

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005445

基于紫外激光对硅基微通道刻蚀分析*

单存良^{1,2} 梁庭^{1,2} 雷程^{1,2} 王文涛^{1,2} 刘瑞芳^{1,2} 李奇思^{1,2}

(1.动态测试技术山西省重点实验室 太原 030051; 2.中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室 太原 030051)

摘要: 紫外激光具有波长短、速度快、加工精度高、热影响区小以及无损加工等优点,针对紫外激光加工过程中,不同参数对刻蚀结果产生不同的影响,实验中通过控制单一变量法,设计了扫描速度、扫描次数、能量密度、重复频率、离焦量等不同参数对刻蚀结果的影响。实验结果表明,刻蚀宽度随能量密度的增加而增加,但是增加率不断降低;减小扫描速度,可以刻蚀出深度较深并且边缘工整的微通道;随着扫描次数的增大,激光刻蚀的深度不断增大,但增大率在不断的减小,刻蚀深度过深,激光将不会对沟道再进行刻蚀。实验中通过优化激光刻蚀参数,得到了刻蚀宽度为146 μm 、刻蚀深度为25.665 μm 、微通道边缘整齐,边缘粗糙度为7 μm ,沟道的垂直度将近90°的L型硅基微通道。

关键词: 紫外激光器;单一变量法;刻蚀宽度;刻蚀深度;L型硅基微通道

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3050

Analysis of silicon based microchannel etching based on ultraviolet laser

Shan Cunliang^{1,2} Liang Ting^{1,2} Lei Cheng^{1,2} Wang Wentao^{1,2} Liu Ruifang^{1,2} Li Qisi^{1,2}

(1.Shanxi Provincial Key Laboratory of Dynamic Testing Technology, Taiyuan 030051, China; 2.Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Ultraviolet laser with a wavelength, high speed, high precision, small heat affected zone and nondestructive processing advantages, such as for ultraviolet laser machining process, the influence of different parameters on the etching results, by controlling the single variable method, designed the scanning speed, scanning frequency, energy density, repetition frequency, the coke deposition on the result of etching. The experimental results show that the etching width increases with the increase of energy density, but the increase rate decreases continuously. By reducing the scanning speed, the microchannel with deep depth and neat edge can be etched. With the increase of scanning times, the depth of laser etching is increasing, but the increase rate is decreasing, and the etching depth is too deep, so the laser will not etching the channel again. By optimizing the laser etching parameters, an L-shaped silicon-based micro-channel with an etching width of 146 μm , an etching depth of 25.665 μm , a neat edge and a roughness of 7 μm , and a channel with a verticality of nearly 90° were obtained.

Keywords: ultraviolet laser; single variable method; etching width; etching depth; L-shaped silicon microchannel

0 引言

微流控作为一种新兴的技术,近些年在无线通信、生物医学、能源环境、航空航天等领域受到了广泛关注^[1-2]。所选取的材料在其制备中起着至关重要的作用,半导体硅材料因具有良好的导电性、成本低、机械性能好、敏感性好并且可以与IC集成等优点,得到了广泛的应用^[3-4]。

微通道作为微流控芯片的关键结构,对其精度要求越来越高,传统的化学湿法腐蚀^[5]、等离子体刻蚀^[6]等加工技术在微通道加工中已不再适用。主要是由于传统的硅材料加工方法存在一定局限性,接触型加工的加工精度不够高,

而且在加工的过程中会对硅材料造成损坏和污染,效率低下,成品率低,不能满足微通道高精度的要求。传统硅材料加工方法中的不足,在紫外激光加工技术下都可以有效规避。它属于无接触式加工,可以直接对硅片进行图形刻蚀,且具有加工精度高、工艺简单、刻蚀效率高等独特优势^[7-8]。目前国内常见的激光加工有飞秒激光加工^[9]、二氧化碳激光加工^[10]、准分子激光加工^[11]和全固态紫外激光加工^[12-13]。飞秒激光因其加工精度高在激光微加工中有很大优势,但其成本高刻蚀量低,不适用于硅微通道的加工工艺。二氧化碳激光微加工的精度低。准分子激光微加工的

