

文章编号 1004-924X(2017)05-1395-07

采用马赫-曾德尔干涉法测量单晶硅在线应力损伤

吴春婷*, 李贺, 蔡继兴, 谭勇, 金光勇
(长春理工大学理学院, 吉林长春 130022)

摘要:开展了毫秒脉冲激光辐照单晶硅的实验研究,基于马赫-曾德尔干涉技术测量了毫秒脉冲激光与单晶硅相互作用过程中的在线应力损伤。用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件建立了毫秒脉冲激光辐照单晶硅的数值仿真模型。从理论和实验两方面探讨了毫秒脉冲激光与单晶硅作用时,相同脉宽不同能量密度下应力场随时间的演变规律。进一步研究了干涉条纹的处理方法,基于传统 x 轴投影法提出了用 45° 投影法来计算材料各方向上的应变,并对两种处理方法得到的实验结果进行了对比。结果显示:与仿真结果相比, x 轴投影法实验结果的误差为 $9.5\% \sim 29.3\%$,而 45° 投影法实验结果的误差为 $0.1\% \sim 22.6\%$,表明用马赫-曾德尔干涉法测量激光辐照单晶硅产生的在线应力损伤时,采用 45° 投影法计算材料各方向上的应变结果更为准确。该实验和计算方法为单晶硅在线应力损伤的研究提供了理论和实验上的指导。

关键词:激光与物质相互作用;单晶硅;毫秒脉冲激光;在线应损伤力;马赫-曾德尔干涉术

中图分类号:O436.1;TN 241 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172505.1395

Measurement of real-time stress damage of monocrystal silicon by Mach-Zehnder interferometry

WU Chun-ting*, LI He, CAI Ji-xing, TAN Yong, JIN Guang-yong

(School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

* Corresponding author, E-mail:646918492@qq.com

Abstract: An experiment of ms laser pulse irradiation on monocrystal silicon was performed. The real-time stress damage from the interaction between ms laser pulse with monocrystal silicon was measured by Mach-Zehnder interferometry. A digital simulation model for ms laser pulse irradiation on monocrystal silicon was established by COMSOL Multiphysics finite element method. The evolution law of a stress field with time under the same pulse width and different energy densities was explored when the monocrystal silicon was irradiated by ms laser pulse from theory and experiments. The processing method for interference fringes was researched and the 45° projection method was proposed to calculate the stress values of materials in different directions based on the traditional x axis projection method. Based on the numerical simulation results, the experimental results of the two methods were compared and analyzed. It shows that the error from the experimental results of the x axis projection method is in $9.5\% \sim 29.3\%$ and that from the 45° projection method is in $0.1\% \sim 22.6\%$ as compared with that of numerical simulation results. It is verified that the method of 45° projection is more accurate for the processing of interference fringes in the experiment of measuring the real-time stress damage by the Mach-Zehnder. The experimental results provide the theoretical and

收稿日期:2016-09-20;修订日期:2016-10-18.

基金项目:吉林省固体激光技术与应用重点实验室基金资助项目(No. 20150622011JC)

experimental guidance for the study of the stress damage of monocrystal silicon.

Key words: interaction of laser beam and material ; monocrystal silicon; ms pulse laser; real-time stress damage ; Mach-Zehnder interferometry

1 引言

随着激光技术的不断发展,其已广泛应用于汽车、扫描、测量、通信等各行各业^[1-3]。激光辐照材料的损伤机理是研究激光断裂、切割等的基础,所以研究激光辐照材料的损伤机理有着极其重要的意义。陈北彦等对激光辐照单晶硅热应力损伤的数值仿真做了较为详尽的研究^[4]。1971年Ready出版了有关高功率激光产生系列效应的第一本专著^[5],2002年孙承纬等人提出了激光辐照效应^[6],之后无论在强激光与物质相互作用的基础理论研究方面,还是激光加工以及激光的军事应用方面都有专著陆续问世。目前,许多研究人员对激光辐照单晶硅引起的热力学现象进行了研究,尤其是在热应力损伤方面^[7-10]。但一般实验测得的热应力均为仿真软件模拟出来的结果,或者为实验线下测得的残余应力,而对于实验过程

