

文章编号: 1001-3806(2006)06-0567-03

## 水辅助准分子激光微加工硅的实验研究

龙芋宏<sup>1,2</sup>, 熊良才<sup>1</sup>, 史铁林<sup>1\*</sup>

(1 华中科技大学 机械科学与工程学院, 武汉 430074; 2 桂林电子工业学院 机电与交通工程系, 桂林 541004)

摘要: 为了研究脉冲激光在不同介质中的刻蚀特性, 采用 20ns 短脉冲、248nm 准分子激光 (能量为 150mJ~250mJ) 分别在水和空气两种介质中对半导体单晶 Si 片进行微刻蚀实验研究。在实验的基础上, 研究了两种介质中准分子激光刻蚀 Si 的刻蚀孔的基本形貌和刻蚀速率, 并对结果进行了对比分析。研究表明, 水辅助激光微加工时, 熔屑易从加工区排出, 有助于提高加工的表面质量; 同时, 水的约束提高了冲击作用, 使得刻蚀速率加快。

关键词: 激光技术; 水辅助微加工; 准分子激光; 刻蚀; 硅

中图分类号: TG665 文献标识码: A

### Experimental research of micromachining silicon by excimer laser ablation in air and under water

LONG Yu-hong<sup>1,2</sup>, XIONG Liang-cai<sup>1</sup>, SHI Tie-lin<sup>1</sup>

(1 School of Mechanical Science and Engineering Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074, China; 2 Department of Electronic Machinery and Transportation Engineering Guilin University of Electronic Technology Guilin 541004 China)

**Abstract** To investigate the technique of laser etching silicon under different mediums micromachining of silicon was conducted using a short-pulse (FWHM is 20ns) KrF excimer laser with energy of 150mJ~250mJ. Laser etching were tested on a silicon workpiece both in air and underwater. Based on the results of experiments, basic etching appearance and etching velocities by excimer laser etching silicon under the two mediums were studied, and then the differences were compared. As a result, the molten material is easy to be removed in water-assisted micromachining of silicon, which helps to improve the processed surface quality, and the restriction of water improves the impact effect which increases the etching velocity.

**Key words** laser technique; water-assisted micromachining; excimer laser; etching; silicon

### 引 言

激光加工, 在材料的微细加工领域有着传统机械方法无可企及的优势<sup>[1,2]</sup>。但由于热效应的存在, 激光直刻会造成基底材料的热应力、机械损伤, 加工飞溅物在加工区的重新沉积, 影响了加工质量。对一些热敏性材料, 这种情况尤为严重<sup>[3-5]</sup>。准分子激光的波长短、光子能量大, 素有“冷光源”之称, 因而在激光微加工中占有一定的地位, 然而, 准分子激光并不能完全避免直刻的热效应<sup>[6]</sup>。

水辅助激光加工技术为解决上述问题提供了一种可能。水辅助激光加工将工件放在水中, 使工件被加工表面离水面有一定距离, 激光通过水加工工件<sup>[7,8]</sup>。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (2003CB716207); 国家自然科学基金资助项目 (50405033, 50575078)

作者简介: 龙芋宏 (1974-), 女, 博士研究生, 研究方向为微制造技术。

\* 通讯联系人。E-mail: tlish@public.wh.hb.cn

收稿日期: 2005-11-22 收到修改稿日期: 2006-04-21

由于水具有良好的导热性, 能冷却热敏材料和飞溅物, 从而减少材料的热影响和加工表面的变质层, 避免加工表面污染, 提高加工表面质量。作者在水辅助激光加工的原理基础上, 采用了 248nm 准分子激光, 分别在空气和水浴环境下对半导体单晶硅材料进行了微加工实验, 对在这两种介质中刻蚀样品的表面形貌进行对比分析, 并对两种介质中, 不同激光参数下的刻蚀速率进行比较, 以研究水辅助准分子激光微加工硅的工艺特性。

