

云南省“十四五”职业教育省级规划立项建设教材
智能制造基础技术系列教材

太阳能光伏发电技术及应用

主编◎杨明熙 戴珍娅

TAIYANGNENG GUANGFU FADIAN JISHU JI YINGYONG

航空工业出版社

内 容 提 要

本书全面介绍了太阳能光伏发电领域的专业知识。在全球能源转型的大背景下，太阳能光伏发电技术愈发重要。本书开篇的太阳能光伏发电技术导论部分，提纲挈领地介绍了太阳能光伏发电的意义、特点及光伏产业的发展状况。随后，项目二深入剖析太阳辐射与太阳能资源。项目三至项目五详细讲解了太阳能光伏电池、太阳能光伏组件和太阳能光伏方阵。项目六的太阳能光伏发电控制器和项目七的太阳能光伏发电逆变器，关乎发电系统的稳定运行与电力转换。项目八的太阳能光伏储能系统解决了电力存储难题，保障能源持续供应。项目九的太阳能聚光系统则致力于提升太阳能利用效率。项目十整合了前面的知识，介绍完整的太阳能光伏发电系统。通过学习本书，学习者基本能系统掌握太阳能光伏发电技术的原理、组件及太阳能光伏发电系统的安装。

本书可作为职业院校光伏工程技术、新能源装备技术、太阳能光热技术与应用等专业的核心教材，也适合对新能源感兴趣的专业技术人员或初学者参考使用。

图书在版编目（CIP）数据

太阳能光伏发电技术及应用 / 杨明熙，戴珍娅主编.

北京：航空工业出版社，2025. 7. -- ISBN 978-7-5165-4229-3

I. TM615

中国国家版本馆 CIP 数据核字第 20250AY659 号

太阳能光伏发电技术及应用 Taiyangneng Guangfu Fadian Jishu ji Yingyong

航空工业出版社出版发行

（北京市朝阳区北苑路 58 号楼 20 层 100012）

发行部电话：010-85672666 010-85672683 读者服务热线：010-85672635

中煤（北京）印务有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2025 年 7 月第 1 版

2025 年 7 月第 1 次印刷

开本：787×1092 1/16

字数：392 千字

印张：17

定价：49.00 元

目 录

项目一 太阳能光伏发电技术导论	1
任务一 太阳能的重要性与开发利用的意义	2
一、化石能源正面临枯竭的危机局面	2
二、保护环境的重要性和紧迫性	6
三、常规电网的局限性和新能源的大量使用	8
任务二 太阳能发电技术的分类与特点	10
一、太阳能发电的类型	10
二、太阳能发电的优缺点	11
任务三 近年来光伏产业的发展状况	13
一、光伏产业在全球整体环境下的发展状况	13
二、中国光伏产业的发展历程	14
三、中国光伏产业现状	16
巩固练习	20
项目二 太阳辐射与太阳能资源	21
任务一 太阳的结构与运动规律	22
一、太阳的结构	22
二、太阳能量的吸收	24
三、地球的基本概况	25
四、地日的运动规律	25
任务二 太阳辐射分布特点	26
一、纬度	27
二、季节变化	28
三、大气状况与云量	29
四、地形与地表特征	29
任务三 影响到达地球表面的太阳辐射能的因素	30
一、太阳高度	30
二、大气质量	31

三、大气透明度	31
四、地理纬度	31
五、日照时间	31
六、太阳辐射对地球的影响	32
任务四 世界和我国太阳能资源分布情况	33
一、全球太阳能资源概况	33
二、全球太阳能资源丰富的地区	33
三、我国太阳能资源分布情况	34
四、我国太阳能资源开发的基本情况	35
巩固练习	38

项目三 太阳能光伏电池 39

任务一 光伏电池的基本结构及工作原理	40
一、光伏电池的基本结构	40
二、光伏电池的工作原理	41
任务二 太阳能光伏电池的分类	42
一、晶硅光伏电池	42
二、薄膜光伏电池	45
任务三 光伏电池的生产工艺	46
一、金属硅的制备	47
二、高纯多晶硅的制备	48
三、硅锭的制备	48
四、单晶硅片的制备	48
五、多晶硅片的制备	50
六、晶硅光伏电池的制造	51
任务四 太阳能光伏电池的生产实训	55
一、实训准备	55
二、生产实训流程	57
三、实训成果与评估	62
巩固练习	65

