

文章编号 1004-924X(2022)06-0702-09

金刚石刀轮滚压脆断单晶硅和蓝宝石的实验研究

陈 绒¹, 周 聪², 谢 晋^{2*}, 陈钊杰²

(1. 广东科技学院, 广东 东莞 523083;

2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 集成电路芯片快速分割是半导体器件制造的关键工艺。通常采用固定的单点金刚石刀轮划线切断,但其过程会产生不规则裂纹,损害芯片电路。因此,针对单晶硅与蓝宝石两种芯片材料,采用直径为2.5 mm的金刚石刀轮进行滚压脆断加工实验,分析不同加工工艺下的应力分布,探究刀轮几何形状和工艺参数对不同材料的裂纹扩展和滚压脆断质量的影响。结果表明:刀轮刃端处集中的张应力引起微裂纹的产生与扩展,在滚压方向上逐渐形成微切痕,导致最后的脆断,但也会产生横向裂纹,使脆断边缘破碎。在合适的张应力下,边沿破碎低至约1 μm,脆断面质量较高。此外,若芯片材料硬度和断裂韧度大,可选择较小的刀轮角度和较大的滚压压力。当单晶硅滚压压力为0.015 MPa,刃端接触处的张应力在100 MPa左右,蓝宝石的滚压压力为0.095 MPa,张应力在350 MPa左右时,滚压脆断后的断面裂纹扩展相对均匀,断面质量最优。最后实验显示,具有微锯齿结构的金刚石刀轮切割集成电路芯片的边沿质量较好。

关键词: 单晶硅;蓝宝石;金刚石刀轮;裂纹扩展;精密滚压脆断

中图分类号: TP391.4; TH73 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223006.0702

Experimental study on rolling and brittle fracture to single crystal silicon and sapphire by diamond cutter wheel

CHEN Rong¹, ZHOU Cong², XIE Jin^{2*}, CHEN Zhaojie²

(1. Guangdong University of Science and Technology, Dongguan 523083, China;

2. College of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: jinxie@scut.edu.cn

Abstract: Rapid partitioning of integrated circuit chips is a key process in semiconductor device manufacturing. Usually, a fixed single-point diamond tool blade is used for scribing and cutting. However, the process can result in irregular cracks and damage chip circuits. Therefore, for two chip materials, i. e., single crystal silicon and sapphire, a 2.5 mm diameter diamond cutter wheel was used for rolling brittle fracture processing experiments. We analyzed the stress distribution under different machining processes and discussed the effects of the cutter wheel geometry and process parameters on crack extension and the rolling brittle fracture quality of different materials. The results show that the concentrated tension stress

收稿日期:2021-07-23;修订日期:2021-09-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51975219);广东省自然科学基金资助项目(No. 2020A1515010807);广东省国际科技合作项目(No. 2020A0505100003);2020年度基本科研业务费项目-自然科学类培育项目;广东省教育厅普通高校认定类科研项目(No. 2020KQNCX103)

at the cutter wheel edge end generates and expands micro-cracks, which gradually shape micro-cutting marks in the rolling direction, leading to the final brittle fracture. However, this produces lateral cracks that make it easier to break the brittle fracture edge. Under a suitable tension stress, edge breakage is as low as approximately $1\ \mu\text{m}$ and the brittle section quality is high. In addition, the greater the hardness and fracture toughness of the chip material, the smaller the cutter wheel angle and the greater the rolling pressure. When the rolling pressure of single crystal silicon is $0.015\ \text{MPa}$, the tensile stress at the edge contact is approximately $100\ \text{MPa}$, the rolling pressure of sapphire is $0.095\ \text{MPa}$, and its tensile stress is approximately $350\ \text{MPa}$, crack expansion of the fracture section after rolling and brittle fracture is relatively uniform, and the quality of the fracture surface is optimal. Finally, the experimental result showed that the quality of integrated circuit chips cut with the diamond cutter wheel with a micro-serrated structure is better.

Key words: single crystal silicon; sapphire; diamond cutter wheel; crack extension; precision rolling and brittle fracture

1 引言

单晶硅和蓝宝石作为半导体衬底材料,具有优越的性能^[1-2],已被广泛应用于LED、CMOS、MEMS器件制造产业^[3-5]。在制作此类微电子器件时,需要对基底材料上光刻后的芯片电路进行分割并封装,切割质量直接影响着器件质量和成本^[6]。此外,硬脆性硅和蓝宝石易产生裂纹,加工难度大^[7-8]。

玻璃基板常采用硬质合金刀轮滚压切割^[9],但其寿命和精度较低;芯片切割采用金刚石高速旋切^[10],但由于磨粒产生应力集中,易出现崩边^[11]。激光切割会残留熔融物质和微观裂纹^[12]。也有学者提出一种干净平滑的冰辅助激光切割,但增加了成本^[13]。1921年,A. A. Griffith提出了微裂纹理论,Griffith认为,实际材料中存在许多细小的裂纹或缺陷。在外力作用下,这些裂纹和缺陷附近产生应力集中现象。当应力达到一定程度时,裂纹开始扩展导致断裂。所以,断裂不是两部分晶体沿整个晶面拉断,而是裂纹扩展的结果^[14]。