中实时的在线应力损伤的研究还未见报导。

本文采用马赫-增德尔干涉法测量毫秒脉冲激光辐照单晶硅的在线应力损伤,产生的干涉条纹用高速相机接收。根据干涉条纹的变化量和物理光学的相关知识计算出材料整体的形变量,由材料整体形变量得到材料各方向的应变,最后由应力与应变关系得到材料各方向上的应力。对于材料各方向上应变的计算,在已发表的《毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究》^[11]的基础上做进一步研究,即在 x 轴投影法的基础上提出了 45° 投影法,得到了与仿真值更加接近的实验数据。

2 毫秒脉冲激光辐照单晶硅在线应力损伤的数值仿真研究

利用 COMSOL Multiphysics 有限元物理仿真软件建立毫秒脉冲激光辐照单晶硅在线应力损伤的二维轴对称仿真模型,参数如表 1 所示。

表 1 仿真模型中各物理量参数

Tab. 1 Physical parameters in simulation model

硅片半径/mm	硅片厚度/mm	脉宽/ms	杨氏模量/GPa	反射率	熔融温度/K	融化潜热/(J·g ⁻¹)	汽化潜热/(J·g ⁻¹)	气化点 K/K	热膨胀系数	泊松比
12.7	4	2.5	107	0.08	1 687	1 800	16 207	3 175	2×10^{-5} 1/K	0.28

毫秒脉冲激光辐照单晶硅的理论模型如图 1 所示。其中 z 轴为轴向方向, r 轴为径向方向, h 为厚度, b 为半径。

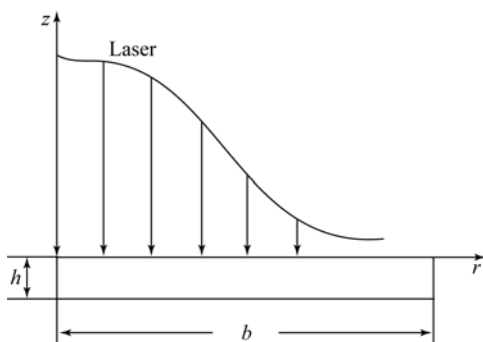


图 1 激光辐照单晶硅的理论模型

Fig. 1 Theoretical model of laser irradiation of monocrystal silicon

仿真模型中的热传导方程^[12]如式(1)所示:

$$\rho c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = k \left[\frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right] + \rho c L \frac{\partial f_s}{\partial t} + I, \quad (1)$$

式中: k 为热传导系数, L 为熔融相变潜热, f_s 为固相率, I 为激光热源方程。仿真模型中 I 设置为:

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

其中 $f(r)$ 是激光能量在材料表面的分布函数:

$$f(r) = \exp(-2r^2/r_0^2), r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (3)$$

$g(t)$ 是激光脉冲的时间分布函数。函数的表达

式为:

$$g(t) = \begin{cases} \tau, 0 \leq t \leq \tau \text{ ms} \\ 0, t \geq \tau \text{ ms} \end{cases} \quad (4)$$

初始条件如下:单晶硅块的表面采用绝热边界条件,认为初始时刻材料的温度为 300 K。

图 2 是脉宽为 2.5 ms,能量密度为 15.13 J/cm² 时材料轴向和径向的应力变化情况。从图 2(a)

中可以看出材料径向应力全部为压应力,随着时间的增加径向应力先增大后减小,应力最大值出现在 2.5 ms 左右。从图 2(b)中可以看出材料轴向应力先表现为压应力后逐渐变为拉应力,且拉应力起主要作用,随着时间的增加轴向应力先增大后减小,应力最大值也出现在 2.5 ms 左右,其它能量密度下的应力最大值如表 2 所示。