项目四 太阳能光伏组件 67

任务一 光伏组件的结构	68
任务二 光伏组件封装材料	69
一、焊带	70

二、助焊剂	70
三、光伏玻璃	71
四、密封材料	72
五、光伏背板	72
六、接线盒	73
七、铝边框	74
八、密封胶	75
任务三 光伏组件工艺流程与检测	76
一、光伏组件生产工艺流程	76
二、光伏组件的检测标准	79
任务四 高效组件技术	79
一、半片技术	80
二、叠瓦技术	81
三、多主栅技术	82
四、无主栅技术	83
五、拼片技术	83
任务五 光伏组件封装工艺过程实训	84
一、实训设备	84
二、实训材料	86
三、实训内容与步骤	88
四、注意事项	91
五、实训评价	92
巩固练习	95

项目五 太阳能光伏方阵 97

任务一 太阳能光伏方阵	98
一、太阳能光伏方阵的概述	98
二、太阳能光伏方阵的分类	99
三、太阳能光伏方阵的工作原理	100
四、太阳能光伏方阵的优势	100
五、太阳能光伏方阵的应用场景	100
任务二 固定式太阳能光伏方阵	101
一、太阳能光伏电池方阵安装角度计算	102
二、太阳能光伏电池方阵固定式支架安装	103
三、倾角可调式光伏支架的安装	107

任务三 跟踪式太阳能光伏方阵	108
一、按应用场合分类	108
二、按跟踪轴的数量与方位分类	109
三、按动力驱动类型分类	110
四、太阳能跟踪器的应用	111
五、太阳能跟踪器国内应用实例	111
六、太阳能跟踪器国外应用实例	112
巩固练习	113

项目六 太阳能光伏发电控制器 115

任务一 控制器的基本功能	116
一、充放电控制功能	116
二、电压调节功能	117
三、电流控制功能	117
四、监测与保护功能	118
五、数据采集与传输功能（部分高级控制器具备）	118
任务二 控制器的分类及工作原理	119
一、控制器的分类	119
二、各类控制器的工作原理	122
任务三 光伏发电控制器的安装与运维	124
一、PWM 控制器的安装与运行维护	125
二、MPPT 控制器的安装与运行维护	126
任务四 MPPT 太阳能控制器的认识	128
一、MPPT 控制器基本资料	129
二、控制器安装	133
三、控制器连接	134
四、控制器的操作	139
五、技术参数	141
六、维护和清洁	144
七、保修	144
八、保修卡	144
巩固练习	145

项目七 太阳能光伏发电逆变器 147

任务一 逆变器的功能	148
一、逆变器基本转换功能	149

二、电压和电流调节功能	149
三、保护功能	149
四、监控和通信功能	150
五、智能控制功能	151
任务二 逆变器的类型	151
一、并网逆变器	151
二、离网逆变器	155
三、混合逆变器	156
任务三 光伏发电系统对逆变器的技术要求	158
一、输出正弦波电流	158
二、高效运行稳定性	158
三、最大功率点追踪 (MPPT)	159
四、小体积高可靠性	159
五、单独供电能力	159
六、高转换效率	159
七、电网异常保护	159
八、防孤岛效应功能	160
任务四 逆变器的电路结构及主要元器件	160
一、逆变器的电路构成	160
二、逆变器的主要元器件及核心电路	162
任务五 光伏发电逆变器安装与运维	163
一、光伏发电逆变器的安装	164
二、光伏发电逆变器的运维	164
巩固练习	167

项目八 太阳能光伏储能系统 168

任务一 储能设备种类及原理	169
一、储能技术概述	169
二、物理储能设备种类及原理	169
三、电磁储能设备种类及原理	172
四、电化学储能设备种类及原理	173
任务二 太阳能光伏离、并网系统储能装置的作用与类型	175
一、太阳能光伏离网系统储能装置的作用与类型	176
二、太阳能光伏并网系统储能装置的作用与类型	177

