

乙醇辅助激光烧蚀切割硅晶圆工艺

田文涛, 刘炜程, 孙旭辉, 郑宏宇, 王志文*

(山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000)

摘要: 为了减小激光切割硅晶圆时的热效应, 选择去离子水作为辅助液体进行激光切割实验, 研究了水下切割时激光烧蚀激发气泡对硅片表面造成的不良影响。为解决水下激光切割进程中诱导气泡大面积粘结在硅片表面的问题, 提出了去离子水混入乙醇溶液的实验方案, 分析了水下激光切割中激光参数和乙醇浓度对切割质量的影响。实验结果表明, 采用乙醇溶液作为辅助介质能明显减少粘结气泡的数量, 减轻气泡破溃冲击带来的负面影响。实验采用乙醇浓度 5 wt.% 时切割得到的硅片比纯水中切割得到的硅表面影响区减小 50% 以上、切缝宽减幅约 20%, 有效提升了激光切割质量。

关键词: 激光切割; 硅; 乙醇; 气泡; 表面质量

中图分类号: TG485; TN249 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210333

Process on ethanol assisted laser ablation dicing of silicon wafer

Tian Wentao, Liu Weicheng, Sun Xuhui, Zheng Hongyu, Wang Zhiwen*

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: In order to reduce the thermal effect of laser dicing of silicon wafer, deionized water was used as assistant liquid to dice the silicon wafer. However, bubbles was induced during laser ablation and led to adverse effects on surface of silicon underwater dicing. Ethanol was mixed into deionized water to decrease the number of bubbles adhering on the surface of silicon which generated during the underwater laser dicing process. The impact of laser parameters and ethanol concentration on dicing quality were analyzed. The results of experiment show that the usage of ethanol as the assistant medium can decrease the number of bubbles adhering on the surface of silicon and alleviate the negative effect of bubble collapse. The kerf width decreases by 20% and the area of affected zone decreases by more than 50% when diced in an ethanol concentration of 5 wt.% compared to when diced in pure water. The dicing quality is improved effectively.

Key words: laser dicing; silicon; ethanol; bubbles; surface quality

收稿日期: 2021-05-24; 修订日期: 2021-08-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFE0199100); 淄博市校城融合项目 (2019ZBXC087, 2019ZBXC168); 山东省自然科学基金项目 (ZR2020ME164, ZR2020ME047); 泰山学者基金 (ts20190401)

作者简介: 田文涛, 男, 硕士生, 主要从事激光精密切割方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 王志文, 男, 讲师, 硕士生导师, 主要从事激光微纳加工、MEMS、偏振导航方面的研究。

0 引言

硅因其优异的电学性能和机械性能而被广泛应用于光伏电池、集成电路芯片等行业中。近些年,单个芯片尺寸日益减小、芯片厚度减薄。薄硅片的抗压抗拉强度较低,对于外部施加的机械应力更加敏感,这给传统采用金刚石划片的晶圆切割工艺带来了巨大挑战。激光切割技术^[1]不同于机械划片,是一种非接触式的加工工艺,光束聚焦后具有极高的峰值功率密度,广泛应用于硅片、陶瓷等硬脆材料的加工。

传统激光烧蚀切割工艺采用纳秒、皮秒或飞秒^[2]等多种脉宽的激光束聚焦到材料表面上,在没有辅助工艺的条件下对硅片多次切割直至分离。纳秒激光与皮秒、飞秒激光相比,其加工成本更低、效率更高,然而在加工过程会同时发生较高的热效应^[3]。激光烧蚀切割常产生一系列缺陷:(1)激光切割产生的飞溅颗粒大范围地再沉积,硅片表面受到污染,影响使用性能;(2)硅片表层存在回融现象,切割后原本分离的部分因激光烧蚀不完全而再次粘结,表面形成重铸层,降低生产效率、导致废品率提高。因此,该工艺一般用于性能要求不高的大尺寸、厚硅片的切割领域。

为减小激光烧蚀切割中的热效应,杨伟^[4]等人研究了硅的水浴切割。水作为辅助介质在水下激光切割^[5]中可以起到冷却、除屑的作用,降低了激光的热效应,并且将熔融的材料及时冷却从而减轻了表层回融现象。然而,水下激光切割时会产生大量气泡^[6],在硅表面附近生成的部分气泡会粘结在材料表面,不断地生成、崩碎、坍塌。附着在硅片上的“粘性气泡”破溃^[7-8]时使表面出现气泡冲击的痕迹,表面清洁度有待提高。为了解决水下激光切割时硅片表面气泡粘结的问题,W.Charee 等人加入超声振动^[9]装置,通过振动将气泡雾化以减少硅片表面粘连气泡的数量,超声振动对水的激励作用同时起到清洁表面的作用。Jiading Bao^[10]等人使用水射流辅助装置向加工区域注水,水流冲刷表面粘附的气泡并清除加工产生的飞溅微纳颗粒,然而水射流加工的液体表面是动态的,不利于焦点的稳定控制。

