

文章编号 1004-924X(2007)09-1361-05

# 长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验

吴东江<sup>1</sup>,马广义<sup>1</sup>,周秋菊<sup>1</sup>,许卫星<sup>1</sup>,许媛<sup>2</sup>,王续跃<sup>1</sup>,赵福令<sup>1</sup>

(1.大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024;

2.大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室,辽宁 大连 116024)

**摘要:**利用毫秒脉宽 Nd:YAG 激光对硅片进行了弯曲试验,给出了长脉宽脉冲激光弯曲硅片的能量阈值条件。研究了长脉宽 Nd:YAG 激光脉冲频率和脉冲宽度参数对硅片弯曲角度的影响,同时说明了脉冲频率和脉冲宽度参数对弯曲角度的影响可以转换成扫描速度和功率密度对弯曲角度的影响,并对试验结果进行了分析,引入了脉冲占空比来表征能量的时域分布对弯曲现象的影响。试验结果表明,采用毫秒量级脉冲激光可以对硅片进行弯曲加工,弯曲角度可达 20° 以上。

**关键词:**激光弯曲;硅片;脉冲频率;脉冲宽度;脉冲占空比

**中图分类号:**TN 249 **文献标识码:**A

## Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser

WU Dong-jiang<sup>1</sup>, MA Guang-yi<sup>1</sup>, ZHOU Qiu-ju<sup>1</sup>, XU Wei-xing<sup>1</sup>,  
XU Yuan<sup>2</sup>, WANG Xu-yue<sup>1</sup>, ZHAO Fu-ling<sup>1</sup>

(1. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *State Key Laboratory for Material Modification by Laser, Ion and Electron Beams, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

**Abstract:** The experiment of silicon chip bending by a millisecond pulse width Nd:YAG laser was done, and the energy threshold of silicon bending was given. Meanwhile, using the Nd:YAG long pulse laser, the influence of pulse frequency and pulse width on the bending angle was mainly investigated, which could be transformed to the influence of scan velocity and power intensity on the bending angle. The pulse duty cycle was also used to describe the influence of the energy's time distribution on bending. The experimental results indicate that the silicon chip could be bent an angle more than 20° using the Nd:YAG long pulse laser.

**Key words:** laser bending; silicon chip; pulse frequency; pulse width; pulse duty cycle

## 1 引言

激光弯曲作为一种新型无模具成形技术,正日益受到快速成形加工界的密切关注。该技术利用激光束扫描板材表面形成的非均匀温度场所导致的热应力来实现塑性变形,是一种无模具、无外力的非接触式依靠热应力的成形工艺,具有生产周期短,柔性大等特点。

现阶段对于激光弯曲的研究主要集中在金属材料 and 合金材料(铝合金,钛合金等)<sup>[1-2]</sup>等塑性变形材料,而对脆性材料很少涉及。但随着快速成形技术的发展,对需要激光弯曲加工的脆性材料的需求日益增长。比如,随着微制造技术的发展,硅在半导体工业中的应用日趋广泛<sup>[3]</sup>,在 MEMS 领域中不仅需要平面硅片,也需要 Si 梁、Si 桥和探针臂等结构件、执行机构件、弹性功能件等不定形硅片;在微型传感器制造中也出现了非直线悬臂,以及精密光学器件中需要在微尺寸器件条件下的微小弧度件等,这些器件的应用要求对加工的微平面器件进行二次加工。而激光弯曲的特点,特别适合对此类器件的二次加工。目前仅查阅到国外从事该领域研究的相关报道,主要集中在德国和美国。其中德国的 U. LÖschner, H. Exner 等人在上世纪末对硅片在高温情况下塑性变形的可行性进行了实验研究,并且说明了在温度  $>650\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,硅片会从脆性向塑性转变,提出了采用激光技术对脆性材料进行弯曲的想法<sup>[4-5]</sup>,并利用连续 YAG 激光器,对单晶硅进行了相关实验,初步确定了硅片弯曲机理和金属材料弯曲机理的相似性<sup>[6-8]</sup>。美国的 R X. Zhang, X F Xu 等人最近几年利用连续和短脉冲(百纳秒量级)两种激光模式激光器,分别对陶瓷、玻璃、硅片进行了实验研究<sup>[9-12]</sup>。

