

太阳能硅片精密切割技术及其特性研究 *

林峰^{1,2}, 汪建平¹, 傅建中²

(1. 浙江工业大学浙西分校机电控制工程系, 衢州 324000; 2. 浙江大学现代制造工程研究所, 杭州 310027)

[摘要] 本文在对当前太阳能硅片常见切割技术及其特性进行分析和比较的基础上, 提出数控超声振动切割太阳能硅片技术, 为太阳能硅片的精密切割提供一种新的实用的加工方法。

[关键词] 太阳能硅片; 精密切割; 数控超声振动切割

[中图分类号] TK513

[文献标识码] A

[文章编号] 1003-5451(2010)01-0012-04

Precision Cutting Technology of Solar Wafer and Characteristic Research

LIN Feng, WANG Jian-ping, FU Jian-zhong

(1. West Branch of Zhejiang University of Technology, Quzhou 324000

2. Institute of Modern Manufacture Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

[Abstract] On the basis of the current solar wafer cutting technology and its characteristics, the numerical control ultrasonic vibration cutting solar wafer technology was presented to provide a practical method of processing for the precision cutting of solar wafer.

[Keywords] solar wafer; precision cutting; CNC ultrasonic vibration cutting

引言

随着全球范围内的能源危机日益严重和国际绿色能源工程的飞速发展, 太阳能光伏发电由于环保、洁净、安全、成本逐渐降低等特点已经得到国际上的公认, 成为世界各国竞相开发的重点, 其开发利用是最终解决常规能源特别是石化能源短缺、环境污染和温室效应等问题的有效途径。近年来, 太阳能光伏发电产业虽然得到了蓬勃发展, 但其大规模的利用在短期内仍难以启动, 成本问题一直是制约太阳电池大规模应用的瓶颈, 要真正使太阳能成为替代能源, 太阳电池的发电成本必须接近常规发电方式的成本。因此, 在技术上实现创新和突破, 发展廉价、高效的新一代太阳电池, 是摆在我们面前的迫切任务^[1-2]。

根据对近年来世界太阳电池的统计, 晶体硅太阳电池是目前太阳电池的主流, 它的市场占有率

一直保持在 90% 以上。预计今后 10 年内晶体硅仍将占据主导地位, 并将向高效率、低成本和薄片化方向发展。在整个产业链中, 太阳能硅片的切割成本占到总的制造成本的 30% 左右, 切割工艺的优劣不仅影响硅片的出片率, 更会影响到硅片的表面质量及后续工艺的加工量与复杂性。因此, 在保证光电转换效率的前提下, 深入研究先进的切割技术和切割工艺, 降低硅片加工成本, 提高原材料利用率和生产效率, 对推动太阳能光伏发电产业的发展具有重要的指导意义和应用价值^[3]。

1 太阳能硅片切割工艺要求

太阳能硅片加工工艺流程一般经过晶体生长、切断、外径滚磨、平边、切片、倒角、研磨、腐蚀、抛光、清洗、包装等阶段, 而硅片切片作为硅片加工工艺流程

* 浙江省教育厅科研计划项目(20070899)和衢州市科技计划项目(20061011)

程的关键工序,其加工效率和加工质量直接关系到整个硅片生产的全局。确定硅切片表面质量的主要参数有晶向偏离度、硅片的总厚度偏差 TTV、硅片的弯曲度 Bow、硅片的翘曲度 Warp 等^[3]。这些参数的精度对后道工序的加工起着直接决定的作用。

①晶向偏离度 指晶体的轴与晶体方向不吻合时,其偏离的角度;

②硅片的总厚度偏差 TTV 指硅片的最大与最小厚度之差值;

③硅片的弯曲度 Bow 指硅片表面凹凸变形大小的数值,硅片弯曲度量值定义为 $(a-b)/2$;

④硅片的翘曲度 Warp 指硅片的参考平面与硅片的中心平面的最大与最小距离的差值。

对于切片加工工艺技术的原则要求是^[2]:

①切割精度高、表面平行度高、翘曲度和厚度偏差小;

