

## 组合激光辐照单晶硅的热作用数值分析

张明鑫, 聂劲松, 孙可, 韩敏

(国防科技大学 电子对抗学院 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

**摘要:** 利用有限元法对组合激光辐照单晶硅的温度及应力场进行了数值分析, 在组合激光与连续激光平均功率密度相同的前提条件下比较了组合激光和连续激光分别作用于单晶硅的损伤效果。计算结果表明, 组合激光与连续激光相比更有利于实现对单晶硅的热损伤; 组合激光作用下单晶硅内部的 Von Mises 应力、轴向应力和环向应力比在连续激光作用下要大, 组合激光对单晶硅的损伤比连续激光更强。

**关键词:** 组合激光; 激光损伤; 数值分析; 单晶硅

中图分类号: TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.1106011

## Numerical analysis on thermal function of single crystal silicon irradiated by combined laser

Zhang Mingxin, Nie Jinsong, Sun Ke, Han Min

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute,  
National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** The numerical analysis was conducted on the temperature and stress fields of single crystal silicon irradiated by the combined laser by the finite element method. The damage effect of the single crystal silicon which was respectively irradiated by the combined laser and continuous laser was compared, which was under the condition that the average power density of combined laser was equal to the continuous laser. The results show that combined laser is more conducive to realize thermal damage of single crystal silicon than continuous laser. The Von Mises stress, axial stress and hoop stress in single crystal silicon is higher when the model is irradiated by the combined laser than when it is under continuous lasers. The combined laser damage in monocrystalline silicon is stronger than continuous laser.

**Key words:** combined laser; laser damage; numerical analysis; single crystal silicon

收稿日期: 2018-06-05; 修订日期: 2018-07-03

基金项目: 国家“十三五装备”预先研究项目

作者简介: 张明鑫(1994-), 男, 硕士生, 主要从事激光损伤方面的研究。Email: zmx7530101@163.com

导师简介: 聂劲松(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电对抗技术方面的研究。Email: njs7001@sina.com

## 0 引言

随着科学技术的发展,硅基探测器已广泛运用到诸多军事领域,如卫星侦察、武器导航及夜视系统等<sup>[1-5]</sup>。硅基探测器中具有代表性的便是 CCD 探测器<sup>[6-7]</sup>。因此,关于 CCD 工作原理及性质的研究有很多,而激光与 CCD 的相互作用也逐渐引起了专家学者的关注<sup>[8-13]</sup>。

由于单晶硅是 CCD 探测器不可或缺的一部分,通过研究组合激光对单晶硅的损伤对研究组合激光对硅基探测器的损伤机理有一定的参考价值。张磊<sup>[14]</sup>通过实验测得了单晶硅在 808 nm 和 1319 nm 激光单独辐照及两种激光组合辐照时的反射率、透射率及耦合系数的变化关系,说明了当采用波段内组合激光时可大幅度提高硅对波段外激光的吸收能力;李佳桂<sup>[15]</sup>使用由毫秒脉冲激光与纳秒脉冲激光组合而成的组合激光辐照单晶硅,得到了双激光不同能量配比时材料的温度场,认为相同能量的组合激光对单晶硅的损伤效果比同等能量的毫秒激光要好。上述研究均说明了在特定条件下组合激光更有利于实现对材料与光学器件的损伤。

组合激光的组合方式有很多,连续激光与高峰值功率脉冲激光组成的组合激光对单晶硅的损伤研究仍未见报道。文中建立了 1.064 μm 连续激光与高峰值功率脉冲激光的组合激光对单晶硅损伤的理论模型,对单晶硅在激光辐照下的温度及应力分布进行了数值分析,深入比较了相同能量的前提下组合激光与连续激光对单晶硅损伤效果的差异。研究表明,在损伤单晶硅的效果方面,组合激光相比于连续激光损伤效果更明显。文中为激光损伤硅基探测器技术的发展及未来的实际运用提供了思路。

## 1 数学模型及理论推导

### 1.1 理论模型

#### 1.1.1 温度场分析

在激光辐照单晶硅的过程中,传热所用公式为:

$$\rho(c) \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rk \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right) + q \quad (1)$$

