

硅晶片金刚石线切割的表面特征及其力学性能

(美) 杨业元

(佐治亚理工学院 制造研究所, 美国 佐治亚州 亚特兰大 30332)

摘 要: 分析了金刚石线切割硅晶片的表面形貌和断裂性能,并在此基础上探讨金刚石线切割原理以及一些技术挑战。金刚石线切割具有表面粗糙度低,硅片厚度均匀等优点,但却存在断裂强度各项异性。与切割划痕垂直方向的力学性能很高,然而与划痕平行方向的力学性能较低,这种性能差异是由表面单方向裂纹引起的,其裂纹的产生又与切割机理密切相关。金刚石线切割属于二体磨料磨损,其切割方式通常为塑性划痕,加之有少量脆性剥落。由于切割线的柔性,以及金刚石磨粒大小、形态、及分布的差异,切割过程则会出现切割的不连续性和不稳定性,并由此引起一些较大的表面裂纹。此外,划痕沟槽局部还会出现非晶态结构。提高金刚石线切割性能应从切割线磨粒角度来考虑。

关键词: 金刚石线切割; 表面形貌; 断裂强度; 切割机理

中图分类号: TG711

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)02-0001-05

Surface Characteristics and Its Mechanical Performance of Diamond Wire Sawn Silicon Wafers

YANG Ye-yuan

(Manufacturing Institute, Georgia Institute of Technology, Atlanta GA 30332, USA)

Abstract: The surface morphology and fracture properties of diamond wire sawn silicon wafers were analyzed. The cutting mechanism and some key challenges with diamond wire sawing are also discussed. Diamond wire sawing has the advantages of low surface roughness and better thickness uniformity, but endures a disadvantage of fracture strength anisotropy. Higher mechanical property exists in the direction perpendicular to the saw marks, but lower in the parallel direction. This performance difference results from the unidirectional surface microcracks, which is further tied closely with the cutting mechanism. Diamond wire sawing belongs to the two-body wear process, where the scratching is dominated, but with a small amount of brittle fracturing at meantime. Due to the flexibility of the cutting wire and the variation of the diamond grain size, shape, and distribution, there may exist cutting discontinuity and instability in the sawing process, which then produces relatively large surface microcracks. Meanwhile, amorphous silicon may formed in the scratch grooves. To improve the cutting performance, the improvement of diamond grits should be pursued.

Key words: diamond wire sawing; surface morphology; fracture strength; cutting mechanism

0 引 言

硅晶片是太阳能半导体光伏电池的基础材料,它经制绒、制结、镀膜、印刷电极、及烧结等工序后,可获得太阳能电池元件。硅晶片通常是由游离磨料多线切割加工制备的。游离磨料线切割

是光伏电池制造中的一种精密加工技术,它包括高强度金属细线($\sim 120\ \mu\text{m}$)、微小碳化硅磨料($\sim 10\ \mu\text{m}$)、导线轮、线辊、张力控制器、及伺服机构等,如图 1 所示。金属线以一定间距反复缠绕在线辊上,形成一张平行的金属线网。高速移动

收稿日期: 2012-12-19; 修回日期: 2013-03-04

作者简介: 杨业元(1962—),男(汉),美籍华人,原籍湖北汉阳人,研究工程师,博士;研究方向: 半导体光伏材料

网络出版日期: 2013-03-26 15:59; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20130326.1559.004.html>

引文格式: 杨业元. 硅晶片金刚石线切割的表面特征及其力学性能 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(2): 1-5.

(~ 25 m/s)的金属线将锋锐磨料带入切割区,形成磨料磨损切割,把铸锭或铸块切割成许多微薄的硅晶片^[1]。游离磨料线切割具有切割精度高、表面平滑、产量大等特点。但随着光伏产业的大规模化,游离切割也显现切割速度慢、废料消耗大、污染严重等局限性。

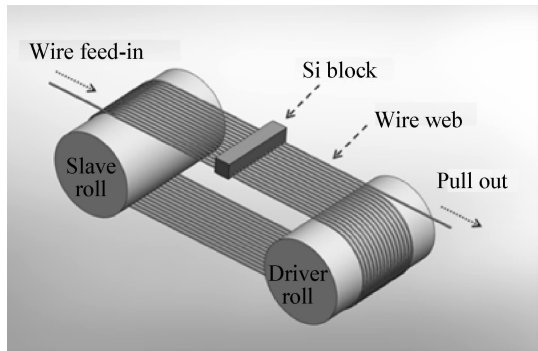


图1 多线切割工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram displaying the operational principle of a multi-wire slurry sawing