以此理论为基础,早期采用单点金刚石刀具划线切断单晶硅,但是对刀刃精度要求较高^[15]。因此,在采用直径 $50\ \text{mm}$ 左右的金刚石砂轮片高速旋转划线切割时,需要在位修整砂轮片尖端^[16-17]。由于半径大的砂轮片切割时有不规则微裂纹横向扩展乃至边缘破碎,直径 $2\ \text{mm}$ 左右的金刚石刀轮已逐渐开始被产业化应用^[18-19]。此

外,刀轮滚压压力和深度与表面质量的关系也一直被探究^[20]。

在本研究中,利用金刚石微刀轮对单晶硅及蓝宝石进行滚压脆断分割。根据脆性材料特性,微裂纹扩展机理,研究刀轮角度和滚压压力对工件材料应力分布的影响。此外,实验研究不同工艺参数对裂纹扩展和断面质量的影响。最终应用于集成电路芯片的切割工艺中。

2 精密滚压应力场分析

2.1 刀轮精密滚压脆断模型

图1为刀轮精密滚压脆断过程图。在施加滚压压力 p 的作用下,使用刃端角度为 α 的金刚石刀轮在单晶硅和蓝宝石表面进行滚压,划痕下方产生垂直裂纹。然后,通过施加力矩,垂直裂纹沿脆断面扩展,产生脆断分离^[21]。采用ANSYS

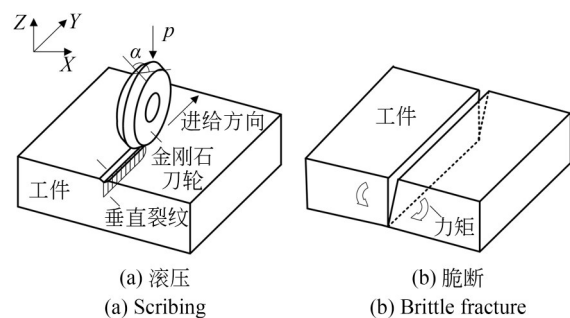


图1 刀轮精密滚压脆断过程

Fig. 1 Cutting wheel precision scribing and brittle fracture

仿真软件分析单晶硅和蓝宝石滚压脆断过程的应力分布。在仿真条件中,将刀轮定义为刚体,刃端角度 α 为 115° 和 120° ,尖端半径 r 为 0 ,将工件材料定义为弹性体。单晶硅和蓝宝石的物理性质如表 1 所示。

表 1 单晶硅和蓝宝石物理性质

Tab.1 Physical properties of single crystal silicon and sapphire

工件	弹性模量	维氏硬度	断裂韧度
单晶硅	186.5 GPa	1 000~1 250 HV	1.9 MPa·m ^{0.5}
蓝宝石	400.5 GPa	2 000~2 300 HV	5.5 MPa·m ^{0.5}

2.2 刀轮角度对工件表面应力的影响

图 2 为滚压过程的刀轮刃端处应力分布云图。可以发现,工件表面应力的分布与刃端位置和刀轮形状有关,在刃端处,张应力达到最大,导

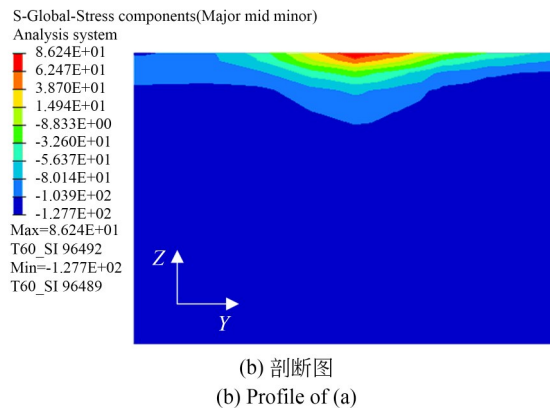
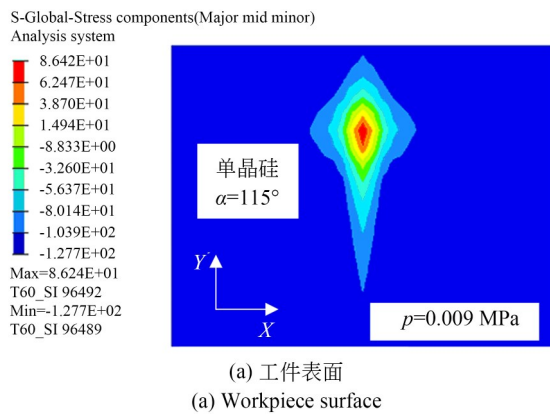


