

# 毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究

李 贺 蔡继兴 谭 勇 马 遥 郭 明 金光勇 吴春婷

长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 为了测量毫秒脉冲激光辐照非透明材料的在线应力及应力应变演化的过程,基于光学干涉理论,针对大功率固体激光器与材料的相互作用,采用马赫-曾德尔干涉的方法,得到了材料损伤的干涉条纹。通过对干涉条纹变化的分析与处理,可以得到材料在线应力及其演化过程。基于光学干涉理论,选择单晶硅作为实验材料,建立 comsol 仿真模型,并在理论与仿真的基础上开展实验。实验与仿真的  $r(x)$  方向误差在 11.7%~33.91% 之间,  $z(y, z)$  方向误差在 20.25%~31.34% 之间,说明用马赫-曾德尔干涉的方法测量非透明材料的应力具有可行性。实验研究为激光与非透明材料作用过程中在线应力损伤及演变过程研究提供了一个新的方法。

**关键词** 相干光学; 毫秒脉冲激光; 单晶硅; 热应力损伤; 马赫-曾德尔干涉; 在线应力

中图分类号 0438

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0219002

## Research on Real-Time Stress Damage of Millisecond Laser Irradiation on Single-Crystal Silicon

Li He Cai Jixing Tan Yong Ma Yao Guo Ming Jin Guangyong Wu Chunting

College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** In order to measure the millisecond pulse laser irradiation of transparent material real-time stress and stress strain evolution process, in view of the high power solid laser interaction with materials, the method of Mach-Zehnder interference to get the interference fringes by the material damage is adopted. The on-line stress and the evolution of the material are obtained through the analysis and the processing of the change of the interference fringe. Single-crystal silicon is selected as experiment material and comsol simulation model is established based on the optical interference theory. Based on the theory and the simulation, the experiment is carried out. The error of experiment and simulation in  $r(x)$  direction is between 11.7%~33.91%, and the error in  $z(y, z)$  direction is between 20.25%~31.34%, which shows measuring the stress of the transparent material with Mach-Zehnder transient interference method is feasible. This provides a new method for the research of real-time stress damage and its evolution process of laser interaction with none-transparent materials.

**Key words** coherence optics; millisecond pulse laser; single-crystal silicon; thermal stress damage; Mach-Zehnder interference; on-line stress

**OCIS codes** 030.1670; 140.3440; 190.4870

## 1 引言

单晶硅是典型的脆性材料,在激光辐照过程中可能出现断裂、熔融、气化、喷溅、等离子体等现象<sup>[1-2]</sup>。激光辐照脆性材料时引发的热应力的理论研究是对脆性材料进行加工或断裂切割的基础<sup>[3-5]</sup>。而毫秒量级脉冲激光因其在空气中传播效率高、与材料相互作用过程中能量耦合效率高、单脉冲能量大等特点,相比短脉冲<sup>[6-7]</sup>激光,毫秒激光脉冲可以对材料造成更大程度的损伤,所以研究毫秒量级激光脉冲辐照单晶硅的热应力损伤具有十分重要的价值<sup>[8-9]</sup>。对于激光与单晶硅相互作用的热应力,国内外的研究人员都做了很多的仿真模拟和实

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-09

作者简介: 李贺(1991—),女,硕士研究生,主要从事激光与物质的相互作用方面的研究。E-mail:646918492@qq.com

导师简介: 吴春婷(1982—),女,博士,副教授,主要从事激光物理与新型激光器方面的研究。

E-mail:bigsnow1@163.com(通信联系人)

验研究<sup>[10-14]</sup>。但毫秒量级激光辐照单晶硅的实时在线应力及演变过程的研究还未见报道,本文参考迈克耳孙干涉法测量透明介质折射率的方法<sup>[15]</sup>,利用马赫-曾德尔干涉方法研究了单晶硅应力损伤机理及演变过程并与仿真结果对照以验证其准确性。