任务三 常用蓄电池的种类、特性参数与选型·····	177
一、蓄电池的分类·····	178
二、蓄电池的命名方法、型号组成及其含义·····	179
三、蓄电池的主要技术指标·····	179
任务四 铅酸蓄电池的结构、工作原理与使用注意事项·····	180
一、铅酸蓄电池的结构·····	181
二、铅酸蓄电池的工作原理·····	182
三、铅酸蓄电池使用注意事项·····	183
任务五 磷酸铁锂电池·····	183
一、磷酸铁锂电池的结构·····	184
二、磷酸铁锂电池充放电原理·····	185
三、磷酸铁锂电池的特点·····	185
四、磷酸铁锂电池的梯次利用·····	186
五、磷酸铁锂电池在储能市场的应用·····	186
任务六 太阳能光伏蓄电池的安装、维护与管理·····	188
一、光伏蓄电池的安装·····	188
二、光伏蓄电池的维护·····	189
三、光伏蓄电池的管理·····	190
巩固练习·····	192

项目九 太阳能聚光系统 193

任务一 聚光光伏发电的优缺点探究·····	194
一、聚光光伏发电概述·····	194
二、光伏发电聚光系统优点·····	195
三、光伏发电聚光系统缺点·····	196
任务二 聚光光伏部件·····	196
一、聚光光伏电池·····	196
二、聚光器·····	198
三、散热部件·····	201
任务三 聚光光伏系统·····	202
一、低倍聚光光伏系统·····	202
二、中倍聚光光伏系统·····	204
三、高倍聚光光伏系统·····	205
巩固练习·····	209

项目十 太阳能光伏发电系统

211

任务一 太阳能光伏发电系统概述	212
一、并网系统	212
二、离网系统	214
三、混合系统	215
任务二 太阳能光伏发电系统的安装	217
一、太阳能光伏发电系统安装重要性	217
二、太阳能光伏方阵安装	218
三、直流汇流箱安装	220
四、控制器安装与连接	221
五、逆变器安装与连接	222
六、存储器安装与连接	224
七、交流与直流电气连接	225
八、系统接地与保护	226
九、防雷装置的安装	227
十、系统监测的安装要求与流程	227
任务三 太阳能光伏发电系统运行与维护	228
一、太阳能光伏发电系统的运行管理	229
二、太阳能光伏发电系统的维护	230
三、太阳能光伏发电系统运行与维护的注意事项	233
四、太阳能光伏发电系统运行与维护的发展趋势	234
任务四 某光伏电站的施工案例	235
一、施工前期准备	235
二、施工安装过程	237
三、分布式光伏电站验收资料	244
任务五 太阳能光伏发电系统实训	245
一、实验设备准备	245
二、实验注意事项	247
三、实验原理和特性参数	247
四、实验内容	248
五、实验报告要求	250
六、实验表格	252
七、实训评价	253
巩固练习	255

参考文献

257

项目三

太阳能光伏电池

项目描述

本项目主要介绍太阳能光伏电池的原理和分类。实际上光伏电池是利用光电转换原理，将太阳辐射光能通过半导体物质直接转换为电能的器件。这种光能转换过程通常叫作“光生伏打效应”。由若干个这种器件封装成光伏电池组件，再根据需要将若干个光伏电池组件组合成一定功率的光伏阵列，并与储能、测量、控制等装置相配套，即构成光伏发电系统。

学习目标

知识目标

- (1) 了解光伏电池的基本概况。
- (2) 掌握光伏电池的基本结构和工作原理。
- (3) 掌握光伏电池的分类与特性。

能力目标

- (1) 能通过实验和案例分析，探究光伏电池的工作原理。
- (2) 能说出光伏电池的多种分类情况。

素质目标

- (1) 认识到光伏电池在可再生能源领域的重要性和价值，积极倡导绿色能源的使用。
- (2) 通过了解光伏电池在减少碳排放和保护环境方面的作用，增强环保意识和责任感。

任务一 光伏电池的基本结构及工作原理

任务说明

光伏电池作为一种清洁能源发电装置，具有可再生、环保与清洁、静音运行、长寿命、分布式发电、灵活性好及高效能转换等特点和优势。随着技术的不断发展和创新，光伏电池的种类也在不断增加和改进，为清洁能源领域带来更多选择和可能性。本任务主要介绍的光伏电池由多个组件精密组装而成，每个组件都发挥着重要的作用，共同实现太阳能到电能的转换过程。光伏电池的工作原理基于光电效应，即当太阳光照射到半导体材料上时，能够激发出电子，从而产生电流。

