

激光刻蚀技术的应用

王宏杰¹, 郭文刚¹, 董兆辉¹, 吕福云¹, 杜永超², 李超², 刘建生²

(1. 南开大学 物理科学学院, 天津 300071;

2. 中国电子科技集团公司 第十八研究所, 天津 300168)

摘要:对激光刻蚀过程中的气化现象进行了热力学分析, 根据不同的材质合理地选取工作条件, 进行了激光狭缝刻制、太阳能电池硅片打孔及激光标识的试验, 并对刻蚀结果进行了对比分析, 得出与理论分析相符的结果。

关键词:激光刻蚀; 激光标识; 光学狭缝; 硅片

中图分类号: TN249 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-2276(2004)05-0469-04

Application of laser etching technology

WANG Hong-jie¹, GUO Wen-gang¹, DONG Zhao-hui¹, LÜ Fu-yun¹, DU Yong-chao², LI Chao², LIU Jian-sheng²

(1. Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. The 18th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Tianjin 300168, China)

Abstract: The gasifying phenomenon in laser etching is analyzed with the theory of heat conduction. According to different materials, appropriate working condition is selected, experiments of engraving, broaching and marking by using high-power laser are operated, and the etching results are compared. The results show that the method is consistent with the theory analysis and can be applied in many fields.

Key words: Laser etching; Laser marking; Optical slots; Silicon wafer

0 引言

随着激光技术的不断成熟, 高功率激光已广泛地应用于工业热处理、焊接、切割及标识等加工领域^[1,2]。在这些应用中, 通常利用强激光作为热源对物体加热, 使物体快速升温, 主要应用于发生气化等物理过程。激光刻蚀技术具有非接触、无污染和可实

现微米线度精细加工的特点。而且, 随着激光器质量的提高和控制系统的改善, 激光刻蚀技术得到了越来越广泛的应用。本文对激光刻蚀过程中温度场的分布进行了热力学分析, 并依据理论分析, 合理地设计了工作参数。同时, 还介绍了激光刻蚀技术在光学元件制作、太阳能电池硅片打孔和激光标识中的应用实例, 如利用激光刻蚀技术制作光学实验需要的多种狭缝元件, 平均缝宽为 75 μm , 达到了目前最小光斑直

收稿日期: 2003-11-06; 修订日期: 2004-02-06

作者简介: 王宏杰(1959-), 男, 天津人, 高级工程师, 主要从事激光电子学教学和科研工作; 激光标识和激光精密加工等应用技术的研究工作。

径为 $d_0 = 50 \mu\text{m}$ 情况下的极限线宽。与传统的光刻方法相比,用激光刻蚀方法制作光学狭缝不需要制版,而是通过计算机控制直接在工件上进行任意图形的刻蚀。该方法操作简便、无污染、非接触、工艺成本低等一系列优点也是前者无法比拟的。另外,利用激光刻蚀技术在厚度为 $300 \mu\text{m}$ 的太阳电池硅片上刻蚀出了直径为 $160 \mu\text{m}$ 的光洁圆孔,这是用常规的机械加工方法无法实现的,非激光刻蚀技术莫属。同时,在硅片背面和塑料杯圈上进行了激光标识。根据产品质量控制和防伪的需要,每一件产品需要一个序号,并且不能重复。如果用传统的印刷或手刻的方法来完成,其难度之大是不可想象的,而用激光标识方法来完成却极其方便和简捷。

1 理论分析

在实际加工过程中,激光光束和工件之间存在着相对运动,这样必定改变了温度场的对称分布;并且,光斑形状和大小也发生相应变化。此时,温度分布不仅取决于材料表面吸收的功率 P 、物体的热扩散系数 k 和热容量 C ,还取决于光斑相对于材料表面的运动速度和光斑大小。当被加工的材料表面尺寸远大于光斑尺寸时,可视为半无穷大的情况。此时,材料中的温度分布与吸收的激光功率密度 Q 之间的关系由热扩散方程决定:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - k \nabla^2 T = \frac{Q}{C} \quad (1)$$

