

国家职业教育改革发展示范学校重点建设专业精品教材

# 光伏组件 制造工艺

张学彩 主 编

国家职业教育改革示范学校重点建设专业精品教材

# 光伏组件制造工艺

张学彩 主 编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书以光伏组件的制造工艺流程为主要内容,对现有的组件制造工艺流程进行了全面的介绍和讲解。重点介绍了组件生产环节中:电池片电学性能测试,电池片的激光切割,电池片的组装与焊接,电池片的层叠,组件的层压工艺,组件的缺陷测试,组件的装框,组件的成品测试等内容。

全书分为八个项目实施,分别是:光伏电池基础,光伏电池的切割与分类,电池片的焊接与层叠,电池组件的层压,层压后组件内部缺陷检测,组件的装框与接线盒的安装,组件成品性能检测,太阳能电动小车制作等内容。

本书可作为职业学校光电子技术,新能源等专业的教材和参考用书,也可供有关工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

光伏组件制造工艺/张学彩主编. —北京:电子工业出版社,2015.1

国家职业教育改革示范学校重点建设专业精品教材

ISBN 978-7-121-25292-1

I. ①光… II. ①张… III. ①太阳能电池—加工—中等专业学校—教材 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第305536号

策划编辑:张帆

责任编辑:张帆

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

装订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:8.75 字数:224千字

版次:2015年1月第1版

印次:2015年1月第1次印刷

定价:20.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线:(010)88258888。



从我国未来社会经济发展战略路径看，发展太阳能光伏产业是我国保障能源供应、建设低碳社会、推动经济结构调整、培育战略性新兴产业的重要方向。近些年来随着光伏产业的兴起与发展，急需一批具备一定的专业知识和动手操作能力的中、高级光伏制造的技能人才。而职业教育正是在这种形式下发展起来。为了满足高等职业教育对应用型人才的培养目标要求，我们组织了一批在教学一线从事光伏理论教学和光伏实训教学经验丰富的优秀教师，结合我校现有的理论和实训教学及生产设备，深入企业参观学习，吸取借鉴其他版本实验教材的成功经验，本着“广吸收、不套用、有创新”的态度，以职业分析为依据，以岗位需求为基本，以培养管理、服务一线的应用型人才为宗旨，编写了适合中、高职光电子专业学生的实训操作指导教材。

太阳能光伏组件制造工艺，在整个太阳光伏电池制造工艺流程中而言仅是其中的一个环节部分。本书以坚实的理论知识为基础，大量的企业实际生产操作为依据，同现有其他版本的教材相比，具有鲜明的特色：

首先，从结构和编写流程上来说，与实际生产制造流程相吻合；从内容上，涵盖了由光伏电池片组装成光伏组件的全部内容，涉及制作工作的每一个环节，每一个步骤。使职业学校的学生易于掌握和接受。

本书由张学彩主编，并负责整个教材的整体规划和设计。张文建、王晷、张艳艳、黄静萍、王二飞、林海翔、徐正元参与了本教材的编写。

由于编者水平有限，本书中错误之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编者

2014.11.



|                     |      |
|---------------------|------|
| 概论                  | (1)  |
| 项目一 光伏电池基础          | (3)  |
| 1.1 硅材料基础           | (3)  |
| 1.2 晶体硅电池片的制造工艺     | (8)  |
| 1.2.1 单晶硅电池片的制造工艺   | (8)  |
| 1.2.2 多晶硅电池片的制造工艺   | (11) |
| 1.3 其他类型光伏电池制造工艺介绍  | (12) |
| 项目二 光伏电池的切割与分类      | (14) |
| 2.1 电池片的切割工艺        | (14) |
| 2.1.1 激光切割设备介绍      | (14) |
| 2.1.2 激光切割设备的操作     | (19) |
| 2.1.3 激光切割设备的维护     | (32) |
| 2.2 电池片分选测试仪        | (33) |
| 2.2.1 单体电池分选测试仪设备介绍 | (33) |
| 2.2.2 单体电池分选测试仪的操作  | (34) |
| 2.2.3 单体电池分选测试仪的维护  | (43) |
| 项目三 电池片的焊接与层叠       | (45) |
| 3.1 焊接前的准备工作        | (45) |
| 3.2 电池片的单焊工艺        | (53) |
| 3.3 电池片的串焊工艺        | (54) |
| 3.4 组件层叠            | (55) |
| 3.4.1 层叠设备与材料介绍     | (56) |
| 3.4.2 层叠流程          | (59) |
| 项目四 电池组件的层压         | (62) |
| 4.1 层压设备介绍          | (62) |
| 4.2 组件层压工艺          | (63) |
| 4.3 层压设备维护          | (66) |
| 4.4 层压后的检查与应对措施     | (68) |