收稿日期:2020-11-27

* 基金项目:山西省重点研发计划(201903D121123)、山西省自然科学基金(201801D121157,201801D221203)项目资助

• 170 •

热影响区小、效率高但是设备的体积大、成本高、操作难度高,工作会产生有毒气体。相比之下,本文使用的激光器因其精度高,低成本和使用寿长等优势被广泛应用于微通道工艺的研究。

基于此,本文探究了紫外激光刻蚀硅基时各个加工参数对刻蚀深度、边缘粗糙度、宽度的影响,并结合实验结果分析得出了较优的加工参数,得到表面形貌良好、刻蚀深度大、垂直度高、底面较为平整的硅基微通道。为今后紫外激光刻蚀硅基微通道提供有力的参数支持。

1 实验材料及装置

1.1 实验材料及处理方法

实验使用直径大小为 4 inch,厚度为 350 μm ,晶向为 100 的硅晶圆。实验前先将硅片放入无水乙醇中超声 5 min,随后将其再放入去离子水中超声清洗 5 min,取出后使用氮气将其吹干,除去玻璃表面的杂质。

1.2 实验装置及研究方法

实验所采用的装置为德龙激光 FPS 紫外微加工系统,该系统主要由全固态紫外激光器、激光能量提供者、紫外激光光学系统(包括光束扩展器、扫描电流计和聚焦透镜)、加工平台、计算机控制系统及吸尘水冷等辅助系统构成,实验装置如图 1 所示。

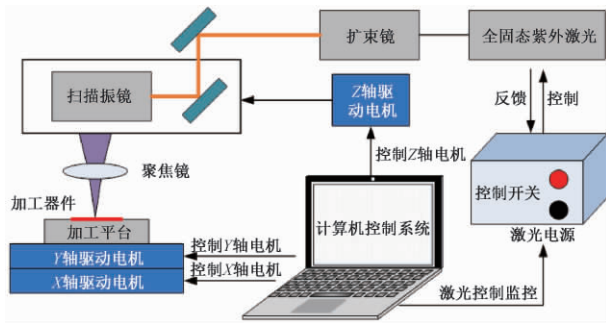
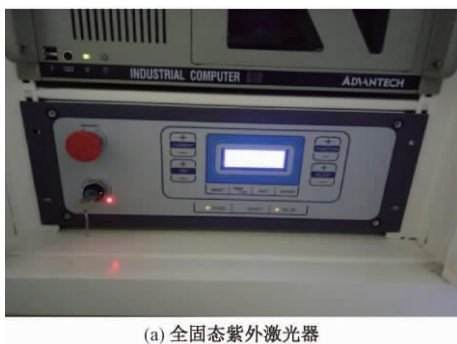


图 1 紫外微加工系统直写刻蚀硅晶圆

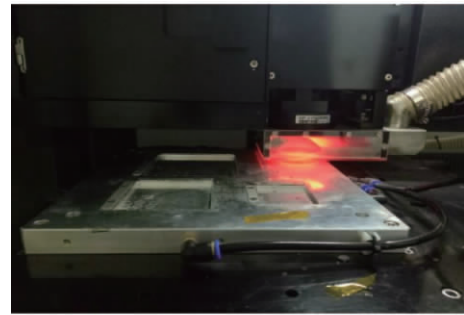
本实验所使用的激光器为苏州 BellinLaser 公司的 MP101 型全固态紫外激光器,其实物如图 2 所示。

1.3 激光器工作原理

半导体泵浦紫外纳秒激光器在电控条件下激发出脉宽



(a) 全固态紫外激光器



(b) 加工平台



(c) FPS 紫外微加工系统

图 2 实验装置实物

时间为纳秒级别的超短脉冲激光。在经过设备内部的光路系统后,激光束被优化、控制并最终聚焦成为微米级别半径的圆形光斑。光斑照射在材料表面,材料吸收热量并瞬间从固态融化,继续照射融化的材料转化为气态,以气态蒸发或者喷射的方式被去除,从而最终达到材料加工的目的。

光学系统方面,设备配备高速旋光模组,并辅以同轴高压吹气,大大提高了打孔和切割的径深比,并且保证侧壁和边缘尽量小的热影响区域。

平台控制方面, X - Y 平台通过电控,以微米级别的精度进行精确的联动,从而控制被加工材料在 X - Y 平面上精确移动。 Z 轴在电控条件下带动高分辨率两套 CCD 影像模组和光学聚焦系统 Z 轴方向移动,实现对激光焦点位置微米级别精度的精确控制。