任务实施

1941 年，美国电化学家拉塞尔·奥尔首次制造了硅 P-N 结光伏器件。在此基础上，美国贝尔实验室于 1954 年制造出第一个实用的硅扩散 P-N 结光伏电池，并很快将光电转换效率提高到 10%，这是现代硅电池的先驱产品，是第一个能以适当效率将光能转换为电能的光伏器件，它的出现标志着光伏电池研发工作取得了重大进展。20 世纪 60 年代，科学家们将光伏电池应用于空间技术——通信卫星供电。20 世纪末，光伏发电系统在众多领域逐渐大显身手，如太阳能庭院灯、太阳能发电用户系统、村寨供电的独立系统、通信电源、石油输油管道、光缆通信泵站电源、海水淡化系统、高速公路路标等。近年来，我国及欧美等国家已将光伏发电并入城市用电系统及边远地区自然村落供电系统等。随着光伏电池制造技术的改进、各国对环境保护重视程度的提升和对可再生清洁能源需求的增长，光伏电池将为光伏发电系统的大规模应用创造条件。

一、光伏电池的基本结构

光伏电池由在其表面上形成的 P-N 结及正、背面引出的电极构成。一般光伏电池中还包括减反射膜、铝背场等结构，如图 3-1 所示。

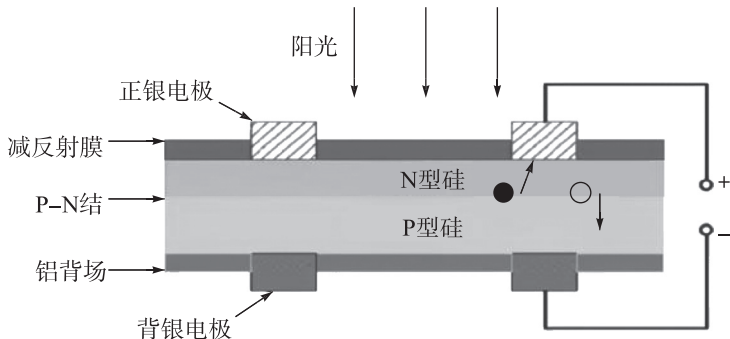


图 3-1 光伏电池的基本结构

二、光伏电池的工作原理

光伏电池是光伏发电系统的发电装置，是组成光伏发电系统最基本的单位，是将光能转化为电能的半导体光伏元件。当有光照射时，光伏电池上、下极之间就会有一定的电势差，用导线连接负载，就会产生直流电（图 3-2），因此光伏电池可以作为电源使用。

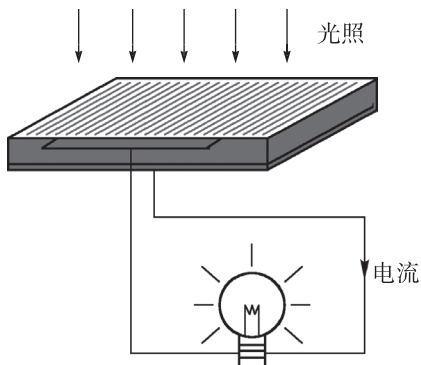


图 3-2 光伏电池工作原理

用于光伏电池的半导体材料是一种介于导体和绝缘体之间的特殊物质，类似其他物质的原子，半导体的原子也是由带正电的原子核和带负电的电子组成的。半导体硅原子的外层有 4 个电子，按固定轨道围绕原子核转动，当受到外来能量的作用时，这些电子就会脱离轨道而成为自由电子，并在原来的位置上留下一个“空穴”。在纯净的硅晶体中，自由电子和空穴的数目是相等的。如果在硅晶体中掺入硼、镓等元素，由于这些元素能够俘获电子，它就成了空穴型半导体，通常用符号 P 表示；如果掺入能够释放电子的磷、砷等元素，它就成了电子型半导体，以符号 N 表示。若把这两种半导体结合，交界面便形成一个 P-N 结。光伏电池的奥妙就在这个“结”上，P-N 结就像一堵墙，阻碍着电子和空穴的移动。当光伏电池受到阳光照射时，在靠近交界面附近的 N 型区中，电子要由浓度大的 N 型区向浓度小的 P 型区扩散，使 N 型区带正电，同时在靠近交界面附近的 P 型区中，空穴要由浓度大的 P 型区向浓度小的 N 型区扩散，使 P 型区带负电。这样，在 P-N 结两端便产生了电动势，也就是通常所说的电压。这种现象就是前面所说的“光生伏打效应”。如果这时分别在 P 型区和 N 型区焊上金属导线，接通负载，则外电路便有电流通过，如此形成的一个个电池元件，把它们串联、并联起来，就能产生一定的电压和电流，并输出功率，如图 3-3 所示。