式中:  $T(r, z, t)$  表示在  $(r, z, t)$  的瞬时温度;  $\rho$  为材料的

密度;  $c$  为材料的热容;  $k$  为热导率。  $q$  为体积热源, 可以表达为:

$$q = I_0(1-R)\alpha f(r)g(t)\exp(-\alpha z) \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为入射激光光斑中心处的峰值功率密度;  $R$  为材料表面反射率;  $\alpha$  为材料对光的吸收系数;  $f(r)$  和  $g(t)$  分别为激光光束的空间和时间分布。假设入射光为高斯分布, 对于基模激光(TEM<sub>00</sub>), 它们可以表达为:

$$f(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{a_0^2}\right) \\ g(t) = 1 \\ I(r, t) = I_0 \exp\left(-2\frac{2r^2}{a_0^2}\right) \quad (3)$$

式中:  $a_0$  为高斯光束峰值光强的  $1/e^2$  所对应的光斑半径。

根据公式(1)~(3), 有限元法控制温度的方程可以表达为:

$$[C]\{\dot{T}\} + [K_h]\{T\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中:  $[C]$  为热容矩阵;  $\{\dot{T}\}$  为温升率向量;  $[K_h]$  为热传导矩阵;  $\{T\}$  为温度向量;  $\{Q\}$  为被材料吸收的激光能量。Crank-Nicolson 方法<sup>[16-17]</sup>用于解公式(4), 得到:

$$\left(\frac{1}{\Delta t}[C] + \theta[K_h]\right)\{T\}_i = \left(\frac{1}{\Delta t}[C] - (1-\theta)[K_h]\right)\{T\}_{i+\Delta t} + \theta\{Q\}_i + (1-\theta)\{Q\}_{i+\Delta t} \quad (5)$$

式中:  $\Delta t$  为时间间隔,  $\theta = 1/2$ 。

#### 1.1.2 应力场分析

在弹性形变区域内应变随应力的变化而线性变化, 在塑性区域内呈现非线性变化趋势。应变与瞬时应力和载荷有关, 在每一个节点可以认为温度的增量等同于载荷的增量。热应力的概念来自于热弹塑性结构理论及冯米塞斯屈服应力准则<sup>[18]</sup>。应力-应变的关系由下式给出:

$$\{\Delta\sigma\} = [D]_{ep}\{\Delta\varepsilon\} \quad (6)$$

式中:  $\{\Delta\sigma\}$  为材料的总应力增量;  $\{\Delta\varepsilon\}$  为材料的总应变增量;  $[D]_{ep}$  为弹塑性矩阵。

弹性区域满足公式  $\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon\}_e + \{\Delta\varepsilon\}_T$ , 其中  $\{\Delta\sigma\}_e$  为弹性形变增量,  $\{\Delta\varepsilon\}_T$  为热应变增量。  $\{\Delta\varepsilon\}_T = \{\alpha\}\{\Delta T\}$ , 其中  $\{\alpha\}$  为热膨胀系数矩阵;  $\{\Delta T\}$  为温度增量矩阵。因此,  $\{\Delta\sigma\}$  可以表达为:

$$\{\Delta\sigma\} = [D]_e \left( \{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon\}_T - \frac{\partial [D]_e^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \right) \quad (7)$$

式中： $[D]_e$  为弹性矩阵：

$$[D]_e = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1-\mu & \mu & \mu & 0 \\ \mu & 1-\mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\mu)/2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中： $E$  为材料的杨氏模量； $\mu$  为材料的泊松比。

在塑性区域，整体应变增量可表示为  $\{\Delta\varepsilon\} = \{\Delta\varepsilon\}_e + \{\Delta\varepsilon\}_T + \{\Delta\varepsilon\}_P$ ，其中  $\{\Delta\varepsilon\}_P$  是材料的塑形应变增量。应力-应变关系最终可以表示为：

$$\Delta\sigma = [D]_{ep} \left( \{\Delta\varepsilon\} - \{\Delta\varepsilon\}_T - \frac{\partial [D]_e^{-1}}{\partial T} \{\sigma\} dT \right) + \frac{[D]_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \frac{\partial H}{\partial T} dT}{H' + \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D]_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}}} \quad (9)$$

式中： $H'$  为硬度系数； $[D]_{ep}$  为弹塑性矩阵：

$$[D]_{ep} = [D]_e - \frac{[D]_e \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D]_e}{H' + \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T [D]_e \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right\}} \quad (10)$$

从时间  $t$  到  $t+\Delta t$  节点的温度载荷增量会转换为节点的应力载荷增量。公式(6)中的应变增量可表示为：

$$\{\Delta\sigma\} = [D]_{ep} ([B] \{\Delta U\} - \{\Delta\varepsilon\}_T) \quad (11)$$

