

文章编号: 0258-7025(2009)11-3064-04

# 水下激光切割硅片的工艺研究

杨 伟<sup>1</sup> 彭信翰<sup>2</sup> 张 骏<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 烟台大学光电学院, 山东 烟台 264005; <sup>2</sup> 深圳市木森科技有限公司, 广东 深圳 518102)

**摘要** 为了解决气体辅助激光切割硅片中由于热效应的影响而造成无法达到切割目的的问题,使用水作为辅助介质进行了对硅的切割实验。分析了水下激光切割过程中激光参数和水的因素对切割质量的影响,提出了消除水波影响的方案。研究表明,采用水作为切割的辅助介质,能够利用水的降温、隔离和除屑作用来解决激光热效应带来的负面影响,得到良好的切割效果。

**关键词** 光学制造; 激光切割; 水下; 硅; 高精密

**中图分类号** TG485; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093611.3064

## Study of Laser Cutting Technology for Silicon Wafer under Water

Yang Wei<sup>1</sup> Peng Xinhan<sup>2</sup> Zhang Jun<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Opto-Electronic Information, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)  
<sup>2</sup> Shenzhen Musen Technologies Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518102, China

**Abstract** In order to resolve the problem that the silicon wafer cannot be divided after laser cutting for heat effect, water is used as assistant material to cut the silicon wafer. The influence of laser and water parameters are analyzed. The technique can avoid the influence of water wave. The results of experiment show that the usage of the water as the assistant material can achieve the purpose perfectly for the cool and insulation effect of water.

**Key words** optical fabrication; laser cutting; under water; silicon; high precision

## 1 引 言

从 19 世纪发现晶体硅的半导体特性后,它已成为信息产业和新能源产业最基础的原材料。硅的传统加工方式是采用钻石刀切割。由于硅是脆性材料,接触式加工极易使硅片边缘破损,导致成品率低,原材料浪费大;还可能造成隐性裂纹影响电性参数;且只能以直线方式对硅片进行切割,无法进行复杂加工。而激光切割则拥有机械切割无法比拟的优势,它属于非接触加工,无应力。因此采用激光切割硅片时,切边平直整齐无破损,也无隐性裂纹;激光可以切割任意形状,包括开孔及圆弧加工,突破了钻石刀切割硅片时只能切直线的限制;另外激光切割无需更换刀具,无耗材,降低使用成本。因此就硅片切割而言,激光切割显然是一条必走之路。

激光切割硅片时通常使用 1064 nm 的 YAG 激

光器,1090 nm 的光纤激光器和 355 nm 的紫外激光器。YAG 和光纤激光器处于红外波段,完全依靠热效应来切割,硅片的切边会有挂渣的现象,切缝宽度较大,且溅射的熔融物会在材料表面堆积,影响材料性能甚至损坏材料本身。紫外激光波长短、光子能量大、切缝宽度小,通过直接破坏被加工材料的化学键来达到切割目的,是一个“冷”过程,因此在精密切割和微加工领域具有广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。然而紫外激光也不能完全避免热效应的存在。当用紫外激光加工硅片时,由于热效应的存在,切割完毕后熔融的部分在冷却过程中又会重新黏连在一起。虽然在背面可以看到切缝,但是无法自动分离,即便是采用同轴喷射的高压气体作为辅助介质来进行降温 and 排除切屑,也无法达到分离的目的,这样自然无法达到加工的要求。

收稿日期: 2009-01-09; 收到修改稿日期: 2009-02-09

作者简介: 杨 伟(1984—),男,硕士研究生,主要从事高精密激光加工方面的研究。E-mail: ywwestlife@163.com

导师简介: 张 骏(1965—),男,教授,主要从事激光技术的研究。E-mail: jzhang@ytu.edu.cn

木森科技有限公司的水下激光切割系统为上述问题的解决提供了一条出路。通过实验证实,当采用水下激光切割技术切割硅片时上述问题迎刃而解。在此之前有学者对水下激光切割做过一些理论上的研究<sup>[3~6]</sup>,仅表明此法在一些情况下有助于提高切割质量,但是并未具体分析切割中一些参数的影响以及工艺方面的具体应用措施。本文通过实验对水下切割和空气中切割硅片进行了对比,分析了切割过程中各个参数对切割质量的影响,并从实用角度提出了消除水波影响的方法,同时对硅片样品进行切割,经过用户鉴定,达到了实际应用的要求。