## 2 毫秒脉冲激光辐照单晶硅在线应力损伤的仿真模型

长脉冲激光辐照单晶硅的理论模型如图 1 所示,

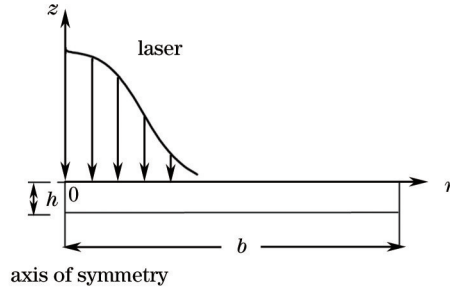


图 1 长脉冲激光辐照单晶硅的理论模型

Fig.1 Theoretical model of long-pulse laser irradiation of single-crystal silicon

不包含相变的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + I, \quad (1)$$

包含相变的热传导方程为

$$\rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \right] + \rho c L \frac{df_s}{dt} + I, \quad (2)$$

式中  $k$  为热传导系数,  $L$  为熔融相变潜热,  $f_s$  为固相率,  $I$  为热源方程,  $\rho$  为密度,  $C$  为比热容, 求解非稳态(1)式, 需要给出初始条件, 边界条件。

初始条件: 初始时刻材料的温度为 300 K, 即

$$T(x, y, z, t) \Big|_{t=0} = T_0 = 300 \text{ K}. \quad (3)$$

边界条件: 单晶硅块的表面采用绝热边界条件, 即

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x=b} = 0, \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{y=b} = 0, \quad (5)$$

$$-k \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h, z=0} = 0. \quad (6)$$

激光辐照单晶硅靶材时, 激光能量会深入材料内部并具有一定的分布, 因此在数值模拟时采用体热源并在热传导方程的右端给出,

$$I = \alpha(T)[1 - R(T)]I_0 f(r)g(t)\exp[-\alpha(T)z], \quad (7)$$

式中  $\alpha(T)$  为吸收系数,  $R(T)$  为反射率。激光能量在材料表面的分布函数  $f(r)$  选择高斯分布,

$$f(r) = \exp(-2r^2/r_0^2), \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (8)$$

$g(t)$  是激光脉冲的时间分布函数。对于 2 ms 单脉冲的激光, 该函数的表达式为

$$g(t) = \begin{cases} 2, & 0 \leq t \leq 2 \text{ ms} \\ 0, & t \geq 2 \text{ ms} \end{cases}, \quad (9)$$

对于脉冲串激光,  $g(t)$  可用重复脉冲函数表示为

$$g(t) = \begin{cases} 2, & n/\nu \leq t \leq n/\nu + 2 \text{ ms} \\ 0, & n/\nu + 2 \text{ ms} \leq t \leq (n+2)/\nu \end{cases} \quad (n = 0, 1, 2, \dots, \nu - 1), \quad (10)$$

式中  $\nu$  是重复频率。

用 comsol 建立二维轴对称仿真模型,材料是半径为 12.7 mm、厚度为 4 mm 的单晶硅。其中脉宽 2 ms,光斑半径为 2 mm,吸收系数为  $5000 \text{ m}^{-1}$ , 熔融温 1685 K, 融化潜热  $1800 \text{ J/g}$ , 气化潜热  $16207 \text{ J/g}$ , 激光能量设置为 1、1.5、2 J, 所以密度分别在  $7.9$ 、 $11.9$ 、 $15.9 \text{ J/cm}^2$  左右。仿真结果如图 2、3、4 所示。