2 实验结果

在紫外激光刻蚀硅基微通道的过程中,激光的扫描速度、扫描次数、能量密度、重复频率、离焦量都会对加工成型微通道的加工结果造成影响。不同参数下刻蚀得到微通道的边缘粗糙度、宽度、深度和锥度会大不相同。实验中采用了控制单一变量法研究了不同参数对刻蚀长度为 10 mm 微通道的影响。

2.1 能量密度对刻蚀结果的影响

在能量密度对刻蚀结果影响的实验中,控制光斑大小不变,扫描速度为 0.1 mm/s,离焦量为 0,扫描次数为 1

次,通过调节激光的功率改变激光的能量密度,对硅晶圆进行激光刻蚀,图 3 所示为不同能量密度下的刻蚀结果。

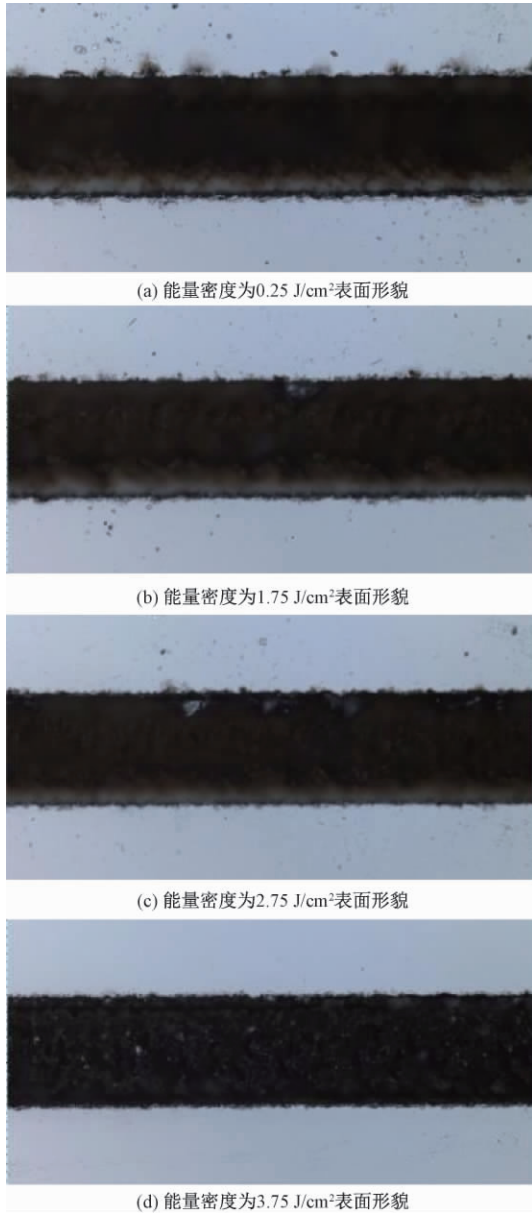


图 3 不同能量密度下刻蚀硅基微通道的表面形貌

同时,通过共聚焦显微镜对硅基微通道的边缘粗糙度、刻蚀宽度进行了测量,测量结果如图 4 所示,从图 4 中可以看出,当激光能量密度增大时,边缘粗糙度和刻蚀宽度的增加率逐渐减小。

2.2 重复频率对刻蚀结果的影响

在重复频率对刻蚀结果影响的实验中,控制光斑大小不变,扫描速度为 0.1 mm/s,扫描次数为 1 次,离焦量为 0,通过调节激光的重复频率,对硅晶圆进行激光刻蚀,如图 5(a)~(e) 所示分别表示重复频率为 25、30、50、70、90 kHz 下刻蚀硅微通道的形貌,通过激光共聚焦显微镜对