## 2 水下激光切割理论分析

### 2.1 水的作用及其影响

液体辅助加工在机械加工中是很常用的方法,通常是在加工时喷水或油来降温 and 排除碎屑。同样也可采用水作为激光切割的辅助介质,来达到降温、排屑和隔离的作用。首先通过水的冷却作用,降低了激光在切割处的热影响,避免了激光对材料的过度烧蚀及温度过高对材料的不良影响;其次,水作为隔离层,防止材料熔融后在冷却的过程中重新黏连在一起;最后以水作为切割的辅助介质可以极大提高切割碎屑的排除程度,达到良好的切割效果。

当激光射入水中时,水会吸收一部分激光而造成其能量的减弱,这可以由 Lambert-Beer 定律计算得到

$$I_t = I_0 \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot l] = I_0 \cdot \exp[-k(\lambda)cl], (1)$$

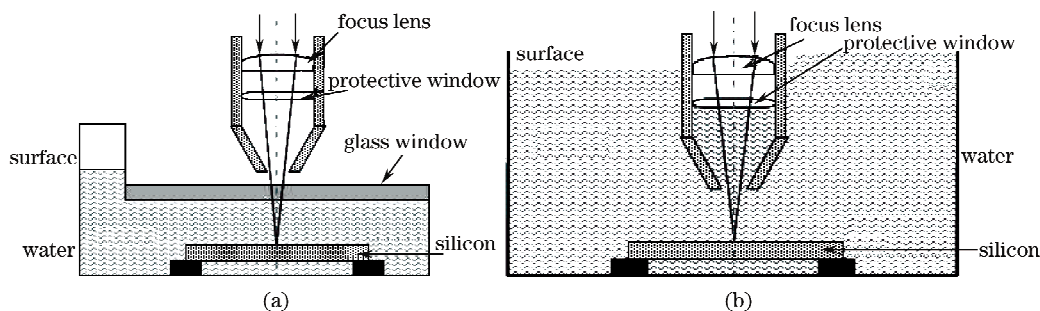


图 1 消除水面波动影响的两种方案

Fig. 1 Two ways of avoiding the influence of water wave

### 2.3 激光参数和切割速度的影响

在硅片切割中,激光以脉冲方式工作,在硅片上打一系列连续的孔从而实现切割。其中切割深度和切割质量是关注的焦点,而切割质量主要从切缝宽度、切边光洁度和切割侧壁质量等几方面来衡量。影响这些的主要参数有光斑直径、激光功率和重复频率、切割速度和材料性质等。激光切割中,光斑直

径、激光功率、切割速度和重复频率共同决定了材料在单位时间单位面积上获得的激光能量。单位时间单位面积上获得的激光能量越大,切割深度和切缝宽度就越大。

### 2.2 消除水波影响的方法

在切割中由于工作台加减速、机械结构的震动和空气流动等因素,造成自由液面的波动,对激光产生折射,使焦点位置产生漂移,造成切割质量变差或无法进行。因此必须采取措施消除自由液面的波动带来的影响,这是水下切割中一个关键的问题。为此提出两个解决方案,如图 1 所示。图 1(a)对容器做了改进,在容器的主腔体一侧有突起的附属腔体。主腔体上的开口使用石英玻璃密封,然后向容器中注入水,直至没过玻璃上缘,这样自由水面只存在于附属腔体中,在激光经过的路径上没有自由水面的存在,从而消除了自由液面的影响。图 1(b)对激光入射方式做了改变,直接将激光切割头浸没在水中,在容器内加水直至没过保护镜上缘,这样激光经过保护镜后直接进入水中,在传输的路径上不存在自由液面,从而消除了自由液面对激光传输的影响。