本文利用 Nd:YAG 长脉冲激光,确定了激光弯曲硅片的能量阈值,通过改变激光脉冲频率和宽度,研究了两者与硅片弯曲角度的关系,同时讨论了脉冲占空比对硅片弯曲现象的影响。

## 2 试验装置

试验采用的硅片试件为(100)单晶硅,单面抛光,厚度为  $100\text{ }\mu\text{m}$ ,尺寸大小为  $10\text{ mm}\times 20$

mm。激光加工设备由 JK701H 型 Nd:YAG 固体毫秒脉冲激光器,四轴联动、定位精度  $<0.03\text{ mm}$ 、重复定位精度  $\pm 0.003\text{ mm}$  的精密机床,0 级精度大理石工作台组成。试验采用激光焊接模式,功率  $0\sim 650\text{ W}$  连续可调。加工设备附有 CCD 在线观测,主要用于实时观察试验过程,防止硅片产生过于剧烈的热熔现象。试验装置如图 1 所示。

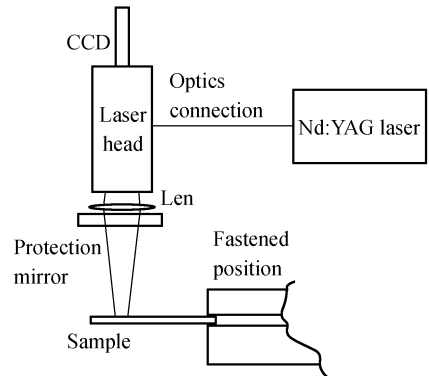


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

试件采用传统的单端固定方式,激光扫描面为抛光面。先把硅片固定在铜片衬底上,然后固定于工作台。扫描路径采用往返扫描方式,且扫描位置不变。扫描路径和固定端如图 2 所示。

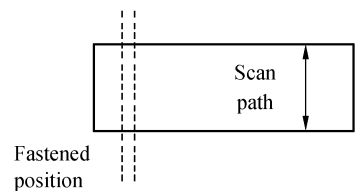


图 2 扫描路径及固定端示意图

Fig. 2 Schematic of scan path and fastened position

## 3 试验结果讨论

试验表明,采用长脉冲 Nd:YAG 激光可以实现硅片的弯曲加工,而且弯曲角度可以通过试验参数控制。图 3 所示为脉冲频率为  $35\text{ Hz}$ ,脉宽为  $2\text{ ms}$ ,扫描速度为  $100\text{ mm/min}$  的弯曲样品照片。

### 3.1 能量阈值的选择

由于硅材料对  $1064\text{ nm}$  波段光的穿透深度

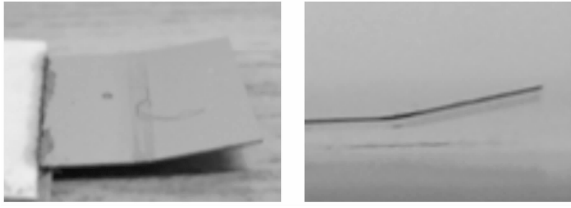


图3 加工样品照片

Fig. 3 Photos of machined sample

大约为  $60 \mu\text{m}$ <sup>[13]</sup>,其深度小于试件的厚度,所以在激光扫描过程中可以认为硅片对激光能量只存在反射和吸收两种现象。吸收比与反射比的关系通过下式给出<sup>[14]</sup>:

$$1 = \rho_R + \alpha_A, \quad (1)$$

其中  $\rho_R$  为材料对激光的反射比,  $\alpha_A$  为材料对激光的吸收比。由于硅材料的  $\rho_R$  随温度的上升会产生变化,必然导致硅片对激光的吸收比  $\alpha_A$  也相应发生改变,在此可设定在室温时的  $\rho_R$  作为标准,考虑温度升高导致  $\rho_R$  的变化,同时忽略表面质量和环境对反射比的影响<sup>[15]</sup>,取平均  $\rho_R = 0.1$ ,故吸收比  $\alpha_A = 0.9$ 。

