

文章编号: 0258-7025(2008)05-0772-04

位错对薄硅片激光弯曲过程的影响

马广义 吴东江 牛方勇 周秋菊 王续跃 郭东明

(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)

摘要 基于开展的薄硅片长脉冲激光弯曲成形实验, 针对弯曲样品表面产生的滑移线和堆垛层错缺陷, 结合实验所用规格硅片弯曲角度不超过 35° 的现象, 运用位错理论分析在弯曲过程中硅晶体产生位错、层错现象的原因以及位错对激光弯曲成形的影响。说明了滑移线主要是位错堆积产生滑移的表现形式, 而堆垛层错是位错相互叠加产生的不全位错导致的结果; 提出薄硅片弯曲成形受到位错浓度和位错移动速度变化的影响。

关键词 激光技术; 激光弯曲; 滑移线; 堆垛层错; 位错理论; 位错浓度; 位错移动

中图分类号 TN 249; TG 665 **文献标识码** A

Influence of Dislocation on the Laser Bending Process of Thin Silicon

Ma Guangyi Wu Dongjiang Niu Fangyong

Zhou Qiuju Wang Xuyue Guo Dongming

(Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology of
Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract Based on slip line and stacking fault appeared on the silicon surface, the dislocation theory is used to analyze the reasons of causing dislocation and stacking fault during the bending process and study their influence on the laser bending, according to the experiment of thin silicon laser bending. The analyzed results indicate that the slip line is caused by the dislocation accumulation, and the stacking fault is the results of piled dislocation. Meanwhile influence of the dislocation density and dislocation moving velocity on the process of laser bending is analyzed. The changing process of dislocation density and the decreased dislocation moving velocity are considered to form maximal angle.

Key words laser technique; laser bending; slip line; stacking fault; dislocation theory; dislocation density; dislocation moving

1 引 言

目前对激光弯曲成形的实验研究报道很多, 主要集中在工程材料(如合金钢、不锈钢等)和高品质合金材料(如铝合金、钛合金等)^[1,2], 只有少数国外文献报道过脆性材料的激光弯曲实验研究^[3~5]; 在弯曲成形机制研究方面, 比较认同温度梯度机制、弯曲机制和增厚机制^[6], 而三者又都是不同温度梯度作用形式的结果, 因此基于温度梯度机制模拟的报

道占绝大多数, 但仅仅考虑温度场产生的应力应变对弯曲角度的影响^[7,8], 而对激光作用产生的温度梯度与晶体材料微观缺陷的相互作用报道较少, 也并未见到关于脆性材料在弯曲成形过程中基于温度梯度而导致的晶体位错对弯曲成形影响的相关报道。本文基于已经开展的长脉冲激光弯曲薄硅片的弯曲实验以及检测结果^[9,10], 分析在弯曲过程中硅晶体产生位错、层错现象的原因, 同时初步分析了位

收稿日期: 2007-08-30; 收到修改稿日期: 2007-10-31

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(50290101), 教育部博士点基金(20070141002)和辽宁省自然科学基金(20062178)资助课题。

作者简介: 马广义(1982—), 男, 辽宁人, 硕士研究生, 主要从事激光弯曲成形方面的研究。

E-mail: mgy_119@hotmail.com

导师简介: 吴东江(1964—), 男, 山东人, 教授, 硕士生导师, 主要从事激光微细加工技术方面的研究。

E-mail: djwudut@dlut.edu.cn

错对激光弯曲成形的影响,有利于进一步理解激光弯曲硅材料的弯曲机制。

2 长脉冲激光弯曲薄硅片实验

2.1 实验条件

实验采用 n 型单晶硅,单面抛光,厚度为 $100\ \mu\text{m}$ 。激光加工设备由 JK701H 型 Nd:YAG 固体毫秒脉冲激光器($1064\ \text{nm}$),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。实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,主要用于实时观察实验过程,防止硅片产生过于剧烈的热熔现象。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(往返 3 次定义为一组),且扫描位置不变。实验设备和扫描路线如图 1 所示。

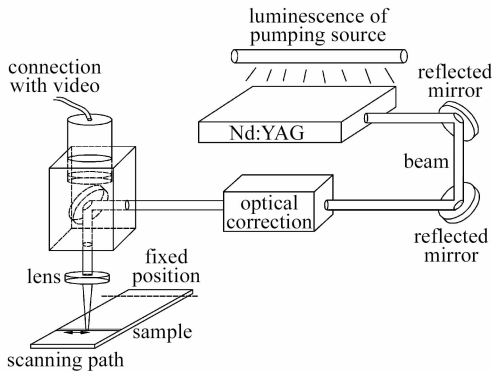


图 1 实验设备及扫描路线示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup and scanning path

