

多晶硅期货&期权专题报告

2024年3月5日

分析师

国联期货研究所

证监许可[2011]1773号

期货交易咨询业务资格:

蒋一星

从业资格号:F3025454

投资咨询号:Z0013829

董娇雄

从业资格证号: F03114109

晶硅崩崩-多晶硅上市前瞻 (一)

多/单/N/P 晶硅如何辨别, 生产技术
迭代升级

相关报告

硅期将至---工业硅基本面专题

报告 (一) 工业硅概述篇

硅期将至---工业硅基本面专题

报告 (二) 工业硅供需格局分

析篇

硅期将至---工业硅基本面专题

报告 (三) 工业硅流通、定价

方式与价格特征篇

目录

导读.....	1
一、什么是多晶硅与单晶硅.....	2
二、多晶硅与单晶硅的同样性与区别.....	3
三、什么是 N/P 型多晶硅.....	3
四、多晶硅分类.....	4
4.1 按纯度要求及用途不同，可以将多晶硅分为太阳能级多晶硅和电子级多晶硅.....	4
4.2 根据硅料掺入杂质及导电类型的不同，太阳能级多晶硅主要分为 N、P 型.....	5
4.2.1 如何区分 N/P 硅料.....	5
4.2.2 N 型硅料设计的注意事项.....	6
4.3 根据表面质量的不同，可划分为致密料、菜花料和珊瑚料。.....	7
五、多晶硅的冶炼工艺.....	8
5.1 生产工艺双技术迭进与区别.....	8
1.5.1.1 改良西门子法（棒状硅）.....	8
1.5.1.2 硅烷流化床法（颗粒硅）.....	9
5.2 改良西门子法与硅烷法流床法的区别.....	10
5.3 其他工艺对比.....	11
六、单晶硅冶炼工艺.....	13
6.1 直拉法单晶硅生长原理.....	13
6.2 直拉法单晶硅工艺流程.....	13
6.3 新型直拉技术——更适用未来 N 型硅片的特点.....	14
国联期货研究所.....	15

图表目录

表 1：N/P 硅料区别.....	6
表 2：历年多晶硅的国标区别.....	7
表 3：改良西门子法与流化床法的区别.....	10
表 4：多晶硅其他冶炼工艺对比.....	11
图 1：多晶硅、单晶硅、非晶硅内部构造.....	2
图 2：N/P 硅料结构.....	4
图 3：太阳能级多晶硅国家标准.....	5
图 4：改良西门子法生产工艺.....	8
图 5：硅烷流化床法生产工艺.....	9
图 6：直拉法单晶硅工艺流程.....	13

导读

针对晶硅五花八门的名称，如何准确的认识它，且在我们进行的过程中，针对同一种工艺（西门子法）下的产品，市场普遍不同叫法鱼龙混杂，比如硅料、多晶硅、单晶硅、晶体硅、区熔级半导体硅等，其次在下游需求匹配后出现的 N 型硅料、P 型硅料等均有出现，故而在多晶硅即将上市前，我们需要弄懂不同名称的“多晶硅”以及其工艺、元素要求。本文将全面的带您了解多晶硅，方便广大投资者清晰的认识下一个新能源品种“多晶硅”。

在整个光伏产业链发展中，光伏电池有各种技术流派，晶体硅电池、薄膜电池、有机电池、染料敏化电池、钙钛矿等等。在众多流派中，晶体硅电池一直牢牢占据霸主地位，自 2006 年以来市场份额一直在 80% 以上。然而，晶硅电池内也有竞争。单晶硅电池与多晶硅电池之间的竞争，从来就没有停歇过，近期愈演愈烈。与此相对应的上游原料端单晶硅与多晶硅的技术路线今年来也是迭代更新，掌握市场话语权，顾名思义也就是成本即技术，对于技术流中的原料要求也随着终端技术在运动变化，故而在我们去定义我们多晶硅的标准的时候会存在很多问题，譬如目前主流的 N/P 硅料技术，N 型硅料已经演变成主流，与此同时在 N 型硅料的要求中，对未来的期货上市后交割是否存在困难，我们还需剖析关键因素，究其根源。

为此我们针对多晶硅上市做专题系列报告分享，本文为系列专题报告（一），为大家介绍多晶硅的由来，如何去分辨市场上各类多晶硅，以及生产工艺；后续将会为大家带来多晶硅发展过程中的供需情况、成本架构、期货研究的架构体系搭建、以及期货合约的解析等。