图 2 滚压过程的刀轮刃端处应力分布云图

Fig.2 Stress distribution at the edge of wheel during scribing

致脆性材料的裂纹扩展。随着离开刃端距离增大,张应力逐渐减小,然后转变成压应力。沿着滚压方向,张应力范围逐渐扩大,最终工件表面形成直线划痕,用于最后的脆断切割。但是,刀轮刃端垂直下方的张应力因逐渐转变成压应力,裂纹不会进一步扩展。

图 3 为刀轮角度 α 对最大表面应力 σ 的影响。可以看出,当 $\alpha=115^\circ$,单晶硅的最大张应力为 86.24 MPa,相比 $\alpha=120^\circ$ 的应力,提高了约 33.2%。相反,滚压蓝宝石时, $\alpha=115^\circ$ 的刀轮产生的最大张应力相比 $\alpha=120^\circ$ 的低约 5.2%。由此可知,刀轮滚压脆断韧度小且硬度较低的晶圆材料时,使用较大角度的刀轮会产生较低应力,可保证脆断面质量。

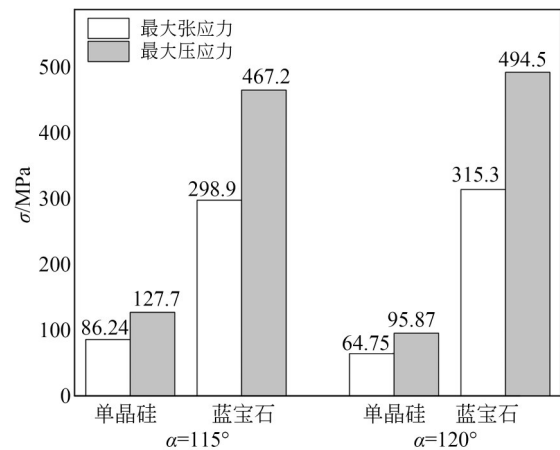


图 3 刀轮角度 α 对工件表面最大应力 σ 的影响

Fig.3 Effect of cutting wheel angle α on workpiece surface maximum stress σ

2.3 滚压压力对单晶硅和蓝宝石表面应力的影响

图 4 为滚压压力 p 与工件表面最大应力 σ 的关系。可以发现,随着滚压压力 p 的上升,工件表面应力 σ 线性上升。当滚压压力 p 较低时,单晶硅表面应力 σ 迅速上升,说明提高滚压压力 p 易产生更多裂纹,导致破碎。但是,蓝宝石表面应力 σ 上升速率比单晶硅低,原因是蓝宝石断裂韧度大,抵抗破碎能力更好,且精密滚压脆断所需滚压压力 p 也更大。此外,断裂韧度为 1.9~5.5 的材料适合的滚压压力 p 的范围约为 0.03~0.07 MPa。

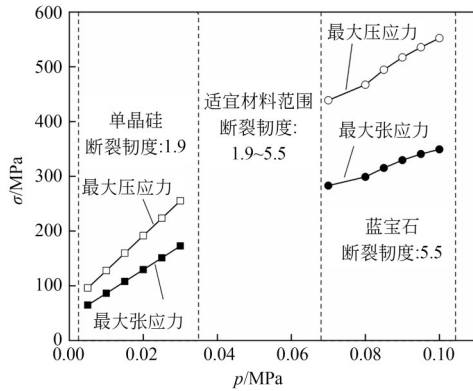


图 4 滚压压力 p 与工件表面最大应力 σ 的关系
 Fig. 4 Relationship between rolling pressure p and the maximum surface stress σ

3 滚压脆断实验数据及分析

3.1 工艺条件及参数

图 5 为刀轮滚压实验装置以及金刚石刀轮形貌。根据第 2 节的模拟仿真结果,选择合适工艺参数,进行滚压脆断实验。其中,工件材料通过真空吸盘固定,在刀架上装有金刚石刀轮,刀轮中央为刀轮轴安装孔,刀轮装入轮轴后固定在刀头部位,如图 5(a)、(b)所示。图 5(c)、(d)为实验使用的金刚石微刀轮形貌图,刃端半径 r 为 $5\ \mu\text{m}$,用来保证精密滚压时的精度。金刚石刀轮规格如表 2 所示。