径、激光功率、切割速度和重复频率共同决定了材料在单位时间单位面积上获得的激光能量。单位时间单位面积上获得的激光能量越大,切割深度和切缝宽度就越大。

激光功率是影响切割深度和切缝宽度的主要因素。其他参数不变时,随着激光功率增大,材料单位时间内获得的能量增加,切割的深度随之增加,切缝

宽度也随之变大。

切割速度的变化意味着激光与材料的相互作用时间改变,切割速度越大,材料单位面积上获得的能量就会减小。其他参数不变时,切缝宽度及切割深度都随着切割速度的增大而减小。

光斑直径是影响切缝宽度最直接的因素,减小光斑尺寸可以减小切缝的宽度,设激光的束腰半径为  $w_0$ ,光束质量因子为  $M^2$ ,激光波长为  $\lambda$ ,聚焦镜焦距为  $f$ ,扩束镜准直倍率为  $A$ ,由激光原理<sup>[7]</sup> 可得激光经过扩束镜和聚焦镜后的光斑直径  $D$  和焦深  $Z$  分别为

$$D = 2 \cdot \frac{\lambda \cdot f \cdot M^2}{\pi \cdot A w_0}, \quad (2)$$

$$Z = \frac{\pi \cdot d^2}{2 \cdot \lambda \cdot M^2}, \quad (3)$$

式中激光的波长  $\lambda$  和光束质量因子  $M^2$  由激光器来决定,可以选择短波长和较小  $M^2$  的激光器来减小光斑尺寸,另一方面通过减小聚焦镜的焦距和增大扩束镜倍数来得到较小的光斑尺寸。但是减小焦距的同时焦深会缩短,使可切割深度变小,因此要根据实际要求合理地选择聚焦镜焦距和扩束镜倍数<sup>[8]</sup>。

其他参数不变的情况下,重复频率越高,峰值功率越小,单脉冲与材料作用的时间越短,影响区越小,切缝宽度也就越小。当重复频率较低时,虽然脉冲的峰值功率很高,但平均功率很低,会使切缝较宽,切割深度却不大。随着重复频率的上升,脉冲峰值功率降低,但平均功率增加,在一个适当的范围内,可以达到较小的切缝宽度和较大的切割深度。当重复频率继续上升时,虽然输出的平均功率增加,但是脉冲的峰值功率却下降,因此切割深度变小。

激光以脉冲方式工作,光斑的重叠率  $S$  是关键的参数。重叠率是指相邻光斑重叠面积占光斑面积的百分比,它影响切边的光滑度和切割深度。在切割过程中光斑变形很小,可以认为仍是圆形的,如图 2 所示。重叠率越高则切边越平滑质量越好。光斑

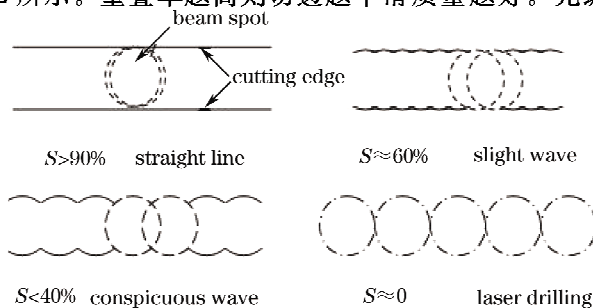


图 2 不同重叠率  $S$  下的切割边缘形状

Fig. 2 Edge appearance in different overlap  $S$

重叠率  $S$  与激光重复频率、脉冲宽度和切割速度有关,可以由简单的几何关系得出。因此在切割中要考虑输入能量和重叠率来合理地选择参数搭配。

### 3 实验装置

实验装置使用的是深圳木森科技有限公司的 Wafercut350 型激光切割机,其示意图如图 3 所示。其中激光器使用的是 JDSU-Q301,波长 355 nm,最大功率为 10 W,光束模式为  $TEM_{00}$ ,重复频率可调范围为 0~250 kHz。聚焦镜焦距为 50 mm,装有与激光束同轴的 CCD 用来视觉定位和实时监视切割状况。工作平台的定位精度为  $\pm 3 \mu\text{m}$ ,重复精度为  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,确保了切割的高精度。硅片样品表面光滑平整,厚度均匀,为 0.5 mm。水层厚度在 4 mm 左右,这样既可以达到良好的冷却和排屑作用,又可以较少的对激光产生衰减。