一、什么是多晶硅与单晶硅

首先了解一下“硅”为何物，在众多名称下，其实本质核心元素就是“硅元素”，其硅元素(外文名:silicon)是一种类金属元素，化学符号为Si，原子序数为14，属于元素周期表上的第三周期IVA族，地壳中第二丰富的元素。1824在瑞典斯德哥尔摩，由J.J.Berzelius发现。其相对原子质量为28.0855，有无定形硅和晶体硅两种同素异形体。硅极少以单质的形式在自然界出现，而是以复杂的硅酸盐或二氧化硅的形式，广泛存在于岩石、砂砾、尘土之中。

根据上述百科得知按照“硅元素”的可将分为**无定形硅（非晶体硅）和晶体硅两种**，

非晶硅又称无定形硅：单质硅的一种形态，棕黑色或灰黑色的微晶体，不具有完整的金刚石晶胞，纯度不高。熔点、密度和硬度也明显低于晶体硅。

根据物理学定义我们可将晶体硅具体分为多晶硅、单晶硅；具体含义如下：

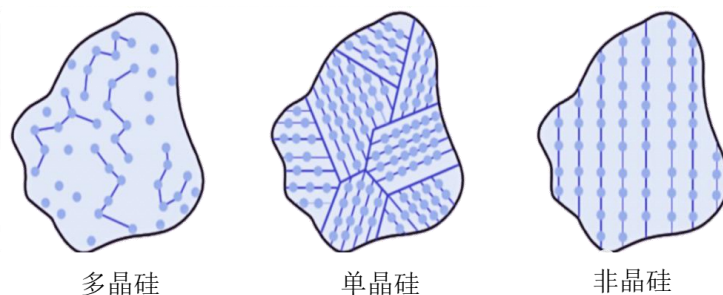
多晶硅：熔融的硅在过冷条件下凝固时，硅原子以金刚石晶格形态排列成许多晶核，如这些晶核长成晶面取向不同的晶粒，这些晶粒在宏观尺度上是随机取向的，但是每一个晶粒内部的取向是一致的。则这些晶粒结合起来，就结晶成多晶硅；

单晶硅：指物质内部的原子或离子或分子的排列是整齐划一的，从一端到另一端都保持相同的取向，整个晶体只有一个晶向，不含晶界。

非晶硅与晶体硅的区别优势：

非晶硅薄膜材料相较于晶体硅表现出更加复杂多变的电学性质，此外，其光吸收系数较高、光电转换能力较强。这使得其在太阳能电池等领域有着较高的应用价值和优势，已成为太阳能电池的核心原材料之一。

图 1：多晶硅、单晶硅、非晶硅内部构造



来源：硅业协会 国联期货研究所

目前市场统称的多晶硅（硅料）主要是指硅锭、棒状硅与颗粒硅，单晶硅则是已经用棒状硅通过单晶硅制成工艺后的产品统称。多晶硅主流工艺主要包括西门子法（硅锭、棒状硅）和硅烷法（颗粒硅），以硅料企业的西门子棒状硅和颗粒硅为原料可制备下游两类产品，通过热交换法或布里曼法制备成的多晶铸锭（物理态上的多晶硅），以及通过直拉或区熔法制备成的单晶硅棒（物理态上的单晶硅）。而两种工艺区别：前者棒状硅料主要呈现的晶面不一致，各向生长，是属于物理形态上的多晶硅产物，后者硅烷法生产的颗粒硅不具有完整的晶胞，其属于非晶硅。而单晶硅呈现的单一晶面生长形态还需要在作为棒状硅的基底进一步的单晶硅生产工艺---拉晶，根据晶体生长方式的不同，可分为区熔单晶硅和直拉单晶硅。直拉单晶硅是利用切氏法制备单晶硅，称为 CZ 单晶硅。

二、多晶硅与单晶硅的同样性与区别

1. 同样性

（1）**初始来源材料都是原生多晶硅（俗称：硅料）**：根据下游的需求制备成电池片的时候，单晶硅电池和多晶硅电池的初始原材料都是原生多晶硅，类似于微晶状态存在。要具备发电能力，就必须将微晶状态的硅制成晶体硅，而晶体硅的晶向需要精确控制。

（2）**单晶电池和多晶电池在制程上唯一无法轻易互换的就是晶体生长环节**：在这个环节，原生多晶硅在单晶炉内会生产成单一晶向、无晶界、位错缺陷和杂质密度极低的单晶硅棒。多晶晶体的生长工艺本身决定了它无法生长出大面积单一晶向的晶体（单晶），多晶的本质就是大量的小单晶的集合体。