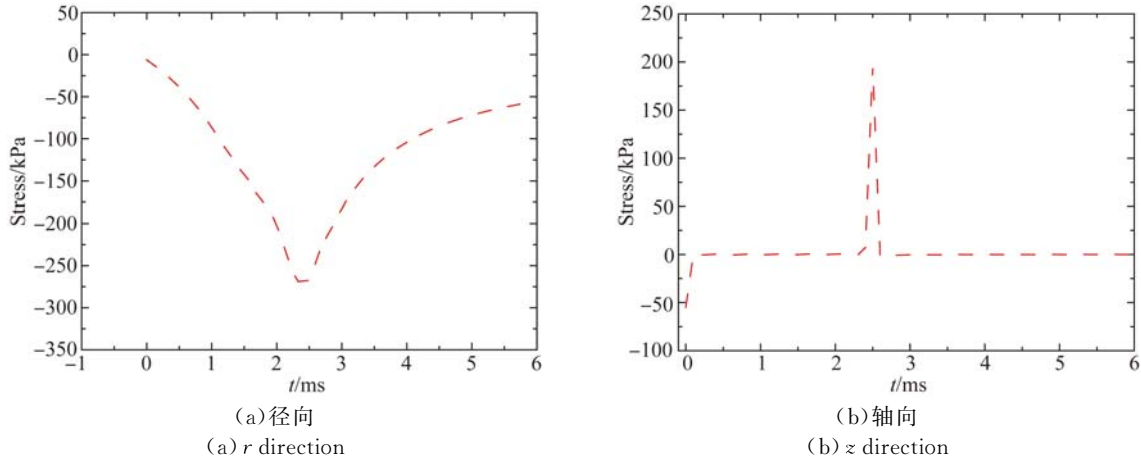


图 2 能量密度为 15.13 J/cm² 时材料应力的变化情况

Fig. 2 Change of material stress with energy density of 15.13 J/cm²

表 2 脉宽为 2.5 ms 时,不同能量密度下材料应力的最大值
Tab. 2 The maximum value of material stress under different energy densities with pulse width of 2.5 ms

脉宽/ms	能量密度/(J·cm ⁻²)	径向应力/kPa	轴向应力/kPa
2.5	7.96	63.4	42.2
2.5	10.75	120.73	70.6
2.5	15.13	274.7	175.49

表 2 为不同能量密度条件下材料轴向和径向的应力最大值,从表 2 中可以看出在脉宽相同的情况下能量密度越大,应力越大。在相同的能量密度下,径向应力始终比轴向应力大。

3 马赫-增德尔干涉法测量单晶硅在线应力的实验研究

实验采用马赫-增德尔干涉法测量毫秒脉冲激光辐照单晶硅的在线应力损伤,实验装置如图 3 所示。实验参数如表 3 所示。

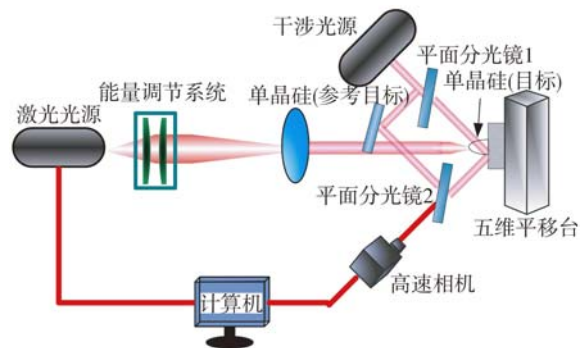


图 3 单晶硅应力应变演化过程测试实验装置

Fig. 3 Test apparatus for evolution process of stress and strain of monocrystal silicon

图 3 中单晶硅(参考目标)、平面分光镜 1、单晶硅(目标)、平面分光镜 2 构成马赫-增德尔干涉系统。图中采用大能量固体激光器作为激光光源,采用窄光线宽半导体激光器作为干涉光源。干涉光源的光束经过马赫-增德尔干涉系统到达目标表面,同时固体激光器的发射光经过能量调节系统和会聚透镜也照射到目标表面,形成干涉条纹被高速相机接收,最后将实验数据保存到计算机。

表 3 实验参数

Tab. 3 Experimental parameters

硅片 半径/mm	硅片 厚度/mm	脉宽/ms	光斑 半径/mm	高速相机帧频 /(frame · s ⁻¹)	大能量固体 激光器波长/nm	半导体激光器 波长/nm	半导体激光器 线宽/nm
12.7	4	2.5	2	10 000	1 064	532	小于 0.7