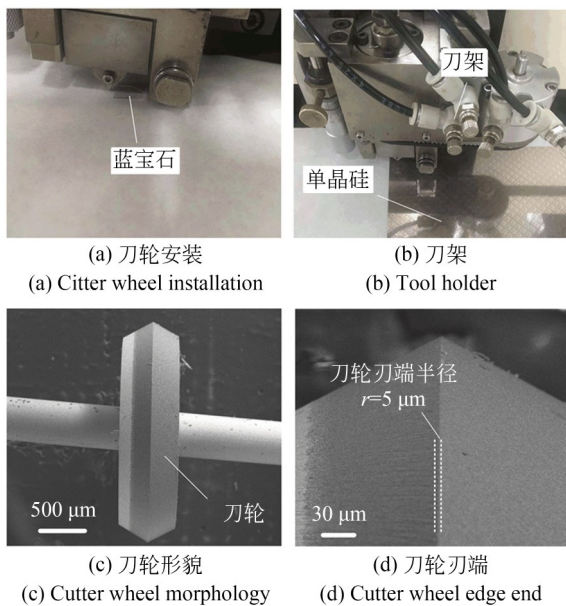


图 5 实验装置及金刚石刀轮形貌
 Fig. 5 Experimental setup and diamond wheel morphology

表 2 金刚石刀轮规格

Tab. 2 Specifications of diamond cutter wheel

参数	参数值	
角度 $\alpha/(\text{°})$	115	120
直径/mm	2.5	2.5
厚度/mm	0.65	0.65

3.2 刀轮角度对滚压脆断断面的影响

图 6 为刀轮角度 α 对晶片断面质量的影响。可以看到, $\alpha=120^\circ$ 的单晶硅脆断面裂纹比 $\alpha=115^\circ$ 的裂纹分布更加均匀,断面质量更高,但是, $\alpha=115^\circ$ 的蓝宝石脆断面相对 $\alpha=120^\circ$ 的质量更高。结合第 2 节刀轮角度 α 对工件表面应力 σ 的分析,加工断裂韧度小和硬度低的材料使用 $\alpha=120^\circ$ 的刀轮可以产生更低的应力 σ ,而加工断裂韧度大和硬度高的材料时使用 $\alpha=115^\circ$ 的刀轮产生的应力 σ 更低。

由此可知,断裂韧度小且硬度低的材料应选择角度偏大的刀轮,滚压产生的应力更低,裂纹扩展更加集中,使芯片材料的断面品质更高。

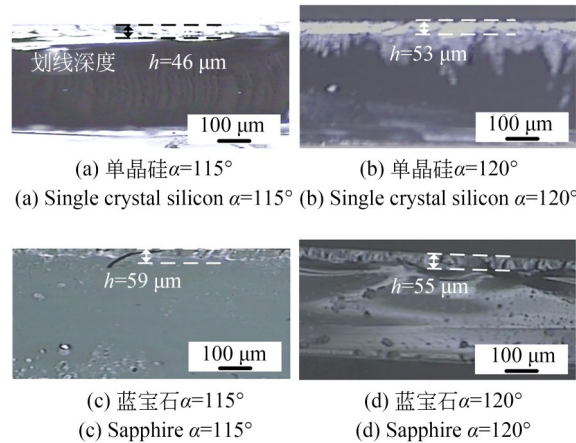


图 6 刀轮角度 α 对晶片断面质量的影响
 Fig. 6 Effect of wheel angle α on wafer cross-section quality

3.3 滚压压力与断面质量的关系

3.3.1 单晶硅和蓝宝石的裂纹扩展

图 7 为滚压后的工件裂纹 SEM 形貌。可以看出,当滚压压力 p 较低时,单晶硅产生明显微裂纹,且随着压力上升横向裂纹逐渐增多,甚至产生破裂。对于蓝宝石,在 $p=0.07\ \text{MPa}$ 的滚压压力下,几乎没有微裂纹,提高压力 p 后开始出现垂

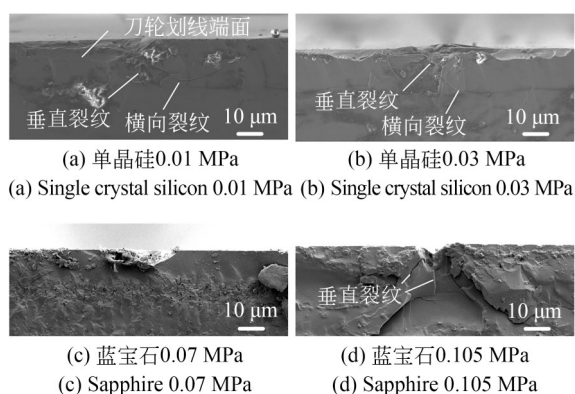


图 7 滚压后的工件裂纹 SEM 形貌
Fig. 7 SEM morphology of crack in the workpiece after rolling

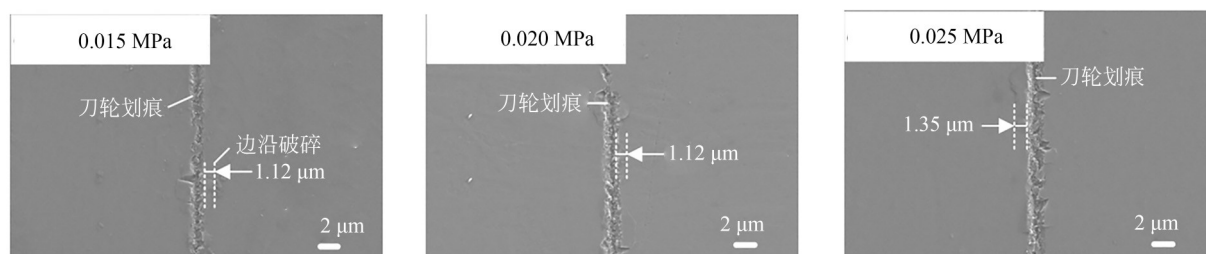


图 8 单晶硅划痕的 SEM 形貌图($\alpha=120^\circ$)
Fig. 8 SEM morphology of scratched silicon($\alpha=120^\circ$)