|       |                    |       |
|-------|--------------------|-------|
| 项目五   | 层压后组件内部缺陷检测        | (70)  |
| 5.1   | EL 缺陷检测仪介绍         | (70)  |
| 5.2   | 电池内部缺陷检测流程         | (73)  |
| 5.3   | 检测结果的种类与分析         | (79)  |
| 5.4   | EL 缺陷检测仪的维护        | (84)  |
| 项目六   | 组件的装框与接线盒的安装       | (85)  |
| 6.1   | 组件装框工具与设备介绍        | (85)  |
| 6.2   | 组件安装铝合金框的流程        | (88)  |
| 6.3   | 组件接线盒的安装           | (92)  |
| 6.4   | 组件清洁               | (93)  |
| 项目七   | 组件成品性能测试           | (97)  |
| 7.1   | 组件光电性能检测设备介绍       | (97)  |
| 7.2   | 组件光电性能检测步骤         | (102) |
| 7.3   | 组件光电性能检测软件操作说明     | (104) |
| 7.3.1 | 软件主界面功能描述          | (104) |
| 7.3.2 | 测试数据处理             | (114) |
| 7.3.3 | 软件校标               | (118) |
| 7.4   | 组件光电性能检测设备的故障与分析处理 | (122) |
| 7.5   | 组件耐压绝缘性能测试         | (124) |
| 项目八   | 太阳能电动小车制作          | (126) |
| 8.1   | 教学目标               | (126) |
| 8.2   | 工作原理               | (126) |
| 8.3   | 制作准备与设计            | (127) |
| 8.4   | 制作工艺与流程            | (128) |
| 8.5   | 调试与评价              | (129) |

# 概 论

太阳能是未来最清洁、安全和可靠的能源，发达国家正在把太阳能的开发利用作为能源革命主要内容长期规划，光伏产业正日益成为国际上继 IT、微电子产业之后又一爆炸式发展的行业。与水电、风电、核电等相比，太阳能发电没有任何排放和噪声，应用技术成熟，安全可靠；除大规模并网发电和离网应用外，太阳能还可以通过抽水、超导、蓄电池、制氢等多种方式储存。太阳能作为一种清洁的可再生能源，是未来低碳社会的理想能源之一，当下正越来越受到世界各国的重视。

目前，各主要发达国家均从战略角度出发大力扶持光伏产业发展，通过制定上网电价法或实施“太阳能屋顶”计划等推动市场应用和产业发展。国际各方资本也普遍看好光伏产业：一方面，光伏行业内众多大型企业纷纷宣布新的投资计划，不断扩大生产规模；另一方面，其他领域如半导体企业、显示企业携多种市场资本正在或即将进入光伏行业。

从我国未来社会经济发展战略路径看，发展太阳能光伏产业是我国保障能源供应、建设低碳社会、推动经济结构调整、培育战略性新兴产业的重要方向。“十二五”期间，我国光伏产业将继续处于快速发展阶段，同时面临着大好机遇和严峻挑战。主要体现在以下几个方面：

## 1. 光伏产业面临广阔发展空间

世界常规能源供应短缺危机日益严重，化石能源的大量开发利用是造成自然环境污染和人类生存环境恶化的主要原因之一，寻找新兴能源已成为世界热点问题。在各种新能源中，太阳能光伏发电具有无污染、可持续、总量大、分布广、应用形式多样等优点，受到世界各国的高度重视。我国光伏产业在制造水平、产业体系、技术研发等方面具有良好的发展基础，国内外市场前景总体看好，只要抓住发展机遇，加快转型升级，后期必将迎来更加广阔的发展空间。

## 2. 光伏产业、政策及市场亟待加强互动

从全球来看，光伏发电在价格上具备市场竞争力尚须一段时间，太阳能电池需求的近期成长动力主要来自于各国政府对光伏产业的政策扶持和价格补贴；市场的持续增长也将推动产业规模扩大和产品成本下降，进而促进光伏产业的健康发展。目前国内支持光伏应用的政策体系和促进光伏发电持续发展的长效互动机制正在建立过程中，太阳能电池产品多数出口，产业发展受金融危机和海外市场变化影响很大，对外部市场的依存度过高，不利于持续健康发展。

## 3. 面临国际经济动荡和贸易保护的严峻挑战

近年来全球经济发展存在动荡形势，一些国家的新能源政策出现调整，相关补贴纷纷下调，对我国光伏产业发展有较大影响。同时，欧美等国已发生多起针对我国光伏产业的贸易纠纷，类似纠纷今后仍将出现，主要原因有：一是我国太阳能电池成本优势明显，对国外产

品造成压力；二是国内光伏市场尚未大规模启动，产品主要外销，可能引发倾销疑虑；存在产品质量水平参差不齐等问题。

#### 4. 新工艺、新技术快速演进，国际竞争不断加剧

全球光伏产业技术发展日新月异：晶体硅电池转换效率年均增长一个百分点；薄膜电池技术水平不断提高；纳米材料电池等新兴技术发展迅速；太阳能电池生产和测试设备不断升级。而国内光伏产业在很多方面仍存在较大差距，国际竞争压力不断升级：多晶硅关键技术仍落后于国际先进水平，晶硅电池生产用高档设备仍需进口，薄膜电池工艺及装备水平明显落后。