为了减轻水下激光切割中气泡对硅片表面产生的不良影响,文中提出在乙醇溶液辅助下进行激光切割的方案,实验对比了乙醇辅助下切割与水下切割表面质量的变化,并分析了乙醇浓度对切割质量的影响规律。

1 材料与方法

文中使用的材料是单面抛光硅片,厚度有 200 μm 和 400 μm 两种。电阻率为 1~3 $\Omega\cdot\text{cm}$, <100>晶向,掺杂类型为硼掺杂。激光加工之前采用标准 RCA 清洗工艺对硅片进行清洗。使用美国相干公司的 AVIA-LX 激光器,波长为 355 nm,脉宽范围为 15~60 ns,频率范围为 1 Hz~300 kHz,功率最大可达 20 W。搭建的激光切割系统如图 1 所示,激光器发出的激光束依次通过扩束镜、半波片(HWP)、偏振分光棱镜(PBS)、反射镜 M1、反射镜 M2、反射镜 M3、聚焦镜后聚焦在工件表面上。硅片超声清洗后水平放置在夹具上,夹具和硅片整体浸没到乙醇溶液中,溶液由无水乙醇和思佰康设备制成的超纯水配比而成。

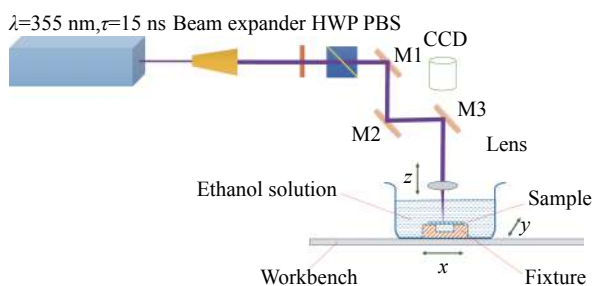


图 1 激光切割系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser dicing system

为研究乙醇辅助下晶圆激光切割的质量变化,设置了如表 1 所示的四组实验。四组实验均采用固定的单脉冲能量 (300 μJ) 且辅助液体膜厚均 4 mm 左右,扫描方式为单次直线扫描。A 组为纯水浴下的激光切割,为探究水辅助条件下能形成连续贯穿切缝的参数,将切割速度设置在 1~3 mm/s,重复频率设置在 10~50 kHz。为了量化切割质量,定义图 2 所示的切缝宽度和烧蚀区范围,将激光切割后在切缝两侧所沉积的飞溅熔体的区域视为烧蚀区域 (ablated zone),切槽宽 (kerf width) 为切割烧蚀区域内所包含的部分。记录不同参数下两者的数值,并从中选取能获得较好切割效果的加工工艺参数。

为探究乙醇浓度对切割表面质量的影响规律,B 组激光切割实验设置在不同浓度的乙醇溶液中进行。乙醇浓度变化范围为 0 wt.%~5 wt.%,切割速度和重复频率由 A 组实验得到。B 组实验采用统一标准的实验步骤:(1)向容器中加入与 A 组等量的去离子水;(2)使用 1 mL 定量吸管抽出一定体积的去离子

表 1 激光切割工艺设计

Tab.1 Parameters of laser dicing process

Group	Auxiliary medium	Frequency/kHz	Scanning speed/mm·s ⁻¹	Cut surface	Thickness of silicon wafer/μm
A	Deionized water	10-50	1-3	Polished surface	200
B	Ethanol solution	30	1	Polished surface	200
C	Ethanol solution	30	1	Non-polished surface	200
D	Ethanol solution	30	1	Polished surface	400

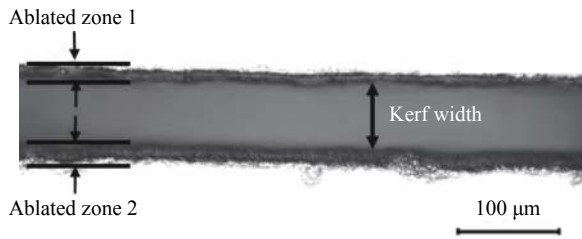


图 2 缝宽、烧蚀区的定义

Fig.2 Definition of kerf width and ablated zone

水,抽取次数由实验采用的溶液浓度所决定;(3)使用 1 mL 定量吸管向容器中注入与步骤(2)相同体积的无水乙醇并搅拌 1 min。目的及意义在于:(1)保持加工溶液的总液体积不变,从而保证了水膜厚度恒定,减小因焦点位置改变而产生的影响;(2)加入乙醇后搅拌 1 min 使乙醇均匀扩散;(3)省去重复地配比溶液和对焦,实验效率和准确性更好。为了量化表面质量,定义如图 3 所示的影响区 (Affected zone) 宽度,记录不同乙醇浓度下激光处理后得到的切缝宽度、影响区和表面形貌。

考虑到使用的材料为单面抛光的硅片,为探究激光切割时因两侧表面特性不同而产生的不同影响而设置了 C 组实验,即非抛光面的激光切割加工,其余参数设计同 B 组。B、C 组实验基于 200 μm 硅片切割形成连续贯穿切缝的研究,侧重于表面质量和切缝宽度的考察,无法对切缝深度进行采集。为探究乙醇浓度对切缝深度的影响规律,设置了 D 组实验。D 组

