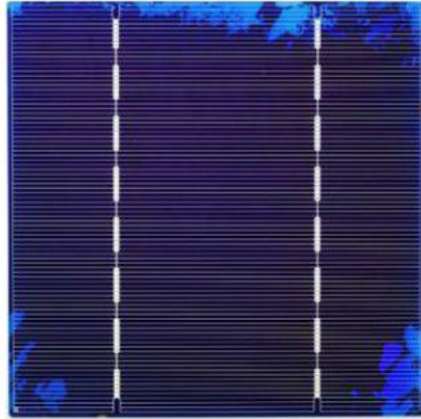


准单晶硅技术

1. 准单晶技术简介

准单晶的概念：准单晶（Mono Like）是基于多晶铸锭的工艺，在长晶时通过部分使用单晶籽晶，获得外观和电性能均类似单晶的多晶硅片。这种通过铸锭的方式形成单晶硅的技术，其功耗只比普通多晶硅多 5%，所生产的单晶硅的质量接近直拉单晶硅。简单地说，这种技术就是用多晶硅的成本，生产单晶硅的技术。



1.1 传统的单晶硅和多晶硅技术

我们知道，单晶硅一般是采用直拉法（CZ 法）制得，用特定晶向的单晶籽晶进行引晶，经过旋转提拉得到目标晶向的单晶硅棒，所得产品仅含一个晶粒，具有低缺陷、高转换效率等特点。目前，单晶硅电池片大规模生产的转换效率已经达到 18%，但是该方法对原料及操作要求高，且单次投料少，产品成本较高，太阳能电池衰减较大。多晶硅主要是采用定向凝固方法制得，单次投料量大，具有易操作、低成本等特点，电池片衰减比单晶硅片小很多，但在传统铸锭条件下，在铸锭多晶中往往含有大量晶界及缺陷，使得多晶硅太阳能电池的转换效率较单晶硅电池约低 1.5%~2%。

1.2 准单晶技术

准单晶技术的核心是单晶铸锭技术，采用铸锭工艺生产出的类似单晶甚至全单晶的产品，将单晶硅及多晶硅的优势相合。相较于多晶，准单晶硅片晶界少，位错密度低；太阳能电池转换效率高达 17.5% 以上。与单晶硅片相比，准单晶电池的光致衰减低约 $1/4 \sim 1/2$ ；投炉料大，生产效率高，切片工艺简单，成本低。

2. 准单晶铸锭技术

2.1 实现方法

实现铸锭单晶的方法有两种，如下：

（1）无籽晶铸锭。无籽晶引导铸锭工艺对晶核初期成长控制过程要求很高。一种方法是使用底部开槽的坩埚。这种方式的要点是精密控制定向凝固时的温度梯度和晶体生长速度来提高多晶晶粒的尺寸大小，槽的尺寸以及冷却速度决定了晶粒的尺寸，凹槽有助于增大晶粒。因为需要控制的参数太多，无籽晶铸锭工艺显得尤为困难。

（2）有籽晶铸锭。当下量产的准单晶技术大部分为有籽晶铸锭。这种技术先把籽晶、硅料掺杂元素放置在坩埚中，籽晶一般位于坩埚底部，再加热融化硅料，并保持籽晶不被完全融

掉，最后控制降温，调节固液相的温度梯度，确保单晶从籽晶位置开始生长。

2.2 温度控制和工艺控制

准单晶铸锭对温度控制和工艺控制提出了很高的要求。为了满足准单晶铸锭的要求，铸锭炉必须有严格的温度梯度及凝固速度控制，适合的界面形状，成核或单晶控制，流动控制。目前已有多个厂家可以提供准单晶铸锭设备，如绍兴精功 JIL500/JIL660/JIL800(G6),美国 GTDSS450HP/DSS650(G5)，北京京运通 JZ460/JZ660(G6)，德国 ALDSCU450/SCU800，法国 Cyberstar650/800。另外，欧美日厂家如 REC（ALD 改进型），SchottSolar（VGF），京瓷（VGF 类型）都有专门设计的炉子，效果不错。