如图 1 所示,平行于 z 轴的激光光束在 $t=0$ 时刻垂直入射到材料表面 $z=0$ 处,当激光光束以速度 u 沿 x 方向运动时,设温度场的坐标为 (x, y, z, t) ,移动光源的坐标为 (x', y', z', t') 。经过理论推导可以得到温场分布为^[3]:

$$T(u, 0, 0, t) = P_a / \pi^{3/2} K \int_0^\infty \exp[-(u\beta^2/4k)^2 / (\beta^2 + w^2)] d\beta / (\beta^2 + w^2) \quad (2)$$

式中 w 为光束半径; P_a 为注入功率; $\beta = 2(k|t - t'|)^{1/2}$, 是一个时间函数。

公式(2)给出了光斑运动速度为 u 时,材料温度分布随时间 t 的变化关系,这是一个积分表达式,需用数值方法才能精确求解。由上述公式可知,当相对

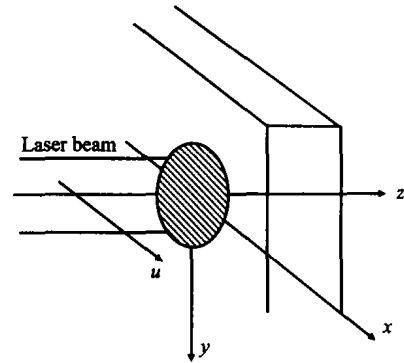


图 1 运动光斑对材料加热的示意图, u 为常数
Fig. 1 Diagram of material heated by moving laser beam, u is constant

静止时($u=0$),温场对称分布;而当存在相对运动时($u \neq 0$),温场呈不对称分布。并且,温度的最高点不再位于 $x=0$ 处,而是在 $x=ut$ 处;随着运动速度 u 的增加,最高温度明显下降。

另外,工件吸收激光能量的效果还与光斑焦深(DOF)有关,并且,焦深随所加工的材料而变化,并由下式决定^[3]:

$$DOF = \pi \rho d_0 / 2M^2 \lambda \quad (3)$$

式中 d_0 是聚焦后光斑的直径; λ 是激光波长; M^2 是激光的模式因子;变量 ρ 是描述刻蚀深度和宽度与焦深相关的参量。从公式(3)可以看出,焦深与光斑尺寸成正比,光斑尺寸愈小,焦深愈浅。例如,取参数 $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$, $d_0 = 50 \mu\text{m}$, ρ, M^2 均近似取 1,这种设计通过合理地选择激光谐振腔是可以实现的^[4]。经计算可知,此条件下焦深 $DOF = 73.8 \mu\text{m}$ 。这说明如果希望获得较窄的刻蚀宽度,只有进一步聚焦光束,同时利用较小的焦深。

综合以上两方面的理论分析可知,如果希望实现理想的精细加工,在焦深一定的情况下,还必须合理地选择功率密度和相对移动速度,特别是,光斑尺寸的大小对加工线度有直接影响^[5]。

2 实验结果

2.1 实验仪器和工作参数

(1) 美国 ESI 公司制造的 MODEL 4210 型激光切割机

激光波长: 1064 nm ; 脉宽: 75 ns ;

峰值功率:50 kW;重复频率:1~30 kHz;
光斑直径:50 μm;移动步长:2 μm;
激光模式:TEM₀₀。

(2) 德国 BAASEL LASERTECH 公司制造的 LBI 6000 型激光打标机

激光波长:1064 nm;脉宽:75 ns;
峰值功率:60 kW;重复频率:1~30 kHz;
光斑直径:70 μm;移动步长:2 μm;
工作范围:12 cm×12 cm。

(3) OLYMPUS BX2M 型显微镜。
目镜倍数:M20。

2.2 光学狭缝的制作

根据光学实验的需要,在镀铬板上用激光刻蚀方法制作了缝宽小于 100 μm 的双缝、三缝、四缝和五缝等多缝光学元件,镀铬层厚度为 20 μm。首先设置激光器工作电流为 10 A,脉冲频率为 3 kHz,峰值功率为 20 kW。图 2 为单个相对静止的激光脉冲在镀铬板上的刻蚀结果。图 3 为激光和镀铬板的相对速度为 50 mm/s 时双缝的刻蚀结果。从图中可以清楚