图 9 为单晶硅划痕的断面光学形貌图($\alpha=120^\circ$)。由图可知,在 $p=0.015$ MPa 时,划痕深度裂纹扩展相对均匀;在 $p=0.010$ MPa 时,断面发生鸡颈区,为非正常局部区域; $p=0.020$ MPa 时断面发生非正常分离局部镜面区域。由此可知,单晶硅在滚压压力 p 为 0.015 MPa 左右时断面质量最优。

图 10 为蓝宝石划痕的 SEM 形貌图($\alpha=115^\circ$)。可以看出,表面边沿破碎程度比单晶硅低约 20%,且形状规则。这也说明,蓝宝石断裂韧度大且硬度高,能产生质量较好的划痕。对应的蓝宝石划痕的断面形貌如图 11 所示。从图中可以看到,在 $p=0.095$ MPa 时,蓝宝石断面划痕深度裂纹扩展较均匀,断面质量较高。

图 12 为滚压压力 p 与工件表面滚压深度 h 的关系。可以看出,滚压深度 h 与滚压压力 p 呈线性关系。单晶硅的滚压深度 h 在 38~58 μm ,蓝宝石的滚压深度 h 在 77~115 μm ,约为单晶硅的 2 倍。也可以预测,断裂韧度为 1.9~5.5 的材料适合的滚压压力范围为 0.03~0.07 MPa。对于不同角度刀轮的滚压效果,在单晶硅上使用 $\alpha=120^\circ$

直裂纹。结合应力分析结果,说明蓝宝石材料产生微裂纹所需要的应力约为单晶硅的 5 倍,且由于其断裂韧度大,硬度高,抵抗破碎和裂纹扩展的能力较强,需要更高的滚压压力 p 来产生垂直裂纹。

3.3.2 断面质量对比

图 8 为单晶硅划痕的 SEM 形貌图($\alpha=120^\circ$)。使用不同压力 p 进行滚压脆断,获得脆断面。可以看出单晶硅在滚压处两侧出现边沿破碎,长度在 1.12~1.35 μm ,且在增大滚压压力 p 的条件下,虽然滚压深度增加,但应力 σ 也增大,边沿破碎程度更大。

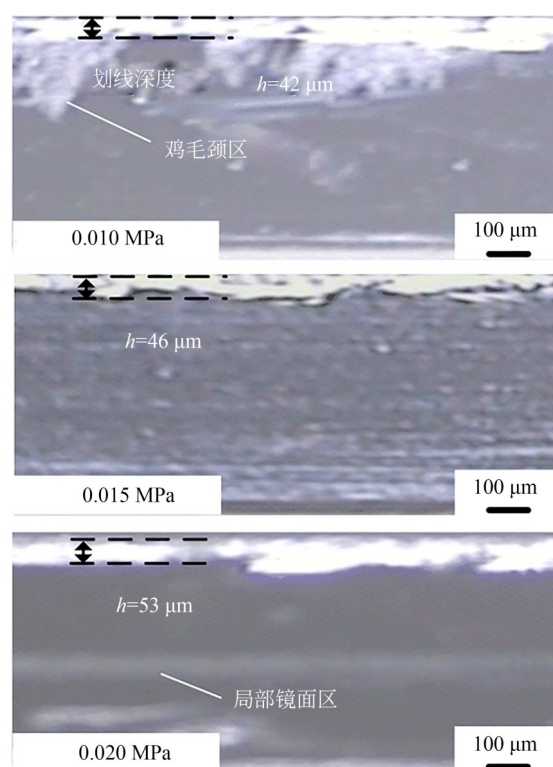


图 9 单晶硅划痕的断面形貌图($\alpha=120^\circ$)
Fig. 9 Cross-section morphology of scratched silicon($\alpha=120^\circ$)