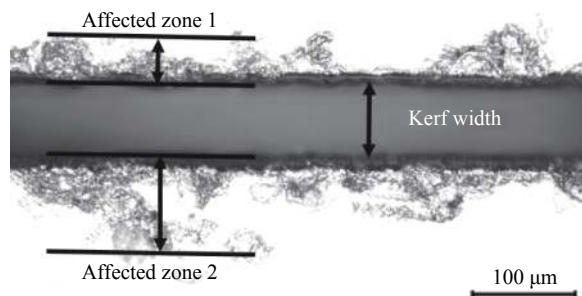


图 3 影响区宽度定义图

Fig.3 Definition of affected zone width

实验采用厚度 400 μm 的硅片,其余参数同 B 组。切割完成后进行裂片处理,观察其断裂面形貌,记录不同乙醇浓度下切槽的深度。

2 实验结果

2.1 水下激光切割

A 组实验在纯水中进行硅片切割,切割速度为 1~3 mm/s,重复频率范围在 10~50 kHz 之间,按照图 2 定义记录数据,绘图得到切缝宽度随切割速度和频率的变化折线,见图 4(a)。其变化规律为:(1)同一切割速度下,频率越低,切缝越窄;(2)同一重复频率下,切割速度越快,切缝越窄。烧蚀区与切割速度、重复频率的关系如图 4(b) 所示,其变化规律与切缝变化规律类似。

为了达到硅片切缝平齐、连续贯穿和表面清洁的目的,需要选择合适的切割速度 v 和重复频率 f ,可以通过光斑重叠率 δ 说明二者对切割质量的影响。重叠率与切割速度和重复频率之间满足以下关系:

$$\delta = \left(1 - \frac{v}{df}\right) \times 100\% \quad (1)$$

式中: d 为光斑直径。可见激光切割速度越慢、重复频率越高,则光斑重叠率越大;切割速度越快、重复频率越低,则重叠率越小。光斑重叠率影响切缝宽度和硅片的表面质量。水下切割实验中,当使用高切割速度、低重复频率时,会出现硅片切缝不连续、不贯穿的情况。如图 5 所示为硅片正面切割后的背部形貌,上半部分区域对应激光重复频率为 10 kHz、切割速度为 3 mm/s,光斑重叠率为 91%,该光斑重叠率下未能产生连续的贯穿切缝。下半部分区域对应激光重复频率为 30 kHz、切割速度为 1 mm/s,光斑重叠率为 99%,该光斑重叠率下得到了连续的贯穿切缝。

水下切割实验中发现加工时有清脆刺耳的响声并伴随产生大量气泡,多数气泡向上运动。然而,部分气泡会粘结在硅晶圆表面,切割时气泡不断生成、破溃。图 6 为激光重复频率 30 kHz、切割速度 1 mm/s

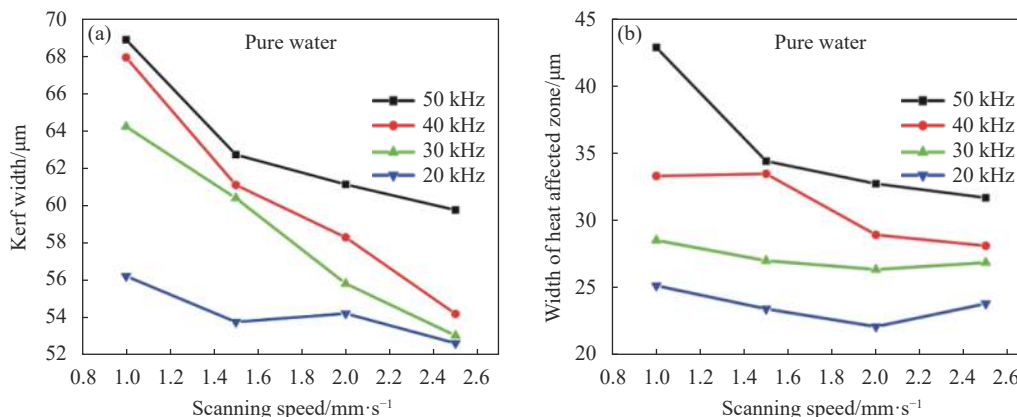


图 4 纯水中切割硅片的规律。(a) 切缝宽随速度和频率的变化趋势；(b) 烧蚀区随速度和频率的变化趋势

Fig.4 Change trend of dicing silicon under pure water. (a) Change trend of kerf width vs speed and frequency; (b) Change trend of ablated zone vs speed and frequency