金刚石线切割是一种新型替代型切割技术。金刚石线切割不仅切割速度快、切割线使用寿命长、环境污染小,同时还可回收硅废料,因而受到极大重视。许多研究公司都在开发相关配套设备和技术。比如,日本旭金刚石工业株式会社、美国DMT公司、比利时贝卡尔特正在开发金刚石切割线,瑞士的梅耶博格、美国的应用材料公司和德国的RENA研发金刚石线切割设备,中国的昱辉和美国MEMC从事金刚石线切割应用方面的工作。金刚石线切割现已初步应用于单晶硅材料的切割,但尚未用于类单晶和多晶切割^[2]。由于硅晶材料和切割加工约占太阳能光伏电池总成本的30%~40%,人们希望一方面进一步减小硅晶片

厚度,另一方面提高切割效率和质量,以达到降低成本的目的^[3]。金刚石线切割技术是一种新技术,在开发应用方面还面临很多挑战。文中在分析金刚石线切割晶片的形貌和力学性能的基础上,提出并探讨了切割机理及相关的核心技术问题。

1 试验材料及方法

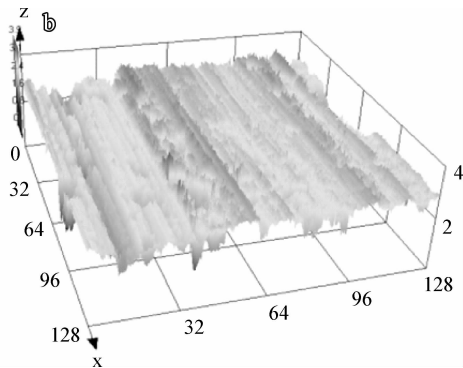
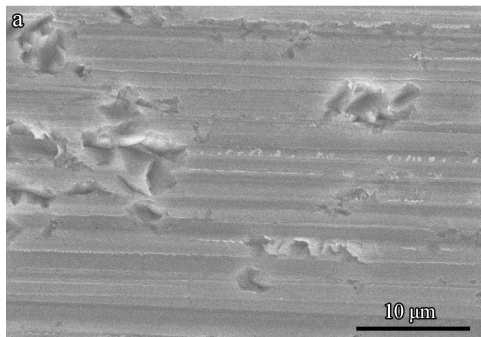
试验材料均为工业金刚石线切割机制备的类单晶硅样品,硅晶片大小为 $156\text{ mm}\times 156\text{ mm}$,厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$,硅片为原始切割状态,未经任何后续处理。硅片表面形貌分析在扫描电镜(SEM)下进行,三维激光共聚焦显微镜(LEXT)用于表面粗糙度测量,光学显微镜用于硅片厚度测量。

硅片力学性能是用四点(线)弯曲测试方法进行的。由于硅片表面存在单向性划痕,四点(线)弯曲按二种方式测试:一种是弯曲方向与划痕方向平行,另一种是弯曲方向与划痕垂直^[4]。断裂强度计算基于最大弯曲载荷。

2 试验结果

2.1 硅片表面形貌

图2(a)显示硅片表面的电子显微镜形貌。与游离磨料切割不同,金刚石线切割硅晶片表面呈现典型二体磨损特征,表面有许多平行划痕,部分划痕边缘还有隆起,局部还有少量剥落微坑。一般而言,这些划痕深度较浅,最大高度差约为 $3.9\text{ }\mu\text{m}$,表面粗糙度也仅为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,如图2(b)的三维形貌图所示。金刚石线切割较稳定,硅片表面各部位形貌及粗糙度都十分相近。这些特征表明,金刚石线切割以塑性变形和划伤为主,以脆性剥落为辅。



(a) SEM image (b) 3D surface topographical map

图2 金刚石线切割硅片表面电子显微镜形貌及三维高度形貌

Fig. 2 SEM image of diamond wire sawn wafer surface and 3D surface topographical map of silicon wafers

2.2 硅片厚度均匀度

图 3 为金刚石线切割硅晶片的厚度与切割位置的关系。可见,硅片厚度变化很小,总体尺寸在 185~195 μm 之间,只在硅片边缘相对较厚(约 205 μm)。金刚石线切割不存在游离磨料切割的厚度渐进变化现象,但会出现硅片厚度局部侧移或变细的情况,如图 4 所示。2 种厚度变化的原因均与切割线振动有关,相邻切割线的对移和反相移动可分别导致硅片厚度的侧移和变细。一般而言,前者通常对硅片性能影响较小,后者则会降低硅片的断裂强度。