式中： $[B]$  为几何矩阵； $\{\Delta U\}$  为位移增量。 $\{\Delta R\}_{t+\Delta t}$  代表了  $\Delta t$  时间内温度增量导致的节点应力增量：

$$\{\Delta R\}_{t+\Delta t} = \int_e [B]^T [D]_{ep} \{\Delta\varepsilon\}_T 2\pi r dr dz \quad (12)$$

在  $t+\Delta t$  时间点的具体位移增量公式为：

$$[K]_{t+\Delta t} \{\Delta U\} = \{\Delta R\} \quad (13)$$

式中： $[K]$  为总体刚度矩阵。

根据平衡公式，位移增量  $\{\Delta U\}$  可由公式(13)计算出来。再代入公式(12)，就可以得到材料的应力增量  $\Delta\sigma$ ，从而得到每一个时刻的应力。

### 1.2 模型参数设置

在数值仿真中，单晶硅的厚度取  $150 \mu\text{m}$ ，宽度和长度取  $4.5 \text{ mm}$ 。连续激光的平均功率密度为  $400 \text{ W/cm}^2$ ，高峰值功率脉冲激光的峰值功率密度为  $20 \text{ MW/cm}^2$ ，脉宽为  $10 \text{ ns}$ ，频率为  $10 \text{ Hz}$ ；组合激光的

平均功率与连续激光相同，其中连续激光部分的功率密度为  $398 \text{ W/cm}^2$ ，脉冲激光部分的平均功率密度为  $2 \text{ W/cm}^2$ 。激光垂直作用于单晶硅的表面呈轴对称分布，聚焦光斑半径为  $0.15 \text{ mm}$ 。单晶硅对  $1.064 \mu\text{m}$  激光的吸收系数为  $0.08 \mu\text{m}^{-1}$ 。图 1 为组合激光辐照单晶硅的热作用模型。图 1 中， $z$  轴为模型的对称轴， $r$  为径向方向， $O$  为前表面的中心。为了使问题简化且与现实情况相符，文中作出如下假设：(1) 材料是各向同性且均匀的，材料的热、力学参数不随时间变化，如表 1 所示；(2) 忽略硅表面的热辐射，并设置上表面与底部绝热，四周与空气对流，对流换热系数  $K=5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ；(3) 模型初始温度  $T_0=300 \text{ K}$ ；(4) 计算热应力时设置底面固定。

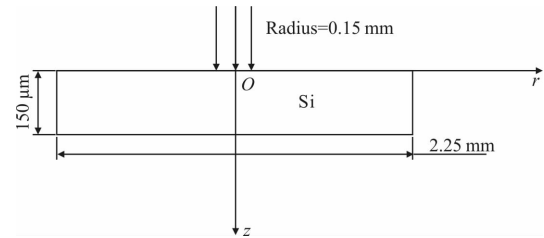


图 1  $1.064 \mu\text{m}$  组合激光辐照单晶硅的理论模型

Fig.1 Theoretical model of single crystal silicon irradiated by  $1.064 \mu\text{m}$  combined laser

表 1 材料的性能参数

Tab.1 Performance parameters of material

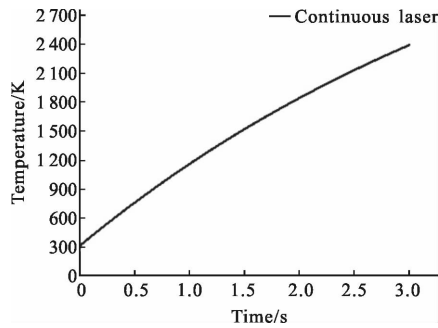
Material	Si
Density/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	2 330
Heat conduction/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	148
Thermal capacity/ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	700
Thermal expansion coefficient/ $\text{K}^{-1}$	$7.8 \times 10^{-6}$
Poisson ratio	0.28
Melting point/K	1 680
Young's modulus/Pa	$1.07 \times 10^{11}$