确定吸收比后,通过式(2)可以计算能量密度:

$$J = \alpha_A \frac{4P}{\pi d^2}, \quad (2)$$

其中  $J$  为能量密度,  $P$  为单脉冲激光能量,  $d$  为激光光斑直径。

试验中能量阈值的确定并不涉及到脉冲宽度,故脉冲宽度可以任意确定。本试验确定在 2 ms 的条件下寻找阈值,因为设备在此脉宽条件下激光能量输出最为稳定。通过单脉冲连续作用对硅片表面的损伤程度来确定阈值。当单脉冲能量为 0.1 J,光斑直径为 0.75 mm 时,能量密度为  $0.23 \text{ J/mm}^2$ ,硅片表面有明显熔融现象,而且表面有黑色氧化层;当单脉冲能量为 0.05 J,光斑直径为 1 mm 时,能量密度为  $0.057 \text{ J/mm}^2$ ,硅片表面有轻微熔融现象;当单脉冲能量为 0.04 J,光斑直径为 1 mm 时,能量密度为  $0.046 \text{ J/mm}^2$ ,硅片表面熔融现象并不明显;当单脉冲能量为 0.02 J,光斑直径为 1 mm 时,能量密度为  $0.035 \text{ J/mm}^2$ ,硅片表面几乎没有变化。根据硅片表面的变化情况,把能量密度阈值确定为  $0.05 \text{ J/mm}^2$ 。在后续试验中选择单脉冲能量为 0.04 J,光斑尺寸为 1 mm。

### 3.2 脉冲频率对弯曲角度的影响

图4所示为硅片弯曲角随脉冲频率变化的关系曲线。试验发现,实现硅片弯曲存在一个合适的激光频率调节范围。如果脉冲的频率过高,会产生严重的熔损现象;相反,如果频率过低,则会产生崩裂现象。这主要是由于脉冲频率的高低直接影响了光斑重叠度,也就是两个相邻光斑重叠部分发生了变化,因此导致了辐照区域得到的热量不同,从而对硅片产生了不同影响。脉冲频率过高,使得重叠率过大,在单位面积上的热积累效应持续时间变长,导致硅片更容易出现熔损现象;相反,脉冲频率过低,使得重叠率变小甚至无重叠,则在单位面积上的热效应不足以使得硅片实现塑性变形的温度条件,导致在局部产生脆性崩裂。

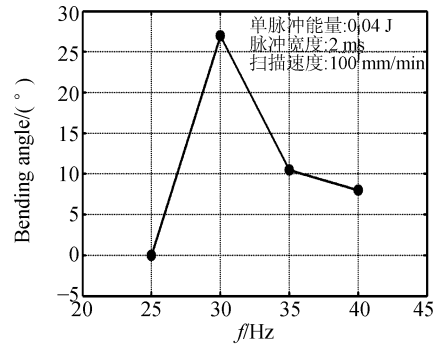


图4 脉冲频率与弯曲角度的关系

Fig. 4 Relation between bending angle and pulse frequency

由于重叠度与频率和速度有关,因此改变频率实现的弯曲角度变化,也可以通过改变扫描速度来实现,即脉冲频率与弯曲角度的关系在一定条件下可以转换成扫描速度与弯曲角度的关系。即扫描速度越慢,对硅片的损伤程度越明显,同时弯曲角度也相应的减小。

### 3.3 脉冲宽度对弯曲角度的影响

图5为激光脉宽与弯曲角度对应关系曲线,由图可见,弯曲角度的大小在脉冲宽度  $> 2 \text{ ms}$  时随着脉冲宽度的增大而减小,并伴有硅片不同程度的损坏。脉宽越大,硅片的损坏越明显。试验中脉冲频率固定在 30 Hz,扫描速度为 100 mm/min,脉冲宽度分别选取 1.5 ms、2 ms、2.5 ms、3 ms、4 ms。结果发现,脉宽为 1.5 ms 条件下,硅片并没有发生明显的弯曲现象,只能看到表面有