2. 区别

1、物理性质不同

多晶硅在力学性质、光学性质和热学性质的各向异性方面，远不如单晶硅明显，多晶硅几乎没有导电性；

2、外观不同

单晶硅的四个角呈现圆弧状，表面没有花纹；而多晶硅的四个角呈现方角，表面有类似冰花一样的花纹。

三、什么是 N/P 型多晶硅

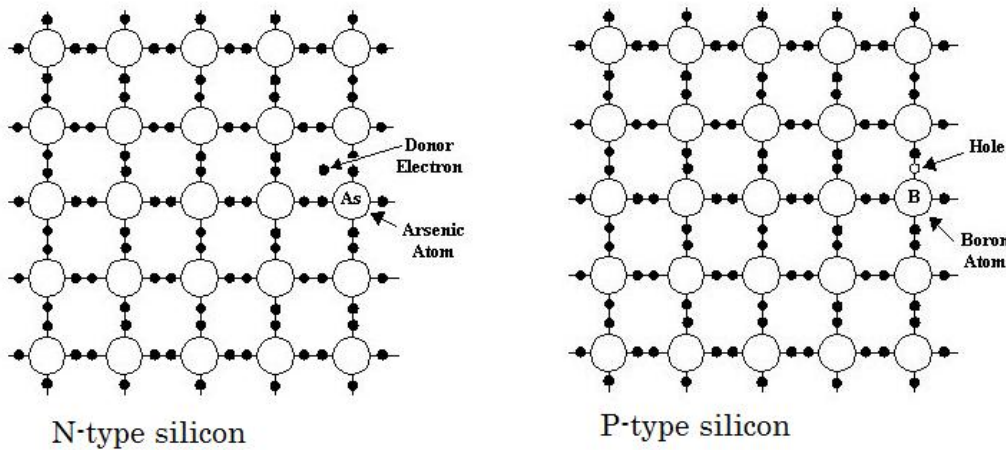
所谓 N/P 硅料其实都是多晶硅，也就是上述所说的硅锭、棒状硅、颗粒硅根据纯度、下游应

用不一来定义的，取决于它的掺杂元素。纯净的硅是半导体，其本身导电性不强，但是通过添加少量的掺杂元素，可以显著提高其导电性。

N型硅：在硅中添加五价元素如磷（P），砷（As）等，使得硅中存在额外的自由电子，因此这种硅被称为N型硅（负电子）。磷与硅相溶性更差，制造工艺复杂，短期成本偏高，优点在于N型少子寿命要比P型高出1-2个数量级，温度系数低导致高温条件下可获得加高输出功率，电池效率做得更高。

P型硅：在硅中添加三价元素如硼（B），铝（Al）等，使得硅中存在“空穴”（缺乏电子的地方），这些空穴可以接受电子，因此这种硅被称为P型硅（正空穴）。

图 2：N/P 硅料结构



来源：国联期货研究所

高纯的单晶硅是重要的半导体材料：在单晶硅中掺入微量的第 IIIA 族元素，形成 p 型硅半导体；掺入微量的第 VA 族元素，形成 n 型和 p 型半导体结合在一起，可做成太阳能芯片，将辐射能转变为电能。在开发能源方面是一种很有前途的材料。多晶硅具有金刚石晶格，晶体硬而脆，具有金属光泽，能导电，但导电率不及金属，且随温度升高而增加，具有半导体性质。晶态硅的熔点 1410℃,沸点 2355℃，无定形硅是一种黑灰色的粉末。

四、多晶硅分类

根据上述针对目前市场对多晶硅的名称，可以发现其均由下游应用决定其多晶硅的使用，根据原生多晶硅通过不同工艺生产后，对其硅含量、以及杂质、应用进行分类可以得到：

4.1 按纯度要求及用途不同，可以将多晶硅分为太阳能级多晶硅和电子级多晶硅

太阳能级多晶硅主要用于光伏电池的生产制造，而电子级多晶硅作为芯片等生产的原材料，广泛应用于集成电路产业。太阳能级多晶硅的纯度为 6~8N，即要求杂质总含量低于 10⁻⁶，多晶硅的纯度需达到 99.9999% 以上。

而电子级多晶硅纯度要求更为严格，最低为 9N，目前最高可达 12N。电子级多晶硅生产难度较大，国内掌握电子级多晶硅生产技术的企业较少，仍较为依赖进口。目前太阳能级多晶硅产量远大于电子级多晶硅，前者大约为后者的 13.8 倍，预计随着光伏装机量的迅猛提升，太阳能级多晶硅的需求增速将高于电子级多晶硅。

4.2 根据硅料掺入杂质及导电类型的不同，太阳能级多晶硅主要分为

N、P 型

根据《太阳能级多晶硅》（GB/T25074-2017）国家标准分类规定，太阳能级多晶硅根据外形分为块状和棒状；根据导电类型分为 N 型和 P 型。其中，当硅中掺杂以施主杂质（V 族元素，如磷、砷、锑等）为主时，以电子导电为主，为 N 型多晶硅；当硅中掺杂以受主杂质（III 族元素，如硼、铝、镓等）为主时，以空穴导电为主，为 P 型多晶硅。P 型电池主要有 BSF 电池和 PERC 电池两种，2021 年 PERC 电池在全球市场中的占比已经超过 91%，BSF 电池被淘汰出局。在 PERC 替代 BSF 的期间，P 型电池转换效率从不足 20% 提升到超过 23%，即将逼近 24.5% 的理论上限，而 N 型电池的理论上限为 28.7%，且 N 型电池具有转换效率高、双面率高、温度系数低等优点，因此企业纷纷开始布局 N 型电池的量产线。