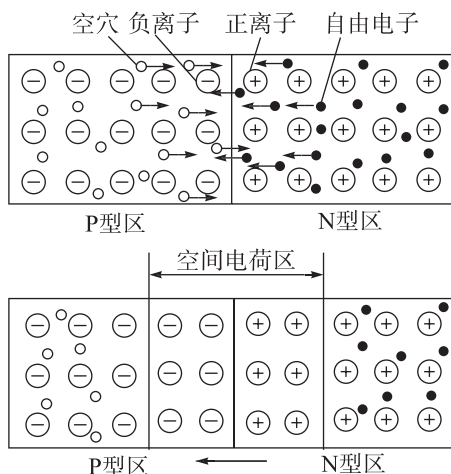


图 3-3 P-N 结的结构示意

任务二 太阳能电池的分类

任务说明

太阳能电池的分类方式多种多样，不同类型的电池具有不同的特点和优势，本任务介绍的硅太阳能电池是最成熟且应用最广泛的类型，主要包括单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池和非晶硅薄膜太阳能电池，在实际应用中，需要根据具体需求和场景选择合适的电池类型。

任务实施

根据目前光伏电池的市场结构，光伏电池主要分为晶硅光伏电池和薄膜光伏电池两种。其中晶硅光伏电池又分为单晶硅光伏电池、多晶硅光伏电池和准晶硅光伏电池，薄膜光伏电池又分为非晶硅薄膜光伏电池和多元化合物薄膜光伏电池，具体分类如图 3-4 所示。

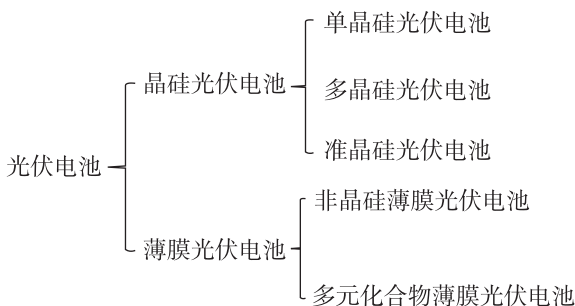


图 3-4 光伏电池的分类

单晶硅光伏电池转换效率较高，技术也比较成熟，但单晶硅成本价格高，大幅度降低其成本很困难。为了节省硅材料，多晶硅光伏电池和薄膜光伏电池逐步成为单晶硅光伏电池的替代产品。多晶硅光伏电池与单晶硅光伏电池相比，成本低廉，而效率却高于薄膜光伏电池。

薄膜光伏电池具有衰减低、重量轻、材料消耗少、制备能耗低、适合与建筑结合等优点。目前，光伏电池中薄膜光伏电池约占到 13%。虽然在大规模部署薄膜光伏电池时可能会面临较低的转换效率问题，但它们在弱光环境下的发电能力和较低的生产成本使其在某些特定的应用场景中仍具有显著优势。

一、晶硅光伏电池

1. 单晶硅光伏电池

单晶硅光伏电池（图 3-5）是采用单晶硅片制造的光伏电池，这类光伏电池发展最早，

产业化技术也最成熟。与其他种类的光伏电池相比，单晶硅光伏电池性能稳定，转换效率高，目前规模化生产的单晶硅光伏电池平均转换效率已达 24%。1980 年以后，由于单晶硅光伏电池技术的持续进步和价格的不断下降，单晶硅光伏电池曾经长期占领最大的光伏市场份额。但由于当时硅材料的生产成本仍较高，市场份额在 1998 年后已逐步被多晶硅光伏电池超越。又经过十几年的发展，一方面金刚线切割技术、多次投料拉晶技术的导入使单晶硅片的生产成本大幅下降，另一方面钝化发射极和后部接触（PERC）技术的导入大幅提升了单晶硅光伏电池的转换效率，从 2016 年开始，单晶硅光伏电池的市场份额快速提高，目前已经占到市场份额的 80% 以上。