## 2 仿真结果与讨论

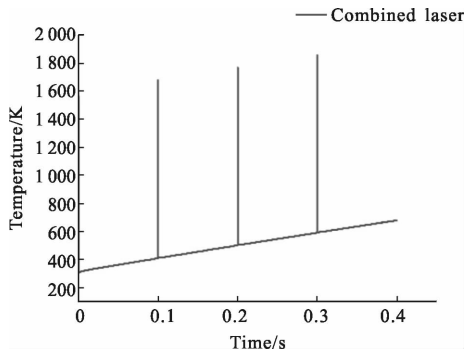
### 2.1 温度场结果

平均功率密度为  $400 \text{ W/cm}^2$  的组合激光、 $400 \text{ W/cm}^2$  的连续激光分别作用于单晶硅时，单晶硅表面中心

的温度随时间变化如图 2 所示。从图中可以看出,连续激光作用下光斑中心的温度随时间的增加而增加,但由于对流换热,材料温度上升的速度较为缓慢,在  $t=1.7\text{ s}$  时才能达到材料的熔点  $1680\text{ K}$ ;组合激光辐照单晶硅时,当  $t$  在  $0\sim 0.1\text{ s}$  之间时,组合激光中的高功率脉冲部分不起作用,仅连续激光部分起作用,因此温度缓慢上升;当  $t=0.1\text{ s}$  时,组合激光中的高功率脉冲部分起决定性作用,因此材料表面中心点温度迅速增长。在第一个脉冲作用后,材料表面中心温度达到  $1690\text{ K}$ ,超过了单晶硅的熔点  $1680\text{ K}$ ,硅表面中心开始熔融。在第一个脉冲作用之后表面中心温度迅速下降,然后组合激光中的连续部分起主要作用,温度缓慢上升直至  $t=0.2\text{ s}$  第二个脉冲开始作用。由图 2 可见,相比于连续激光作用单晶硅,组合激光将会引起更大的温升,单晶硅会发生更剧烈的热损伤。



(a) 连续激光作用单晶硅时材料中心温度变化图  
(a) Temperature variation of the material center of the single crystal silicon irradiated by continuous laser



(b) 组合激光作用单晶硅时材料中心温度变化图  
(b) Temperature variation of the material center of the single crystal silicon irradiated by combined laser

图 2 连续激光、组合激光分别作用时材料中心温度变化图  
Fig.2 Temperature variation of the material center irradiated by continuous laser and combined laser respectively

组合激光作用于单晶硅时,在  $t=0.1\text{ s}$  时单晶硅表面已经发生了热损伤,损伤半径随时间变化如图 3 所示。由图可知,组合激光作用时间在  $0\sim 0.1\text{ s}$  时,由于未达到单晶硅的熔点,表面损伤半径为  $0$ ;当  $t=0.1\text{ s}$  时,单晶硅表面开始发生损伤,且损伤的效果非常明显(图中损伤半径曲线斜率很大),在第一个脉冲作用结束时,损伤半径达到了  $0.20\text{ mm}$ ,以  $0.1\text{ s}$  为周期组合激光中的高功率脉冲部分会产生多次热损伤,因此在  $0.4\text{ s}$  时损伤半径已经达到了  $0.25\text{ mm}$ 。而使用相同功率密度的连续激光辐照单晶硅无法造成损伤。

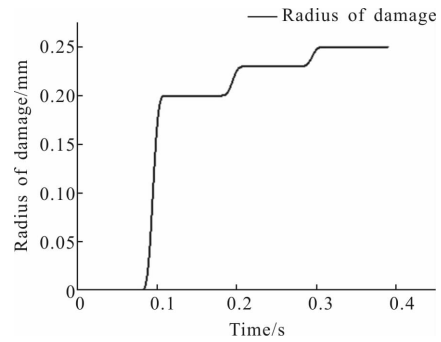


图 3 组合激光作用下硅表面损伤半径随时间的变化图  
Fig.3 Radius of damage on the surface of silicon irradiated by combined laser when time changes

图 4 表示相同功率密度的组合激光和连续激光分别作用下在  $t=0.1\text{ s}$  时模型  $r$  轴的温度分布,图 4 中的放大图为连续激光作用下的温度分布放大图。

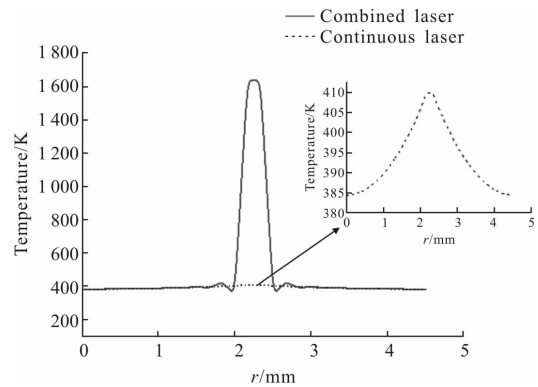


图 4 连续激光、组合激光分别作用下在  $t=0.1\text{ s}$  时模型  $r$  轴的温度分布  
Fig.4 Temperature distribution of  $r$ -axis in model irradiated by continuous laser and combined laser respectively when time is  $0.1\text{ s}$