轻微的扫描痕迹;脉宽为 2 ms 条件下,虽然表面存在一定的扫描痕迹,但并没有损坏现象,产生的弯曲角度达到  $27^\circ$ ,弯曲面较圆滑,背面无明显变化;脉宽为 2.5 ms 条件下,表面存在很明显的扫描痕迹,硅片已经部分破坏;脉宽为 3 ms 条件下,表面发生了很明显的熔损,大部分已经破坏;脉宽为 4 ms 条件下,熔损现象更加明显。试验现象表明:在单脉冲能量、频率、扫描速度等参数条件不变的情况下,脉冲宽度对弯曲现象的影响比较明显,存在一个最佳的脉冲宽度。脉宽较大时,在硅片表面的热积累效果容易导致硅片熔化损坏;脉宽较小时,无明显弯曲现象产生。

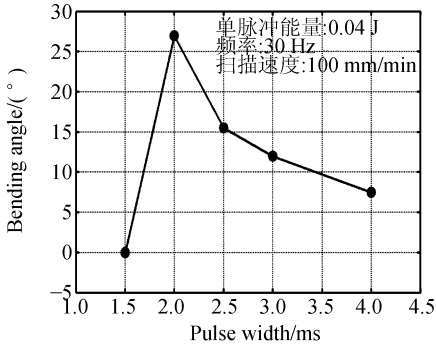


图 5 脉冲宽度与弯曲角度的关系

Fig. 5 Relation between bending angle and pulse width

由于功率密度与脉冲宽度有一定的函数关系,故脉冲宽度对弯曲角度的影响也可间接表示脉冲功率密度对弯曲角度的影响。

### 3.4 脉冲占空比对弯曲现象的影响

由于试验中所采用的是毫秒量级激光,单脉冲激光作用时间较长,需要考虑到相邻脉冲间隔时间的热传导,这就需要引入一个可以表征能量的时域分布参数,定性分析能量的时域分布对弯曲现象的影响。本试验引入脉冲占空比来讨论能量时域分布对弯曲现象的影响。

脉宽除以脉冲周期定义为脉冲占空比。试验中脉冲周期通过下式计算得到:

$$T = \frac{1}{\text{脉冲频率}} \times 1000 \text{ ms}, \quad (3)$$

其中  $T$  为脉冲周期。

表 1 列出了在扫描速度为 100 mm/min 的条件下脉冲占空比对弯曲现象的影响,通过表 1 可以明显地发现,当占空比在 0.060~0.075 之间时,弯曲角度比较明显,同时质量也相对较好;而

占空比  $< 0.060$  或者  $> 0.075$  时,即使存在弯曲角度,硅片也都有一定程度的破坏。由此可以说明占空比可以表征弯曲硅片时能量的时域分布对弯曲现象的影响。即在扫描速度一定的条件下合理的占空比可以得到较好的弯曲质量。具体的物性机制作者另文做深入分析。

表 1 占空比对弯曲现象的影响

Tab. 1 Influence of pulse duty cycle on bending

占空比	角度	弯曲质量	频率(Hz)	脉宽(ms)
0.070	$11^\circ$	较好	35	2
0.045	$0^\circ$	略有痕迹	30	1.5
0.060	$27^\circ$	好	30	2
0.075	$15^\circ$	部分损坏	30	2.5
0.090	$12^\circ$	大部分破坏	30	3
0.050	$0^\circ$	略有痕迹	25	2
0.080	$8^\circ$	损坏严重	40	2
0.060	$20^\circ$	好	40	1.5

## 4 结 论

利用毫秒脉宽 Nd:YAG 激光对厚度为 100  $\mu\text{m}$  的单晶硅片进行了激光弯曲试验,得到如下结论:

(1)给出了激光弯曲硅片的能量阈值选择原则以及本试验中确定的阈值:  $0.05 \text{ J/mm}^2$ ;

(2)通过改变脉冲频率可以控制弯曲角度,但可调节的范围比较小。在扫描速度为 100 mm/min,脉宽为 2 ms 的条件下,最佳的脉冲频率为 30 Hz;

(3)脉冲宽度对弯曲角度的影响比较明显,可以控制弯曲角度的大小,在扫描速度为 100 mm/min,脉宽为 2 ms,脉冲频率为 30 Hz 条件下弯曲角度可以达到  $27^\circ$ ,但随着脉冲宽度的增长,硅片的损坏程度比较严重;