### 1 实验装置

水辅助激光微刻蚀硅的实验装置如图 1 所示。主

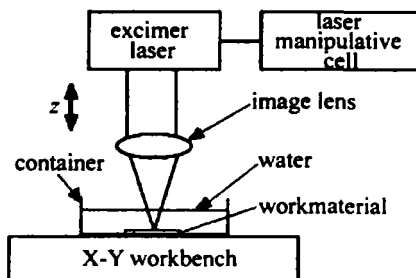


Fig 1 Schematic of the setup used for laser micromachining silicon under water and in air

要设备: Lumonics公司的 PM-848型准分子激光器、激光加工系统、容器、高倍光学显微镜、计算机图像采集系统和表面轮廓测试仪。激光器的工作介质为 KrF, 波长为 248nm, 脉宽 20ns, 脉冲重复频率最大值为 20Hz, 脉冲能量实验取 150mJ~250mJ, 聚焦透镜用焦距为 75mm 的柱透镜。刻蚀光斑的形状和大小由掩模和透镜成像比例来决定, 本实验中采用 1.168mm 孔径掩模。实验材料: n-Si 晶向为 100, 厚度 430 $\mu$ m; 丙酮溶液, 用来清洗试件表面。在空气中进行刻蚀实验时, 容器中不充水; 水辅助激光加工时, 在容器中加入离子水, 淹没硅片 3mm。样品清洗后固定到三维工作台上的样品池中, 激光通过聚焦照射到样品表面。加工过程用在线监视系统进行观察。实验后样品用高倍显微镜和计算机图像采集系统进行表面形貌分析, 采用表面轮廓测试仪测量刻蚀深度。

## 2 实验现象、结果及讨论

为了研究水辅助准分子激光刻蚀硅特性, 本文中将其与在空气中激光刻蚀结果进行比较, 主要从刻蚀形貌和刻蚀速率两方面进行对比分析。

### 2.1 刻蚀形貌的对比分析

当激光入射到空气中的 Si 片表面上时, 刻蚀处发出耀眼强光, 声音清脆, 并伴随有明显的等离子体喷射; 随着刻蚀深度的加剧, 声音渐渐减弱, 喷射的等离子体减少; 微孔完全穿透后, 声音消失。观察发现, 在刻蚀孔的周围会有明显的白色溅射沉积物残留。而把样品置于水中后, 在刻蚀处也产生强光, 同时, 刻蚀点能量密度很大, 会不断伴随有水泡冒出。

在脉冲能量 200mJ, 脉冲频率 20Hz, 脉冲个数 3000 的实验条件下, 在水和空气中加工硅的形貌如图 2 所

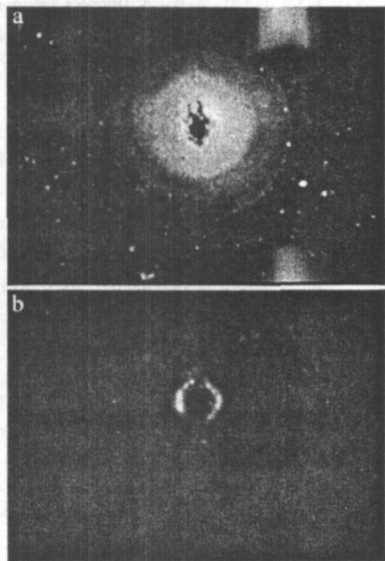


Fig 2 Images of silicon etching cavity in air and underwater respectively  
a— image of etching cavity in air b— image of etching cavity underwater

示。其中, 图 2a 图 2b 分别放大 20 倍。图 2a 为激光直接刻蚀试样的放大图像; 图 2b 为水辅助激光刻蚀试样的放大图像。观察发现: (1) 水中 3000 个脉冲没有明显的热影响和飞溅物沉积; 而空气中直刻有明显的溅射物颗粒附着, 宏观上表现为有白色附着物, 见图 2a。这种沉积物中的绝大部分可用丙酮擦拭去掉。这些现象表明, 水辅助激光加工能获得较好的加工质量。水辅助激光刻蚀有较好的表面质量的原因在于激光在水中与材料作用时会产生热流和气泡, 热流引起水的流动和气泡的不断产生和破裂, 有助于熔屑从加工区排出。另外, 水具有良好的冷却热敏材料和飞溅物的作用, 会减少材料的热影响和加工表面的变质层。直刻中的热影响会随着激光脉冲数的增加而提高, 这正是水辅助激光刻蚀的优越所在。(2) 空气中激光打孔, 孔壁融化表面是较光滑的, 而水下打孔时, 孔的边缘稍微粗糙。这是熔化物由于水冷却而快速凝固的结果。