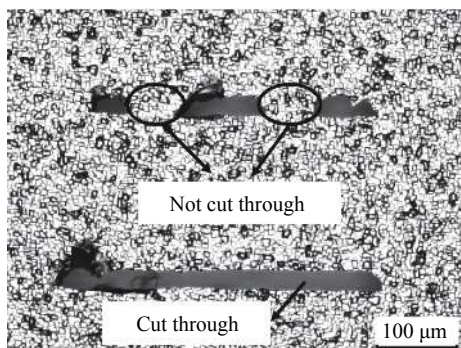


图 5 硅片背面切槽形貌

Fig.5 Optical image of the grooves on the rear side of silicon

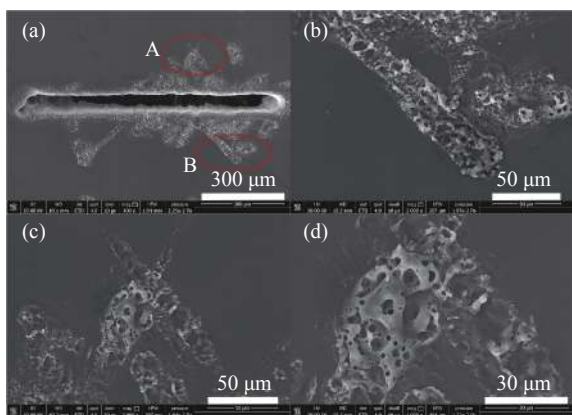


图 6 水下切割硅片表面。(a) 受气泡破溃冲击的硅片表面；(b) 区域 B 放大图；(c) A 区域放大图 1；(d) A 区域放大图 2

Fig.6 Surface of silicon diced under water. (a) Silicon surface impacted by bubbles collapse; (b) Enlarged optical image of area B; (c) The first enlarged optical image of area A; (d) The second enlarged optical image of area A

时水下激光切割得到的硅片表面，其中图 6(b)为图 6(a)中 B 区域的局部放大图，图 6(c)、图 6(d)为图 6(a)

中 A 区域的局部放大图。可见水下激光切割时，切缝附近产生了大量“疏松多孔”的结构，其降低了表面质量，影响硅片后续的使用性能。

2.2 乙醇辅助激光切割

为研究乙醇浓度对硅晶圆表面切割质量的影响，B 组实验将硅晶圆放置在不同浓度的乙醇溶液中进行切割。激光重复频率设置为 30 kHz、切割速度设置为 1 mm/s。图 7(a)~图 7(d) 分别对应乙醇浓度为 0 wt.%、2 wt.%、3.5 wt.%、5 wt.% 时的切割表面。实验发现，纯水中激光切割后在硅片表面会出现如图 7(a)所示的数量多、体积大的粘附气泡。切割后，气泡长期粘附在晶圆表面，未在短时间内破溃。乙醇的加入能有效减轻气泡粘附现象。如图 7(b)~图 7(d)所示，随着乙醇浓度的提高，粘结气泡的数量和体积逐渐减少。通过对比图 7(a)与图 7(d) 容易发现乙醇浓度为 5 wt.% 时切割表面粘附的气泡数量和体积都显著少于纯水中切割的表面，并且乙醇辅助切割后表面的气泡

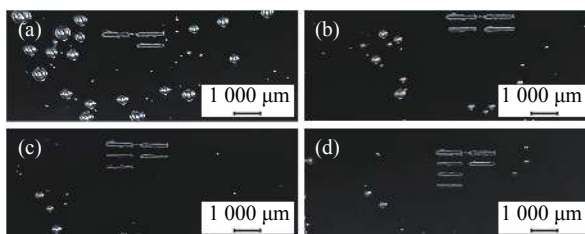


图 7 不同乙醇浓度下切割后硅片表面粘附的气泡。(a) 0 wt.%；(b) 2 wt.%；(c) 3.5 wt.%；(d) 5 wt.%

Fig.7 Bubbles adhering on the surface of the silicon diced in different ethanol-water mixtures with ethanol in water of 0 wt.% (a), 2 wt.% (b), 3.5 wt.% (c), 5 wt.% (d)

也不是短期破溃的。

图 7 中四组气泡拍摄皆为切割后立即完成的,虽然拍摄的具体时刻不能严格精确统一,但不影响分析气泡对切割质量的影响规律。因为图 7 说明了切割后两种液体介质下的气泡粘附状态,切割过程中同样存在类似的粘结现象。经过大量实验验证,四种浓度下切割后总存在如图 7 的表面气泡状态。另外,气泡分散分布的原因可能是加工时气泡产生了动态移动,导致气泡滑移至远离切缝的区域。

硅片抛光面激光切割后的上表面如图 8(a)~(d) 所示,底面形貌如图 9(a)~(d) 所示。B 组实验按图 3 定

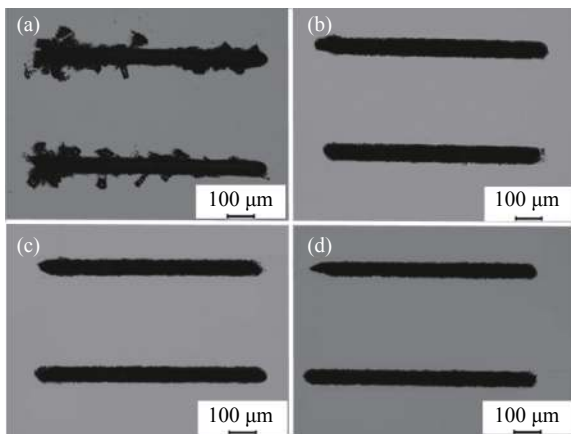


图 8 不同乙醇浓度下切割后的硅片上表面形貌。(a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%; (c) 3.5 wt.%; (d) 5 wt.%