图 3：太阳能级多晶硅国家标准

	特等级	1 等级	2 等级	3 等级
施主杂质浓度/10 ⁻⁹ (ppba)	≤0.68	≤1.40	≤2.61	≤6.16
受主杂质浓度/10 ⁻⁹ (ppba)	≤0.26	≤0.54	≤0.88	≤2.66
氧浓度/(atoms/cm ³)	≤0.2 × 10 ¹⁷	≤0.5 × 10 ¹⁷	≤1.0 × 10 ¹⁷	≤1.0 × 10 ¹⁷
碳浓度/(atoms/cm ³)	≤2.0 × 10 ¹⁶	≤2.5 × 10 ¹⁶	≤3.0 × 10 ¹⁶	≤4.0 × 10 ¹⁶
少数载流子寿命/μs	≥300	≥200	≥100	≥50
基体金属杂质含量/ (ng/g)				
Fe、Cr、Ni、Cu、Zn	≤15	≤50	≤100	≤100
表面金属杂质含量/ (ng/g)				
Fe、Cr、Ni、Cu、Zn、Na	≤30	≤100	≤100	≤100

来源：CPIA

4.2.1 如何区分 N/P 硅料

一种简单的方法是使用四探针测量系统（四点探针法）测量硅片的电阻率，再通过霍尔效应

测量设备确定其掺杂类型。霍尔效应测量可以测量载流子（电子或空穴）的密度和迁移率，从而判断是 P 型还是 N 型。但就如何精确定义 N 型硅料，目前市场上其实还没有明确的考核指标。

相比 P 型硅料，N 型硅料在纯度品质方面要求更高，需要满足电子二级水平，而 P 型硅料仅为电子三级（一级主要应用在芯片半导体领域）。

表 1：N/P 硅料区别

	N 型硅料	P 型硅料
质量标准	电子二级以上	电子三级及太阳级
外观质量	致密料	致密料、菜花料、珊瑚料
工艺流程	N 型、P 型差别不大	
初始投资额	N 型材料更高端，后端洁净环境更好，初始投资额更大	
循环回收	N 型料品质更高，可循环回收重新用于硅料	

来源：各公司公告、国联期货研究所

4.2.2 N 型硅料设计的注意事项

关于 N/P 硅料有几个争议的地方需要注意：

N 型硅料逐步占据主流，且随着下游技术革新和应用，N 型硅料的指标是变化的，按照目前的国标，难以满足目前市场 N 型料的要求，其中主要设计三点：

①少数载流子寿命

隆基报告中提到，与硅材料少子寿命及电阻率存在关系。转化效率越高的电池（N 型电池）对少子寿命越敏感，要求也越高；电阻率对部分电池结构影响较大。那就 N 型硅料需要的条件聚焦了，硅料中影响硅片“少子寿命，氧含量，电阻率分布”的因素。在 N 型硅片工艺生产过程中见下图，并未涉及到金属元素的掺入，其余硅片生产的过程中导致的金属杂质的引入并不在硅料企业考虑范围内，因而**唯一硅料企业考虑的金属杂质引入点就在硅片材质本身，也就是硅料携带进来的金属杂质**，尤其是深能级杂质，所以硅料中存在体金属，表金属的指标，同时反应硅料金属杂质浓度大小的硅料少子寿命。

得注意一下：影响的是硅片的少子寿命，氧含量，电阻率，因为硅片是单晶硅棒切片产生，其实也是也是单晶硅棒的上述标准。谨防与硅料中的少子寿命，氧含量，电阻率混淆。

②更低氧含量

“硅片的氧含量”，氧的主要来源是熔体和堆塌的相对运动。堆塌和硅反应产生一氧化碳，

部分会进入晶体界面。氧和杂质会导致 N 型硅片在电池高温制备环节出现同心圆、黑心片等问题。氧在 1400 度无法流动，会被凝固在 COP 附近形成缺陷。TOPCon 在后续电池制备环节高温步骤较多，因此也更容易产生同心圆等问题。但明显氧气的引入和控制硅片生产环节，硅料生产环节中涉氧较少，因而在**新国标中将氧含量改为客户自定，该元素的除杂并不在 N 型硅料指标范围考虑之中。**