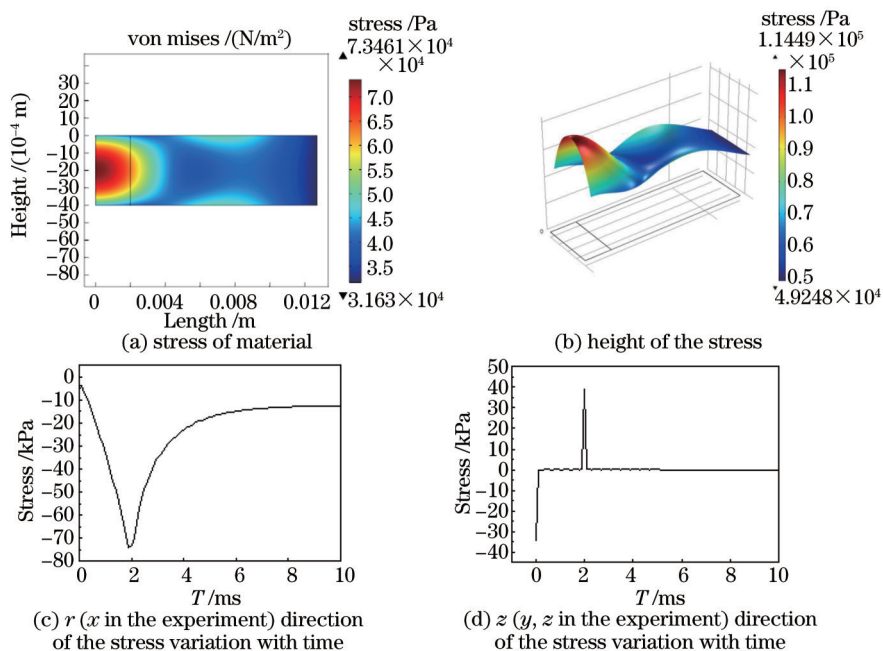


图 2 能量密度在  $7.9 \text{ J/cm}^2$  附近时中心点的应力变化

Fig.2 Energy density in the vicinity of  $7.9 \text{ J/cm}^2$  at the stress variation in the center

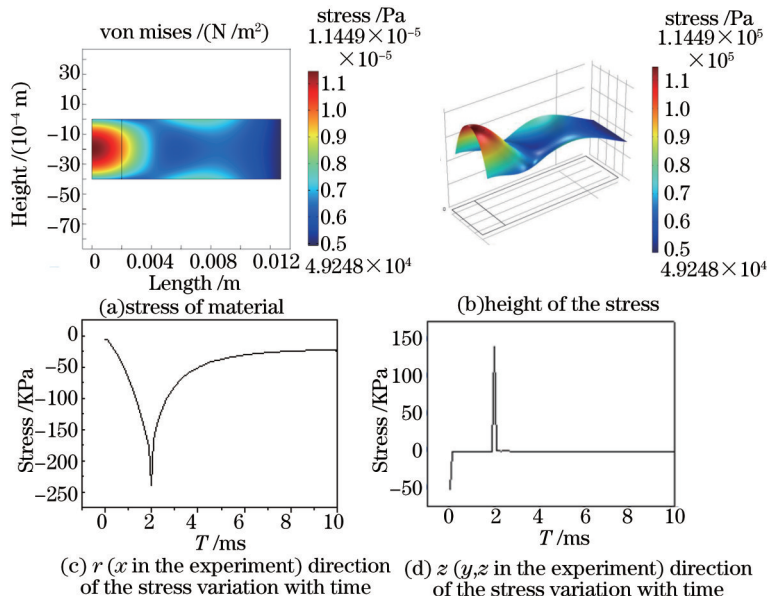


图 3 能量密度在  $11.9 \text{ J/cm}^2$  附近时中心点的应力变化

Fig.3 Energy density in the vicinity of  $11.9 \text{ J/cm}^2$  at the stress variation in the center

图 2、3、4 为不同能量密度下仿真出的中心点的应力变化,表 1 为相同脉宽不同能量各方向应力的最大值。由应力图可知毫秒脉冲激光与单晶硅作用时应力主要集中在激光作用区,且材料中心附近应力最大。由图 2、3、4 及表 1 可知中心点径向应力全部表现为压应力,随着时间的增加压应力先增大后减小,应力最大值在 2 ms 左右。中心点轴向应力先表现为压应力后变为拉应力,随着时间的增加压应力先增大后减小,应力最大值在 2 ms 左右。