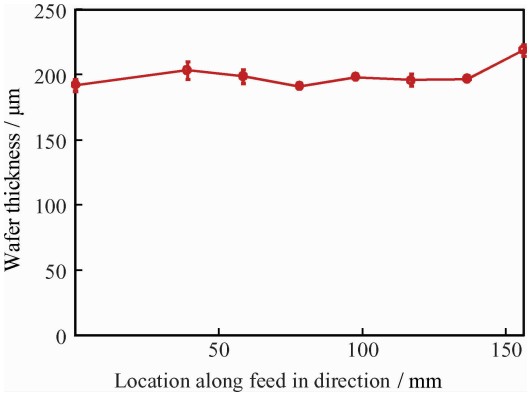


图 3 硅片厚度与切割位置的关系

Fig. 3 Correlation between the wafer thickness and its location along the cutting wire

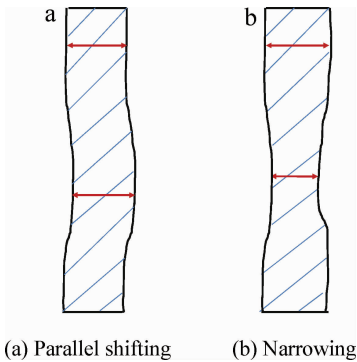


图 4 2 种硅片厚度变化模式

Fig. 4 Schematic diagram of wafer thickness variation

2.3 断裂性能

断裂强度是硅片的重要力学性能指标,它直接涉及到光伏电池产品的成功率和可靠性。图 5 显示金刚石切割硅晶片的断裂强度韦伯分布曲线。由于晶体硅为脆性材料,硅片断裂强度分布较分散;同时由于切割的原因,硅片断裂强度随弯曲方向的变化也很大。当弯曲方向与切割沟槽方

向垂直时,硅片呈现出很高的断裂强度,约在 200~300 MPa 之间。但当弯曲方向与沟槽平行时,硅片的断裂强度较低,约在 80~180 MPa 之间。2 种方向的断裂强度约相差 1 倍,呈明显各向异性。

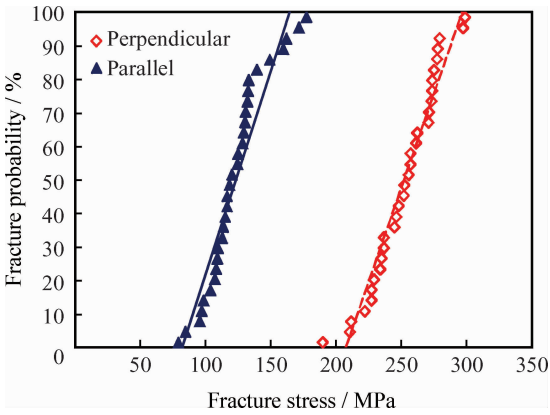


图 5 硅片断裂强度韦伯分布曲线以及与弯曲方向的关系
Fig. 5 Weibull distribution of fracture strength and its relation with bending orientation

观察表明,硅片断裂强度的各向异性与切割形貌,尤其是表面裂纹密切相关。金刚石线切割会导致硅片表面裂纹,这种通常呈单方向性、与划痕方向平行,且裂纹尺寸较大,如图 6 所示。在划痕沟槽和裂纹的共同影响下,硅片断裂强度在裂纹平行方向显著降低。这种现象表明,硅片的断裂强度受表面因素的影响很大。若要提高硅片性能,在减少体缺陷的同时,更需减少表面缺陷。

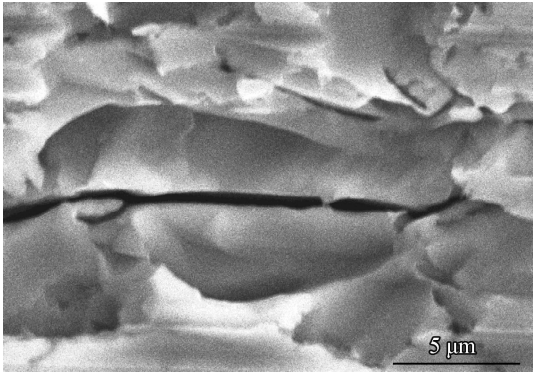


图 6 硅片表面的裂纹形貌

Fig. 6 SEM image of surface cracks on a wafer

3 讨论

3.1 金刚石线切割机理

脆性材料切割加工可按 2 种方式进行:一种

是脆性模式,另一种是塑性模式。前者以裂纹扩展方式进行,高接触应力导致次表面纵向裂纹,其后裂纹又将在应力消失时以横向方式扩展,最后引起材料的脆性剥落,形成微剥落坑。后者则以挤压变形的方式进行,高接触应力导致材料塑性变形,形成连续切屑。游离磨料线切割以三体磨料磨损方式进行,其切割机理则是典型的脆性加工。与其相反,金刚石线切割的磨料固定在切割线上,切割则以二体划伤方式进行。基于切割角度和深度的变化,切割则会出现塑性或脆性,二者的决定因素是临界切割深度^[5]。