#### 5. 市场应用不断拓展，降低成本仍是产业主题

太阳能光伏市场应用将呈现宽领域、多样化的趋势，需求的光伏产品将不断问世，除了大型并网光伏电站外，与建筑相结合的光伏发电系统、小型光伏系统、离网光伏系统等也将快速兴起。太阳能电池及光伏系统的成本持续下降并逼近常规发电成本，仍将是光伏产业发展的主题，从硅料到组件以及配套部件等都将面临快速降价的市场压力，太阳能电池将不断向高效率、低成本方向发展。

针对目前光伏发电成本高、产能相对过剩、国内产业对出口依存度过高的特点，中国应该加大政策指导和扶持力度，以此来发展和壮大太阳能光伏产业的国内市场。经验表明，中国政府的政策导向将在未来一段时间内决定着中国光伏产业的发展水准和市场需求。相信在节能减排、低碳经济的大背景下，在中国政府的大力扶持和倡导下，中国的太阳能光伏产业未来前景无限光明，发展空间极其广阔。长期发展，潜力无限，必将造福全人类。



## 学习要求

1. 了解光伏材料硅的基本知识;
2. 知道晶体硅电池片的制造工艺;
3. 知道晶体硅电池制作工艺和过程;
4. 了解几种其他类型电池。

## 1.1 硅材料基础

### 1. 硅的原子结构

硅原子位于元素周期表第 IV 主族, 化学符号是 Si, 旧称矽。它的原子序数为  $Z=14$ , 原子核外有 14 电子。电子在原子核外, 按照能级由低到高, 由里到外, 层层环绕, 这称为原子核外电子的壳层结构。其核外电子的二维分布如图 1-1 所示, 图 1-1 中硅原子的核外电子第一层有 2 个电子, 第二层有 8 个电子, 这两层都达到了稳定结构状态。还有 4 个电子分布在最外层, 即最外层的 4 个电子为价电子, 这 4 个电子对硅原子的物理特性和化学反应方面起着重要作用。图 1-2 所示是硅原子核外电子的三维结构示意图。

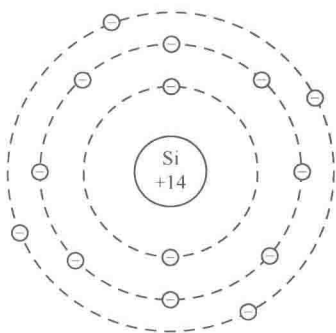


图 1-1 硅原子核外电子的二维结构示意图

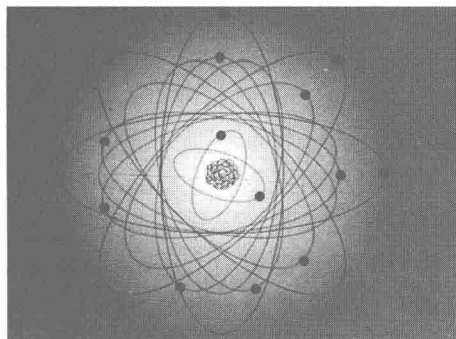
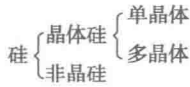


图 1-2 硅原子核外电子的三维结构示意图

### 2. 硅的物理和化学特性

硅材料的分类可分为:



### (1) 单晶硅

熔融的单质硅在凝固时硅原子以金刚石晶格排列成许多晶核，如果这些晶核长成晶面取向相同的晶粒，则这些晶粒平行结合起来便结晶成单晶硅。单晶硅其结构与金刚石类似，属于正四面体结构，是带有金属光泽的灰黑色固体，密度为  $2.33\text{g/cm}^3$ ，熔点为  $1410^\circ\text{C}$ ，沸点  $2355^\circ\text{C}$ ，硬度大有脆性。常温下化学性质不活泼，在高温下能与氧气等多种元素化合，不溶于水、硝酸和盐酸，溶于氢氟酸和碱性溶液。

单晶硅具有基本完整的点阵结构的晶体，其不同的方向具有不同的性质，是一种良好的半导体材料。纯度要求达到 99.9999%，甚至达到 99.999999% 以上。用于制造半导体器件、太阳能电池等。单晶硅具有准金属的物理性质，有较弱的导电性，其电导率随温度的升高而增加，有显著的半导电性。超纯的单晶硅是本征半导体。在超纯单晶硅中掺入微量的 IIIA 族元素，如硼可提高其导电的程度，而形成 P 型硅半导体；如掺入微量的 VA 族元素，如磷或砷也可提高导电程度，形成 N 型硅半导体。单晶硅棒如图 1-3 所示。