②断面完整性好,消除拉丝、刀痕和微裂纹;

③提高成品率,缩小刀(钢丝)切缝,降低原材料损耗;

④提高切割速度,实现自动化切割。

由于硅片材料硬度高、脆性大,切片过程容易产生崩碎损坏,很难采用普通的加工方法切割;又因其不导电,不能用电火花等特种加工方法加工。

2 传统太阳能硅片切割技术

在太阳能电池的加工环节中,硅片切割技术一直是个瓶颈。当前太阳能硅片切割常用的方法有:外圆切割、内圆切割和线切割。

2.1 外圆切割技术

外圆切割是最早开发的切割硅晶片的工艺,这种方法与砂轮外圆磨削相似,把薄的金刚石锯片夹持在高速旋转的主轴上,用外径上的金刚石磨粒切割工件。

外圆切割时,噪音大、锯片刚性差,刀片因为太薄且径向承受晶体的压力,容易产生变形和侧向摆动,使晶体材料损耗大,晶面不平整。外圆锯锯切深度受到锯片直径限制,一般不超过直径的三分之一,若增大锯片直径必然降低其刚度,使切割过程中产生摆动,不易保证锯切的直线度。尽管增加锯片厚

度可以提高其刚性,但却增加了锯片成本,而且增加了锯缝宽度,降低了出材率。因此,外圆切割方法已很少使用,主要用于对晶向偏转大的长晶体进行定向切割和大尺寸材料整形切割。

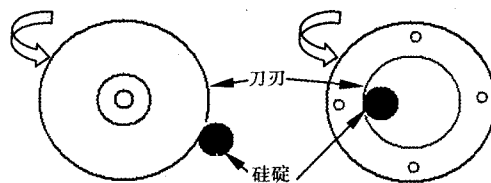


图1 外圆切割、内圆切割原理图

2.2 内圆切割技术

目前,中、小尺寸晶片切割主要采用内圆切割方法,这种方法是以前刀片内径电镀金刚石磨料作为切削刃,内圆切割时,切割刀片由主轴带动高速旋转,同时相对工件径向进给。内圆切割技术成熟,刀片稳定性好,在硬脆材料的切割领域中应用广泛,特别适用于切割硅晶体、陶瓷及硬质合金等硬脆材料。

内圆切割技术优点在于:

①切片精度高,直径为200 mm晶片的厚度差仅为0.01 mm;

②切片成本低,同规格级的内圆切片机价格是线切割机价格的1/3~1/4;

③每片都可以进行晶向调整和切片厚度调整;

④小批量多规格加工时,具有灵活的可调性。

其缺点是:

①晶片表面损伤层较大;

②刀口宽,材料损失大;

③生产率低,每次只切割一片。

2.3 多线锯切割技术

伴随着大直径硅片的使用越来越普遍,内圆锯片由于张紧力作用产生相应的变形,刃口表面为波浪形,尤其是随着内圆刀片径向尺寸的增大,这种变形更加明显,导致内圆锯在高速度旋转时除主轴系统以外还产生附加的轴向振动。内圆锯的结构限制了切割工件的尺寸,一般只能切割直径不超过200mm的硅片,且会产生较大的翘曲变形,加工表面会留下较大的切痕和微裂纹,表层损伤层深度可达10~50 μm。因此对于大直径(直径≥200 mm)和小厚度(厚度≤0.3 mm)的硅片加工,内圆切割从产量和能力上远远不能满足生产要求,多线切割已经

成为主流技术。

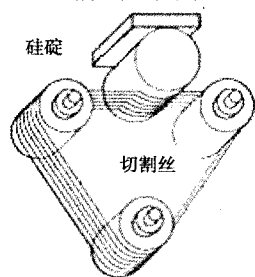


图2 多线锯切割原理图

目前真正用于硅晶体切片的多线切割技术只有往复式自由磨料线锯切割。其原理是利用一根钢丝缠绕在一组锯丝导轮上,形成一排以一定间隔排列的切割线。切割时,钢丝按一定方向运动,同时工件和钢丝相互压紧,当含有游离磨料的切削液浇注到工件和锯丝之间时,锯丝快速运动将切削液带入工件切缝,产生切削作用。多线锯切割每小时可切割 300~2000 平方英寸(大约为内圆切割的 3~5 倍),锯痕损失仅为 0.2~0.3 mm(大约为内圆切割的 60%),损伤层厚度为 5~15 μm ,详见表 1。但是由于发展历史短,技术还有待于进一步成熟,主要表现为:

- ①片厚不均匀,误差较大;
- ②切片厚度调节困难,切割过程中检测控制难以实现;
- ③风险大,一旦断丝,整根晶棒报废;
- ④成本高,金属线为一次性使用,切削液只有少部分进入切痕起作用;
- ⑤设备主要依赖进口,价格昂贵,进口一台需要 300 多万人民币^[4-7]。

表 1 内圆切割与多线锯切割特性比较

项 目	内圆切割	多线锯切割
切割方法	固定研磨剂加工	自由研磨剂加工
切割的表面特性	刀片的印痕迹	线锯的印痕迹
损伤层深度/ μm	20~30	5~15
每次切割的硅片数量/片/次	1	200~400
刀损/ μm	300~500	150~210
最小可切硅片厚度/ μm	约 350	约 200
最大可切硅晶棒直径/mm	200	300
硅片的总厚度偏差 TTV/ μm	<25.0	<15.0
硅片的翘曲度 W_{avg} / μm	严重,>50.0	轻微,5~10.0

3 数控超声振动切割技术

利用超声振动的能量对材料进行切割的理念,

在国外很早就得到了重视^[8]。但直到上世纪 90 年代,奥地利 GFM 公司才将这一概念实际应用于航空材料加工领域,开始对多种复合材料进行超声切割。该项技术的应用至今已有近 20 年,欧洲和美国的各大飞机制造厂和航空复合材料的研发生产企业都已广泛地采用超声切割设备用于生产。而数控技术是二十世纪五十年代发展起来的机床控制新技术,是自动化制造系统的核心技术之一,如果将数控技术应用于传统的超声波加工技术中,就可以通过计算机控制工件和工具的相对运动关系而自动加工出所需工件,提高超声波加工的质量和效率,进一步满足企业自动化生产的需要。

3.1 数控超声振动切割原理及结构

超声波切割基本原理是利用一个电子超声发生器产生频率为 20~30 kHz 的超声波,通过置于超声切割头内的超声——机械转换器将原本振幅和能量很小的超声振动转换成同频率的机械振动,再通过共振放大,得到足够大的、可以满足切割工件要求的振幅和能量(功率),最终传导至超声切割头顶端的刀具上,由超声切割头对工件进行切割加工。

根据超声振动切割原理,超声波切割装置一般包括超声波发生器、超声振动系统、超声波切割机床、磨料悬浮液冷却循环系统等几部分组成。

①超声波发生器主要是产生一定功率的超声频率振荡,以提供刀具往复运动和切割工件所需的能量。

②超声振动系统主要包括超声换能器、变幅杆及刀具头三部分,其主要作用是将高频振荡变成所需的机械振动。图 3 为用于硅片切割的超声波切割刀头,刀头 1.超声波发生器 2.超声振动系统由一组厚度为 0.127 mm 的软钢片铆合而成,每片间隔 1.14 mm (可根据硅片厚度做相应调整),刀具伸出高度应考虑刀片磨损后重磨的使用次数,最外边刀片应高出其它刀片 0.5 mm,作为切割时导向用。刀具头与变幅杆的连接为焊接。

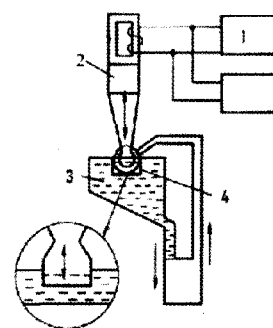
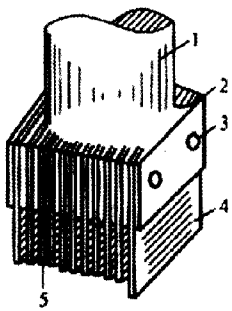