由图可见,单晶硅表面的温度沿  $z$  轴对称分布,与激光高斯空间分布形状相同。这表明沿着  $r$  轴的温度分布和入射激光的空间分布有较大关联。图中组合激光作用下位于光斑中心  $O$  点的温度达到 1 690 K,且于半径为 0.20 mm 的圆形区域内表面温度均超过单晶硅的熔点 1 680 K,因而发生热损伤。组合激光作用下的单晶硅表面温度分布均高于连续激光作用下的表面温度,因此从材料  $r$  轴温度分布的角度而言,相同功率密度的组合激光的损伤效果要大于连续激光。

图 5 是在  $t=0.1$  s 时两种激光分别作用下模型  $z$  轴的温度分布,图 5 中的放大图为连续激光作用下  $z$  轴温度分布放大图。由图可见,沿着  $z$  轴的方向,模型温度逐渐下降,这是根据 Beer-lambert 定律  $I=I_0\exp(-\alpha z)$ ,其中  $I$  为激光强度, $\alpha$  为吸收系数, $z$  为材料深度。当入射激光垂直入射到材料表面时,材料所能吸收的能量随着深度的增加而大幅度减少,因而材料深处温度的增幅没有表面大。但达到一定深度后材料温度不再有明显变化,这是因为当深度较大时,各深度材料所吸收的能量都很小,产生的温升也非常小,几乎可以忽略不计。由图 5 还可以看出,组合激光作用下达到单晶硅熔点 1 680 K 的  $z$  轴坐标为  $0.5 \mu\text{m}$ ,这说明当  $t=0.1$  s 时单晶硅的熔融深度为  $0.5 \mu\text{m}$ ,而连续激光无法使材料熔融。

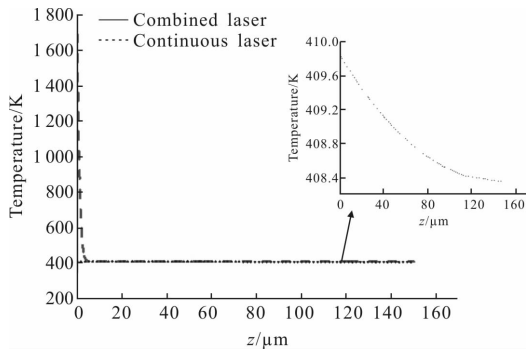


图 5 两种激光分别作用下在  $t=0.1$  s 时模型  $z$  轴的温度分布图  
Fig.5 Temperature distribution of  $z$ -axis in model irradiated by two lasers respectively when time is 0.1 s

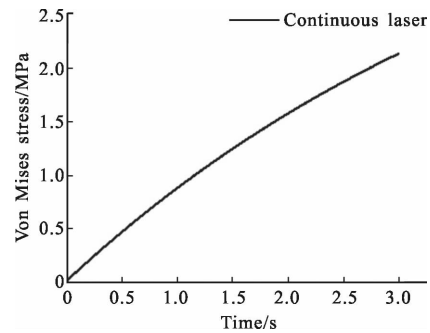
## 2.2 应力场结果

### 2.2.1 Von Mises 应力

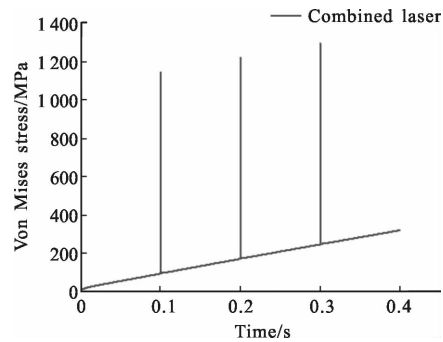
激光辐照单晶硅时,辐照区域的温升会导致材料的热膨胀以及很大的温度梯度。然而,材料的连续性阻碍了材料的自由膨胀,因此产生了热应力。如果