③更加集中的电阻率分布

在硅料拉单晶制备成单晶硅棒过程中，一般利用**高纯的硼或磷作为掺杂剂**，掺杂剂本身的纯度超过 99.999%~99.9999%，N 型硅片是通过掺杂不同量的磷来控制单晶硅的电阻率，电阻率 ρ 与掺杂浓度 C_s 的关系如下：

$$\rho=1/\sigma=1/(C_s \cdot e \cdot \mu)$$

式中， σ 为电导率； e 为电子电荷， $e=1.6 \cdot 10^{-19}$ C； μ 为电子的迁移率，为 $1350 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ；对于 $1\Omega \cdot \text{cm}$ 的 N 型掺磷单晶硅而言，磷的掺杂浓度为 $4.2 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 。因而控制单晶硅的电阻率主要取决于硅熔体中加入的掺杂剂的量。所以主要控制控制电阻率的地方在硅片的生产，但有别于氧，掺杂既然按照一定比例定量执行，必定需要原本体的中 B 或 P 更像一张白纸，这样我才能更准确控制电阻率大小，所以**硅料在新国标中的 B、P 更重要的是 P，有了更加严苛的标准。**

4.3 根据表面质量的不同，可划分为致密料、菜花料和珊瑚料。

致密料表面颗粒凹陷程度最低，小于 5mm，外观无颜色异常、无氧化夹层，价格最高；菜花料表面颗粒凹陷程度适中，为 5-20mm，断面适中，价格中档；而珊瑚料表面凹陷较为严重，深度大于 20mm，断面疏松，价格最低。致密料主要用于拉制单晶硅，菜花料、珊瑚料则主要用于制作多晶硅片，企业日常生产中可在致密料中掺杂不低于 30%的菜花料来生产单晶硅，从而节约原料成本，但菜花料的使用会在一定程度上降低拉晶效率，企业需在两者之间进行权衡后选择合适的掺杂比例。

值得注意的是，未来多晶硅上市后，按照国标对定义不同级别的多晶硅质量标准可能存在差距，从而导致多晶硅在交割环节受到阻碍。查阅相关的国标定义资料，我们对比可以发现：

表 2：历年多晶硅的国标区别

国标名称	起草单位	共同点与区别	问题
GB/T 25074-2010 太阳能级多晶硅	“洛阳中硅、无锡尚德、中国电子技术标准研究所、隆基等	对比下来 2010 年的起草单位有上游硅料企业，	N 型硅料是随下游以及终端运用变化的，关于

GB/T 12963-2014 电子级多硅	峨眉半导体、中能、特变、洛阳中硅等	有下游硅片或电池片企业，且大部分是硅料下游应用企业，而2022年即便更新的过硅料指标，起草单位大部分是上游企业。	未来进入期货交割，下游应用对太阳能级别的多晶硅（N/P）质量如何把控是个问题
GB/T 12963-2022 电子级多硅	鑫华、黄河水电、中能、永祥、新特等		

来源：国家标准委员会 国联期货研究所

五、多晶硅的冶炼工艺

5.1 生产工艺双技术迭进与区别

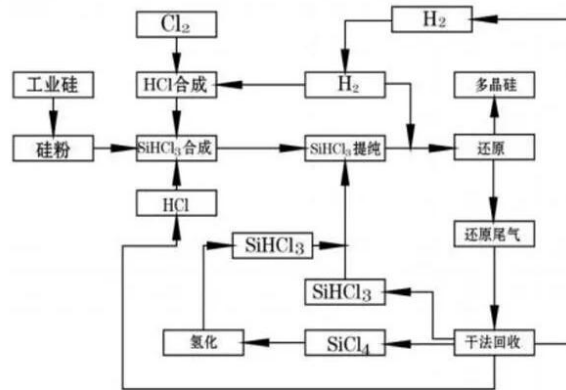
改良西门子法和硅烷流化床法，两种产品的形态分别为棒状硅和颗粒硅。

1.5.1.1 改良西门子法（棒状硅）

西门子法的核心在于化学沉积技术（CVD,ChemicalVaporDeposition），在还原炉中，将硅芯加热到一定温度，然后将预热后的原料气体注入还原炉中，在硅芯上发生反应，产生的高纯硅沉积在硅芯上。反应副产物从底部排出，经回收、分离、提纯后重新返回生产工序。当硅芯生长至一定尺寸后，需停炉取出棒状硅，送入后续破碎步骤。从西门子法发展历史来看，其“改良”主要体现在副产物回收利用、冷氢化替代热氢化，从而降低生产能耗与成本。

三氯氢硅西门子法是光伏领域主流。根据生产原料的不同，改良西门子法还可以细分出多条技术路线，包括三氯氢硅、四氯化硅、二氯二氢硅、硅烷等。在光伏领域，以三氯氢硅为原料、氢气为还原剂的工艺路线由于纯度和生产成本的相对优势，是当前的主流，因此下文改良西门子法特指三氯氢硅西门子法；而其它技术路线也有不同特点，如硅烷西门子法由于纯度和致密性更高，一般应用于半导体领域的区熔硅片。