### 2.2 刻蚀速率的对比分析

采用两组对比实验研究在水和空气两种介质中, 准分子激光刻蚀硅的刻蚀速率。实验 1 条件: 脉冲能量为 200mJ, 脉冲频率为 2Hz, 脉冲个数依次为 100, 200, 300, 400, 500, 600。实验 2 条件: 脉冲能量为 200mJ, 脉冲个数为 600, 脉冲频率依次为 20Hz, 10Hz, 6Hz, 4Hz, 2Hz, 1Hz。

刻蚀速率对比实验的结果如图 3 所示。图 3a 为

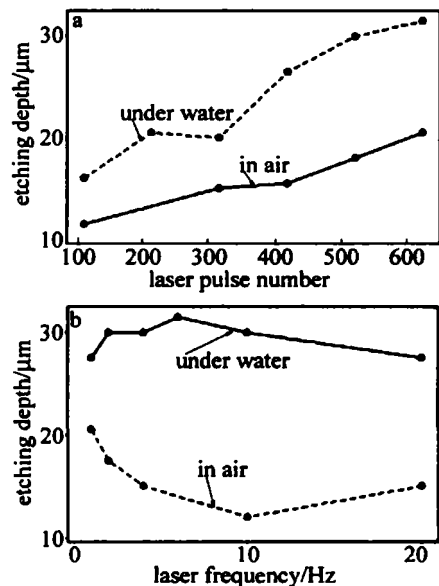


Fig 3 Laser etching depth in air and underwater, respectively  
a— with the variation of pulse shots b— with the variation of pulse frequency  
不同脉冲个数的条件下水和空气中激光刻蚀硅的深度对比, 从图中可看出, 在水和空气中两种情况下激光刻蚀硅, 刻蚀深度均随着脉冲个数的增加而增加, 因此, 可用脉冲数来控制刻蚀的深度。但水辅助激光刻蚀速率比空气中激光直刻速率要快。图 3b 为在不同脉冲

频率的条件下水和空气中激光刻蚀硅的深度对比。从图中可知,水辅助激光刻蚀速率比空气中激光直刻速率也要快。而且,在水和空气中两种情况下激光刻蚀硅,由于每个实验点的脉冲个数相等,刻蚀的深度基本相同,且随脉冲频率的增加而略有减小。

实验结果表明,在不同脉冲个数和脉冲频率的条件下,水辅助激光刻蚀速率总是比空气中激光直刻的刻蚀速率大。这是因为,当高功率激光作用于靶材时,材料表面出现融蚀,产生高温高压等离子体等现象。该等离子体吸收后续激光能量向外膨胀,将对材料表面形成反冲压力。由物理学可知,激光和物质作用,如果在材料表面上覆盖有对激光透明的物质,如水、石英等,周围介质在一定程度上限制了刻蚀过程中材料微粒从刻蚀孔向外喷出,这增加了刻蚀过程中产生的冲击作用,使激光脉冲对材料的刻蚀作用增强。当为液体时,还会出现空泡这一物理现象。如果空泡周围存在固体壁面,那么在溃灭阶段还会形成指向靶面的高速射流。该高速射流所产生的冲击力往往可达到兆帕的数量级<sup>[9,10]</sup>。因此,高能量密度激光通过水作用在材料表面时,会产生比在空气中更强的冲击作用,使微加工的速率加大。但是,冲击作用增大也可能使得刻蚀材料背面易出现材料崩离。