最大热应力超过了材料的临界应力,材料就会受到热应力损伤。由于单晶硅的临界应力阈值随温度的增加而降低<sup>[19-20]</sup>,因此,在激光辐照阶段材料发生断裂、产生裂缝的可能性比在冷却阶段要高很多。

图 6 表示相同功率密度的组合激光和连续激光分别辐照单晶硅时,单晶硅表面中心的 Von Mises 应力随时间的变化。由图可见,组合激光作用下在  $t=0.3$  s 时 Von Mises 应力达到最大值 1 310 MPa,而



(a) 连续激光作用单晶硅时材料中心 Von Mises 应力变化图  
(a) Von Mises stress variation of the material center of single crystal silicon irradiated by continuous laser



(b) 组合激光作用单晶硅时材料中心 Von Mises 应力变化图  
(b) Von Mises stress variation of the material center of single crystal silicon irradiated by combined laser

图 6 两种激光分别作用时材料表面中心 Von Mises 应力变化  
Fig.6 Von Mises stress variation of the material center irradiated by two lasers respectively

同一时刻连续激光只有 0.3 MPa。两图对比可以得出,任意时刻组合激光产生的 Von Mises 应力都是最大的,而如果 Von Mises 应力与材料屈服强度相等,材料就会发生塑性形变。由图 2 可得任意时刻中心点  $O$  的温度都是模型的最高温度,而相应的屈服强度是最低的,因此材料的塑性应变首先发生在表面中心处。组合激光辐照下材料在  $t=0.1$  s 时材料中



心点温度达到 1690 K, 对应的屈服强度为 0.2 MPa<sup>[21]</sup>, 而 Von Mises 应力为 1 150 MPa, 远远大于屈服强度, 因此材料的表面中心点会发生较大的塑性形变。该现象同样发生在  $t=0.2$  s、 $t=0.3$  s 时, 均为组合激光中的高功率脉冲部分开始作用的时刻, 这是由于当高功率脉冲部分冲击材料后, 材料表面温度尤其是中心温度非常高, 而由于热传导及温升需要时间, 因此材料表面与材料深处有较大的温度差, 表面层急剧膨胀, 而深层无明显膨胀, 因此产生较大屈服应力, 从而使材料发生塑性形变。

由于单晶硅的塑性形变是从表面开始的, 所以分析其表面的 Von Mises 应力分布情况, 如图 7 所示。由图 7 可见, 在  $t=0.1$  s 时组合激光作用下单晶硅表面的 Von Mises 应力在中心点  $O$  处取最大值为 1 150 MPa, 而连续激光最大值为 0.12 MPa, 因此在组合激光作用下单晶硅中心点更容易发生塑性形变。

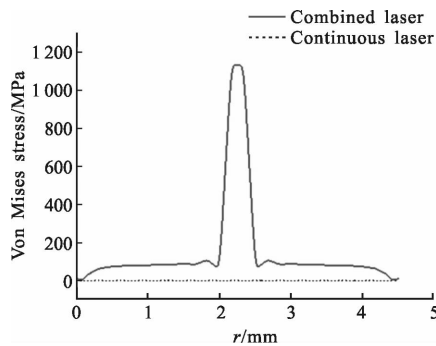


图 7  $t=0.1$  s 时连续激光和组合激光分别作用下材料表面 Von Mises 应力分布图

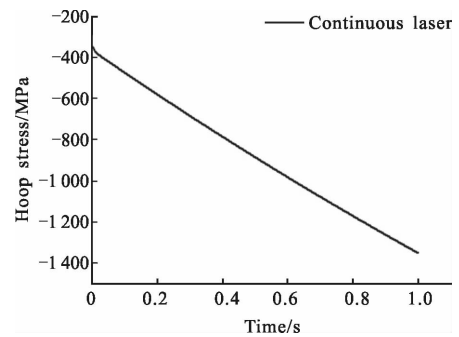
Fig.7 Von Mises stress of the material surface irradiated by continuous laser and combined laser respectively when time is 0.1 s

综上所述,  $400 \text{ W/cm}^2$  的组合激光辐照单晶硅 0.1 s 后, 材料表面中心点处 Von Mises 应力达到 1 150 MPa, 会发生较为剧烈的塑性形变。相同功率密度的组合激光作用后的材料表面 Von Mises 应力比连续激光作用后的要大很多, 因此材料表面的塑性形变更明显, 剪切应力对材料的损伤更强。