其中 ALD 早期为 Bpsolar 产品研发过设备。早在 2006 年，Bpsolar 已围绕铸锭单晶这一主题做了较多工作，并开发了 MONO2 产品，其专利 US2007/0169684A1 报道了多种方法。其中有一种方法是将籽晶与硅料分开放置，将熔融硅液倒入铺有籽晶的容器中进行长晶。后由于其总公司将重点放在了化石燃料方面，Bpsolar 终止了铸锭单晶的研究。

准单晶产品单个晶粒面积可达整张硅片的 90%以上，位错密度比较低，部分硅片约 95% 及以上区域几乎无位错，边缘存在"带状"分布高位错区域，部分硅片中含亚晶现象。以昱辉 virtuswafer 产品为例：靠近坩埚面的区域为多晶，其他区域根据长晶体情况，若长晶体情况较好的话基本为单晶。

3. 电池工艺的改进

准单晶产品也引发了各个企业对电池工艺的改进。硅片的晶向控制、位错密度、碳氧浓度和杂质分布，以及侧边问题会直接影响电池片效率。不同于普通多晶，准单晶产品更适合碱制绒工艺，形成倒金字塔型织构化表面，可显著提高成品电池片效率。晶澳太阳能针对准单晶电池片发明了先酸制绒后碱制绒的特殊工艺，目前 maple 系列电池片效率已经达到了 18.2%。然而由于碱制绒的各项异性，准单晶中尤其边缘，非指定晶向处无法腐蚀，会在电池表面形成高亮区域，影响组件成品的外观。

4. 准单晶技术的决定性因素

4.1 技术研发要点

- (1) 温度梯度改进。针对热场研发以改良温度梯度，同时还要注意热场保护；
- (2) 晶种制备。研究发现，准单晶晶种制备方向将朝着超大超薄的方向发展；
- (3) 精确熔化控制。这一环节非常难以控制，它决定准单晶是否能够稳定生产，因此需要一个与之对应的精准熔化控制设备。据了解，为获得稳定的控制工艺，凤凰光伏开发了一套针对准单晶专用的晶种融化控制设备，可以在 0.5mm 的时候进入长晶阶段；
- (4) 位错密度。在很多生产过程中，效率衰减总是不可避免，为此把位错密度控制到最低，是此项工艺的关键；
- (5) 边角多晶控制，即合理有效控制边角多晶的比例；
- (6) 铸锭良率提升。目前良率大约在 40%~60%之间，还有待提高。

4.2 量产决定性因素

- (1) 可行的工艺路线。如果开发出的准单晶没有可行的工艺路线，准单晶产品将只能处于实验室阶段；
- (2) 是稳定的控制方法；
- (3) 精准熔化控制设备；
- (4) 低廉的改造成本及生产成本，即在原有铸锭炉的基础上实现转型，从而降低成本。凤

風光伏日前宣布，该公司通过改造 GTSolarDDS450 型号炉，成功实现全球准单晶第一次量产，且成本低于晶硅电池。

5.准单晶技术的意义

准单晶不仅是高效硅片的一种可行性方式，同时也是铸锭厂降低成本的一个途径。关于成本控制问题，众所周知，在电池组件的利用率上，直拉单晶硅的硅棒呈圆柱状，制作的光伏电池片需将四周切掉，组成的电池组件成品率为 50%左右。相比较而言，准单晶硅铸锭为方形铸锭，制作电池片的切片也是直角方形，组成的电池组件成品率约为 65%。在工艺成本上，直拉单晶硅为 160 元/公斤，而准单晶硅为 60 元/公斤。从光伏电池总成本上考虑，在硅原料、切片、组件等其他成本一定的前提下，整个生产链的成本可因准单晶硅铸锭技术降低 10%。但要做到该技术的低成本，不仅需要掌握相关工艺及理论知识，熟练的实际操作也必不可少。最后一个因素即高可靠性，核心表现为生产出来的产品能不能承受那么大的温度差。