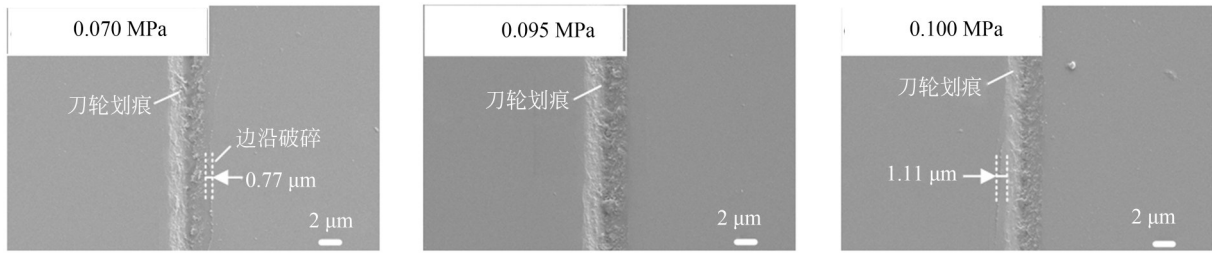


图 10 蓝宝石划痕的 SEM 形貌图 ($\alpha=115^\circ$)
 Fig. 10 SEM morphology of sapphire scratches ($\alpha=115^\circ$)

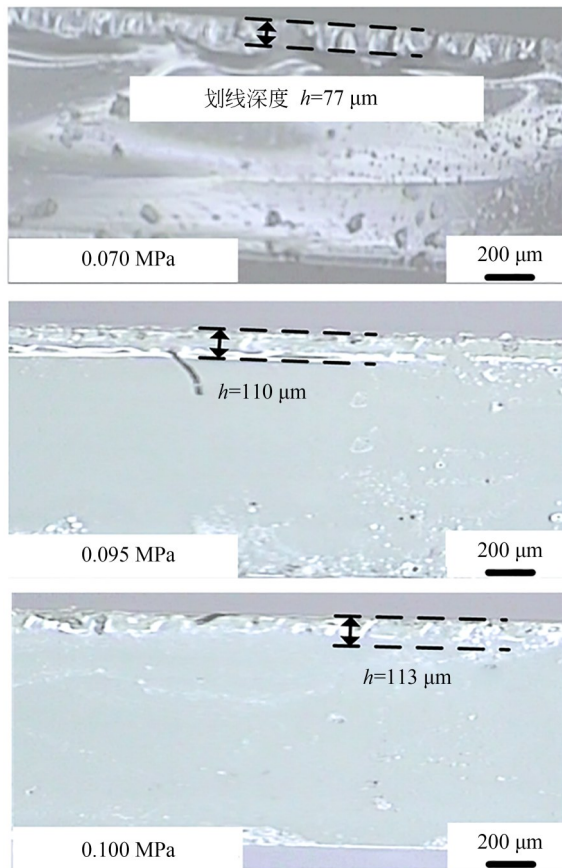


图 11 蓝宝石划痕的断面形貌图 ($\alpha=115^\circ$)
 Fig. 11 Cross-section of sapphire scratches ($\alpha=115^\circ$)

的刀轮可以产生更深的滚压深度,断面质量较好,而在蓝宝石上使用 $\alpha=115^\circ$ 刀轮的效果更优,这是由于滚压时产生的表面应力 σ 更小所导致的。

综上所述,在进行晶片滚压脆断分离时,对应不同的晶片材料首先需要选择合适角度的刀轮,并在合适的滚压压力 p 下进行。过小的滚压压力 p 导致过小的应力 σ ,无法在划痕下方产生垂直裂纹;而过大的滚压压力 p 导致过大的应力 σ ,会产生破碎以及崩裂。其中,单晶硅滚压压力

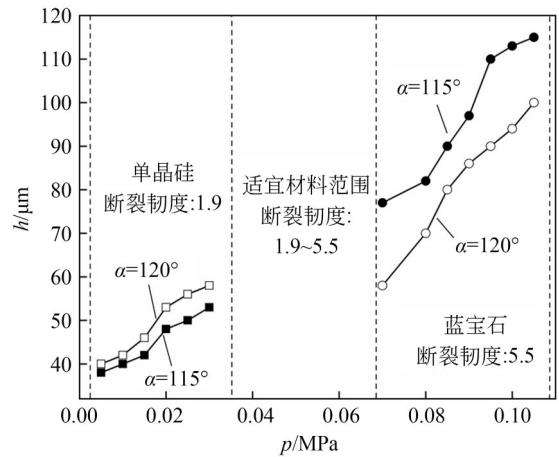


图 12 滚压压力 p 与工件表面滚压深度 h 的关系
 Fig. 12 Relationship between rolling pressure p and depth h of workpiece surface

p 为 0.015 MPa,蓝宝石的滚压压力 p 为 0.095 MPa 时,滚压脆断后的断面裂纹扩展相对均匀,断面质量最优。

根据最优滚压压力 p ,结合图 4 的应力分析,单晶硅的最佳张应力 σ 在 100 MPa 左右,蓝宝石的为 350 MPa 左右,在适宜的外加应力 σ 下,切痕表面不会产生过多的边沿破碎,同时保证了一定的垂直裂纹长度(约 10 μm),可以获得高质量的断面。