Fig.8 Optical images of front surface diced in different ethanol-water mixtures with ethanol in water of 0 wt.% (a), 2 wt.% (b), 3.5 wt.% (c), 5 wt.% (d)

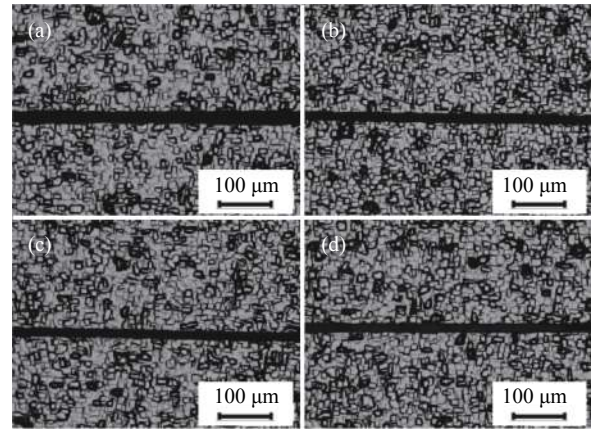
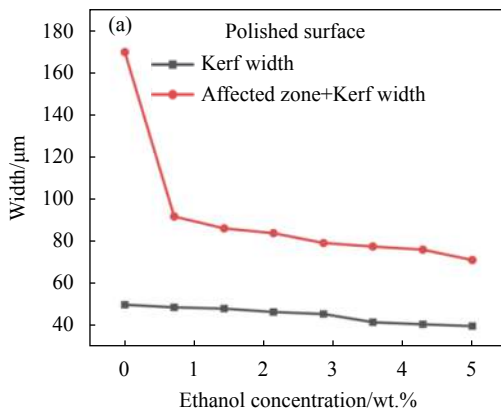


图 9 不同乙醇浓度下切割后的硅片下底面形貌:(a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%; (c) 3.5 wt.%; (d) 5 wt.%

Fig.9 Optical images of rear surface diced in different ethanol-water mixtures with ethanol in water of 0 wt.% (a), 2 wt.% (b), 3.5 wt.% (c), 5 wt.% (d)

义记录数据,绘制得到图 10(a),图中黑色折线为切缝宽度随乙醇浓度的变化曲线。结合图 8(a)可知:纯水中切缝较宽,随着乙醇浓度提高,切缝逐渐变窄,底部切缝宽度有类似变化趋势。图 10(a)中的红色折线为切缝和影响区总宽度随乙醇浓度的变化趋势,其与切缝变化情况类似。

A、B 组实验皆为抛光面的激光切割,作为对比设置了 C 组实验。C 组实验为相同激光参数和乙醇浓度下对非抛光面的切割。图 11(a)与 11(b)分别为乙醇浓度 0 wt.%、2 wt.% 下非抛光表面形貌图,图 12(a)与 12(b)对应其抛光表面形貌图。

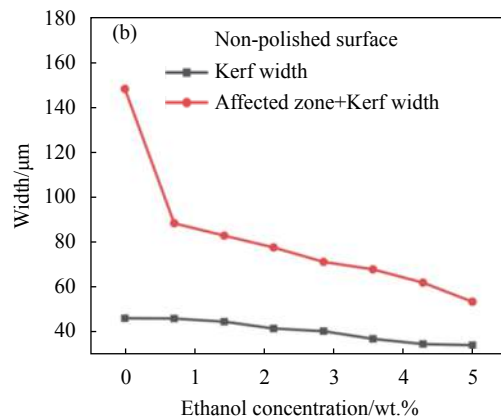


图 10 乙醇溶液中切割硅片的规律。(a) 硅片抛光面切缝宽和影响区总宽度随乙醇浓度变化趋势;(b) 硅片非抛光面切缝宽和影响区总宽度随乙醇浓度变化趋势

Fig.10 Change trend of dicing silicon in ethanol solution. (a) Cut width (characterized by 'Kerf width + affected zone width') of polished surface of silicon vs ethanol concentration; (b) Cut width of non-polished surface of silicon vs ethanol concentration

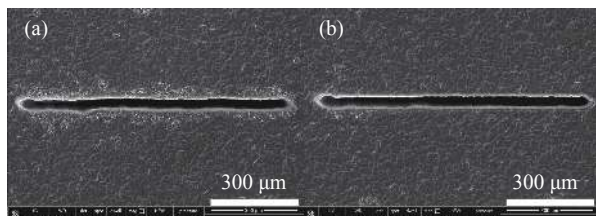


图 11 不同乙醇浓度下切割后的硅片背面形貌。(a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%
Fig.11 Morphology of rear surface diced with different ethanol concentrations. (a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%

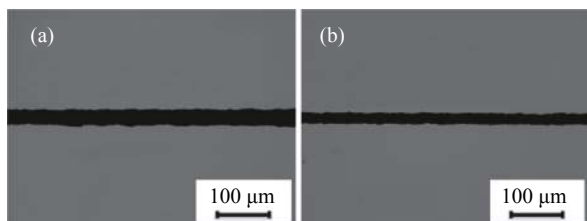


图 12 不同乙醇浓度下切割后的硅片抛光面形貌。(a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%
Fig.12 Optical images of polished-surface of silicon diced with different ethanol concentrations. (a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%