(4)在定义脉冲宽度除以脉冲周期为脉冲占空比的条件下,脉冲占空比可以定性表征弯曲硅片时能量的时域分布对弯曲现象的影响;

(5)对激光作用区域的形貌和结构需进一步检测分析,便于确定弯曲硅片的形貌和晶体结构的改变程度。

## 参考文献:

- [1] 刘韧,季忠,张鹏,等. 板料激光成形及其研究进展[J]. 锻压装备与制造技术,2004,3:17-21.  
LIU R,JI ZH,ZHANG P,*et al.*. Sheet laser forming & research progress[J]. *Metal forming Equipment & Technology*,2004,3:17-21. (in Chinese)
- [2] 陈敦军,向毅斌,吴诗淳,等. 钛合金板料激光曲线弯曲及热辐射对其组织性能的影响[J]. 金属学报,2001,37(6):43-46.  
CHEN D J, XIANG Y B, WU SH CH,*et al.*. Curved laser bending of titanium alloy sheets and effects of heat radiation on its microstructure and property[J]. *Acta Metallurgica Sinica*,2001,37(6):43-46. (in Chinese)
- [3] 崔建丰,赵晶,樊仲维,等. 厚硅片的高速激光切片研究[J]. 光学精密工程,2006,14(5):829-834.  
CUI J F,ZHAO J,FAN ZH W,*et al.*. Study on LD-pumped Nd:YAG laser cutter for silicon wafer [J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):829-834. (in Chinese)
- [4] FRÜHAUF J,GÄRTNER E,JÄNSCH E,*et al.*. Silicon as a plastic material[J]. *Micromesh Microeng*,1999,9:305-312.
- [5] FRÜHAUF J,GÄRTNER E,JÄNSCH E. New aspects of the plastic deformation of silicon-prerequisites for the reshaping of silicon microelements[J]. *Appl. Phys.*,1999,68:673-679.
- [6] LÖSCHNER U,EXNER H,GÄRTNER,*et al.*. Laser bending of silicon [J]. *SPIE*,2003,4977:86-93.
- [7] GÄRTNER E,FRÜHAUF J,LÖSCHNER U,*et al.*. Laser bending of etched silicon microstructure[J]. *Micro system Technologies*,2001,7:23-26.
- [8] EXNER H,LÖSCHNER U. Contactless laser bending of silicon microstructures [J]. *SPIE*,2003,5116:383-392.
- [9] ZHANG R X,XU X F. Microscale bending of brittle materials using pulsed and CW lasers [J]. *SPIE*,2002,4637:291-296.
- [10] ZHANG R X,XU X F. High precision micro scale bending by pulsed and CW lasers [J]. *Transactions of the ASME*,2003,125(8):512-518.
- [11] ZHANG R X,XU X F. Finite element analysis of pulsed laser bending: the effect of melting and solidification [J]. *Journal of Applied Mechanics*,2004,71(5):321-326.
- [12] ZHANG R X,XU X F. Laser bending for high-precision curvature adjustment of micro cantilevers [J]. *Applied Physics Letters*,2005,86(021114):1-3.
- [13] MICHAEL P,JORG K,HENDRIK W,*et al.*. Processing of silicon by Nd:YAG-lasers with harmonics generation [J]. *SPIE*,2002,4637:496-504.
- [14] 陆建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1996.  
LU J,NI X W,HE A ZH. *Interactive Physics of Laser and Materials* [M]. Beijing:China Machine Press,1996. (in Chinese)
- [15] 吴东江,许媛,王续跃,等. 激光清洗硅片表面 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒的试验和理论分析[J]. 光学精密工程,2006,14(5):764-770.  
WU D J,XU Y,WANG X Y,*et al.*. Experimental and theoretical study on laser cleaning Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle on silicon wafer surface [J]. *Opt. Precision Eng.*,2006,14(5):764-770. (in Chinese)

作者简介:吴东江(1964—),男,山东人,大连理工大学机械工程学院教授,博士,主要从事激光精密微细加工方面的研究。E-mail:djwudut@dlut.edu.cn