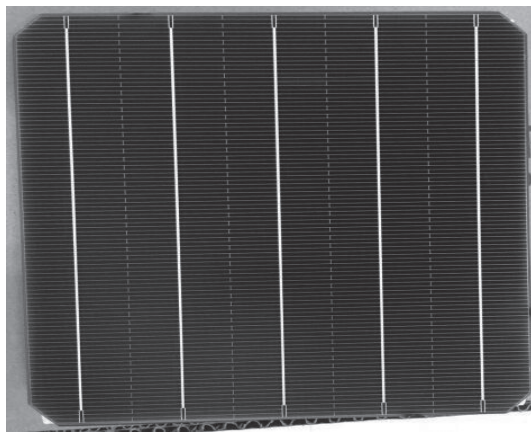


图 3-5 单晶硅光伏电池

2. 多晶硅光伏电池

在制作多晶硅光伏电池时，作为原料的高纯多晶硅料不是拉制成单晶硅，而是加热熔化后直接浇铸成正方形的多晶硅锭，然后使用切割机将其切成薄的多晶硅片，再加工成多晶硅光伏电池（图 3-6）。该工艺方便，易于生长大尺寸硅片，易于自动化生长和控制，并且材料的损耗小，相对能耗小，特别是对硅原材料的容忍度要比直拉单晶硅大。该技术的缺点是铸造的多晶硅锭内晶界多，由于多晶硅片是由不同大小、不同取向的晶粒构成的，内部存在大量晶界和缺陷复合中心，位错密度高，杂质浓度和微缺陷也相对较高，从而可能会降低光伏电池的光电转换效率。然而，这种技术可省去单晶硅拉制过程，成本较低，而且材料利用率高，能耗也较低，所以颇有吸引力。自 1975 年德国瓦克公司在国际上首先利用铸造多晶硅制造光伏电池以来，国际上新建的光伏电池和材料生产线大多采用铸造多晶硅。

近年来，在铸造多晶硅制作工艺领域，通过利用具有平坦固液界面的热场技术，以及应用涂覆氮化硅涂层的石英坩埚来实现铸造；在多晶硅光伏电池制备过程中，受光面沉积氮化硅减反射膜技术、氢钝化技术和铝背电极吸杂技术共同促使铸造多晶硅光伏电池的光电转换效率迅速提高。实验室里铸造多晶硅光伏电池的最高光电转换效率已经达到 21.8%，在实际生产中，铸造多晶硅光伏电池的光电转换效率也已经达到 18.5%~20.5%，由于其制造成本比较低，所以曾经发展很快，一度成为产量和市场占有率最高的光伏电池。

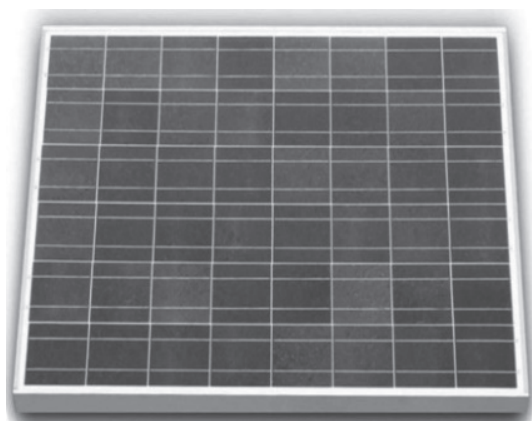


图 3-6 多晶硅光伏电池

3. 准晶硅光伏电池

2012 年前后，市场上出现一种晶硅电池——准晶硅光伏电池，又称准单晶硅光伏电池（图 3-7），它是利用低成本铸造法生长的高质量单晶硅片制造而成的光伏电池。2012 年前后，准单晶硅产品曾经短暂在市场应用过，一度占有 10%~20% 的市场份额。相较于普通多晶硅光伏电池，准单晶硅光伏电池晶界少，位错密度低，转换效率高出多晶硅光伏电池 0.7%~1%。准单晶硅技术并不能生长全单晶硅锭，只有中间接近 90% 的面积为单晶。该区域的单晶品质不如普通直拉单晶，由于冷却热应力的作用，铸造单晶中仍存在较多位错缺陷，比普通单晶硅光伏电池转换效率低 0.5%；准单晶硅多晶区域占 10%，品质不如普通多晶。总体来说该电池转换效率比单晶硅光伏电池低，但比多晶硅光伏电池转换效率高，由于成本低，2017 年后该电池重新受到关注，该电池还具有比单晶硅光伏电池更优异的抗光致衰减性能。



图 3-7 准（单）晶硅光伏电池

二、薄膜光伏电池

薄膜光伏电池由于所用材料少、工艺流程短、耗能少，因此成本低，受到了人们的青睐。特别是随着分布式光伏与建筑一体化的推广应用，加上物联网、电动汽车、智能机器人、无人机、平流层平台及卫星等移动能源的潜在市场需求进一步扩大，薄膜光伏电池更有其独特的优势。