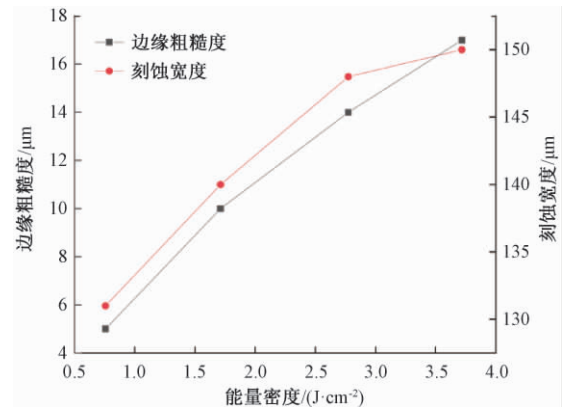
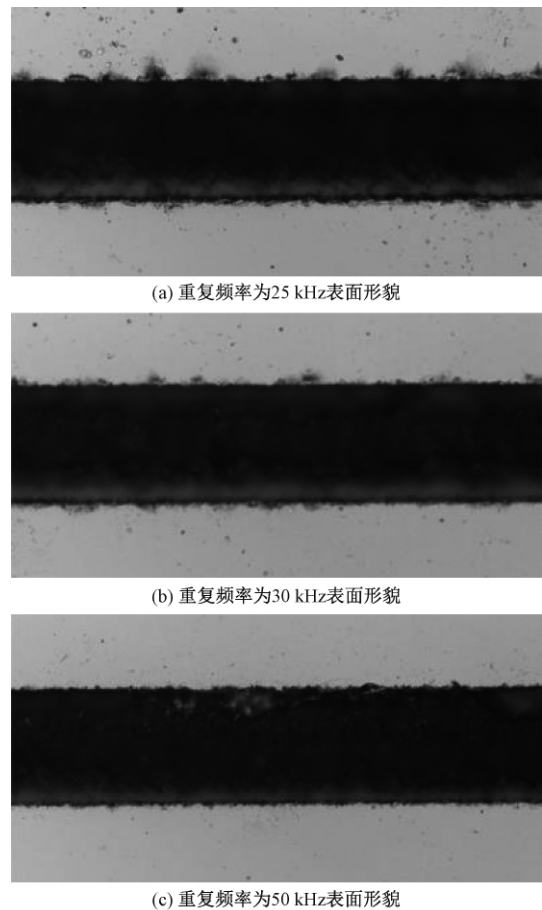
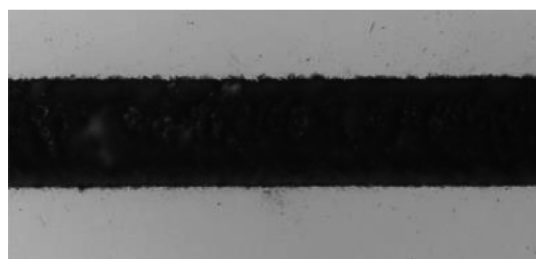


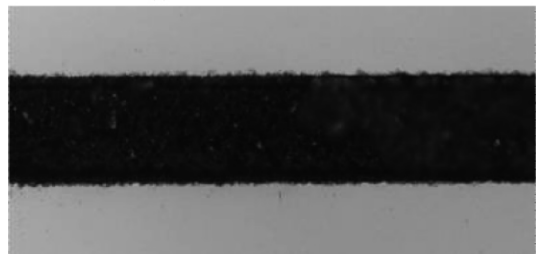
图 4 边缘粗糙度和刻蚀宽度随能量密度变化

微通道的边缘粗糙度、刻蚀宽度进行了测量,测量结果如图 6 所示,从图 6 中可以看出,随着重复频率的增加,边缘粗糙度和刻蚀宽度的逐渐减小,这是在加工直线微通道的过程中,相同的加工速度,随着重复频率的升高,脉宽相应增加,激光脉宽的增加会导致脉冲峰值下降,所以沟槽边缘的粗糙度和刻蚀宽度会降低。激光的能量下降,导致激光刻蚀的微通道内气体压力减小,所以坑内会有大量的熔融物质^[14-15]因气体压力过小而无法排除坑外,重新在坑内凝固成不规则形状,使得沟槽底部,进而促使沟槽底面的粗糙度变差。