4 实验结果

按照理想弹性体模型的假定条件,应力与应变存在一一对应关系。根据应用弹塑性力学中线弹性体的本构方程^[13]可以将弹性矩阵 $[D]$ 写成如下形式:

$$[D] = \begin{pmatrix} C11 & C12 & C13 & C14 & C15 & C16 \\ & C22 & C23 & C24 & C25 & C26 \\ & & C33 & C34 & C35 & C36 \\ & & & C44 & C45 & C46 \\ & & & & C55 & C56 \\ & & & & & C66 \end{pmatrix}.$$

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,单晶硅上任意一点的应力和应变之间满足的本构方程可以写成如下形式:

$$\sigma_x = C11\epsilon_x + C12\epsilon_y + C12\epsilon_z, \quad (5)$$

$$\sigma_y = C12\epsilon_x + C11\epsilon_y + C12\epsilon_z, \quad (6)$$

$$\sigma_z = C12\epsilon_x + C12\epsilon_y + C11\epsilon_z, \quad (7)$$

其中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向上的应力值, ϵ 为应变, $C11, C12$ 为弹性系数, $C11 = 165.7 \text{ GPa}, C12 = 64.1 \text{ GPa}$ 。

图 4(彩图见期刊电子版)是脉宽为 2.5 ms,能量密度为 15.13 J/cm^2 时,高速相机拍摄的毫秒脉冲激光与单晶硅相互作用的干涉图样。从图中可以看出在 $t=0$ 时刻出现了等间距直条纹,随着激光作用时间的增加,单晶硅材料表面产生了微小的形变,干涉条纹发生变形。