2.2 参数选择及实验结果

由于薄硅片对激光能量的变化比较敏感,故能产生弯曲现象的能量范围较小,同时考虑到设备的特点和激光加工参数的选择原则,在实验过程中主要选取频率和脉冲宽度(毫秒量级)作为实验可调整参数,研究激光加工参数对薄硅片弯曲成形的影响。

实验结果表明,实现硅片弯曲存在一个较窄的激光频率和脉冲宽度调节范围^[9]。如果脉冲频率过高,会产生严重熔损;相反,如果频率过低,则会产生崩裂。而脉宽较大时,容易导致硅片熔化损坏;脉宽较小时,无明显弯曲现象产生。另外在扫描路径不变的情况下,弯曲角度存在最大值,在实验所用规格硅片的条件下,弯曲角度不超过 35° 。弯曲样品如图 2 所示。

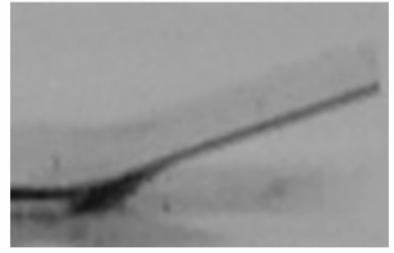


图 2 弯曲样品

Fig. 2 Bending sample ($40\ \text{Hz}$, $1.5\ \text{ms}$)

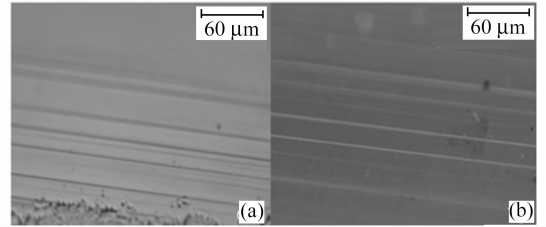


图 3 实验现象照片(滑移线)

Fig. 3 Images of experimental phenomena (slip line)

(a) $40\ \text{Hz}$, $1.5\ \text{ms}$; (b) $30\ \text{Hz}$, $2\ \text{ms}$

通过电子显微镜对不同参数下弯曲样品的观测中发现,在激光作用的边缘区域都可以看到明显的范性^[11]滑移线(如图 3 所示,图 3(a) $40\ \text{Hz}$, $1.5\ \text{ms}$,图 3(b) $30\ \text{Hz}$, $2\ \text{ms}$),且很一致地平行于扫描方向。

图 4 为在边缘区域附近且靠近激光作用剧烈区域的电子显微镜和扫描电镜(SEM)图像,其中(a)为电子显微镜照片($35\ \text{Hz}$, $2\ \text{ms}$), (b)为扫描电镜照片($40\ \text{Hz}$, $1.5\ \text{ms}$)。通过图 4(a)可以明显发现许多正三角形结构,而且随着与激光作用剧烈区域距离的减小有“长大”的趋势,最终“湮灭”在激光作用剧烈区域,大小不超过 $15\ \mu\text{m}$ 左右。而从图 4(b)可以看到从滑移线区域到激光作用剧烈区域之间正三角形结构的变化趋势,同时发现正三角形结构实际上是立体的貌似三菱体的小凸起。

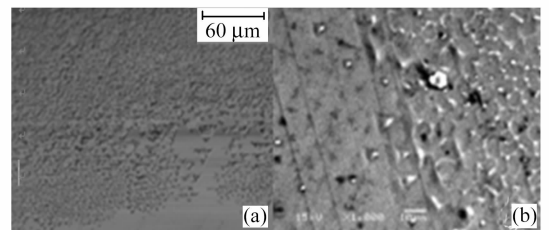


图 4 实验现象照片(正三角形结构)

Fig. 4 Images of experimental phenomena (perfect-triangle)

(a) $35\ \text{Hz}$, $2\ \text{ms}$; (b) $40\ \text{Hz}$, $1.5\ \text{ms}$

3 位错对弯曲过程的影响

3.1 位错的产生

晶体存在位错的原因主要有两种,一是晶体在生长过程中本来就有位错存在于籽晶或者促使晶体生长的壁面里;另外一种是由于在晶体中产生位错核、位错环^[11]。而位错核、位错环又是导致硅晶体在后续加工条件下产生位错的主要因素,所以主要考虑后者在激光弯曲过程中对晶体的影响。