(d) 重复频率为70 kHz表面形貌



(c) 重复频率为90 kHz表面形貌

图5 不同重复频率下刻蚀硅基微通道的表面形貌

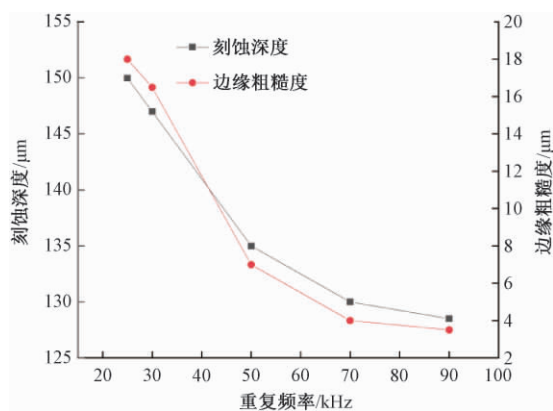


图6 边缘粗糙度和刻蚀宽度随重复频率变化

2.3 扫描速度对刻蚀结果的影响

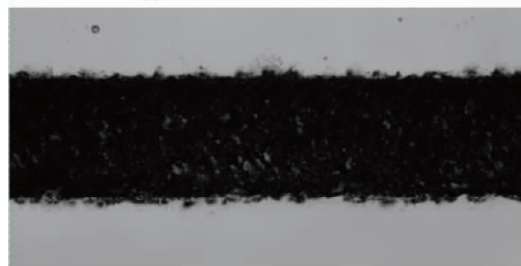
激光的扫描速度对微通道刻蚀深度的影响较大,当扫描速度比较低时,光斑的重叠率比较高,作用在材料表面的能量密度就比较大,从而使得刻蚀深度发生变化。实验中探究了扫描速度对刻蚀结果的影响,控制光斑大小不变,扫描速度分别为0.1、0.5、1 mm/s,扫描次数为1次,离焦量为0,调节激光的重复频率为25 kHz,对硅晶圆进行激光刻蚀,刻蚀结果如图7所示。图7(a)扫描速度为0.1 mm/s,(b)扫描速度为0.5 mm/s,(c)扫描速度为1 mm/s。从图7中可以看出,增大扫描速度时,微通道边缘越来越粗糙。这是因为在扫描速度比较高时,光斑的重叠率比较小,作用于材料表面的能量比较小,微通道边缘的不规则点状坑洼比较多,随着扫描速度的减少,这种情况在不断改善,在扫描速度比较小时,微通道边缘变得整齐。



(a) 扫描速度为0.1 mm/s表面形貌



(b) 扫描速度为0.5 mm/s表面形貌



(c) 扫描速度为1 mm/s表面形貌

图7 不同扫描速度下刻蚀硅基微通道的表面形貌

2.4 扫描次数对刻蚀结果的影响

改变扫描次数是对微通道刻蚀一次后在原有的基础上继续对其进行激光刻蚀,实验中,控制光斑大小不变,扫描速度为0.1 mm/s,扫描次数分别为1、2、3、4、5次,离焦量为0,调节激光的重复频率30 kHz,对硅晶圆进行激光刻蚀。刻蚀结果如图8所示。从图8中可以明显看出,随着扫描次数的增加,刻蚀微通道中心的颜色在不断变黑变深,说明刻蚀深度在不断加大。同时,用共聚焦显微镜对刻蚀所得微通道的边缘粗糙度、刻蚀深度进行了测量,测量结果如图9所示,从上图可以看出,随着扫描次数的增加,刻蚀宽度的变化不大。由于改变扫描次数是在加工一次10 mm长的沟道的基础上再进行第二次加工,材料相同区域经过很长一段时间才能加工第二次,激光作用的时间间隔比较长,所以沟道内部的热积累比较少,导致刻蚀沟道宽度在极限值波动。但是随着扫描次数的增大,刻蚀深度不断增大,刻蚀深度的增加率在不断的减小,这是由于随着刻蚀深度的增加,激光仍然是聚焦在了材料的表面,无法聚焦到第一次刻蚀微通道的底部,在微通道的底部接收到的激光能量较少,刻蚀速率减慢。

2.5 离焦量对刻蚀结果的影响

离焦量指的是紫外激光的焦点距离与材料表面的距



图 8 不同扫描次数下刻蚀硅基微通道的表面形貌

离。实验中,控制光斑大小不变,扫描次数为 1 次,扫描速度为 0.1 mm/s,控制离焦量分别为-0.2、0、0.2 mm,调节激光的重复频率 30 kHz,对硅晶圆进行激光刻蚀,刻蚀结