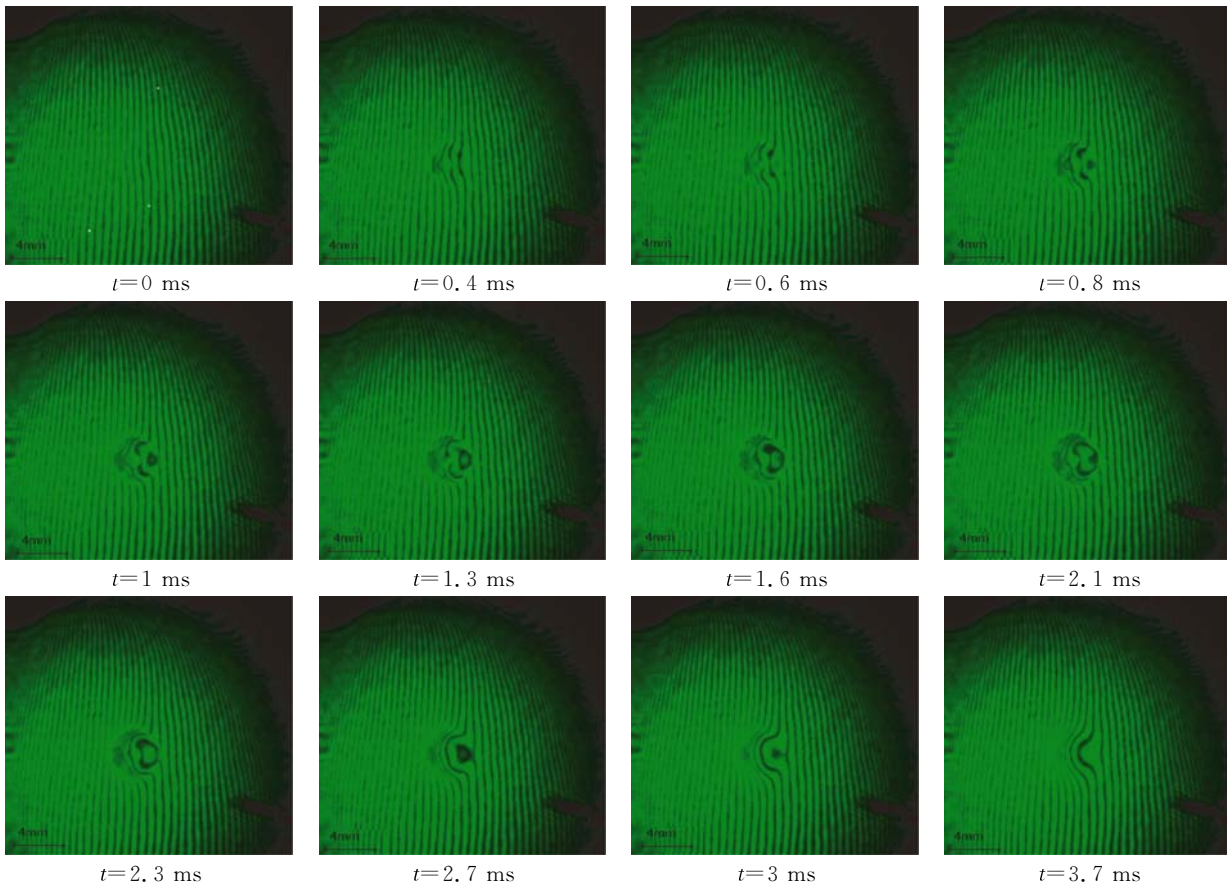


图 4 脉宽为 2.5 ms、能量密度为 15.13 J/cm^2 时,激光辐照单晶硅的干涉图样

Fig. 4 Interference patterns of laser irradiated monocrystal silicon with pulse width of 2.5 ms, energy density of 15.13 J/cm^2

将图 4 产生的等厚干涉条纹的变化量带入等厚干涉公式(8)^[14]进行计算:

$$\Delta = 2nh = m\lambda, \quad (8)$$

其中: Δ 为光程差, n 为折射率, $n \approx 1$,那么 $h = m \times \frac{\lambda}{2}$, h 为厚度。令 $h = \epsilon$, $m = (N + \epsilon_i)$,则公式有:

$$\epsilon = (N + \epsilon_i) \frac{\lambda}{2}, \quad (9)$$

其中: λ 为波长, N 为这条曲线越过的条纹整数, ϵ_i

为这条曲线越过的条纹小数。

由于干涉公式(8)和(9)求出激光与单晶硅相互作用过程中整体的形变量,那么单晶硅在 x 、 y 、 z 方向上所受到的应力就应该与整体形变量在 x 轴、 y 轴和 z 轴方向上的投影有关。由于单晶硅表面未出现熔融现象,如图 5 所示(彩图见期刊电子版),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 方向的应变可以忽略不计。



(a)能量密度为 7.96 J/cm² 附近时的显微图 (b)能量密度为 10.75 J/cm² 附近时的显微图 (c)能量密度为 15.13 J/cm² 附近时的显微图
(a)Micrograph of area with energy density of 7.96 J/cm² (b)Micrograph of area with energy density of 10.75 J/cm² (c) Micrograph of area with energy density of 15.13 J/cm²

图 5 脉宽为 2.5 ms,不同激光能量密度作用下的显微图

Fig. 5 Micrographs under different laser energy densities with pulse duration of 2.5 ms

由于 x 方向条纹变化最明显,所以《毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究》中是按照形

变量都在 x 方向(即 x 轴投影法)计算的,计算结果如表 4 所示。

表 4 x 轴投影法下单晶硅各方向的应力值及实验与仿真的误差值

Tab. 4 Stress values of monocrystal silicon in each direction and simulation and experiment error values by x axis projection method

脉宽/ms	能量 密度/(J · cm ⁻²)	x (对应仿真中径向) 方向应力最大值/kPa	z (对应仿真中轴向) 方向应力最大值/kPa	与仿真中径向 (实验中 x 方向)的误差/%	与仿真中轴向 (实验中 z 方向)的误差/%
2.5	7.96	79.3	30.6	25.1	27.5
2.5	10.75	132.2	50.9	9.5	27.8
2.5	15.13	321.8	124.1	17.1	29.3

本文主要研究形变量与 x 、 y 成一定角度的情形,为计算简便,本文考虑 x 、 y 方向投影相等的情况。由于 ϵ 在 x 、 y 方向投影相等,所以公式(5)、(6)、(7)可以写成:

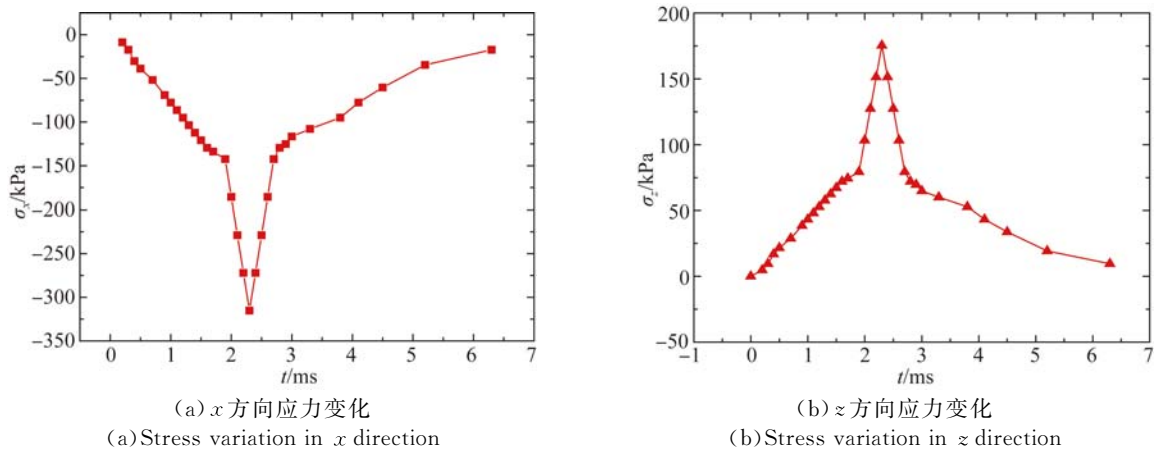
$$\sigma_x = \sigma_y = C11\epsilon_x + C12\epsilon_y = \frac{\sqrt{2}}{2}C11\epsilon + \frac{\sqrt{2}}{2}C12\epsilon, \quad (10)$$

$$\sigma_z = C12\epsilon_x + C12\epsilon_y = \sqrt{2}C12\epsilon. \quad (11)$$

通过公式(10)、(11)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 6 为 45°投影法下,能量密度为 15.13 J/cm² 时材料中心点的应力变化情况。从图中可以看出在激光作用时间内(0~2.5 ms)单晶硅的应力随着时间的增加而增加,由于激光作用过程中能量会有损耗,应力最大值出现在 2.5 ms 附近,但并没有真正到 2.5 ms,激光作用结束后,材料进入冷却阶段,应力值逐渐减小。

图 6 能量密度为 15.13 J/cm^2 时单晶硅的应力变化Fig. 6 Stress changes of monocrystal silicon with energy density of 15.13 J/cm^2 表 5 45° 投影法下单晶硅各方向的应力值及实验与仿真的误差值Tab. 5 Stress values of monocrystal silicon in each direction and simulation and experiment error values by the 45° projection method

脉宽/ms	能量 密度/ $(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	实验中 x 方向上的应力/kPa	实验中 z 方向上的应力/kPa	与仿真中径向 (实验中 x 方向)的误差/%	与仿真中轴向 (实验中 z 方向)的误差/%
2.5	7.96	77.7	43.2	22.6	2.4
2.5	10.75	129.53	72.1	7.3	2.1
2.5	15.13	315.2	175.4	14.7	0.1

表 4 为 x 轴投影法下实验应力值及实验与仿真的误差值,表 5 为 45° 投影法下实验应力值及实验与仿真的误差值。从表 4 中可以看出 x 轴投影法下,实验与仿真的径向误差为 $9.5\% \sim 21.5\%$,轴向误差为 $27.5\% \sim 29.3\%$ 。从表 5 可以看出 45° 投影法下,实验与仿真的径向误差为 $7.3\% \sim 22.6\%$,轴向误差为 $0.1\% \sim 2.4\%$ 。从表 4 和表 5 中可以看出,在脉宽相同的情况下单晶硅所受应力的大小随着激光能量密度的增加而增加。且 45° 投影法与仿真的误差值要比 x 轴投影法与仿真的误差值小的多,尤其是轴向最为明显。

5 误差分析

首先,由于实验条件的限制,虽然对单晶硅晶格的 $[100]$, $[010]$, $[001]$ 方向进行了标定,但不能十分精准确认,导致材料 x 轴, y 轴, z 轴不一定能百分百的按照晶格方向来标定;且测量干涉条纹形变量越过条纹的级数时,小数部分为估计值,其测量结果将直接影响 ϵ 的大小。其次由于实验中固体激光器本身的激光能量、输出波形和空间