实验结果与抛光面切割类似,可见加入乙醇提升了表面质量,同时降低切缝宽度。如图 10(b)所示,非抛光面切缝宽和影响区范围随着乙醇浓度的增加而逐渐减小。另外,非抛光面切割相较于抛光面切割具有一定优势。因为非抛光面作为基底使用,飞溅颗粒在非抛光面沉积对硅片使用性能带来的影响小于其在抛光面沉积,优化了抛光表面清洁度,使硅片整体性能更好。

D 组实验是基于硅晶圆切槽深度的研究,硅晶圆切割后进行裂片处理,以观察其断裂面形貌。如图 13(a)~(d)为不同乙醇浓度辅助切割得到的断裂面形貌图,

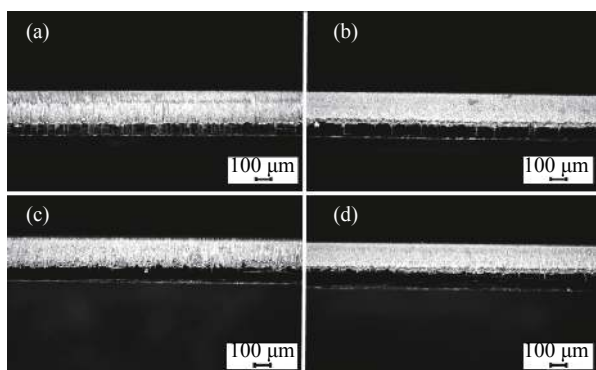


图 13 不同乙醇浓度下切割后的硅片断裂面形貌。(a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%; (c) 3.5 wt.%; (d) 5 wt.%
Fig.13 Lateral side view of silicon diced with different ethanol concentrations. (a) 0 wt.%; (b) 2 wt.%; (c) 3.5 wt.%; (d) 5 wt.%

记录平均切槽深度,绘制得到图 14 所示的乙醇浓度与切缝深度关系折线图。与在去离子水中加工相比,5 wt.%乙醇浓度辅助切割得到的切缝深度减小约 18%。

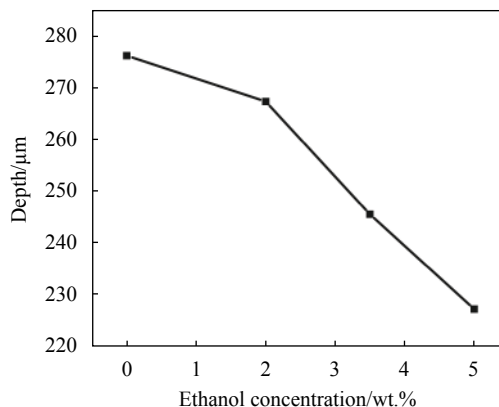


图 14 切缝深度随乙醇浓度的变化折线图

Fig.14 Change line chart between depth and ethanol concentration

通过四组实验研究发现切割表面质量随乙醇溶液浓度的提高而逐渐优化,同时切槽深度随之降低。因此,实际应用时选择合适的乙醇浓度,可在切割效率低损耗的前提下改善切割表面质量。

3 分析与讨论

3.1 液相辅助激光烧蚀切割机理分析

液相辅助激光烧蚀加工时,脉冲激光到达硅片表面后,硅表面电子吸收光子,并以电子-声子耦合的形式将能量传递给晶格。晶格振动使硅晶圆表面升温,当升至硅材料汽化温度时,表面开始蒸发。高强度激光引起的高温使蒸汽原子产生电离,形成高温、高密度的等离子体^[11]。液相介质的束缚作用使激光诱导形成的等离子体羽具有更高的温度、压力和密度,其沿硅晶圆表面法线方向急剧膨胀,压缩周围液相介质并以冲击波的形式将能量传递出去。随着等离子体与液体持续相互作用,等离子体温度急剧降低,随后等离子体淬灭。等离子体羽周边的材料分子受温度影响会以汽化或电离的形式进入到随后形成的空化气泡中,空化气泡经历多个振荡^[12]周期后破溃。

水下激光诱导产生的气泡生命周期^[13-14]约 150 μs,当激光发射一束脉冲后,约 5 μs 时气泡形核并扩张,气泡生长过程持续 50~100 μs 左右,此时气泡体积最大,其高度可达 1 mm,气泡在涨至最大尺寸后随

即衰减。与水下激光加工不同,乙醇溶液具有更高的粘度,激光作用产生的气泡的生命周期相比较于纯水中的气泡生命周期更短、气泡体积尺寸更小。

3.2 表面质量提升机理分析

图 6 所示的“疏松多孔物质”是水下切割存在的一大缺陷,水下切割总出现如图 6(a) 的表面形貌,沿切缝分布着不均匀的沉积熔体。乙醇辅助能有效减轻这一现象,如图 8 所示,切缝两侧熔体沉积范围随着乙醇浓度的提升而明显缩小,表面质量大幅提升。