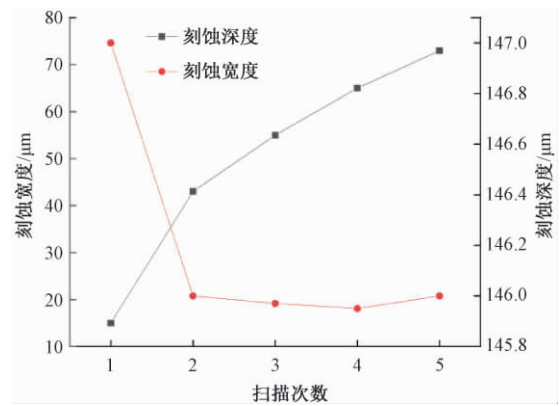


图 9 刻蚀宽度和刻蚀深度随扫描次数变化

果如图 10 所示。同时,通过共聚焦显微镜对硅基微通道的刻蚀宽度、刻蚀深度进行了测量,测量结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出,随着离焦量绝对值的增大,激光刻蚀所得微通道的宽度在增大。对于刻蚀深度而言,当材料处于负离焦时,材料内部受到激光能量比材料表面接受到的能量要大,使得材料内部的材料越容易融化、气化,使得激光更能深入的照射到材料沟道,刻蚀深度较大。

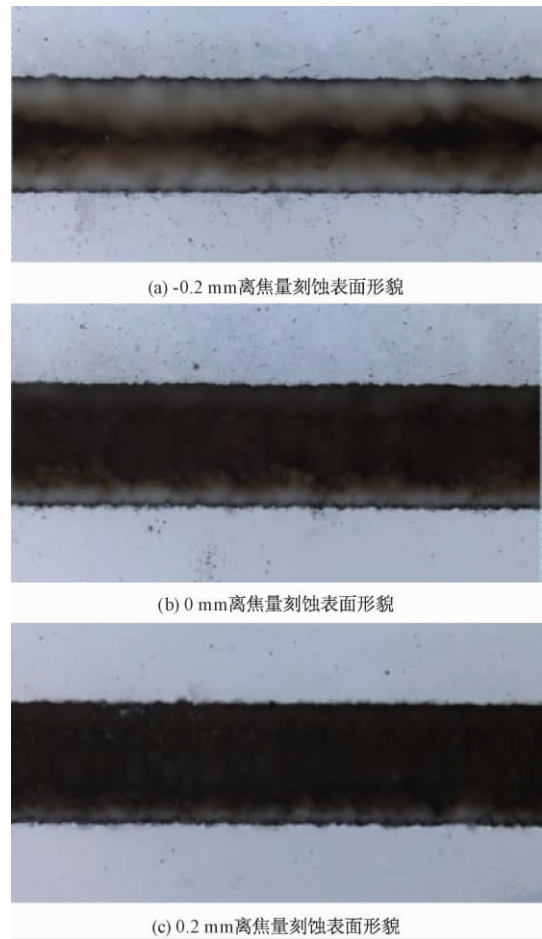


图 10 不同离焦量下刻蚀硅基微通道的表面形貌

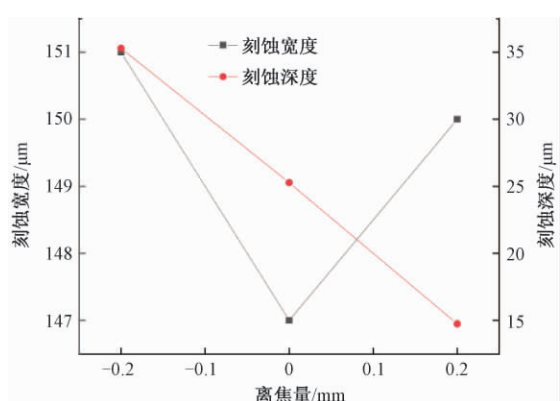


图11 刻蚀深度和刻蚀宽度随离焦量变化

2.6 L型沟道的刻蚀

基于以上对紫外激光微加工研究,对激光器的参数进行优化,在硅晶圆表面进行L型微通道的刻蚀。实验中调节激光器的能量密度为 2.774 J/cm^2 、重复频率为 30 kHz 、扫描速度为 0.1 mm/s 、离焦量为 0 、扫描次数为 1 次,对硅晶圆进行刻蚀。刻蚀结果如图12所示,测量得到L型硅基微通道的刻蚀宽度为 $146 \mu\text{m}$ 、刻蚀深度为 $25.665 \mu\text{m}$ 、微通道边缘整齐,边缘粗糙度为 $7 \mu\text{m}$,沟道的垂直度将近 90° ,刻蚀效果良好。