太阳能厂技术高层人员分析，多晶硅晶圆在未来仍有主流优势，相信在市场上仍会有相当长的生命周期，虽然因多晶硅晶圆的晶格问题使 17%的转换效率已到极限，但除了成本门坎低外，其氧含量低、光衰少仍为优势；单晶拉晶完美、效率高，但长晶时间久产量少、氧含量高、光衰问题则为弱势；至于类单晶产品，则拥比多晶效率好成本优，且没有光衰现象的问题。

以目前三者的价格分布上，多晶硅晶圆产品均价约在 1.2 美元、类单晶在 1.35-1.4 美元、单晶则在 1.6-1.7 美元；而在效率分布上，多晶效率天险约在 17%、类单晶可达 17-18.5%、单晶则可达 18.5%以上的水平。

然面对类单晶的异军突起，单晶业者也不甘示弱，单晶业者认为，类单晶仍有成晶比率低，也就是一根长晶柱中仅有最中间的精华段才可做成类单晶，以及种晶来源等两问题，使类单晶的生产成本不见得比单晶有优势，未来在市场上竞争不一定能抢到便宜。

下游厂商则认为，太阳能往高效率竞赛已是趋势，但在此趋势下因价格仍相当严峻，故产品性价比仍是相当重要，若单晶价格可再亲民、或类单晶效率可有再进一步突破，未来可望取得主流地位。

附：晶澳太阳能对传统的直拉单晶法和新推出的准单晶铸锭法进行了对比：

——直拉单晶方法生产的单晶硅制造的太阳能电池最高转换效率为 18.5%，采用准单晶铸锭生产的硅材料所制造的太阳能电池转换效率为 18.3%；

——直拉单晶硅每炉的投料约为 100 公斤，准单晶硅铸锭炉的单次投料达到 430 公斤，投料量增加为前者的四倍；

——基于直拉单晶硅材料生产的电池片的衰减率为 2%以上，基于准单晶铸锭所生产的电池片衰减率降低至 0.5%以下，并且性能更稳定；

——通过直拉法生产的单晶硅棒为圆柱形，制作太阳能电池片时需要将四周切掉，所有硅料利用率仅由 50%左右，而准单晶铸锭法生产的方形单晶硅锭为方形，所以硅料利用率可以提升至 65%；

——工艺成本上，直拉单晶成本为 160 元人民币/公斤，准单晶铸锭的成本仅为 60 人民币/公斤，因此可以影响整个生产链的生产成本降低 10%左右。

附：多晶单晶的转化效率和光衰问题

一般认为单晶的效率大约比多晶高 1~2%，目前号称的准单晶比单晶的效率小于 0.5%。

直拉单晶电池片衰减率在 2%以上，而准单晶铸锭在 0.5%以下。

这是什么原因造成的？

我们先了解一下两种方法所用坩锅。硅单晶使用的是熔融石英坩锅，虽然目前大部分坩锅都采用了涂层来抗侵蚀，但是 SiO₂ 中氧还是大量熔入硅液从而进入晶体。铸锭多晶硅使用的是陶瓷石英坩锅，使用氮化硅颗粒涂层用来做为脱模剂，带来的好处是可以避免黏结坩锅拉裂硅多晶锭、同时也避免了 SiO₂ 中的氧进入；带来的一个缺点引入了不熔杂质氮化硅，在成晶的时候有更过的晶核，基本不可能唯一晶核成晶。

从原理上和大量的实验数据证明，杂质含量高决定了太阳能电池的效率相对会比较低；而在杂质存在的情况下氧含量高的硅材料光衰相对高。单晶硅电池的杂质含量相对低、但是氧含量相对多晶硅电池高，这就是为什么单晶硅电池效率相对高、光衰相对也高。而多晶硅电池材料杂质高、氧含量相对低、同时由于多晶的界面效应带来了更好的分凝排杂效应，多晶的效率相对单晶不是低太多、光衰更低。