图3 超声波切割原理



1.变幅杆 2.焊缝 3.铆钉
4.导向片 5.刀片组
图4 超声波切割刀头

③超声波切割机床结构比较简单,主要实现刀具的进给运动及调整刀具与工件之间相对位置的运动,为达到自动化加工目的,可以在现有的数控机床上进行改装。

④磨料悬浮液及冷却循环系统采用泵供给可以实现悬浮液在切割

区域的良好循环,若能够在刀具与变幅杆中间开孔,使悬浮液从孔中流动,则对提高切割质量有较好的效果^[9-12]。

3.2 数控超声振动切割特点

①主要切割对象为硬脆材料

由于超声波切割是靠磨料及液体分子的不断冲击和空化作用实现的,因此主要切割对象为硬脆材料,尤其是电加工难以切割的材料。

②切割精度高

由于切割过程是依靠微小磨料的作用,被切割表面无组织变化,无残余应力,其切割尺寸精度可达0.01~0.02 mm,表面粗糙度可达0.08~0.63 μm 。

③工件在切割过程中受力较小

超声波切割过程中,不存在横向摩擦力,有利于加工薄壁、窄缝及低刚度工件。

④切割效率介于内圆切割和多线锯切割之间,相当于普通无振动切割的三倍^[10]。

4 结语

综上所述,目前太阳能硅片精密切割技术的主要特点可归纳如下:

①对于中、小直径(直径在200 mm内)的硅片加工,一般采用内圆切割,且适用于小批量多规格的加工。

②对于大直径(直径 ≥ 200 mm)和小厚度(厚度 ≤ 0.3 mm)的硅片加工,通常采用多线锯切割。但多线锯切割机多依赖进口,价格昂贵,切割成本较高,一般较小规模的企业难以承受。

③相比之下,超声振动切割在性价比方面具有较大的优势。其切割效率相当于普通无振动切割的三倍,并且可以降低切削力,提高切割精度,延长工具的使用寿命。

随着超声波加工技术和数控技术的日渐成熟,数控超声切割技术的优势也将日益显现,并将得到国际和国内专家学者的高度重视。展望未来,相信随着现代工业和太阳能产业的发展,凭借超声加工技术在晶体硅等非金属硬脆材料加工方面的得天独厚优势,太阳能硅片的数控超声切割技术将具有较好的发展前景。

参考文献:

- [1] 吕金铭.国内外光伏发电的新进展[J].中国建设动态(阳光能源),2007(01)
- [2] 张颀宗.硅单晶抛光片的加工技术[M].北京:化学工业出版社,2005-08
- [3] N.B.John, C.La., Longwood. Semiconductor wafer slicing method united state patent[P].1998,No:5718615
- [4] Pei.Z.J, Alan Strasbaugh, Fine grinding of silicon wafers[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture,2001
- [5] 任丽,李彦林,羊建坤等.超薄太阳能硅片线切割工艺中悬浮液特性研究[J].太阳能学报,2008,03
- [6] Rusnaldy, Tae Jo Ko, Hee Sool Kim. Micro-end-milling of single-crystal silicon [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture , 2007,47: 2111-2119
- [7] 崔巍,高军.超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J].航空制造技术,2006,06
- [8] Michael John Radley Young and Stephen Michael Radley Young[J]. Ultrasonic Cutting Tool. Reviews of Acoustical Patents (U.S.A),2003,02
- [9] 曹凤国.超声加工技术[M].北京:化学工业出版社,2004
- [10] Roman V.Barsukov, Alexey N.Slavin, Vladimir N.Khmelev. An Equipment for Continuous Joint Ultrasonic Welding and Cutting of Various Thermoplastic Polymeric Materials [J]. IEEE, 2004
- [11] Norman E.Gibbs. Ultrasonic Cutting of Quartz Wafers. Meeting of Acoustical Society of America[J]. IEEE,1955,07

(收稿日期 2009-02-10)