图4：改良西门子法生产工艺



来源：国联期货研究所

1.5.1.2 硅烷流化床法（颗粒硅）

硅烷流化床法：是指利用甲硅烷（SiH₄）热分解转化为三氯氢硅，在流化床反应器（Fluidized Bed Reactor）中进行的技术路线。具体来看，作为晶种的高纯度籽晶（直径约0.2-0.6mm）从流化床反应器顶部加入，堆积形成晶种颗粒床层，硅烷和氢气从反应器底部通入，使床层达到流化状态，在外部加热器的作用下，硅烷裂解沉积在籽晶表面，籽晶颗粒不断外延生产，达到足够重量的颗粒硅沉降到反应器底部排出。生产过程中，固体反应物自上而下移动，气体反应物自下而上流动，从而实现不间断的连续生产。

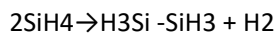
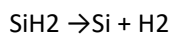
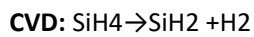
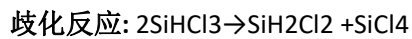
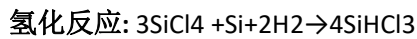
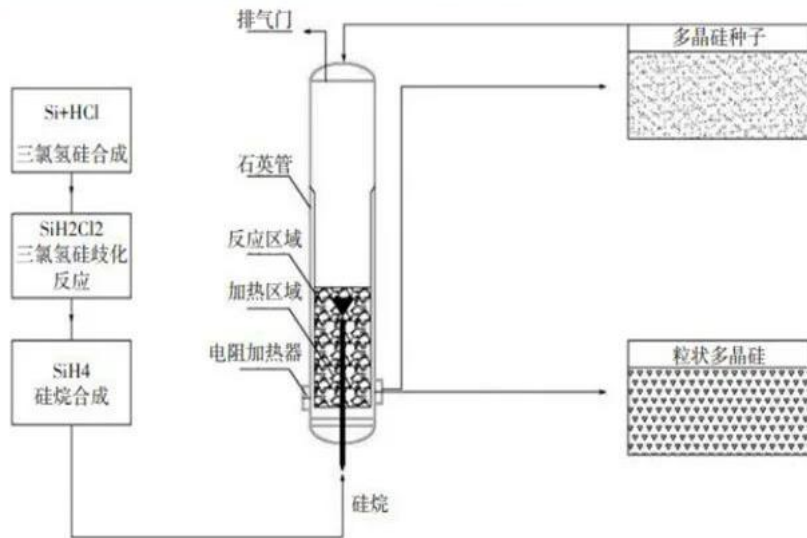


图 5：硅烷流化床法生产工艺



来源：国联期货研究所

5.2 改良西门子法与硅烷法流床法的区别

表 3：改良西门子法与流化床法的区别

双技术区别		
	改良西门子法(棒状硅)	硅烷流化床法(颗粒硅)
原材料	三氯氢硅、氢气	硅烷、氢气
产品纯度	电子级、太阳能级	太阳能级
反应温度	1150-1200C	约 550-700C
转化率	10-20%	超过 90%
能耗	高(耗电量约 45 度/kg)	低(RECFBR 耗电量:4.1 度/kg)
物耗	将尾气中的各种组成部分全部进行回收利用, 从而大幅降低原料的消耗	参与反应的硅料得到充分的利用, 排出的废料极少
安全性	工艺成熟, 操作安全	硅烷易爆炸, 安全性差
工艺成熟度	最成熟、可靠、投产速度最快的工艺	工艺不够成熟, 仅少数厂家使用
多晶硅纯度	较高(9-12N)	较低(6-9N)
生产连续性	批次生产, 需进行装、拆炉	连续性不间断生产
副产物	产生大量副产硅烷需通过氢化处理	副产物少, 污染性排放少

竞争优势	1) 工艺成熟稳定, 生产易复制扩大; 2) 多晶硅产品纯度较高	1) 生产成本低; 2) 无需破碎, 生产过程自动化; 3) 下游客户的单品生产成本降低
现存缺点	1) 间断生产能耗较高; 2) 需人工破碎	1) 表面积大易吸附杂质, 2) 硅粉较多, 3) 加料时易产生跳料问题。
代表企业	多数晶硅生产企业	美国 MEMC、挪威 REC、协鑫科技、陕西天宏瑞科