表面质量的改善与空化气泡粘结现象紧密联系。气泡粘结现象与辅助介质的润湿性能有关,硅片表面在纯水中与在乙醇溶液中的润湿性不同。水气泡与硅表面的接触角较小,气泡易在晶圆表面长时间粘结。乙醇气泡与硅表面的接触角^[15] 相对较大,气泡在破溃之前能及时从晶圆表面剥离。

激光诱导的气泡中包含有“蒸汽”、“空气”以及由激光烧蚀材料而产生的“纳米粒子”^[12]。如图 15(a) 所示,水辅助激光烧蚀诱导的气泡在硅表面粘结,粘附气泡破溃时将其中包含的纳米颗粒直接溅射沉积到材料表面,导致表面质量降低。相比于水辅助工艺,乙醇辅助烧蚀诱导的空化气泡未出现大量粘结的现象。如图 15(b) 所示,气泡在破溃之前及时剥离。气

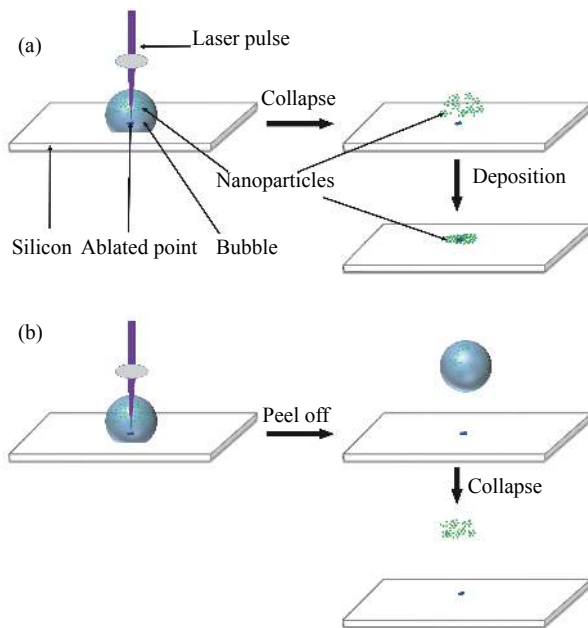


图 15 激光诱导气泡的动态。(a) 去离子水中;(b) 乙醇溶液中
Fig.15 Dynamics of laser-induced bubble. (a) In deionized water; (b) Under ethanol solution

泡内包含的纳米颗粒随气泡上浮,减轻了空化气泡在材料表面破溃的现象。烧蚀纳米颗粒游离在液体中而并未被直接释放到硅片表面,表面质量提高。

水辅助烧蚀切割常出现图 8(a) 所示的“分枝”现象,切槽直线度较差,文中认为该现象是由晶圆表面的气泡对光束的折射、反射造成的。当激光重复频率为 30 kHz 时,相邻脉冲时间间隔为 33 μs,气泡体积在该时间间隔内快速膨胀。当前激光脉冲发出时,若前序激光脉冲产生的气泡尺寸较大,则有可能对激光传播路径产生折射和反射^[16]。如图 16(a) 所示,纯水中激光加工时,前序激光脉冲产生的气泡造成后序脉冲激光产生折射和反射,导致激光光束偏离切割路径,从而沿切缝附近出现如图 8(a) 的“分枝”现象。由于乙醇溶液粘度更高,乙醇辅助激光切割时,前序脉冲产生的气泡生长体积小,如图 16(b) 所示,不影响后序激光脉冲传播路径,切槽如图 8(d) 直线度好。

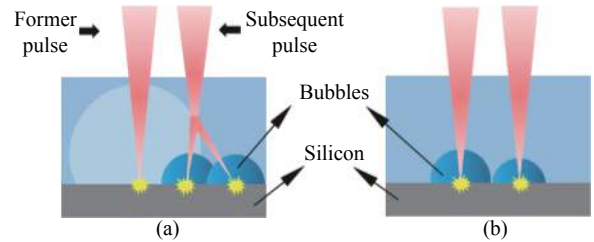


图 16 前、后序脉冲与气泡的关系示意图。(a) 纯水中;(b) 乙醇溶液中
Fig.16 Relationship between pulse and bubbles. (a) Under pure water; (b) Under ethanol solution

3.3 切槽深度降低机理分析

经测试,激光透过文中采用的水溶液和乙醇混合溶液后功率衰减程度一致,切槽深度的变化不是由溶液本身导致的。切槽深度随乙醇溶液浓度的提升而略有降低,该现象与气泡的消光作用^[17] 有关。随着乙醇浓度的增加,溶液整体沸点降低,切割声音逐渐减弱,切割会产生更高密度的上浮气泡。气泡对光的影响主要是散射和吸收,从而造成光强的衰减,即消光。透过气泡幕的激光功率随气泡密度以及气泡幕厚度的增加而衰减。