试验表明,金刚石线切割通常以一种塑性和脆性混合的方式进行,以塑性切割划痕为主,以脆性剥落为辅。由于脆性剥落对力学性能不利,通常希望在切割过程中有更多的塑性加工方式。然而,事实表明,金刚石线切割中的犁削也会带来长裂纹,对力学性能更为不利。因此应考虑切割线的设计和切削液的选择,以减弱或避免这些不利因素。

金刚石切割线的设计主要涉及磨粒的制备。尽管磨粒固定在金刚石线上,切割过程中磨粒与工件直接接触,但这种接触方式不同于传统的刚体接触。因切割线的弹性,它实际上是一种半柔性接触方式,因此,切割过程中的进给量和切削深度都会随弹性的改变而变化。此外,金刚石磨粒还存在形状、大小、及分布的差别,每个磨粒的切割深度也会不一样。图 7 显示金刚石切割线的电子显微形貌,微小的金刚石磨料以电镀方式涂覆在金属线表面,颗粒的不均匀性显而易见。由于切割过程中线速很大,每个磨粒的切割情况也会变化。这种变化对单个磨粒而言并不明显,但对整个系统而言,则会有强烈变化。从切削力来看,单个磨粒的切割力常较小,仅数微牛顿,但多磨粒叠加形成的切割力则很大,整个切割系统的纵向载荷甚至高达数吨。切割力的变化则会导致系统震动,从而引起脆性剥落和较大的裂纹。由此可见,金刚石切割线对切割系统的影响很大。若要提高线切割性能,应合理设计和制备金刚石切割线。

此外,从塑性加工的持续性来看,还有可能需要使用具有一定粘度的切削液。目前,金刚石线切割均使用水溶性切割液。水溶性切割液一方面可降低成本,另一方面还有利于硅废料的回收。

然而,从表面缺陷和切割机理来分看,高粘度的切割液则具有一定优点。高粘度溶液可增加弹性流体动压效应,从而提高塑性切割的几率;均匀的压力分布还可减小硅片表面的残余应力,从而提高硅片的机械稳定性。

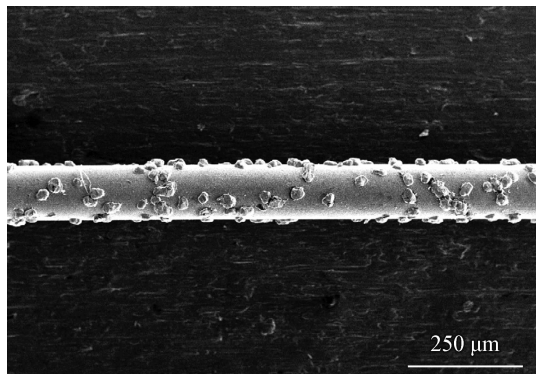


图 7 金刚石切割线的电子显微形貌
Fig. 7 SEM image of a diamond coated wire

3.2 表面形貌对其它工艺及电性能的影响

硅晶片表面形貌对后续工艺的影响在于制绒效果。为了提高硅片表面的光学吸附率,硅晶片需进一步制绒处理。对单晶硅晶片而言,这种处理常是碱性刻蚀,以形成微小金字塔结构;对多晶而言,则用各向同性的酸性刻蚀。然而,由于金刚石线切割会导致高压塑性变形,有时甚至还会形成非晶态结构。这种结构的差异则会带来腐蚀速度的变化,出现局部刻蚀滞后,形成硅片表面条纹状结构,如图 8 所示。显然,这种情况对硅片性能不利,还有待从刻蚀角度改善。