来源: CPIA 国联期货研究所

5.3 其他工艺对比

表 4: 多晶硅其他冶炼工艺对比

其他生产工艺对比		
名称	含义	特点
冶金法	冶金法又称物理冶金法, 是指应用冶金技术方法提纯冶金级硅的过程, 主要是以工业硅为原料, 采用湿法冶金、真空熔炼、氧化精炼、定向凝固、特种场熔炼等技术组合而制备多晶硅的方法。	冶金法的特点是在提纯过程中硅不参与任何化学反应, 依靠硅与杂质物理性质的差异, 通过冶金熔炼的方法将杂质去除, 从而获得满足太阳能电池性能需求的多晶硅。冶金法是近年来正在发展的一种低成本、低能耗和环境友好的多晶硅制备的新技术。
流化床法	流化床法制造多晶硅需要用到流化床反应器, 具体反应过程如下: 将 SiHCl_3 和 H_2 由底部注入到流化床反应装置中, 在加热器和预热气体的双重作用下把床层温度提高到反应所需温度。硅烷气体通过被加热的硅颗粒床层时分解生成硅和氢气, 硅在硅颗粒表面沉积, 硅颗粒长大到一定尺寸后形成产品, 从反应器底部取出。	该方法与西门子法相比主要具有以下优势: 第一, 可以进行连续生产, 生产过程中不需要停顿, 因而具有极高的生产效率。 第二, 能量转化率较高, 与西门子法相比, 可以在很大程度上降低能耗。 第三, 反应物为流动状态, 有效地保障了反应物之间能够充分接触, 进而提高反应效率, 缩短反应时间。

<p>硅石碳热还原法</p>	<p>硅石碳热还原法是利用 C 来还原 SiO_2 进行多晶硅的制备，反应方程式如下：$\text{SiO}_2 + \text{C} = \text{Si} + \text{CO}_2$。这种多晶硅制备方法经过 Sintef 公司改进后，生产过程如下：在离子回转炉中通过 C 对 SiO_2 进行还原，得到产物 SiC，再将 SiC 投入到电弧炉中继续和 SiO_2 反应，可以得到液态的硅。</p>	<p>实验表明，这种液态硅中杂质含量非常少，几乎只有 C 这一种杂质。为了去除液态硅中的 C 元素，首先，需要将液态硅进行冷却处理，使温度逐渐降下来，再对硅中的 C 进行精炼，将硅进行提纯。当温度降低后，C 将会与 Si 发生反应生成 SiC，进而让 C 从硅中分离出来。然后，向反应装置中注入 Ar/H_2O 气体，让 Si 中残留的 C 元素能够以 CO 的形式分离出去。最后，使提纯后的硅定向结晶，进而得到多晶硅。通过这种方法得到的多晶硅，其中 C 元素的含量不超过 0.0005%，由此可见，硅石碳热还原法得到的多晶硅的纯度相当之高。</p>
<p>电解法</p>	<p>电解法采用电解硅酸盐的方式得到纯度较高的硅，在电解装置中，以 C 作为阳极，反应温度控制在 1000°C，在经过一段时间的电解反应后，Si 单质将会在阴极上附着，阳极生成 CO_2 气体。</p>	<p>电解反应对电极材料的要求较高，这是因为在电解反应中，尤其是温度较高的反应条件下，电极极易发生腐蚀，进而将新的杂质引入反应体系中，如 B、P 等，对硅的纯度造成影响。以 CaCl_2 作为熔盐电解为例，使用石墨作为阳极，阴极采用特制材料。电解完成后，需要将阴极置于真空环境，通过熔点的不同可以将 Si 与阴极材料进行分离，通过这种方法得到的硅的纯度可以达到 99.8%，在很大程度上避免了 B、P 等杂质对硅的污染，极大地提高了多晶硅的纯度。</p>
<p>气液沉积法</p>	<p>气液沉积法 (VLD 法) 由日本 Tokuyama 公司研发，反应物质为 SiHCl_3 和 H_2，通过这两种物质来制备多晶硅。SiHCl_3 与 H_2 的反应需要在石墨管中进行，反应温度需要控制在 1500°C 左右。反应物由石墨管的上部注入，经过一段时间的反应后，生成的 Si 将会以液态的形式聚集在石墨管的底部。</p>	<p>这种制备多晶硅的方式与西门子法相比，减少了硅棒破碎的过程。与流化床法相比，有效地解决了反应器壁沉积的问题，促使 Si 的生成效率大幅度提高。</p>

来源：国联期货研究所

六、单晶硅冶炼工艺

单晶硅呈现的单一晶面生长形态还需要在作为棒状硅的基底进一步的单晶硅生产工艺---拉晶，根据晶体生长方式的不同，可分为**区熔单晶硅和直拉单晶硅**。直拉单晶硅是利用切氏法制备单晶硅，称为**CZ单晶硅**。直拉单晶硅的制造成本相对较低，机械强度较高，易制备大直径单晶，主要应用于微电子集成电路和太阳能电池方面，是单晶硅的主体。