图12 L型硅基微通道的表面形貌

3 结 论

本文结合紫外激光加工材料的基本原理,应用 355 nm 数控紫外激光器对硅晶圆进行了激光刻蚀,实验中通过采用控制单一变量法,探究了扫描速度、扫描次数、能量密度、重复频率、离焦量等各个参数对硅微通道刻蚀结果的影响,实验结果表明,刻蚀宽度、边缘粗糙度随能量密度的增加而增加,重复频率、扫描次数、离焦量是影响刻蚀深度的主要因素,刻蚀速度影响着微通道边缘的平整度。通过优化激光刻蚀参数,得到了刻蚀宽度为 $146 \mu\text{m}$ 、刻蚀深度为 $25.665 \mu\text{m}$ 、

微通道边缘整齐,边缘粗糙度为 $7 \mu\text{m}$,沟道的垂直度将近 90° 的L型硅基微通道。

参考文献

- [1] 张名川,靖向萌,王京,等.应用于TGV的ICP玻璃刻蚀工艺研究[J].真空科学与技术学报,2014,34(11):1222-1227.
- [2] 李志刚,吴晓松,汪磊,等.用于血液病毒核酸检测的微流控PCR温度控制技术[J].电子测量技术,2020,43(13):152-156.
- [3] 陈建刚,舒林森,赵知辛,等.多尺度微纳流道光刻压印工艺及关键技术研究[J].制造业自动化,2020,42(11):6-10.
- [4] 黄晓勇.紫外纳秒激光对硬质木材表面烧蚀机理的研究[D].北京:北京林业大学,2020.
- [5] 李鑫,罗洁,任丁.电化学湿法腐蚀法制备硅微柱阵列[J].电子元件与材料,2018,37(11):26-30.
- [6] 郑志霞,冯勇建.大面积悬空浓硼硅薄膜ICP刻蚀工艺研究[J].电子测量与仪器学报,2015,29(11):1706-1710.
- [7] 骆公序,陈俊,王国庆,等.紫外激光精细加工应用研究[J].应用激光,2011,31(3):228-231.
- [8] 华显刚,魏昕,周敏,等. 355 nm 紫外激光抛光 Al_2O_3 陶瓷作用机理的实验研究[J].中国激光,2014,41(12):70-75.
- [9] 张耀文,汪世益,王子威.飞秒激光单路径刻蚀硅微槽深度研究[J].现代制造技术与装备,2019(12):90-93.
- [10] 张铎,卢立新,周丹. CO_2 激光加工微孔膜关键加工参数[J].包装工程,2017,38(7):125-129.
- [11] 王争飞,单等玉,陈涛. 248 nm 准分子激光加工锥形微孔的实验研究[J].应用激光,2019,39(4):628-633.
- [12] 李奇思,梁庭,雷程,等. 355 nm 全固态紫外激光直写刻蚀硼硅玻璃微通道[J].中国激光,2018,45(8):79-86.
- [13] LIANG T, LI Q S, LEI C. Research on 355 nm all-solid-state ultraviolet (UV) laser processing through silicon holes [J]. Journal of Laser Applications, 2019, 31(2):02003.
- [14] 韩伟,冯斌,郑奎兴,等.高功率激光装置熔石英紫外损伤增长研究[J].物理学报,2016,65(24):156-162.
- [15] 王文涛,梁庭,雷程,等. 355 nm 全固态紫外激光加工玻璃通孔工艺[J].微纳电子技术,2020,57(1):59-65.

作者简介

梁庭,工学博士,副教授,主要研究方向为光学气体传感器和高温压力传感器等。

E-mail:liangtingnuc@nuc.edu.cn