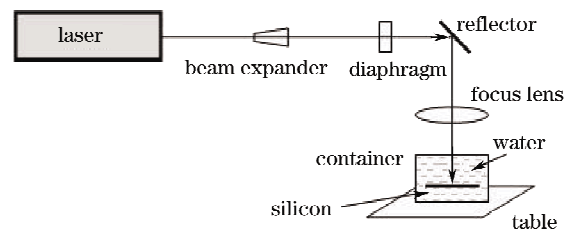


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Experiment equipment

## 4 实验结果与分析及技术对比

### 4.1 实验结果与分析

激光入射到硅片表面时,声音清脆,稍有刺耳,伴随着切割的进行,明显地看到切屑逆着切割方向从切割道中喷出,并且在切割处有大量的气泡生成,在这里气泡影响可以忽略<sup>[9,10]</sup>。切割完毕后硅片可以自动分离,而且切边整齐,切壁光滑。

实验中发现切割深度和切缝宽度均随着激光功率的增大而增大,随着切割速度的增大而减小。另外当重复频率小于 10 kHz 时,切割时声音尖锐刺耳,切割深度较浅,切缝较宽。随着频率的增加,切割时声音变小,切割深度增加,切缝宽度也减小。当重复频率达到 50 kHz 时,切割深度达到最大。频率继续上升时,切割深度再次减小。这与之前的分析结果一致。

如图 4 所示,水层厚度为 3 mm,在激光功率为 8.5 W,重复频率 20 kHz,切割速度为 15 mm/s 时所得到的硅片最佳切割效果。图 4(a)是在硅片上开方孔,这是钻石刀无法或很难做到的;图 4(b)为

开十字孔,其中孔宽为  $80\ \mu\text{m}$ ,即与一根头发丝的直径相当。图 4(c)为切边效果图,可以看到切边整齐,切壁光滑,无破损和崩边现象;图 4(d)为切割侧壁正视图,可以看到侧壁光滑,无熔渣残留。

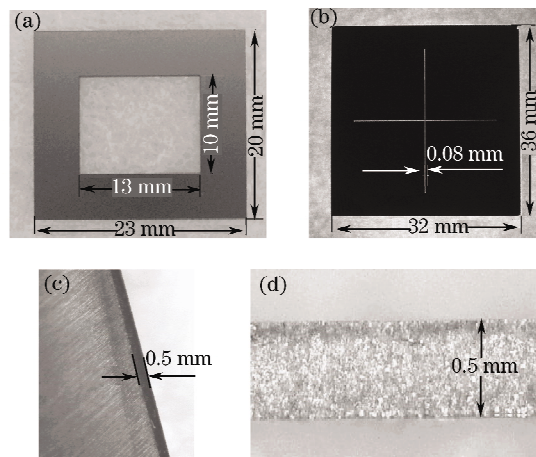


图 4 水下激光切割硅片照片。(a)硅片上开方孔;  
(b)硅片上开十字孔;(c)切割侧边;(d)切割侧壁

Fig. 4 Photo of Si cutting under water. (a) Rectangular hole in Si; (b) crossed hole in Si; (c) side of cutting; (d) profile of cutting

#### 4.2 与水导激光切割的对比

在用水作为辅助介质的激光切割中,有一种被称为水导激光(Water-jet-guided laser)的切割技术,由瑞士某公司开发并申请了世界专利。它是将激光束经过聚焦后导入高压喷射的极细水柱中,利用激光在水柱中全反射传播,将激光引到材料表面进行切割,因此水起到了长度可变的液态光纤的作用。其中水柱的产生及激光的耦合和传播都是关键技术。与本实验相同,水可以起到降温 and 除屑作用,因此使用水导激光切割可以达到良好的切割效果和—些气体辅助切割所不能达到的要求。但其在切割中硅片的切边会有轻微氧化,呈现淡黄色,且此项技术为国外垄断,工艺复杂设备昂贵。而采用水下激光切割法可以达到水导激光切割的效果,甚至在某些方面优于水导激光切割,且工艺简单操作方便。