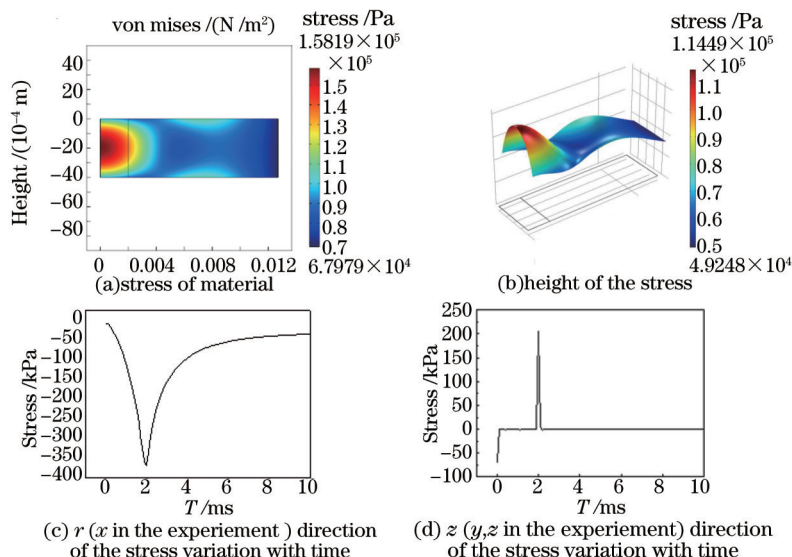


图 4 能量密度在  $15.9 \text{ J/cm}^2$  附近时中心点的应力变化

Fig.4 Energy density in the vicinity of  $15.9 \text{ J/cm}^2$  at the stress variation in the center

表 1 相同脉宽不同能量各方向应力的最大值

Table 1 Maximum value of the stress in the same direction of different energies

Pulse width /ms	Energy density $/(J/cm^2)$	Stress of maximum and absolute value in $r(x)$ direction/kPa	Stress of maximum and absolute value in $z(y, z)$ direction/kPa
2	7.9	73.83	67.29
2	11.9	178.23	141.02
2	15.9	368.09	261.08

### 3 实 验

实验采用马赫-曾德尔干涉的方法测量毫秒脉冲激光辐照单晶硅的在线应力,马赫-曾德尔干涉系统如图 5 中蓝色虚线部分所示。厚度为  $0.4 \text{ mm}$ 、半径为  $12.7 \text{ mm}$  的单晶硅片为实验目标和参考目标。其中大功率固体激光器为激光光源,波长为  $1064 \text{ nm}$ ,光斑半径为  $2 \text{ mm}$ 。窄线宽半导体激光器为干涉光源,波长为  $532 \text{ nm}$ ,线宽小于  $0.7 \text{ nm}$ 。该测试系统是利用窄线宽半导体激光光源,经过平面分光镜 1,一部分光束透射,作为测量臂;一部分光束反射,作为参考臂。参考臂光束至平面反射镜,反射至平面分光镜 2,再由分光镜 2 反射。参考臂中反射镜用参考目标,使两臂等光强,是该方案中至关重要的一点;测量臂光束照射到待测目标上,同时固体激光器经过能量调节系统和会聚透镜也照射到材料上形成干涉,并被材料表面反射,再经分光镜 2 透射。测量臂和参考臂光束同时经聚焦透镜、干涉滤光片,形成干涉条纹入射到高速相机上。高速相机帧频为  $10000 \text{ frame/s}$ 。实验装置图及条纹的物理模型如图 5、6 所示,

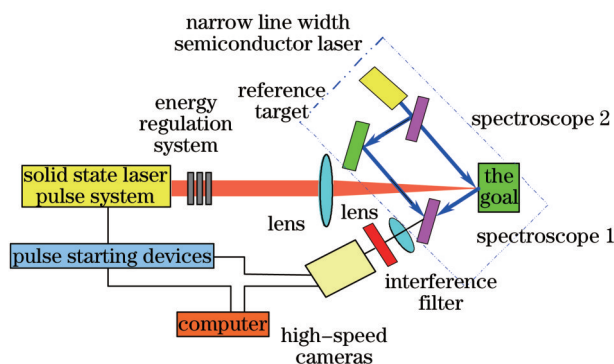


图 5 单晶硅应力应变变化过程测试实验装置

Fig.5 Laboratory testing equipment of single-crystal silicon stress strain evolution process diagram