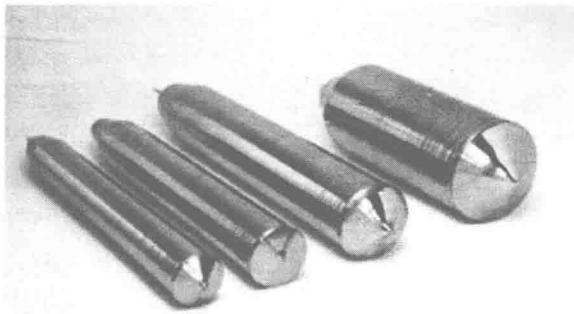


图 1-3 单晶硅棒

### (2) 多晶硅

熔融的单质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，则这些晶粒结合起来，就结晶成多晶硅。灰色金属光泽。密度  $2.32\sim 2.34\text{g/cm}^3$ ，熔点与沸点与单晶硅一样。溶于氢氟酸和硝酸的混酸中，不溶于水、硝酸和盐酸。硬度介于锆和石英之间，室温下质脆，切割时易碎裂。加热至  $800^\circ\text{C}$  以上即有延性， $1300^\circ\text{C}$  时显出明显变形。常温下不活泼，高温下与氧、氮、硫等反应。高温熔融状态下，具有较大的化学活泼性，几乎能与任何材料作用。具有半导体性质，是极为重要的优良半导体材料，微量的杂质即可大大影响其导电性。

多晶硅可作拉制单晶硅的原料，多晶硅与单晶硅的差异主要表现在物理性质方面。例如，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；在电学性质方面，多晶硅晶体的导电性也远不如单晶硅显著，甚至于几乎没有导电性。在化学活性方面，两者的差异极小。多晶硅和单晶硅可从外观上加以区别，但真正的鉴别须通过分析测定晶体的晶面方向、导电类型和电阻率等。多晶硅锭如图 1-4 所示。

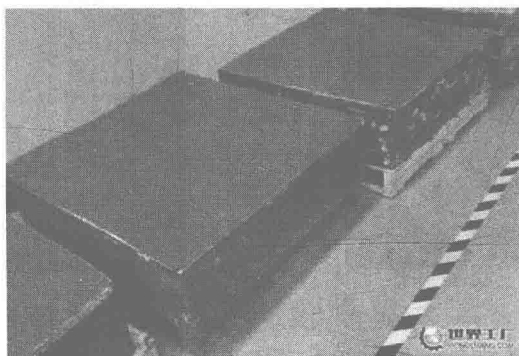


图 1-4 多晶硅锭

### (3) 非晶硅

“非晶硅”从字面上可简单地看成“非，晶硅”，也就是说不是晶硅的硅，晶硅的结构特点是硅原子排列有序，所以长程有序，而非晶硅由于硅原子排列无序导致长程无序，且存在较多的缺陷，因此电性能较差，但正是由于无长程序导致吸收光子时不存在动量守恒的束缚，因此光吸收系数大，所以晶硅电池需  $200\mu\text{m}$  左右，而非晶硅不到  $1\mu\text{m}$  就够了。

非晶硅又称无定形硅，是单质硅的一种形态。棕黑色或灰黑色的微晶体。硅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。

非晶硅的制备：由非晶态合金的制备知道，要获得非晶态，需要有高的冷却速率，而对冷却速率的具体要求随材料而定。硅要求有极高的冷却速率，用液态快速淬火的方法目前还无法得到非晶态。近年来，发展了许多种气相淀积非晶态硅膜的技术，其中包括真空蒸发、辉光放电、溅射及化学气相淀积等方法。一般所用的主要原料是单硅烷( $\text{SiH}_4$ )、二硅烷( $\text{Si}_2\text{H}_6$ )、四氟化硅( $\text{SiF}_4$ )等，纯度要求很高。非晶硅膜的结构和性质与制备工艺的关系非常密切，目前认为以辉光放电法制备的非晶硅膜质量最好，设备也并不复杂。非晶硅薄膜太阳能电池片如图 1-5 所示。

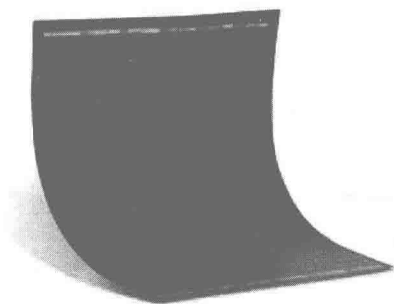


图 1-5 非晶硅薄膜太阳能电池片

### 3. 硅的制取与提纯

硅在自然界中虽然分布很广，在地壳中约含 27.6%，其含量仅次于氧，居第二位。但在自然界中没有游离态的硅，只有化合态的硅。它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。硅的提炼如图 1-6 所示。

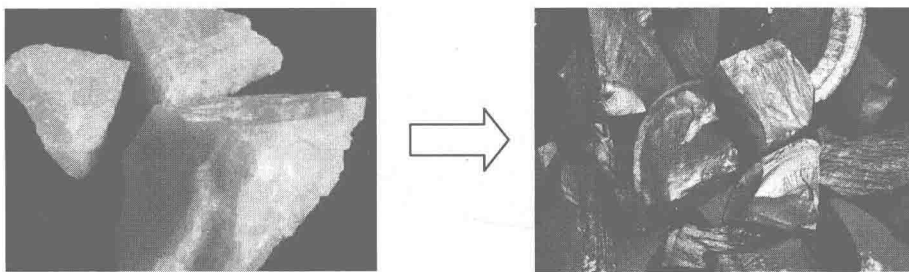


图 1-6 硅的提炼

较为纯净的硅 (Si) 是从自然界中的石英矿石 (主要成分  $\text{SiO}_2$ ) 中提取出来的, 分以下几步反应获得:

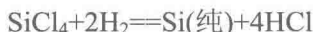
- ① 二氧化硅和碳粉在高温条件下反应, 生成粗硅:



- ② 粗硅和氯气在高温条件下反应生成氯化硅:

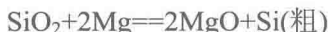


- ③ 氯化硅和氢气在高温条件下反应得到纯净硅:

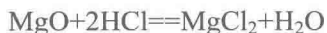


以上是硅的工业制法, 在实验室中可以用以下方法制得较纯的硅。

- ① 将细砂粉 ( $\text{SiO}_2$ ) 和镁粉混合加热, 制得粗硅:



- ② 这些粗硅中往往含有镁、氧化镁和硅化镁, 这些杂质可以用盐酸除去:



- ③ 过滤, 滤渣即为纯硅。

#### 4. 硅在太阳能电池上的应用

##### (1) 单晶硅太阳电池

单晶硅太阳电池是当前开发得最快的一种太阳电池, 它的构成和生产工艺已定型, 产品已广泛用于宇宙空间和地面设施。这种太阳电池以高纯的单晶硅棒为原料, 纯度要求为 99.9999%。为了降低生产成本, 现在地面应用的太阳电池等采用太阳能级的单晶硅棒, 材料性能指标有所放宽。有的也可使用半导体器件加工的头尾料和废次单晶硅材料, 经过复拉制成太阳电池专用的单晶硅棒。将单晶硅棒切片、抛磨、清洗等工序, 制成待加工的原料硅片。由硅片制作成组件还需要很多复杂工艺流程, 后面的单晶硅电池制造工艺中会详细讲述。目前单晶硅太阳电池的光电转换效率为 15% 左右, 实验室成果也有 20% 以上的。用于宇宙空间站的还有高达 50% 以上的太阳能电池板。单晶硅电池片如图 1-7 所示。

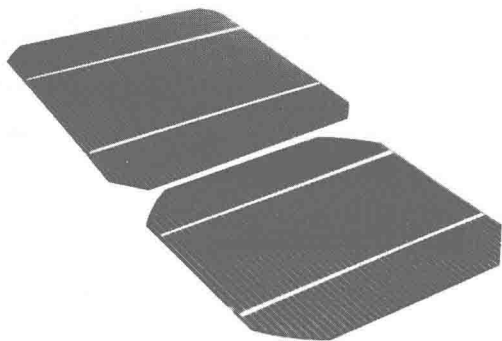


图 1-7 单晶硅电池片

### (2) 多晶硅太阳电池

单晶硅太阳电池的生产需要消耗大量的高纯硅材料，而制造这些材料工艺复杂，电耗很大，在太阳电池生产总成本中已超 1/2，加之拉制的单晶硅棒造成太阳能组件平面利用率低。因此，20 世纪 80 年代以来，欧美一些国家投入了多晶硅太阳电池的研制。多晶硅太阳电池的制作工艺与单晶硅太阳电池差不多，其光电转换效率约 12%，稍低于单晶硅太阳电池，但是材料制造简便，节约电耗，总的生产成本较低，因此得到大力发展。随着技术提高，目前多晶硅的转换效率也可以达到 14% 左右。目前在太阳能电池制造中，绝大多数光伏发电组件都是采用多晶硅电池片制作的。多晶硅电池片如图 1-8 所示。

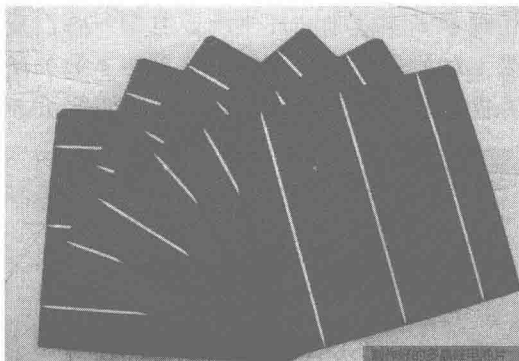


图 1-8 多晶硅电池片

### (3) 非晶硅太阳电池

非晶硅太阳电池是 1976 年出现的新型薄膜式太阳电池，它与单晶硅和多晶硅太阳电池的制作方法完全不同，硅材料消耗很少，电耗更低，非常吸引人。制造非晶硅太阳电池的方法有多种，最常见的是辉光放电法，还有反应溅射法、化学气相沉积法、电子束蒸发法和热分解硅烷法等。因为普通晶体硅太阳电池单个只有 0.5V 左右的电压，现在日本生产的非晶硅串联太阳电池可达 2.4V。目前非晶硅太阳电池存在的问题是光电转换效率偏低，国际先进水平为 10% 左右，且不够稳定，常有转换效率衰降的现象，所以尚未大量用于做大型太阳能电源，而多半用于弱光电源，如袖珍式电子计算器、电子钟表及复印机等方面。估计效率衰降问题克服后，非晶硅太阳电池将促进太阳能利用的大发展，因为它成本低，重量轻，应用更为方便，它可以与房屋的屋面结合构成住户的独立电源。非晶硅电池组件如图 1-9 所示。