在常温条件下,实验所用的单面抛光硅片在晶体内部存在位错核与位错环,及一定浓度的位错,但可以认为晶体内部处于一种热平衡状态,即在常温无外界作用的条件下,短时期晶体内部不会有新的位错出现。而激光弯曲过程可以等同于时间很短的高温淬火,瞬间把扫描区域温度提高,扫描的次数越多,则扫描区域的温度将会越高,但存在温度上限。随着温度的升高,晶体内部原有的热平衡遭到破坏,使得开始存在的位错核与位错环长大而产生新位错,而开始存在的位错向四周扩散和塞积,同时也会诱导新一轮位错核与位错环的形成。但随着温度接近上限且趋于稳定,位错浓度并不是无限度增加,同时位错核与位错环的形成也会随着位错浓度的提高而逐渐消失,这主要由于晶体中的缺陷浓度满足

$$c_d = A \exp(-U_f/kT), \quad (1)$$

式中 c_d 是温度为 T 时的缺陷浓度, U_f 为缺陷形成能, A 是量级为 1 的常数, k 为玻尔兹曼常数。所以当温度稳定一段时间后,缺陷浓度将会趋于饱和,详细机制参见文献[12]。

在图 3,图 4 中看到弯曲区域的硅片产生了明显的位错、层错现象。滑移线的形成主要由于位错的滑移;另外考虑到激光弯曲时的工艺条件,正三角形结构则属于堆垛层错的表现形式。

3.2 温度梯度对位错的影响

目前认为温度梯度导致薄板产生弯曲变形的主要原因是由于材料上下两表面的温度差较大而形成的应力不同而造成的,因此在厚度方向上的温度梯度大小一定程度上决定了弯曲成形的效果。而对硅片而言,温度梯度不仅影响了热应力的分布,同时也会对位错浓度分布和位错移动产生一定的影响。

在边缘区域附近且靠近激光作用剧烈区域,当激光瞬间作用到单晶硅表面时,由于接近扫描中心,表面温度较高,上表面附近有形成较大位错浓度的趋势,而下表面产生的位错浓度相对较小,导致位错在厚度方向更容易移动。随着激光扫描次数增加,位错移动作用加强,而温度作用将促使位错在激光

作用表面产生堆积现象,使每次位错移动结果叠加,容易形成不全位错,最终表现为层错。

在硅片温度升高的过程中,激光扫描边缘区域的温度相对扫描中心较低,使硅片表面没有明显的热变化,而温度梯度产生的不均匀热应力将会导致硅片沿着厚度方向产生切应力。由于硅片上下两表面存在温度差,故在硅片上表面更容易产生位错堆积,同时热应力作用引起的弯曲促进了位错堆积群沿着一定方向滑移,最终在上表面形成平行于扫描方向的滑移线。

3.3 位错对弯曲成形的影响

传统的温度梯度理论认为,激光在弯曲板材时主要分为加热和冷却两个阶段,而产生的塑性变形是热应力-应变的结果,并没有考虑晶体在骤热、骤冷的条件下,产生的晶体缺陷对弯曲过程的影响。而对单晶硅而言,激光短时间内的加热作用会使硅晶体产生大量位错,而位错理论说明位错需要一定的应力作用才可以形成,同时位错的扩散和塞积也需要一定的应力支持,反过来位错之间相互作用、掺杂原子钉扎作用以及位错移动等对晶体内部的应力作用也会起到促进或限制的效果,这都会对弯曲成形产生一定的影响。

根据位错滑移动力学理论,宏观上的塑性变形是位错运动的结果,可表征为

$$\frac{d\epsilon}{dt} = b\rho v, \quad (2)$$

式中 b 为伯格矢量, ρ 为可动位错密度, v 为位错运动的平均速率^[11]。由(2)式可知增大位错矢量 b , 位错密度和位错速率都可加速塑性变形率,进一步使塑性变形量增加。

激光扫描过程中,瞬时产生很高的温度提升,单晶硅本身产生的热应力促使位错密度、位错移动速率等发生变化,此时弯曲过程就不单纯是热应力-应变作用的结果。由于激光照射过程中温度提升很快,导致位错浓度迅速增加,同时掺杂原子以及近表面氧原子的干扰会使位错移动受到一定的阻碍作用,在局部出现位错塞积,在滑移面上位错出现被钉扎等现象,而这些作用会引起硅晶体产生内应力分布,对在弯曲过程中出现的热应力产生限制或者促进的作用,进而影响弯曲成形角度的大小。另外由于冷却时间较短,使得单晶硅在高温条件下产生的位错密度在短时间内不可能完全释放,造成在冷却过程中容易出现位错浓度的过饱和状态,而过饱和状态有利于位错核的形成^[11],促使单晶硅在下一个