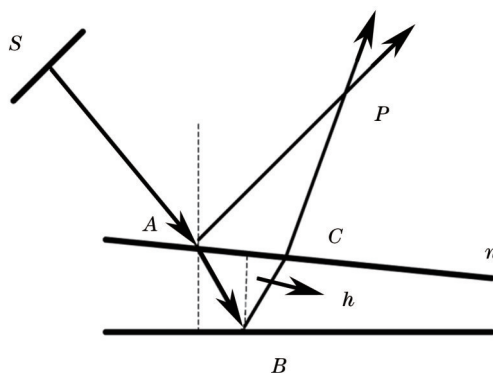


图 6 条纹出现的物理模型

Fig.6 Physical model of stripe

#### 4 实验结果及分析

在几何模型中与热传导方程耦合的热弹性平衡方程为<sup>[16]</sup>

$$x \text{ 方向: } \nabla^2 u_x + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad (11)$$

$$y \text{ 方向: } \nabla^2 u_y + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (12)$$

$$z \text{ 方向: } \nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} - \frac{2(1+\mu)}{1-2\mu} \beta \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \quad (13)$$

式中  $u_x$ ,  $u_y$  和  $u_z$  分别表示  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向上的位移分量。

初始条件:初始时刻位移为0,速度为0,即

$$u_x|_{t=0} = 0, \quad u_y|_{t=0} = 0, \quad u_z|_{t=0} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_y}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u_z}{\partial t}\bigg|_{t=0} = 0. \quad (15)$$

边界条件:由于单晶硅的边缘是被固定住的,因此边界条件是本征硅块的上下表面为自由边界条件,变为固定边界条件,即

$$u_x|_{r=b} = 0, \quad u_y|_{r=b} = 0, \quad u_z|_{r=b} = 0. \quad (16)$$

根据几何方程可以得到应变向量为

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \\ \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \\ \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \end{pmatrix}. \quad (17)$$

再根据胡克定律便可得到应力向量:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0), \quad (18)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{yz} \quad \tau_{zx})^T, \quad (19)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_x - a_0 T \quad \varepsilon_y - a_0 T \quad \varepsilon_z - a_0 T \quad \varepsilon_{xy} \quad \varepsilon_{yz} \quad \varepsilon_{zx})^T, \quad (20)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{pmatrix}. \quad (21)$$

硅晶体是金刚石结构,根据晶体物理学相关知识,利用金刚石结构的对称关系可以将刚度矩阵  $\mathbf{C}$  化简为如下形式:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & & & \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & & & \\ & & & C_{44} & & \\ & & & & C_{44} & \\ & & & & & C_{44} \end{pmatrix}, \quad (22)$$



当选择3个坐标轴 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向与晶体的 $[100]$ 、 $[010]$ 、 $[001]$ 方向一致时,则由实验数据可知应力为

$$\sigma_x = C_{11}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{12}\varepsilon_z, \quad (23)$$

$$\sigma_y = C_{12}\varepsilon_x + C_{11}\varepsilon_y + C_{12}\varepsilon_z, \quad (24)$$

$$\sigma_z = C_{12}\varepsilon_x + C_{12}\varepsilon_y + C_{11}\varepsilon_z, \quad (25)$$

式中 $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 分别为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的应力值, $\varepsilon$ 为应变, $C_{11} = 165.7$  GPa、 $C_{12} = 63.9$  GPa、 $C_{44} = 76.9$  GPa。

图7所示为高速相机拍摄的单晶硅干涉条纹变化。从图中可以看出,在 $t=0$ 时刻出现等厚直条纹,随着激光作用时间的增加,激光作用区域产生干涉图样。由于激光作用区域会产生热应力而且激光呈高斯分布,致使材料表面产生微小的近似球形的形变,出现里疏外密的同心圆环。

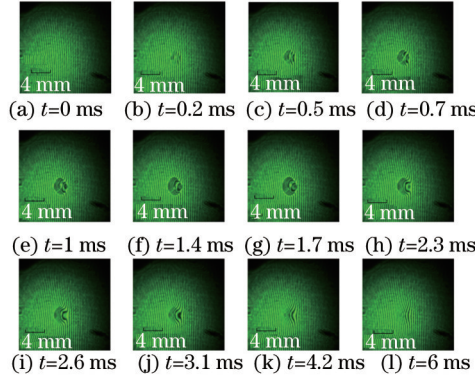


图7 脉宽2 ms、能量密度15.9 J/cm<sup>2</sup>时,不同时刻目标激光作用中心干涉图样的变化

Fig.7 Change of interference pattern in the center of silicon by laser at different time with pulse width of 2 ms, energy density of 15.9 J/cm<sup>2</sup>