在猛烈阳光照射下，单晶体式太阳能电池板较非晶体式能够转化多一倍以上的太阳能为电能，但可惜单晶体的价格比非晶体的昂贵两三倍以上，而且在阴天的情况下非晶体式反而与晶体式能够收集到几乎一样多的太阳能。

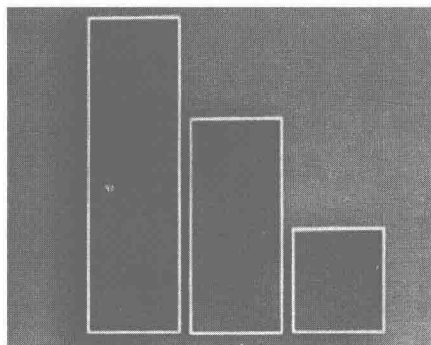


图 1-9 非晶硅电池组件

## 1.2 晶体硅电池片的制造工艺

晶体硅太阳能电池制作主要分为两个过程，单晶硅和多晶硅原材料的生产和电池片的制作。常规晶体硅太阳电池组件中，硅片的成本占 55%~60%，太阳电池制片成本占 15%~18%，组件材料及制造成本占 25%~27%。

### 1.2.1 单晶硅电池片的制造工艺

单晶硅电池片的生产相对于多晶硅电池片生产要复杂一些，复杂的地方主要就是单晶硅棒的生长。将多晶硅（见图 1-10）生产成单晶硅棒（见图 1-11）所需的加工工艺是：①加料→②熔化→③缩颈生长→④放肩生长→⑤等径生长→⑥尾部生长。



图 1-10 多晶硅料



图 1-11 单晶硅棒

(1) 加料：将多晶硅原料及杂质放入石英坩埚内，杂质的种类依电阻的 N 或 P 型而定。杂质种类有硼、磷、锑、砷。

(2) 熔化：加完多晶硅原料于石英坩埚内后，长晶炉必须关闭并抽成真空后充入高纯氩气使之维持一定压力范围内，然后打开石墨加热器电源，加热至熔化温度（1420℃）以上，将多晶硅原料熔化。

(3) 缩颈生长：当硅熔体的温度稳定之后，将籽晶慢慢浸入硅熔体中。由于籽晶与硅熔体场接触时的热应力，会使籽晶产生位错，这些位错必须利用缩颈生长使之消失掉。缩颈生长是将籽晶快速向上提升，使长出的籽晶的直径缩小到一定大小（4~6mm）由于位错线与生长轴呈一个交角，只要缩颈够长，位错便能长出晶体表面，产生零位错的晶体。

(4) 放肩生长：长完细颈之后，须降低温度与拉速，使得晶体的直径渐渐增大到所需的大小。

(5) 等径生长：长完细颈和肩部之后，借着拉速与温度的不断调整，可使晶棒直径的变化维持在-2~2mm 之间，这段直径固定的部分即称为等径部分。单晶硅片取自于等径部分。

(6) 尾部生长：在长完等径部分之后，如果立刻将晶棒与液面分开，那么热应力将使得晶棒出现位错与滑移线。于是为了避免此问题的发生，必须将晶棒的直径慢慢缩小，直至成为一尖点而与液面分开。这一过程称之为尾部生长。长完的晶棒被升至炉室冷却一段时间后取出，即完成一次生长周期。最终生长成的单晶硅棒如图 1-11 所示。