## 5 结 论

通过实验分析了水下激光切割过程中激光参数及水的因素的影响,从实用角度提出了消除水波影响的方法,解决了气体辅助激光切割硅片中存在的切割后无法分离的问题,并通过实际切割证实了此法的可行性,经过用户确认满足实用要求。同时把水下激光切割技术由实验室研究推向工业应用,为激光加工工业中所遇到的由热效应带来的负面问题

的解决提供了一个新的选择。

另外还通过实验验证,水下激光切割也适用其他材料如陶瓷、碳化硅、砷化镓等,也可以推广到其他加工方法如划线、打孔等。而且辅助介质可以根据材料的性质和加工要求来选择,如酸碱盐的水溶液、有机溶液等。目前已经对此项技术申请了发明专利,并将其应用到新开发的产品之中。

## 参 考 文 献

- Reinhart Poprawe. Lasertechnik für die Fertigung; Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den Innovativen Ingenieur[M]. Zhang Dongyun Transl., Beijing: Tsinghua University Press, 2008. 279~283  
浦诺威. 激光制造工艺:基础、展望和创新应用实例[M]. 张冬云译. 北京:清华大学出版社, 2008. 279~283
- Lou Qihong, Zhang Lin, Ye Zhenhuan *et al.*. Experimental research on Si cutting by using UV excimer laser[J]. *Laser Technol.*, 2002, **26**(4): 250~251  
楼祺洪, 章琳, 叶震寰等. 紫外激光切割 Si 片的实验研究[J]. 激光技术, 2002, **26**(4): 250~251
- Ling Lei, Lou Qihong, Li Shuzhi *et al.*. Microcutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser[J]. *Laser Technol.*, 2004, **28**(2): 131~134  
凌磊, 楼祺洪, 李抒智等. 水浴条件下 YAG 倍频激光切割 Si 片的实验研究[J]. 激光技术, 2004, **28**(2): 131~134
- Zhu Bo, Qi Litao, Wang Yang. The experimental study of water-assisted laser machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2003, (12): 73~74  
朱波, 齐立涛, 王扬. 水辅助激光加工技术的实验研究[J]. 现代制造工程, 2003, (12): 73~74
- Long Yuhong, Xiong Liangcai, Shi Tielin. Experimental research of micromachining silicon by excimer laser ablation in air and under water[J]. *Laser Technol.*, 2006, **30**(6): 567~569  
龙宇宏, 熊良才, 史铁林. 水辅助准分子激光微加工硅的实验研究[J]. 激光技术, 2006, **30**(6): 567~569
- Zhang Hua, Xu Jiawen, Wang Jiming. Experimental study of neutral salt solution assisted laser machining [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1836~1840  
张华, 徐家文, 王吉明. 中性盐溶液辅助激光加工试验研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1836~1840
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tiron *et al.*. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 64~73  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 64~73
- Liao Jianhong, Meng Hongyun, Wang Hongwei *et al.*. Investigation and applications of fiber laser precision cutting system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1): 135~138  
廖健宏, 蒙红云, 王红卫等. 光纤激光精密切割系统的研制及其应用[J]. 中国激光, 2007, **34**(1): 135~138
- Li Jianmin, Yang Fu, Wei Jianyu *et al.*. Far-field interferometric analysis and application of bubble[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1301~1304  
李建民, 杨富, 魏建宇等. 气泡的远场干涉分析及应用[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1301~1304
- Li Wei, Yang Kecheng, Xia Min *et al.*. Distribution characteristics of scattered light intensity on coated air bubble in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 799~803  
李微, 杨克成, 夏珉等. 光在水中吸附膜层气泡上的散射特性[J]. 光学学报, 2008, **28**(4): 799~803