附：国内光伏企业研究准单晶概况

晶龙集团

2011 年 3 月 28 日，晶龙集团宣布其旗下的东海晶澳太阳能科技有限公司生产的“准单晶铸锭量产一号锭”顺利下线，这标志着晶龙集团不仅成功研发出世界领先的准单晶铸锭技术，也率先实现了该创新技术的产业化。据了解，投资 1.5 亿元的试量产一期项目已经有 12 台准单晶铸锭炉投产，预计将实现年产 65MW 准单晶硅锭，年销售收入 3 亿元。同时，投资 4 亿元的二期 200MW 准单晶硅铸锭项目也正在实施中，2011 年底达产后还将增加 32 台准单晶硅铸锭炉，预计将实现年销售收入 10 亿元。早在 2009 年，晶龙集团就一次性投入 3000 万元作为准单晶专项研发经费。

晶澳太阳能

2011 年 6 月 8 日，晶澳公司在德国 Intersolar 展会上宣布其所研发的高效多晶电池“晶枫（Maple）”正式启动规模性量产。量产后的转换效率平均可达 17.5%，最高可达到 18.2%。该产品应用了由晶澳自主研发的“超大晶粒准单晶硅铸锭”技术，其显著的特点是低成本，高效率。从品质上比较，直拉单晶转换率可达 18%，多晶硅一般在 16%-17%左右，而采用准单晶铸锭技术生产的“晶枫（Maple）”产品最高的转换率可以与单晶硅媲美，高达 18.2%；而在成本上，“晶枫（Maple）”与多晶硅铸锭工艺相当。

保利协鑫

近期，中国最大的硅片企业保利协鑫也已经试用准单晶技术成功，预计待其准单晶技术成熟后将大规模推广。

昱辉阳光

昱辉阳光于 2011 年 1 月 14 日报道：公司近日宣布已成功研发出一种名叫“Virtus Wafer”的新型多晶硅硅片，该产品能够提高太阳能电池转换效率至 17.5%，较行业标准高出 1%。硅片光致衰减率在 0.1%左右，比单晶硅 4%的衰减率低了一个数量级。在弱旋光性（与总发电量相关）方面，Virtus 硅片与普通多晶、单晶没有明显差异。较之市场上常规的准单晶，Virtus 硅片既有相同的地方也有创新之处，为此在技术创新方面，昱辉阳光申请了 6 项专利技术。

无锡尚品

2011 年 7 月 8 日，无锡尚品太阳能宣布其准单晶生产工艺试验成功，其转换效率在 18%以上，利用率超过 65%。

凤凰光伏

2011 年 6 月 18 日，在上海举行的“2011 年准单晶技术与市场发展趋势暨凤凰光伏新品发布

会上，凤凰光伏正式发布了其准单晶产品。凤凰光伏相关负责人表示，公司历经半年时间自行研发、实验、小批量生产测试，通过对 GT 铸锭炉改造实现了准单晶的量产能力，并有效解决了等温曲线精确控制问题、0.5CM 厚度超大尺寸无损伤籽晶制备技术和超低成本应用问题、位错等影响产品品质问题、电池制造工艺匹配问题，从而为客户提供专业的应用意见和系统解决方案。

附：国内已经公开的相关专利

201010520745.2	一种准单晶硅片的制绒方法	晶澳太阳能有限公司;东海晶龙晶硅光伏材料研究院有限公司;东海晶澳太阳能科技有限公司
201110265315.5	一种准单晶硅片的制绒方法	浙江向日葵光能科技股份有限公司
201010564154.5	一种石英坩埚和铸造准单晶的方法	奥特斯维能源（太仓）有限公司
201010198142.5	一种准单晶硅的铸锭方法	晶海洋半导体材料(东海)有限公司;绍兴县精功机电研究所有限公司