单晶硅棒的生产流程如图 1-12 所示。

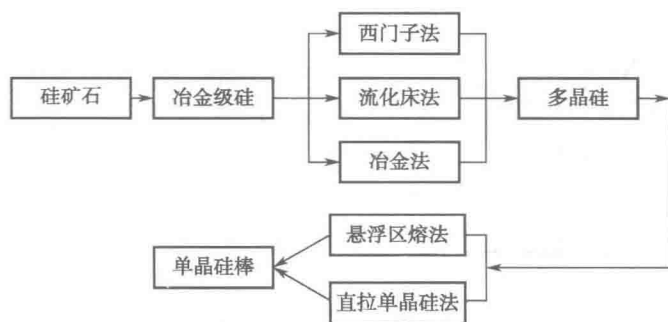


图 1-12 单晶硅棒的生产流程

要将单晶硅棒加工成单晶硅片，还得需要一系列的流程。主要加工流程如下所示：

①切断→②外径滚磨→③平边或 V 形槽处理→④切片→⑤倒角→⑥研磨→⑦腐蚀→⑧抛光→⑨清洗→⑩包装。

(1) 切断：目的是切除单晶硅棒的头部、尾部及超出客户规格的部分，将单晶硅棒分段成切片设备可以处理的长度，切取试片测量单晶硅棒的电阻率含氧量。

切断的设备：内圆切割机或外圆切割机。

切断用主要进口材料：刀片。

(2) 外径滚磨：由于单晶硅棒的外径表面并不平整且直径也比最终抛光晶片所规定的直径规格大，通过外径滚磨可以获得较为精确的直径。

外径滚磨的设备：磨床。

(3) 平边或 V 形槽处理：指方位及指定加工，用以单晶硅棒上的特定结晶方向平边或 V 形。

处理的设备：磨床及 X-Ray 绕射仪。

(4) 切片：指将单晶硅棒切成具有精确几何尺寸的薄晶片。

切片的设备：内圆切割机或线切割机。

(5) 倒角：指将切割成的晶片锐利边修整成圆弧形，防止晶片边缘破裂及晶格缺陷产生，增加磊晶层及光阻层的平坦度。

倒角的主要设备：倒角机。

(6) 研磨：指通过研磨能除去切片和轮磨所造的锯痕及表面损伤层，有效改善单晶硅片的曲度、平坦度与平行度，达到一个抛光过程可以处理的规格。

研磨的设备：研磨机（双面研磨）。

主要原料：研磨浆料（主要成分为氧化铝、铬砂、水）、滑浮液。

(7) 腐蚀：指经切片及研磨等机械加工后，晶片表面受加工应力而形成的损伤层，通常采用化学腐蚀去除。

腐蚀的方式：①酸性腐蚀，是最普遍被采用的。酸性腐蚀液由硝酸（ $\text{HNO}_3$ ）、氢氟酸（ $\text{HF}$ ）及一些缓冲酸（ $\text{CH}_3\text{COCH}$ ， $\text{H}_3\text{PO}_4$ ）组成。

②碱性腐蚀，碱性腐蚀液由  $\text{KOH}$  或  $\text{NaOH}$  加纯水组成。

(8) 抛光：指单晶硅片表面需要改善微缺陷，从而获得高平坦度晶片。

抛光的设备：多片式抛光机、单片式抛光机。

抛光的方式：分为粗抛和精抛两种。

粗抛：主要作用是去除损伤层，一般去除量为  $10\sim 20\mu\text{m}$ ；

精抛：主要作用是改善晶片表面的微粗糙程度，一般去除量在  $1\mu\text{m}$  以下。

主要原料：抛光液由具有  $\text{SiO}_2$  的微细悬硅胶及  $\text{NaOH}$ （或  $\text{KOH}$  或  $\text{NH}_4\text{OH}$ ）组成，分为粗抛浆和精抛浆。

(9) 清洗：在单晶硅片加工过程中很多步骤需要用到清洗，这里的清洗主要是抛光后的最终清洗。清洗的目的在于清除晶片表面所有的污染源。

清洗的方式：主要是传统的 RCA 湿式化学洗净技术。

主要原料： $\text{H}_2\text{SO}_4$ ， $\text{H}_2\text{O}_2$ ， $\text{HF}$ ， $\text{NH}_4\text{OH}$ ， $\text{HCL}$ 。

最终获得的单晶硅片如图 1-13 所示，而要将这样的单晶硅片生产成光伏单晶电池片（见图 1-14）还要经过很多工艺流程，这些工艺中主要有如图 1-15 所示的几种。

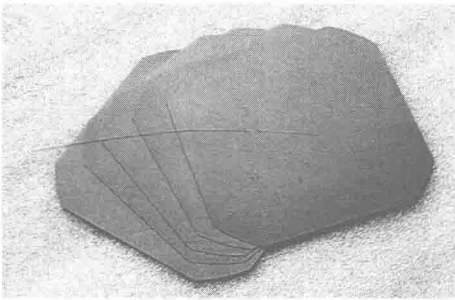


图 1-13 单晶硅片

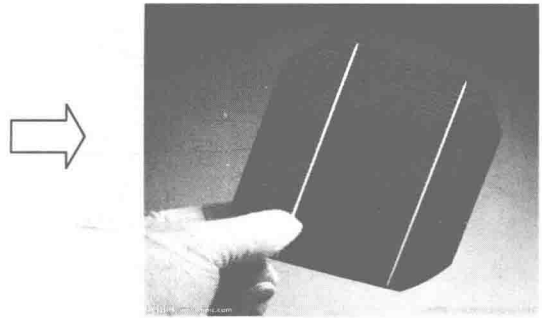


图 1-14 单晶电池片

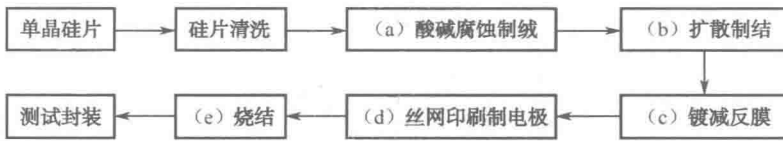


图 1-15 单晶硅电池片的生产流程

下面对上述生产工艺中比较重要的环节做个介绍：

① 硅片正表面酸碱腐蚀制绒：不管是单晶硅片还是多晶硅片，都可以用酸或者碱来处理。无论用哪种方法处理，一般情况下，用碱处理是为了得到金字塔状绒面；用酸处理是为了得到虫孔状绒面。不管是哪种绒面，都可以提高硅片的陷光作用。