图 2 单个脉冲的光斑

Fig. 2 Facula of single pulse

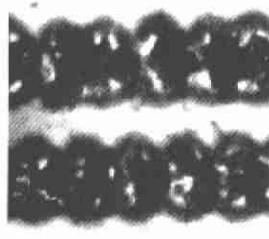


图 3 相对移动速度 $u=50$ mm/s 时缝的痕迹

Fig. 3 Etching trace at $u=50$ mm/s

地看到切割后的条纹由一系列相连的椭圆形熔迹组成。这主要是由于相对移动速度太快时光斑重叠的结果。另外,因为在相对运动的方向上,脉冲能量没有被铬层充分地吸收,以至于气化过程非常不稳定。在实际过程中,是由于一个脉冲产生的能量沿正方向传递时遇到下一个脉冲产生的反方向传递的能量,于是在能量相交的地方产生痕迹;而且在垂直于相对运动的方向上,脉冲能量却有充足的时间被吸收,气化的过程比较充分,所以,每个脉冲刻蚀产生的痕迹近似是一个椭圆形状。由于相对运动速度太快,缝的中间还有未被气化的部分,缝的边缘也是由一段段圆弧

熔迹相连而成,而并非是一条直线,刻蚀效果不理想。

图 4 为相对移动速度降低为 15 mm/s 时的刻蚀结果。虽然相邻激光脉冲作用的区域开始重叠,边缘的起伏明显降低,但是刻蚀的边缘仍然不是直线状。继续将激光的相对速度降低到 5 mm/s 时,刻蚀结果如图 5 所示。此时相邻的激光脉冲几乎完全重合,脉冲能量被充分吸收,使铬层发生均匀气化,刻蚀出的条纹变得连贯、均匀,并且边缘呈直线状,刻蚀效果比较理想。经过显微镜测量,得到如下结果:双缝平均宽度为 70 μm;三缝平均宽度为 75 μm;四缝平均宽度为 75 μm;五缝平均宽度为 80 μm。

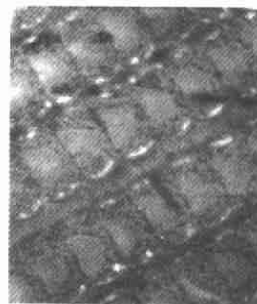


图 4 相对移动速度 $u=15$ mm/s 时缝的痕迹
Fig. 4 Etching trace at $u=15$ mm/s

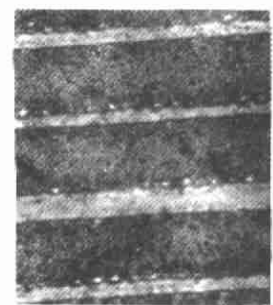


图 5 相对移动速度 $u=5$ mm/s 时缝的痕迹
Fig. 5 Etching trace at $u=5$ mm/s

经分析可知,在刻蚀多缝时,激光实际是斜入射到边缘的缝上,使投射的光斑变成椭圆形状,因为激光器的焦深是有限的,所以斜入射时光斑会变大,造成缝的宽度越来越大,此分析与我们得到的实验结果是吻合的。并且,在目前光斑大小下进行刻蚀时,实际测到的平均缝宽和前面的理论计算结果也是一致的。

2.3 激光打孔

利用 MODEL 4210 型激光切割机在太阳能电池硅片上进行了激光打孔。试验中将工作电流设置为 20 A,重复频率为 3 kHz,峰值功率为 50 kW,相对移动速度为 7 mm/s,并将激光光斑聚焦到 50 μm 时,在硅片上刻蚀出最小直径为 160 μm 的圆孔,硅片厚度为 300 μm,刻蚀结果如图 6 所示。

