B C, Feit M D, Herman S, et al. Nanosecond-to-femtosecond laser-induced breakdown in dielectrics[J]. *Physical Review B*, 1996, 53(4): 1749-1761.
- [8] 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: 0614003. (Xu Jiao, Chen Lixia, You Xinghai, et al. Thermal stress damage of thin-film components induced by surface impurities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37: 0614003)
- [9] 彭玉峰, 盛朝霞, 张虎, 等. 激光辐照下固体材料的温度分布理论研究[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(10): 1225-1228. (Peng Yufeng, Sheng Zhaoxia, Zhang Hu, et al. Theoretical analyses of temperature distributions of solid materials irradiated by high power laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,

16(10): 1225-1228)

- [10] 段晓峰, 牛燕雄, 张维. 半导体材料的激光辐照效应计算和损伤阈值分析[J]. 光学学报, 2004, 24(8): 1057-1061. (Duan Xiaofeng, Niu Yanxiong, Zhang Chu. Calculation of laser irradiation effect and analysis of laser-induced damage threshold in semiconductor[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(8): 1057-1061)
- [11] Carr C W, Bude J D, DeMange P. Laser-supported solid-state absorption fronts in silica[J]. *Physical Review B*, 2010, 82: 184304.
- [12] Shen N, Bude J D, Carr C W. Model laser damage precursors for high quality optical materials[J]. *Optics Express*, 2014, 22(3): 3393-3404.
- [13] Ristau D. Laser-induced damage in optical materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014: 27-30.
- [14] 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.
- [15] Stevens-Kalceff M A, Stesmans A, Wong J. Defects induced in fused silica by high fluence ultraviolet laser pulses at 355 nm[J]. *Applied Physics Letters*, 2002, 80(5): 758-760.
- [16] Bude J, Miller P E, Shen N, et al. Silica laser damage mechanisms, precursors and their mitigation[C]//Proceedings of SPIE 9237, Laser-Induced Damage in Optical Materials. 2014: 92370S.
- [17] 项建胜. 基于Mie光散射理论的气泡测量技术研究[D]. 西安: 中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所), 2007: 10-11. (Xiang Jiansheng. Research on bubble measurement technology based on Mie light scattering theory[D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2007: 10-11.)
- [18] Van De Hulst H C. Light scattering by small particles[M]. New York: Dover Publications, 1981: 40-57.
- [19] Wang M Y, Ge D B, Xu J, et al. FDTD study on back scattering of conducting sphere coated with double negative metamaterials[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, 28: 689.
- [20] Endo R K, Fujihara Y, Susa M. Calculation of the density and heat capacity of silicon by molecular dynamics simulation[J]. *High Temperatures-High Pressures*, 2003, 35/36(5): 505-511.
- [21] Sin E H, Ong C K, Tan H S. Temperature dependence of Interband optical absorption of silicon at 1152, 1064, 750, and 694 nm[J]. *Physica Status Solidi (A)*, 1984, 85(1): 199-204.