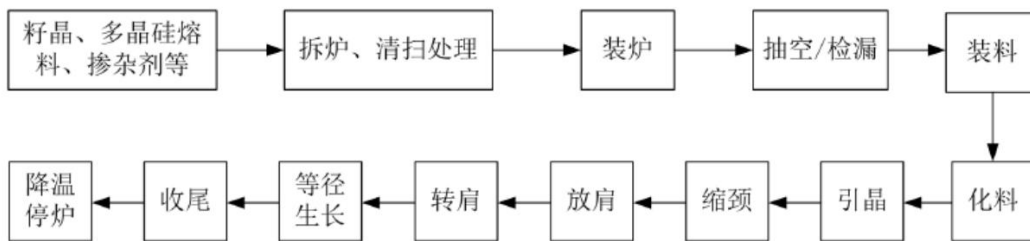
6.1 直拉法单晶硅生长原理

直拉法硅单晶生长过程属于一个多晶硅熔液转变为单晶硅固体的固液相变过程。首先，将多晶硅原料装于石英坩埚内，坩埚上方有一可旋转和升降的籽晶杆，杆的下端有一夹头，其上捆上一根籽晶。原料被加热器熔化后，将籽晶插入到高温硅熔体表面，使得籽晶与硅熔液熔接，在合适的热场环境下，通过转动并缓慢向上提拉籽晶，并经过引晶、缩颈、放肩、转肩、等径生长和收尾等过程，从而完成单晶硅的生长。

直拉法制备单晶硅需要采用直拉法生长炉及相关配套系统生长单晶硅。整个生长系统主要包括晶体旋转提拉系统、加热系统、坩埚旋转提拉系统、控制系统等。晶体生长过程是在一个封闭的热场条件下进行的，通常单晶硅生长周期较长，尤其是大尺寸单晶硅。

6.2 直拉法单晶硅工艺流程

图 6：直拉法单晶硅工艺流程



来源：公开资料 国联期货研究所

多晶硅主要由工业硅、氯气和氢气经一系列的物理、化学反应提纯后达到一定纯度的电子材料，是制造硅抛光片、太阳能电池及高纯硅制品的主要原料。多晶硅可融化冷却后制成多晶硅锭，也可通过直拉法或区熔法生成单晶硅。相比多晶硅，单晶硅由晶体取向相同的晶粒组成，因此具有更为优越的导电性与转换效率。多晶硅锭和单晶硅棒均可进一步切割加工为硅片、电池，进而成为光伏组件的关键部分，应用于光伏领域。除此之外，单晶硅片还可通过反复的打磨、抛光、

外延、清洗等工艺形成硅晶圆片，作为半导体电子器件的衬底材料。

6.3 新型直拉技术——更适用未来 N 型硅片的特点

主要原理：减少在晶棒溶解过程中减少引入更多的氧杂质，故而控制氧浓度达到纯净单晶硅，进而增加拉晶效率。

(1) 磁拉法（MCZ）

原理：MCZ 法是在常规的 CZ 法工艺中附加一个稳定的磁场，其原理为硅熔体内部的带电粒子在磁场中受到洛伦兹力，进而抑制熔体内的对流。

优点：MCZ 法可以明显降低单晶硅中氧含量，净化多晶硅；

缺点：成本大大提升，在于磁场的加入需要耗费大量的电力资源，成本比传统的 CZ 法要提高一倍左右，因此仅建议在制备性能要求很高或者是应用于半导体领域的硅产品时使用

(2) 连续直拉单晶技术（CCZ）

原理：CCZ 法是一种可以在单晶生长中无需停炉即可添加硅原料的方法，通过特殊炉体设计，实现了进料-熔料-拉棒同步进行，节省了加料时间和熔料时间，两根硅棒生产之间无需等待，极大提升生产效率

优点：与传统的 CZ 法对比，生产效率及自动化大大提升，成本显著降低；

缺点：资金投入大、对制备企业要求相对较高。

免责声明

本报告中信息均来源于公开资料，我公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。

报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述期货操作的依据。由于报告在撰写时融入了研究员个人的观点和见解以及分析方法，如与国联期货发布的其他信息有不一致及有不同的结论，未免发生疑问，本报告所载的观点并不代表国联期货公司的立场，所以请谨慎参考。我公司及其研究员对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。

本报告所提供资料、分析及预测只是反映国联期货公司在本报告所载明日期的判断，可随时修改，毋需提前通知。

本报告版权归国联期货所有。未经书面许可，任何机构和个人不得进行任何形式的复制和发布。如遵循原文本意的引用，需注明引自“国联期货公司”，并保留我公司的一切权利。

国联期货研究所