切割工艺对光伏电池电学性能的影响在于金

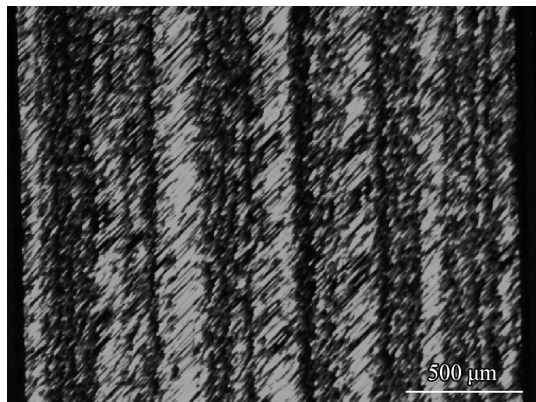


图 8 制绒表面的条带状结构的光学形貌
Fig. 8 Optical image of strip structure on a textured surface

属杂质污染,尤其是电镀镍的污染。微量金属镍及铁都属于有害元素,它们会降低电子载流体寿命,减少发电效率。金属元素的污染与切割线的磨损有关,因而应提高切割线的耐磨性。除金属污染外,光伏电池的电学性能还受表面裂纹的影响。这是因为金刚石线切割所引起的深裂纹难以用化学腐蚀的方法消除,裂缝对硅片掺杂和表面钝化处理均不利,尤其可引起高漏电流,故降低电池效率。

金刚石线切割是一种很有前途的新技术,但仍存在许多亟待解决的问题。与此同时,金刚石线还需考虑价格因素。由于金刚石线价格高,需重复多次使用才能弥补价格差别。重复或往返使用则会引起磨粒的磨损及脱落,由此带来的切割效应还不清楚,尚须进一步深入研究。

4 结 论

金刚石线切割具有表面粗糙度低($0.2\ \mu\text{m}$),硅片厚度均匀($\pm 10\ \mu\text{m}$)等优点,但却存在断裂强度各项异性。沿切割沟槽平行方向的断裂强度仅在 $80\sim 180\ \text{MPa}$ 之间,但与垂直方向的强度却在 $200\sim 300\ \text{MPa}$ 之间,二者相差约一倍。力学性能的差异与表面面貌及裂纹有关。金刚石切割以塑性加工为主,但由于磨粒大小、形态、及分

布的不均匀性和切割线的柔性,切割表面会出现较大的单方向裂纹。鉴于磨粒的关键作用,金刚石线切割应从切割线的设计和制备来考虑提高切削性能。

参考文献

[1] Möller H J. Basic mechanisms and models of multi-wire sawing [J]. Advanced Engineering Materials, 2004(6): 501-513.

[2] Yu X, Wang P, Li X, et al. Thin Czochralski silicon solar cells based on diamond wire sawing technology [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 98: 337-342.

[3] Photovoltaic technologies for the 21st century, 2010, <http://gsi.nist.gov/global/docs/Photovoltaic.pdf>

[4] Yang C, Wu H, Melkote S, et al. Comparative analysis of fracture strength of slurry and diamond wire sawn multicrystalline silicon solar wafers [J]. Advanced Engineering Materials, 2012(14): doi: 10.1002/adem.201200262.

[5] Sharif Uddin M, Seah K H W, Rahman M, et al. Performance of single crystal diamond tools in ductile mode cutting of silicon [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 185: 24-30.

作者地址: 美国佐治亚洲亚特兰大 30332
佐治亚理工学院制造研究所
Tel: +1 404 8943 594
E-mail: chris.yang@gatech.edu

• 学术动态 •

2013 年全国青年表面工程学术会议将在银川召开(第二轮通知)

第 5 届全国青年表面工程学术会议暨表面工程分会第一届青年工作委员会成立会议将于 2013 年 5 月 28~30 日在宁夏银川组织召开。本次会议将通过学术活动和产品展示等交流我国青年表面工程学界在表面工程研究和应用方面取得的最新成果和进展,同时还将产生中国机械工程学会表面工程分会第一届青年工作委员会。

大会的主题是“绿色表面工程及其创新应用”。会议设大会特邀报告、分会报告、展览交流等多种形式。会议目的在于为全国青年表面工程工作者提供自由和活跃的学术交流平台,就表面工程及其交叉领域内的热点问题,特别是节能减排、绿色制造、环境友好、能源等高技术应用等问题展开讨论。会议得到了表面工程领域相关高校、研究所和企业的大力支持,会议将设“特别贡献奖”14 个,用于表彰会议协办和资助单位。与此同时,为鼓励青年表面工作者瞄准国际表面工程前沿开展研究,充分展示高水平研究成果,会议将设“优秀青年论文奖”10 名,用于表彰优秀青年学者,届时将颁发证书及奖金。

(摘自中国机械工程学会表面工程分会 网)