在显微镜下观察,刻蚀的圆孔边缘整齐、光洁、圆度符合要求,这说明以上工作参数的选择是合理的。如果将激光光斑进一步聚焦到 10 μm 以下,就可以

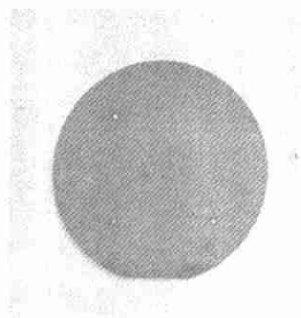


图 6 硅片打孔

Fig. 6 Broaching on the silicon wafer

刻蚀出直径小于 $100\ \mu\text{m}$ 、圆度更理想的圆孔。利用激光打孔技术满足了发射结卷包太阳能电池制备工艺的需要,通过圆孔实现了从硅片背面引出电极的设计要求,有效地增大了太阳能电池的吸光面积,提高了太阳能电池的短路电流,从而极大地提高了该类电池的光电转换效率,也为太阳能电池组件的组合工作带来了极大的方便。目前,采用发射结卷包技术的太阳能电池的转换效率可以达到 16.6% ,该制备方法已在实际生产中得到了广泛的应用。另外,激光技术已广泛地应用于太阳能电池制备工艺中的埋栅刻槽、打孔、划片及标识等工序,这些不仅极大地提高了太阳能电池的产量,而且,从根本上改革了制备工艺,使太阳能电池的性能达到了世界先进水平^[6]。

2.4 激光标识

利用 LBI 6000 型激光打标机在不同的材料上选择不同的激光参数进行了激光标识。在本实验中选取了塑料和硅片进行了对比实验。由于两种材料的气化点相差很大,根据前面的理论分析,选取的工作参数如表 1 所示。

表 1 激光打标工作参数

Tab. 1 Parameters of laser marking

	Current/A	Speed/mm s ⁻¹	Frequency/Hz
Plastic	11	45	3000
Wafer	16	30	3000

按照表 1 制定的工作参数,标识的结果分别如图 7、图 8 所示。另外,在其他不同的材质上进行了汉字和图形的标识,也均取得了满意的效果。



图 7 塑料上打号

Fig. 7 Marking symbols on the plastic

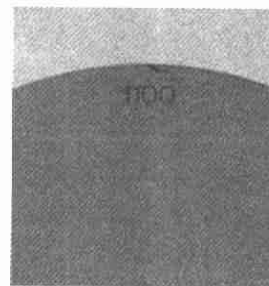


图 8 硅片上打号

Fig. 8 Marking symbols on the silicon wafer

3 结 论

依据理论分析,实验中合理地选择了工作参数,在激光切割机和激光打标机上分别进行了狭缝的刻蚀和硅片打孔,以及在不同材质上进行激光标识试验,均收到了预期的效果。而且,将激光刻蚀技术在实际中进行了推广应用。

致谢:在本文所进行的实验研究中,得到了中国电子科技集团公司第十八研究所徐寿岩、王庆华高级工程师和南开大学物理学院吕可诚教授的大力支持和亲自指导;在理论分析方面,本文作者与徐之光硕士进行了深入浅出的探讨,受益匪浅,在此一并感谢!

参考文献:

- [1] Michael Watts. Laster trim embedded passive components[J]. Photonics Spectra, 2003,7:74-76.
- [2] Lenny Migliore. Laser targert glass marking[J]. Photonics Spectra, 2003,7:72-73.
- [3] 路建,倪晓武,贺安之. 激光与材料相互作用的物理学[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [4] 张光寅,焦志勇,颜彩繁,等. 大功率高亮度固体激光腔的选择[J]. 强激光与粒子束,2003,15(5):424-426.
- [5] 漆海滨,李文煜. 强激光束对运动物体的加热[J]. 红外与激光工程,1999,28(1): 33-35.
- [6] 杜永超,王景霄,孙彦铮. 激光技术在太阳能电池行业的应用[J]. 激光产品世界,2003,6:37-40.