3.4 集成电路芯片的滚压脆断切割

集成电路产业分为电路设计、芯片制造以及封装测试三个行业。在集成电路芯片封装过程中,首先需要对芯片进行切割,这一过程具有重要影响。在切割过程中,精密的切割轨迹能够保证在后续的分过程中产生尽可能小的缺陷,不破坏表面电路,并减少后续的侧面磨抛时间。

以上述的刀轮精密滚压实验研究为基础,使用不同滚压压力 p 对集成电路芯片进行精密滚压

脆断分离,观察刻有电路的芯片表面破碎情况,如图 13 所示。可以看出,在滚压压力 p 增大时,芯片的边沿破碎较为严重,出现缺口以及崩碎,影响芯片的性能。在选择滚压压力 p 较小的条件下产生的边沿破碎不会破坏晶片表面电路,保证性能。

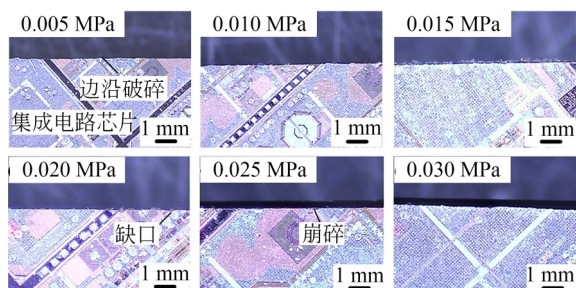


图 13 集成电路芯片分割后边缘形貌对比图

Fig. 13 Edge comparison after integrated circuit chips splitting

根据以上分析,使用带锯齿的 120° 金刚石刀轮以 $p=0.005$ MPa 的滚压压力对芯片背面进行滚压脆断分离,最终得到的芯片表面如图 14 所示。带锯齿的刀轮滚压脆断后,所得到的芯片边缘几乎不产生破碎,不会损伤芯片中的电路线。

4 结 论

(1)在金刚石刀轮精密滚压过程中,工件表面应力分布与与刃端位置和刀轮形状相近,张应力最大的部分集中在刀轮刃端下方,且工件表面的应力值与滚压压力总体呈线性关系。张应力过低,划痕下方无法产生垂直裂纹;张应力过高,会产生横向裂纹,易使芯片脆断边缘破碎和崩裂。

(2)在单晶硅精密滚压时,刀轮角度为 115° 产生的张应力相比 120° 约高 33.2%,而在蓝宝石



图 14 低损伤芯片分割形貌图

Fig. 14 Low damage chip splitting

中,刀轮角度为 115° 产生的张应力相比 120° 刀轮约低 5.2%。在选择刀轮角度时,硬度和断裂韧性越大的材料选用角度偏小的刀轮,滚压时产生的应力更低,裂纹扩展范围更加集中,工件材料的断面品质更高。

(3)在进行对单晶硅与蓝宝石精密滚压脆断时,滚压深度与滚压压力成正相关关系。同时,在合适的滚压压力和张应力范围内,划痕表面边沿破碎低至约 $1 \mu\text{m}$,微裂纹扩散均匀且方向一致,断面质量高。其中,单晶硅滚压压力为 0.015 MPa,张应力在 100 MPa 左右,蓝宝石的滚压压力为 0.095 MPa,张应力在 350 MPa 左右时,滚压脆断后的断面裂纹扩展相对均匀,断面质量最优。

(4)将金刚石刀轮滚压脆断技术应用于集成电路芯片切割中可减少后续加工磨抛的时间,提高效率。滚压压力增大会引起芯片边沿破碎的增多,甚至出现缺口以及崩碎,影响芯片的性能。所以,在进行芯片切割时,应尽可能选择较小的滚压压力,选用带微锯齿的刀轮,保证芯片分离时表面电路完整性。

参考文献:

- [1] 葛梦然, 毕文波. 单晶硅低裂纹损伤切片加工技术研究进展[J]. 人工晶体学报, 2021, 50(5): 967-973.
GE M R, BI W B. Research progress on low crack

- damage slicing technology for single crystal silicon [J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2021, 50(5): 967-973. (in Chinese)
[2] 考政晓, 叶大千, 于璇, 等. 蓝宝石衬底材料的研究及应用进展[J]. 人工晶体学报, 2018, 47(1): 102-107.