激光脉冲作用时更加容易产生新位错,同时也降低了位错移动时间,有利于实现单晶硅的弯曲成形。

在扫描开始阶段,单晶硅上下表面并未达到平稳的高温条件,但随着单晶硅温度不断提高,位错浓度不断增大,同时位错移动速率也会迅速增加,因此产生的塑性变形也最大;但随着扫描次数的增加,冷却效果逐渐减弱,促使位错浓度的变化逐渐减小,同时位错移动速率降低,最终表现为塑性变形量减小。关于位错移动速率的详细理论可参见文献[11,12]。而当激光作用次数增加到一定程度,即扫描区域的最高温度趋于平稳且出现此温度的累计时间较长时,存在最大位错浓度值,使单晶硅不再发生明显的位错浓度增大,同时位错移动速率迅速减小,这时晶体内部的位错移动、新位错生成几乎消失,根据(2)式,晶体不会进一步发生明显塑性变形。这种位错浓度变化过程和减小的位错速率为硅片存在最大弯曲角度提供了解释依据。

4 结 论

根据激光弯曲硅片的实验现象,运用位错理论分析弯曲过程中位错对弯曲成形的影响,得到如下结论:

1) 激光弯曲过程中硅片将会产生位错、层错现象,主要表现为滑移线和堆垛层错,其中滑移线的产生是由于位错的堆积,而堆垛层错则是位错的叠加产生不全位错的结果。

2) 运用位错理论可以较好解释实验现象。增大位错矢量 b ,位错密度和位错速率都可加速塑性变形率,进一步使得塑性变形量增加。而位错密度变化过程和位错移动速率的减小也对本实验条件下不改变扫描位置而存在的最大弯曲角度产生影响。

参 考 文 献

- 1 Liu Shunhong, Hu Qianwu, Zhou Longzao *et al.*. Investigation on microstructure and property of laser bent Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1049~1053
刘顺洪,胡乾午,周龙早等. 激光弯曲成形 Ti-7Al-2Zr-2Mo-2V 的组织及性能研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(11):1049~1053
- 2 Guan Yanjin, Ji Zhong, Hao Binhai *et al.*. Influence of material properties on laser bending process of sheet metal [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(1):87~90
管延锦,季忠,郝滨海等. 材料性能参数对板料激光弯曲成形的影响[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(1):87~90
- 3 U. Löschner, H. Exner, E. Gärtner *et al.*. Laser bending of silicon [C]. *SPIE*, 2003, **4977**:86~93
- 4 H. Exner, U. Löschner. Contactless laser bending of silicon microstructures[C]. *SPIE*, 2003, **5116**:383~392
- 5 Xi Zhang. Laser-assisted high precision bending and its applications [D]. USA: PURDUE University, 2004
- 6 R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger *et al.*. *Laser Physics and Applications* [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2004
- 7 Huang Chenguang, Duan Zhuping. Numerical simulation on the micro-scale bending induced by pulsed laser beam [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(3):281~285
黄晨光,段祝平. 激光微弯曲成形机理的数值研究[J]. 中国激光, 2002, **A29**(3):281~285
- 8 U. Löschner, H. Exner. FEM calculations on laser bending of silicon with a moving laser source [C]. *SPIE*, 2004, **5455**:407~414
- 9 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Zhou Qiuju *et al.*. Experimental study of bending silicon chip with long pulse width laser [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(9):1161~1165
吴东江,马广义,周秋菊等. 长脉宽脉冲激光硅片弯曲成形试验[J]. 光学精密工程, 2007, **15**(9):1161~1165
- 10 Wu Dongjiang, Ma Guangyi, Cao Xiansuo *et al.*. Analysis of silicon surface profile of pulsed laser bending processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1589~1593
吴东江,马广义,曹先锁等. 脉冲激光弯曲成形技术中硅片表面的形貌分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(11):1589~1593
- 11 Zhao Jingshi. *The Theory of Dislocation* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1989
赵敬世. 位错理论基础[M]. 北京:国防工业出版社, 1989
- 12 J. Friedel. *Dislocation* [M]. Wang Yi translated. Beijing: Science Press, 1964
J. Friedel. 王熠译. 位错(增订版)[M]. 北京:科学出版社, 1984