对干涉条纹图进行分析研究并处理,可以通过对高速相机上每一帧干涉条纹的变化进行处理,并代入等厚干涉公式<sup>[17]</sup>:

$$\Delta = 2nh = m\lambda, \quad (26)$$

式中 $\Delta$ 为光程差, $n$ 为折射率, $n \approx 1$ , $h = m \times \lambda/2$ , $h$ 为厚度。实验中厚度的变化可看成热应力使材料产生的形变,所以令 $h = \varepsilon$ , $m = N + \varepsilon_i$ ,则(26)式可以改写成

$$\varepsilon = (N + \varepsilon_i)\lambda/2, \quad (27)$$

式中 $\lambda$ 为波长, $N$ 为这条曲线越过的条纹整数, $\varepsilon_i$ 为这条曲线越过的条纹小数。

由于干涉条纹的变化算出了材料整体的形变量,由于硅材料并未出现熔融现象(如图8所示)且干涉条纹主要沿 $x$ 方向变化, $z$ 方向形变量非常小,所以 $z$ 方向应变可近似忽略。那么 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的应力就应该与整体形变量在 $x$ 、 $y$ 方向的投影有关。可以考虑:1)形变都在 $x$ 方向,2)形变都在 $y$ 方向,3)形变与 $x$ 、 $y$ 成一定角度。由于 $x$ 方向条纹变化最明显,为计算简便本文考虑投影在 $x$ 方向上的情况。所以(23)、(24)、(25)式可以简写成

$$\sigma_x = C_{11}\varepsilon_x, \quad (28)$$

$$\sigma_y = C_{12}\varepsilon_x, \quad (29)$$

$$\sigma_z = C_{12}\varepsilon_x, \quad (30)$$

式中 $\varepsilon_x$ 为 $\varepsilon$ 在 $x$ 方向上的投影。通过(26)~(30)式可以得到应力与应变的对应关系,从而得到各方向上应力。

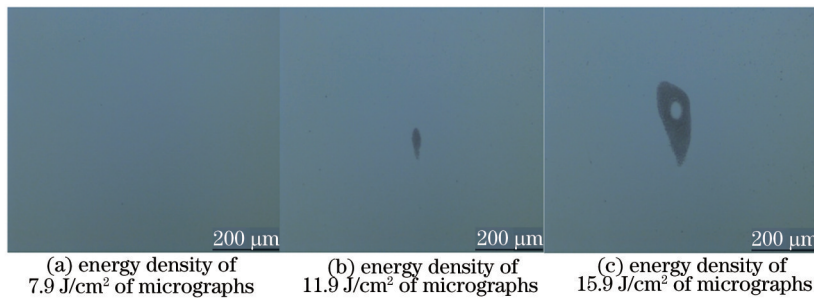


图8 脉宽为2 ms时,不同激光能量密度作用下的显微图

Fig.8 Micrograph under different laser energy densities with pulse duration of 2 ms

用 Origin 等软件描绘出应力演变过程的变化曲线(其中应力大小为绝对值),如图 9、10、11 所示。相同脉宽不同能量各方向应力的最大值及实验与仿真的误差如表 2 所示。

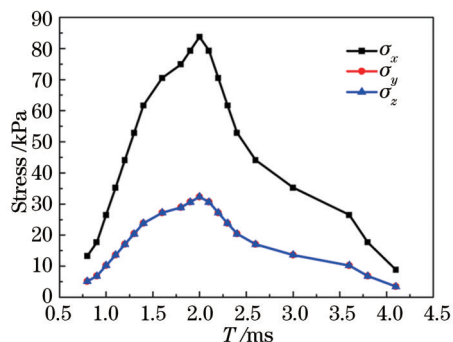


图 9 脉宽为 2 ms 时,激光能量密度在 7.9 J/cm<sup>2</sup> 附近时应力的变化曲线

Fig.9 Stress change curve with pulse width of 2 ms and laser energy density in the vicinity of 7.9 J/cm<sup>2</sup>