- KAO Z X, YED Q, YU X, *et al.* Research and application progress of sapphire substrates[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2018, 47(1): 102-107. (in Chinese)
- [3] ZEHETNER J, KRAUS S, LUCKI M, *et al.* Manufacturing of membranes by laser ablation in SiC, sapphire, glass and ceramic for GaN/ferroelectric thin film MEMS and pressure sensors[J]. *Microsystem Technologies*, 2016, 22(7): 1883-1892.
- [4] 李芬, 石树正, 杨翔宇, 等. 硅基压电MEMS球形矢量水听器设计[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(3): 84-86.
- LI F, SHI S Z, YANG X Y, *et al.* Design of silicon-based piezoelectric MEMS spherical vector hydrophone[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(3): 84-86. (in Chinese)
- [5] 李思宏, 侯想, 罗荣煌, 等. SiO₂图形化蓝宝石衬底对GaN生长及LED发光性能的影响[J]. *发光学报*, 2021, 42(4): 526-533.
- LI S H, HOU X, LUO R H, *et al.* Effect of SiO₂ patterned sapphire substrate on GaN growth and LED luminescence performance[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(4): 526-533. (in Chinese)
- [6] 方素平, 小森雅晴, 赵宇, 等. 半导体芯片切割加工品质的评价方法[J]. *半导体技术*, 2008, 33(4): 300-303.
- FANG S P, XIAO S Y Q, ZHAO Y, *et al.* Appraising method of machining quality for semiconductor chips[J]. *Semiconductor Technology*, 2008, 33(4): 300-303. (in Chinese)
- [7] 葛培琪, 陈自彬, 王沛志. 单晶硅切片加工技术研究进展[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2020, 40(4): 12-18.
- GE P Q, CHEN Z B, WANG P Z. Review of monocrystalline silicon slicing technology[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2020, 40(4): 12-18. (in Chinese)
- [8] MIZUMOTO Y, MAAS P, KAKINUMA Y, *et al.* Investigation of the cutting mechanisms and the anisotropic ductility of monocrystalline sapphire[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 89-92.
- [9] 万珍平, 张昆, 冯俊元, 等. 液晶玻璃双刀轮切割及其裂纹产生、扩展规律[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(12): 99-105.
- WAN Z P, ZHANG K, FENG J Y, *et al.* Liquid crystal glass substrate cutting based on double scribe-wheels and its crack initiation and propagation laws[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2017, 45(12): 99-105. (in Chinese)
- [10] SUBRAMANIAN K, RAMANATH S, TRICARD M. Mechanisms of material removal in the precision production grinding of ceramics[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997, 119(4A): 509-519.
- [11] LUO S Y, WANG Z W. Studies of chipping mechanisms for dicing silicon wafers[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, 35(11/12): 1206-1218.
- [12] 郭明, 张永祥, 李宏. 脉冲串毫秒激光对单晶硅的热损伤[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(6): 199-205.
- GUO M, ZHANG Y X, LI H. Thermal damage of monocrystalline silicon by multi-pulsed millisecond laser[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(6): 199-205. (in Chinese)
- [13] TANGWARODOMNUKUN V, MEKLOY S, DUMKUM C, *et al.* Laser micromachining of silicon in air and ice layer[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 36: 197-208.
- [14] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, 1921, 221(582-593), 163-198.
- [15] OLIVER A D, WALLNER T A, TANDON R, *et al.* Diamond scribing and breaking of silicon for MEMS Die separation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2008, 18(7): 075026.
- [16] 尹韶辉, 杨宏亮, 陈逢军, 等. 硅晶圆分层划片工艺试验研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(7): 1-7.
- YIN S H, YANG H L, CHEN F J, *et al.* Experimental research on step cut process of silicon wafer[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(7): 1-7. (in Chinese)
- [17] 方素平, 小森雅晴, 赵宇, 等. 主轴转速对半导体芯片切割品质的影响[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(18): 2187-2190.
- Fang S P, Komori Masaharu, ZHAO Y, *et al.* Influence of spindle rotating speed on machining quality for chips of semiconductor[J]. *China Mechan-*

- cal Engineering*, 2007, 18(18): 2187-2190. (in Chinese)
- [18] HASEGAWA R, MATSUSAKA S, HIDAI H, *et al.* In-process estimation of fracture surface morphology during wheel scribing of a glass sheet by high-speed photoelastic observation [J]. *Precision Engineering*, 2017, 48: 164-171.
- [19] AKIYAMA Y, OKADA M, SUZUKI H, *et al.* Scribing characteristics of glass plate with ground PCD scribing wheel [J]. *International Journal of Automation Technology*, 2018, 12(5): 760-766.
- [20] 李海泉, 王涛, 李大伟. TP 盖板玻璃的切割分断工艺研究 [J]. *机械管理开发*, 2019, 34(2): 59-61.
- LI H Q, WANG T, LI D W. Study on cutting and breaking technology of TP cover glass [J]. *Mechanical Management and Development*, 2019, 34(2): 59-61. (in Chinese)
- [21] TOMEI N, FUKUNISHI T. Development of diamond materials for glass cutting tool [J]. *Journal of the Japan Society for Abrasive Technology* 2016, 60 (6 TN. 406), 314-317.

作者简介:



陈 绒(1986—),女,硕士,讲师,2016年于华南理工大学获得机械工程硕士学位,主要从事精密加工、机械制造及其自动化方面的研究。E-mail: rongchen338@163.com

通讯作者:



谢 晋(1963—),男,博士,教授,博士生导师,2002年于日本北见工业大学获得博士学位,主要从事微细磨削技术、光学制造、精密制造工艺过程控制技术等方面的研究。E-mail: jinxie@scut.edu.cn