### 2.2.2 中心点环向应力

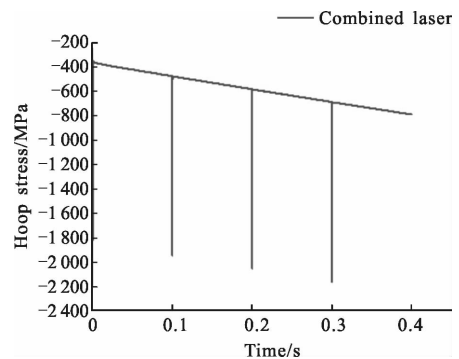
图 8 表示相同功率密度的组合激光和连续激光分别作用下单晶硅表面中心点的环向应力随时间的变化图。从图中可以观察到, 当组合激光辐照材料时, 最突出的特点是当组合激光中的高功率脉冲

冲部分作用于材料时, 材料表面中心点会发生应力跳跃的现象, 这会导致脆性材料内部产生裂纹甚至直接断裂。如图 8(b) 所示, 在  $t=0.099$  s 时, 中心点环向应力约为 475 MPa, 而当  $t=0.1$  s 时, 组合激光中的脉冲部分作用于材料, 使得材料表面中心点环向应力达到 1 945 MPa, 环向应力增加了 4.09 倍, 产生了剧烈的应力冲击, 极易使单晶硅断裂。组合激光作用材料时, 在脉冲部分结束之后环向应力虽亦减小, 但仍按照连续激光作用下环向应力增长的方式进行增长, 且下一个脉冲的应力跃变基点为按连续激光作用后环向应力增长后的终点, 这意味着组合激光中的多个脉冲作用单晶硅后会产生更大的环向应力, 对材料产生更加急剧的应力冲击。



(a) 连续激光作用下单晶硅表面中心点的环向应力随时间的变化图

(a) Hoop stress variation of the center of single crystal silicon irradiated by continuous laser vs time



(b) 组合激光作用下单晶硅表面中心点的环向应力随时间的变化图  
(b) Hoop stress variation of the center of single crystal silicon irradiated by combined laser vs time

图 8 两种激光分别作用下单晶硅表面中心点的环向应力随时间的变化图

Fig.8 Hoop stress variation of the center of single crystal silicon irradiated by two lasers respectively vs time

### 2.2.3 z 轴轴向应力

当  $t=0.1\text{ s}$  时,相同功率密度的组合激光和连续激光分别作用下模型  $z$  轴的轴向应力分布如图 9 所示。由图 9 可见,在  $z$  轴零点位置(即  $O$  点)轴向应力达到最大值,组合激光作用下最大值为  $-1\ 900\text{ MPa}$ ,连续激光为  $-475\text{ MPa}$ (如图 9 中放大图所示),都是压缩热应力,这是因为材料的温度随着深度的增加而减小,高温区的热膨胀被低温区所阻碍,所以产生压缩热应力。由于组合激光辐照下材料的温度较连续激光辐照下材料的温度要高很多,组合激光辐照下模型  $z$  轴的轴向应力也相对较高。在远离材料表面的低温区域,组合激光辐照下材料的轴向应力约为  $-480\text{ MPa}$ ,连续激光辐照下轴向应力约为  $-473\text{ MPa}$ ,相比于高温区域  $z$  轴的轴向应力,低温区域的轴向应力较小。

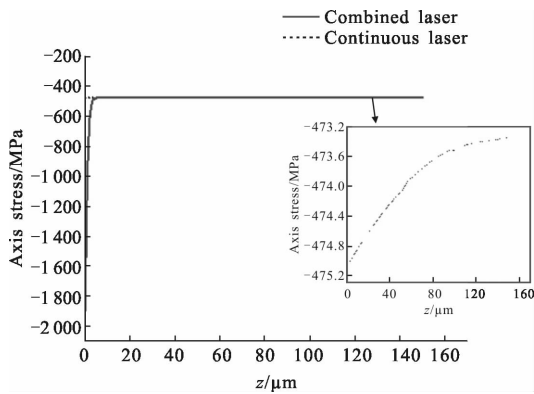


图 9  $t=0.1\text{ s}$  两种激光分别作用时模型  $z$  轴的轴向应力分布  
Fig.9 Axis stress of  $z$ -axis in model irradiated by two lasers respectively when time is  $0.1\text{ s}$