### 3 结 论

与准分子激光直刻硅工艺相比,水辅助准分子激光微刻蚀硅工艺,具有刻蚀表面质量好、刻蚀速率快、对环境无污染,无需掩模就能进行图形加工,工艺过程

简单。该工艺不仅具有加工大深宽比微结构的能力,而且对硅片的抛光面也有良好的刻蚀性能。

### 参 考 文 献

- [1] CHOO K L, OGAWA Y, KANBARG I G *et al* M icrom achining of silicon by short-pulse laser ablation in air and underwater [ J ]. *Materials Science and Engineering* 2004 A372(1~2): 145~ 162.
  - [2] DAM NELLIG, KRUGER J KAUTEK W. Femtosecond laser interaction with silicon under water confinement [ J ]. *Thin Solid Films* 2004 467(1~2): 334~ 341.
  - [3] SHAFEEV G A, OBRAZISOVA E D, PM ENOV S M. Laser-assisted etching of diamonds in air and in liquid media [ J ]. *Materials Science and Engineering* 1997 B46(1~3): 129~ 132.
  - [4] LI Y W, LIU J Zh, LI W X. Study of CO<sub>2</sub> laser grooving under water on the outside of a cylinder casing [ J ]. *Chinese Journal of Lasers* 1999 26(5): 455~ 460( in Chinese).
  - [5] LING L, LOU Q H, LI Sh Zh *et al* M icrocutting Si wafer in water bath by second harmonic output of YAG laser [ J ]. *Laser Technology* 2004 28(2): 131~ 133( in Chinese).
  - [6] LIU H P, ZHOU Y H, XIONG J C *et al* Experimental study on transverse affect zone in external laser direct etching [ J ]. *Laser Technology* 2005 29(2): 132~ 134( in Chinese).
  - [7] KRUSUNG A. Underwater and water-assisted laser processing part 2—— etching, cutting and rarely used methods [ J ]. *Optics and Lasers in Engineering* 2004, 41(2): 329~ 352.
  - [8] KRUSUNG A. Underwater and water-assisted laser processing part 1—— general features, steam cleaning and shock processing [ J ]. *Optics and Lasers in Engineering* 2004 41(2): 307~ 327.
  - [9] XU R Q, CHEN X, SHEN Zh H. Anom al phenomenon of laser drilling a plate underwater [ J ]. *Chinese Journal of High Pressure Physics* 2004 18(2): 130~ 134( in Chinese).
  - [10] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al* M echanisms of laser processing in water and air [ J ]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology* 2004 28(3): 248~ 252( in Chinese).
- 
- (上接第 566 页)
- 工作的青心老师和杨尚明老师在理论与实践方面给予的宝贵指导。
- 参 考 文 献
- [1] YANG A, ZHONG D J The study of a compact laser diode Doppler interference system [ J ]. *Laser Technology*, 1994, 18(4): 202~ 206( in Chinese).
  - [2] LU H Sh, LU B. Latest development of laser Doppler technique in vibration measurement [ J ]. *Laser Technology*, 2005 29(2): 176~ 179( in Chinese).
  - [3] GU Z H, LIN Z Q. Design review of a unique laser monostatic bidirectional reflectometer [ J ]. *Proc SPIE*, 1993, 1995 131~ 142.
  - [4] GU Z H, LIN Z Q, ESTEP J A. Calculation of signal-to-noise ratio of a monostatic bidirectional laser reflectometer [ J ]. *Proc SPIE*, 1993 1753 292~ 303.
  - [5] ESTEP J A, GU Z H. Ladar signature simulation [ J ]. *Proc SPIE*, 1992 1700 119~ 128.
  - [6] QI H X, LIU Z D, JIANG R X. A Doppler modulation based upon Michelson-Morley dynamic interferometer [ J ]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2003 16(4): 248~ 251( in Chinese).
  - [7] LU Z D, FENG W W, LIU M J. New type of Doppler modulating technology [ J ]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 556~ 559( in Chinese).
  - [8] YANG G G. Modern technology for optical examination [ M ]. Hangzhou Zhejiang University Press 1997 430~ 433( in Chinese).
  - [9] HU Sh L. Laser interference technology for velocity measurement [ M ]. Beijing National Defence Industry Press 2001 9~ 11( in Chinese).
  - [10] GU Z H, DUMMER R S. Small angle scattering measurement [ J ]. *Proc SPIE*, 1991 1558 374~ 375.