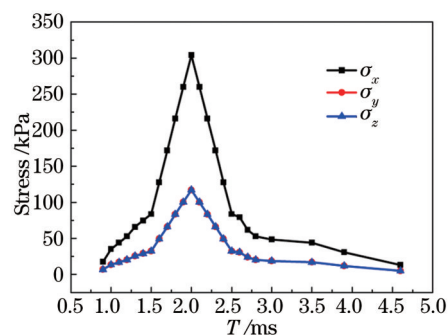


图 10 脉宽为 2 ms 时,激光能量密度在 11.9 J/cm<sup>2</sup> 附近时应力的变化曲线

Fig.10 Stress change curve with pulse width of 2 ms and laser energy density in the vicinity of 11.9 J/cm<sup>2</sup>

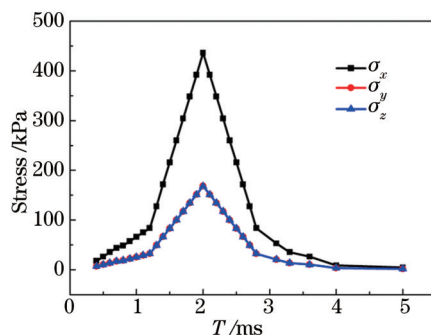


图 11 脉宽为 2 ms 时,激光能量密度在 15.9 J/cm<sup>2</sup>附近时应力的变化曲线

Fig.11 Stress change curve with pulse width of 2 ms and laser energy density in the vicinity of 15.9 J/cm<sup>2</sup>

表 2 相同脉宽不同能量各方向应力的最大值及实验与仿真的误差

Table 2 Maximum stress of simulation with the same pulse width and different energies of each direction and error values of experiment and simulation

Pulse width /ms	Energy density /(J/cm <sup>2</sup> )	Stress of maximum in x(r) direction /kPa	Stress of maximum in y,z (z) direction /kPa	Error in x(r) direction	Error in y,z(z) direction
2	7.9	83.61	32.20	11.7%	-22.02%
2	11.9	303.93	117.27	23.92%	-20.25%
2	15.9	435.89	168.63	15.55%	-22.21%

从图 9、10、11 及图表 2 中可以看出应力沿 x(仿真中径向)方向变化趋势较大,y 方向(仿真中轴向)应力变化趋势较小,并且激光功率密度越大,应力越大。在能量密度相同的情况下材料的应力随时间的增加呈先增大后减小的线性变化,在作用时间为 2 ms 时应力出现最大值。通过仿真和实验对比,可知其轴向与径向应力变化趋势与仿真相似,其数值大小在同一数量级并且实验与仿真的误差在 11.7%~23.92% 之间。

## 5 结 论

研究了毫秒激光与单晶硅作用时,材料应力场随时间的演变规律。结果表明,当激光与材料相互作用时会产生热应力损伤。由测量毫秒脉冲激光辐照单晶硅的在线应力及应力应变演化的过程的实验以及对干涉条纹的处理,可知当脉宽为 2 ms 时不同能量的脉冲激光辐照材料时,材料的应力随时间的增加呈线性变化,并且激光能量密度越大应力越大,在时间为 2 ms 左右时应力达到最大值。对比仿真结果可知,毫秒脉冲激光与单晶硅作用时应力主要集中在激光作用区,且材料中心附近应力最大。中心点径向(实验中 x 方向)应力全部表现为压应力,随着时间的增加压应力先增大后减小。中心点轴向(实验中 y,z 方向)应力先表现为

压应力后变现为拉应力,随着时间的增加压应力先增大后减小。其轴向和径向应力的变化趋势与实验中基本一致且数值大小在同一数量级且偏差不大,最大值也出现在 2 ms 左右,说明采用马赫-曾德尔干涉的方法测非透明物质在线应力的方法可行。研究结果为长激光辐照单晶硅等非透明材料的在线应力测量及在线应力损伤机理奠定了基础。