## 3 结论

文中通过建立平均功率密度为  $400\text{ W/cm}^2$  的组合激光(平均功率密度为  $398\text{ W/cm}^2$  的连续激光和  $2\text{ W/cm}^2$  的脉冲激光)和相同平均功率密度的连续激光辐照单晶硅的理论模型,计算得到了单晶硅受到组合激光、连续激光分别辐照时的温度场和应力场分布。温度场的分析结果表明,组合激光辐照单晶硅  $0.1\text{ s}$  后,模型最高温度超过单晶硅的熔点,材料表面熔融,产生热损伤,而连续激光辐照单晶硅时不会发生热熔融;应力场的分析结果表明, $400\text{ W/cm}^2$  的组合激光辐照单晶硅  $0.1\text{ s}$  后,模型中心点 Von Mises 应力为  $1\ 150\text{ MPa}$ ,远远大于屈服强度,材料会

发生较大的塑性形变,而连续激光辐照单晶硅时 Von Mises 应力没有组合激光辐照时产生的 Von Mises 应力大,因此产生的塑性形变也较小。任意时刻组合激光辐照下,材料表面中心点的环向应力、中心对称轴的轴向应力均比连续激光辐照下的大。因此,组合激光比连续激光更容易造成对单晶硅的损伤。由于单晶硅是硅基探测器的基底,研究组合激光对单晶硅的损伤对激光损伤硅基探测器具有一定的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Li Mingxin, Guang Yongjin, Yong Tan. Study on the mechanism of a charge-coupled device detector irradiated by millisecond pulse laser under functional loss [J]. *Applied Optics*, 2015, 55(6): 1257-1261.
- [2] Zhu Zhiwu, Zhang Zhen. The hard damage and damage probability of single pulse laser to CCD detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 113-118. (in Chinese)
- [3] Sun Chengwei. Effect of Laser Irradiation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [4] Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai, Jiang Zongfu. Analysis of the mechanism of the over-saturation of the CCD [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2010, 22 (2): 233-237. (in Chinese)
- [5] Nie Jinsong, Wang Xi. Thermal and mechanical damage in CCD detector induced by  $1.06\ \mu\text{m}$  laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 380-386. (in Chinese)
- [6] Zhang Zhen, Cheng Xiang'ai. A phenomenon of optical saturation in CCD [J]. *High Power Laser and Partical Beams*, 2008, 20(6): 917-919. (in Chinese)
- [7] Bartoil F J, Esterowitz L, Allen R, et al. A generalized thermal model for laser damage in infrared detectors [J]. *Applied Physics*, 1976, 47(10): 2875-2881.
- [8] Zhang Zhen. Experimental study of laser induced effect on visible light CCD [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
- [9] Shen Hongbin, Shen Xueju. Experimental study on CCD irradiated by  $532\text{ nm}$  pulsed laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(10): 1449-1454. (in Chinese)
- [10] Zhang Zhen. Laser-induced dazzling phenomenon in visiable light CCD and their mechanism[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2010. (in Chinese)
- [11] Qiu Dongdong, Zhang Zhen. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214006. (in Chinese)
- [12] Zhang Z. A dazzling phenomenon of CW laser on linear CCD camera[J]. *Optik*, 2012, 123: 223–227.
- [13] Sun K. Analysis and simulation of the phenomenon of secondary spots of the TDI CCD camera irradiated by CW laser [J]. *Optics Express*, 2011, 19: 23901–23907 .
- [14] Zhang Lei. Experimental study on the coupling rule of Si under combined laser irradiation [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [15] Li Jiagui. Numerical analysis of thermal effect of single crystal silicon by combined laser [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [16] Crank J, Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type [J]. *Proc Cambridge Philos Soc*, 1943, 43: 50–67.
- [17] Crank J, Nicolson P. A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat-conduction type [J]. *Advances in Computational Mathematics*, 1996, 6: 207–226.
- [18] Chen Y, Lu J, Ni X, et al. Plastic penetration during laser heating of a metal plate[J]. *Journal of Materials Processing Technol*, 2008, 205: 9–15.
- [19] Siethoff H, Brion H G, Schroter W. A regime of the yield point of silicon at high temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 75: 1234–1236.
- [20] Fischer A, Richter H, Shalynin A, et al. Upper yield point of large diameter silicon [J]. *Microelectronic Engineering*, 2001, 56: 117–122.
- [21] Frühauf J, Garther E, Jansc E. New aspects of the plastic deformation of silicon-prerequisites for the reshaping of silicon microelements [J]. *Applied Physics A*, 1999, 68: 673–679.