② 扩散制结：扩散一般用三氯氧磷液态源作为扩散源。把 P 型硅片放在管式扩散炉的石英容器内，在  $850\sim 900^\circ\text{C}$  高温下使用氮气将三氯氧磷带入石英容器，通过三氯氧磷和硅片进行反应，得到磷原子。经过一定时间，磷原子从四周进入硅片的表面层，并且通过硅原子之间的空隙向硅片内部渗透扩散，形成了 N 型半导体和 P 型半导体的交界面，也就是 PN 结。

③ 镀减反膜：沉积减反射层的目的在于减少表面反射，增加折射率。广泛使用 PECVD 淀积  $\text{SiN}$ ，由于 PECVD 淀积  $\text{SiN}$  时，不光是生长  $\text{SiN}$  作为减反射膜，同时生成了大量的原子氢，这些氢原子能对多晶硅片具有表面钝化和体钝化的双重作用，可用于大批量生产。



④ 丝网印刷制电极：电极的制备是太阳电池制备过程中一个至关重要的步骤，它不仅决定了发射区的结构，而且也决定了电池的串联电阻和电池表面被金属覆盖的面积。最早采用真空蒸镀或化学电镀技术，而现在普遍采用丝网印刷法，即通过特殊的印刷机和模板将银浆铝浆（银铝浆）印刷在太阳电池的正背面，以形成正负电极引线。

⑤ 烧结：晶体硅太阳电池要通过三次印刷金属浆料，传统工艺要用二次烧结才能形成良好的带有金属电极欧姆接触，共烧工艺只需一次烧结，同时形成上下电极的欧姆接触。在太阳电池丝网印刷电极制作中，通常采用链式烧结炉进行快速烧结。

## 1.2.2 多晶硅电池片的制造工艺

多晶硅锭的生产流程如图 1-16 所示。实物如图 1-17 所示。

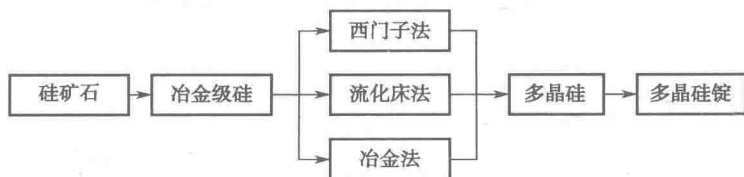


图 1-16 多晶硅锭的生产流程

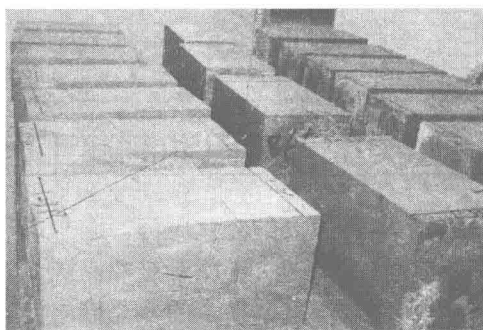


图 1-17 多晶硅锭

比较图 1-12 和图 1-16 会发现多晶硅电池制造工艺与单晶硅电池有许多相似的地方。多晶硅可以作为单晶硅棒的原料，也可以直接用浇注法形成多晶硅锭。熔铸多晶硅锭比提拉单晶硅锭的工艺简单，省去了昂贵的单晶拉制过程，也能用较低纯度的硅做投炉料，材料利用率高，电能消耗较省。同时，多晶硅太阳电池的电性能和机械性能都与单晶硅太阳电池基本相似，而生产成本却低于单晶硅太阳电池，这也是目前多晶硅太阳能电池得到快速发展的因素。

多晶硅电池片的生产流程如图 1-18 所示。

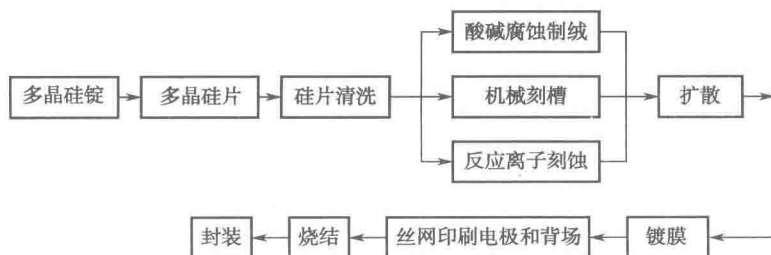


图 1-18 多晶硅电池片的生产流程