## 参 考 文 献

- 1 Yanbei Chen, Jian Lu, Xiaowu Ni. Analysis of thermal stress damage in single-crystal silicon induced by 1064 nm long-pulse laser[C]. SPIE, 2008, 6835: 68351X.
- 2 Jinghua Han, Weixing Fan, Yaguo Li, *et al.*. Laser plasma effects on surface damage characteristics of silicon[C]. SPIE, 2012, 8206: 820616.
- 3 K Yamada, T Ueda, A Hosokawa, *et al.*. Thermal damage of silicon wafer in thermal cleaving process with pulsed laser and CW laser[C]. SPIE, 2006, 6107: 61070H.
- 4 Chao Shen, Maxime Chambonneau, Xiang'ai Cheng, *et al.*. Identification of the formation phases of filamentary damage induced by nanosecond laser pulses in bulk fused silica[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(11): 111101.
- 5 Shen Chao, Cheng Xiang'ai, Jiang Tian, *et al.*. Time-resolved imaging of filamentary damage on the exit surface of fused silica induced by 1064 nm nanosecond laser pulse[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(15): 155501.
- 6 Li Yuhua, Ma Fajun, Dai Nengli, *et al.*. Ultra-short pulsed laser-induced damage in inorganic silicon materials[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(7): 1009-1013.  
李玉华, 马法君, 戴能利, 等. 超短脉冲激光对无机硅材料的损伤[J]. 中国激光, 2007, 34(7): 1009-1013.
- 7 Jiang Zhiming, Jean Claude Kiefer, Xu Zhizhan. Intense ultrafast laser-matter interaction and its application[J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(6): 513-519.  
江志明, 让-克劳德·基夫, 徐至展. 超短高功率脉冲激光与物质相互作用及其应用[J]. 中国激光, 1996, 23(6): 513-519.
- 8 Xiaowu Ni, Zhonghua Shen, Jian Lu. Study of laser destruction for optoelectronic device and semiconductor material[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 1997, 8(6): 487-492.
- 9 Ding Weihuan, Zhang Liang, Shen Zhonghua, *et al.*. Analyse on the thermal interaction of the long pulse high power laser and semiconductor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 332-335.  
丁玮环, 张 梁, 沈中华, 等. 长脉冲高能激光与半导体材料的热作用分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 332-335.
- 10 Jianping Hu, Ping Ma, Qian Xu, *et al.*. Effect of  $\lambda/2$  SiO<sub>2</sub> overcoat on the laser damage of HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> high-reflector coatings[J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(6): 340-342.
- 11 Jian Liu, Jian Lu, Xiaowu Ni, *et al.*. Numerical study on thermal stress cutting of silicon wafer using two point pulsed laser[J]. Optical Applicata, 2011, 41(1): 247-255.
- 12 Wang Gongtang, Wang Xiangtai, Zhang Yici, *et al.*. The plasma emission spectrum of laser ablated silicon in air[J]. Chinese J Lasers, 1996, 23(1): 64-68.  
王公堂, 王象泰, 张恻慈, 等. 激光烧蚀硅所生成的等离子体发射光谱特性[J]. 中国激光, 1996, 23(1): 64-68.
- 13 Wang Kepu, Zhang Qiuhui. The ablation microstructures of mono crystalline silicon by high power nanosecond laser[J]. Lasers Journal, 2012, 33(5): 36-37.  
王克甫, 张秋慧. 高能纳秒激光烧蚀单晶硅的微观结构[J]. 激光杂志, 2012, 33(5): 36-37.
- 14 Liu Kui, Feng Guoying, Deng Guoliang, *et al.*. Difference in microstructures induced by femtosecond laser scanning on silicon surface at different temperatures[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0803003.  
柳 岗, 冯国英, 邓国亮, 等. 飞秒激光扫描不同温度下的硅片诱导形成微结构的差别[J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0803003.
- 15 Jungjae Park, Jonghan Jin, Jae Wan Kim, *et al.*. Measurement of thickness profile and refractive index variation of a silicon wafer using the optical comb of a femtosecond pulse laser[J]. Optics Communication, 2013, 305: 170-174.
- 16 卓卫东. 应用弹塑性力学[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 61-80.
- 17 梁铨廷. 物理光学(第三版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 75-124.

栏目编辑: 史 敏