分布具有不稳定性,而仿真模型为理想模型,其激光参数的输出是稳定的;且实验中的单晶硅是含有杂质和缺陷的,而仿真中并未考虑单晶硅的杂质及缺陷,所以实验结果与仿真结果存在一定的差异。

6 结论

本文建立了毫秒脉冲激光辐照单晶硅的理论模型,开展了毫秒脉冲激光辐照单晶硅的实验研究。从理论和实验两方面入手探讨了毫秒脉冲激光与单晶硅作用时,相同脉宽不同能量密度下应力场随时间的演变规律。在《毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究》的基础上,进行了深入的研究探讨,改进实验中应力、应变的计算方法,即按照干涉条纹形变量在单晶硅各方向上的投影来计算单晶硅各个方向的应力值。研究表明运用 45° 投影方法计算的实验结果与仿真结果的误差变小了。这说明 45° 投影法比 x 轴投影法更加科学、准确。

参考文献:

- [1] 张建萍,冯秀恒,黄廉卿,等. 数字 X 线影像仪的激光扫描光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2):202-207.
ZHANG J P, FENG X H, HUANG L Q, *et al.* Design of laser scanning optical system for computed radiography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):202-207. (in Chinese)
- [2] 尤政,杨冉,张高飞,等. 激光测距系统整形模块和低通滤波模块优化设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10):2527-2534.
YOU ZH, YANG R, ZHANG G F, *et al.* Optimization of shaping circuit and low-pass filter in laser ranging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2527-2534. (in Chinese)
- [3] 金光,李艳杰,钟兴,等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8):2067-2074.
JIN G, LI Y J, ZHONG X, *et al.* Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8):2067-2074. (in Chinese)
- [4] READY J F. *Effect of High Power Laser Radiation* [M]. New York: Academic, 1971.
- [5] CHEN Y B, LU J, NI X W. Analysis of thermal stress damage in single-crystal silicon induced by 1 064 nm long-pulse laser [J] *Optical Engineering*, 2008, 8(1):6835-6841.
- [6] 孙承伟,陆启生,范正修,等. 激光辐照效应[M]. 北京:国防工业出版社, 2002.
SUN CH W, LU Q SH, FAN ZH X, *et al.* *Laser Irradiation Effect* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [7] HAN J H, FAN W X, LI Y G, *et al.* Laser plasma effects on surface damage characteristics of silicon [J]. *Optical Engineering*, 2012, 12(1):8206-8212.
- [8] YAMADA K, UEDA T, HOSOKAWA A, *et al.* Thermal damage of silicon wafer in thermal cleaving process with pulsed laser and CW laser [J]. *Optical Engineering*, 2006, 23(6):6107-6116.
- [9] HEN C, CHAMBONNEAU M, CHENG X A, *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):111101-111105.
- [10] SHEN CH, CHENG X A, JIANG T, *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): 1-8.
- [11] 李贺,蔡继兴,谭勇,等. 毫秒激光辐照单晶硅的在线应力损伤研究[J]. 光学学报, 2016, 36(2), 02190021-02190028.
LI H, CAI J X, TAN Y, *et al.* Research on real-time stress damage of millisecond laser irradiation on single-crystal silicon [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2), 02190021-02190028. (in Chinese)
- [12] 胡汉平. 热传导理论[M]. 中国科学技术大学出版社, 2010(1).
HU H P. *Heat Conduction Theory* [M]. University of Science and Technology of China Press, 2010(1). (in Chinese)
- [13] 卓卫东. 应用弹塑性力学[M]. 北京:科学出版社, 2013:61-80.
ZHUO W D. *Application of Elastic-Plastic Mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2013:61-80. (in Chinese)
- [14] 梁铨廷. 物理光学[M]. 第三版. 北京:电子工业出版社, 2008:75-124.
LIANG Q T. *Physical Optics* [M]. Third Edition. Beijing: Electronic Industry Press, 2008:75-124. (in Chinese)

作者简介:



吴春婷,女,副教授,激光物理与新型激光器,激光与物质相互作用。E-mail: bigsnow1@163.com



李贺(1991—),女,吉林长春人,硕士研究生,激光与物质相互作用。E-mail:646918492@qq.com

(本栏目编辑:李自乐)