由米氏散射理论,单个气泡的散射系数^[17] K_e 为:

$$K_e = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n) \quad (2)$$

式中: α 为气泡尺度参量; a_n 与 b_n 为米氏散射系数。

对于气泡幕^[17],采用浊度描述其消光特性。根据

朗伯特-比尔定律, 气泡幕的浊度 τ 为:

$$\tau = NK_e\sigma \quad (3)$$

式中: N 为单位体积内的气泡数, 即气泡密度; σ 为气泡沿光传播方向的投影面积。由公式 (2) 与 (3) 可知气泡幕的消光率随气泡密度的增大而提高。

乙醇辅助激光烧蚀切割产生的气泡幕密度更大, 上浮气泡对激光的“屏蔽”作用^[16]增强, 到达硅晶圆的激光能量有所降低。因此, 切槽深度及宽度随乙醇浓度提升而降低。

4 结论

文中通过向水中混入乙醇溶液的方法改善了硅片精密切割的质量, 加工表面更加清洁、切缝宽度减小、切槽深度降低。文中提出的工艺无需外加辅助设备、成本低、操作简单、无安全问题。当设置乙醇浓度为 5 wt.% 时, 抛光面切割缝宽减幅约 20%, 影响区缩减范围 50% 以上, 同时切槽深度减小约 18%。文中从两方面分析了表面质量提升的机理: (1) 乙醇辅助切割时, 气泡不易粘结在硅晶圆表面, 大部分气泡在破溃之前能及时从材料表面剥离, 从而减轻了“气泡破溃冲击”现象; (2) 乙醇辅助切割时, 前序激光诱导生成的气泡生长体积小于纯水环境下气泡的体积, 后序脉冲激光束折射、反射现象减轻。文中还分析了切槽深度降低的机理: 乙醇改变了硅晶圆表面润湿性, 溶液整体沸点降低, 激光作用产生的高密度气泡幕对激光的消光作用增强, 实际到达硅晶圆的能量有所降低。文中的实验验证了乙醇浓度对切缝宽和影响区的优化作用, 为硅片高质量切割提供有益的参考。

参考文献:

- [1] Wang Y, Li C Q, Zhang H Z, et al. Research on unconventional laser machining [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 448-454. (in Chinese)
- [2] Wang Z, Fu W J, Zhang R Z. Numerical simulation of femtosecond laser multi-pulse ablation of metal iron [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(7): 0706002. (in Chinese)
- [3] Guo M, Zhang Y X, Zhang W Y, et al. Thermal damage of monocrystalline silicon irradiated by long pulse laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 0305002.
- [4] Yang W, Peng X H, Zhang J. Study of laser cutting technology for silicon wafer under water [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 3064-3067. (in Chinese)
- [5] Huang H K, Lai J C, Lu J, et al. Study on Nd: YAG ns pulsed laser ablation of Ge target in water [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(8): 20190498. (in Chinese)
- [6] Zhong X, Eshraghi J, Vlachos P, et al. A model for a laser-induced cavitation bubble [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2020, 132: 103433.
- [7] Avila S G, Ohl C D. Fragmentation of acoustically levitating droplets by laser-induced cavitation bubbles [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 805: 551-576.
- [8] Ren X D, He H, Tong Y Q, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics and strengthening mechanism of laser-induced cavitation bubbles [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 32: 218-223.
- [9] Charee W, Tangwarodomnukun V, Dumkum C. Ultrasonic-assisted underwater laser micromachining of silicon [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 231: 209-220.
- [10] Bao J, Long Y, Tong Y, et al. Experiment and simulation study of laser dicing silicon with water-jet [J]. *Applied Surface Science*, 2016, 387: 491-496.
- [11] Kanitz A, Kalus M R, Gurevich E L, et al. Review on experimental and theoretical investigations of the early stage, femtoseconds to microseconds processes during laser ablation in liquid-phase for the synthesis of colloidal nanoparticles [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(10): 103001.
- [12] De B A, Sansone M, D'Alessio L, et al. Dynamics of laser-induced bubble and nanoparticles generation during ultra-short laser ablation of Pd in liquid [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, 46(44): 445301.
- [13] Wagener P, Ibrahimkuty S, Menzel A, et al. Dynamics of silver nanoparticle formation and agglomeration inside the cavitation bubble after pulsed laser ablation in liquid [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics Pccp*, 2013, 15: 3068-3074.
- [14] Giacomo A D, Dell'Aglio M, Santagata A, et al. Cavitation dynamics of laser ablation of bulk and wire-shaped metals in water during nanoparticles production [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics Pccp*, 2013, 15: 3083-3092.
- [15] Fan L T, Yuan X G, Zhou C X, et al. Contact Angle of Ethanol and n - Propanol Aqueous Solutions on Metal Surfaces [J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2011, 34(9): 1535-1542.
- [16] Barcikowski S, Zhang D S, Gökce B, et al. Debris-free rear-side picosecond laser ablation of thin germanium wafers in water with ethanol [J]. *Applied Surface Science: A Journal Devoted to the Properties of Interfaces in Relation to the Synthesis and Behaviour of Materials*, 2016, 367: 222-230.
- [17] Ma Z G, Wang J A, Yu Y, et al. Light extinction properties of underwater bubble films [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 18-20. (in Chinese)