1. 非晶硅薄膜光伏电池

非晶硅薄膜光伏电池（图 3-8）是 1976 年出现的新型薄膜式光伏电池。非晶硅薄膜光伏电池的最大特点是材料厚度为微米级。它与单晶硅和多晶硅光伏电池的制作方法完全不同，制作过程采用化学气相沉积工艺，原材料为硅烷、硼烷和磷烷等，工艺过程大大简化，硅材料消耗很少，电耗更低。它的主要优点是在弱光条件下也能发电，而且成本低、重量轻、转换效率较高、便于大规模生产，有极大的潜力。但受制于其材料引发的光电效率衰退效应，稳定性不高，直接影响了它的实际应用。如果能进一步加强稳定性并提高转换率，那么，非晶硅薄膜光伏电池无疑将是光伏电池的主要发展产品之一。



图 3-8 非晶硅薄膜光伏电池

2. 多元化合物薄膜光伏电池

多元化合物薄膜光伏电池材料为无机盐，其主要包括碲化镉（CdTe）、砷化镓（GaAs）、铜铟镓硒（CIGS）等。

碲化镉薄膜电池的效率较非晶硅薄膜光伏电池效率更高，成本较单晶硅光伏电池更低，并且易于大规模生产，但由于镉有剧毒，会对环境造成严重的污染，因此并不是晶硅光伏电池最理想的替代产品。

砷化镓Ⅲ-V族化合物电池的转换效率可达 28% 以上。砷化镓化合物材料具有十分理想的光学带隙及较高的吸收效率，抗辐照能力强，对热不敏感，适合用于制造高效单结电池，转化效率可达 47%，但砷化镓材料价格不菲且有毒，因而在很大程度上限制了砷化镓电池的普及，目前该电池主要应用于空间电源。

铜铟镓硒（CIGS）薄膜光伏电池是铜铟硒（CIS）薄膜光伏电池掺入镓（Ga）后形成的四元化合物电池。CIGS 薄膜光伏电池的发展起源于 1974 年的美国贝尔实验室，1975 年其转换效率提升至 12%，目前 CIGS 薄膜光伏电池的转换效率已经达到 23.6%，和晶硅光伏电池 25% 的转化效率没有太大差别。该电池的主要优点：具有较高的光吸收率，比非晶硅电池效率高，生产成本低，仅为晶硅光伏电池的 $1/3 \sim 1/2$ 。铜铟镓硒薄膜光伏电池性能稳定，可制成柔性光伏电池（图 3-9），在建筑一体化、移动电源等市场具有发展前景。它将成为今后发展光伏电池的一个重要方向。由于铟（In）和硒（Se）都是比较稀有的元素，因此，这类电池的发展又必然受到限制。



图 3-9 铜铟镓硒柔性光伏电池

从技术发展趋势看，虽然目前晶硅光伏电池仍然占据主要地位，但是薄膜光伏电池未来发展前景更被看好。一方面，薄膜光伏电池成本低，装载至光伏发电系统后整体价格和其他能源相比劣势更小；另一方面，目前的薄膜光伏电池虽然转换效率和晶硅光伏电池相比还有一点小差距，但是近年来薄膜光伏电池的转换效率提高更快，一旦转换效率水平和晶硅光伏电池接近甚至超过的话，成本优势更大，必将加速薄膜光伏电池的发展。

任务三 光伏电池的生产工艺

任务说明

近些年来，全世界生产应用最多的光伏电池是主要由单晶硅光伏电池和多晶硅光伏电池构成的晶硅光伏电池，其产量占到当前世界光伏电池总产量的 90% 以上。晶硅光伏电池工艺技术成熟，性能稳定可靠，光电转换效率高，使用寿命长，已实现工业化大规模生产。因此，本任务主要介绍晶硅光伏电池的一般生产工艺。

任务实施

光伏产业链包括硅料、铸锭（拉棒）、切片、电池片、电池组件、应用系统 6 个环节。上游为硅料、铸锭（拉棒）、切片环节；中游为电池片、电池组件环节；下游为应用系统环节。从硅矿到晶硅光伏电池的主要流程（图 3-10）：硅矿→金属硅→多晶硅→单晶硅棒（多晶硅锭）→单（多）晶硅片→单（多）晶硅电池。

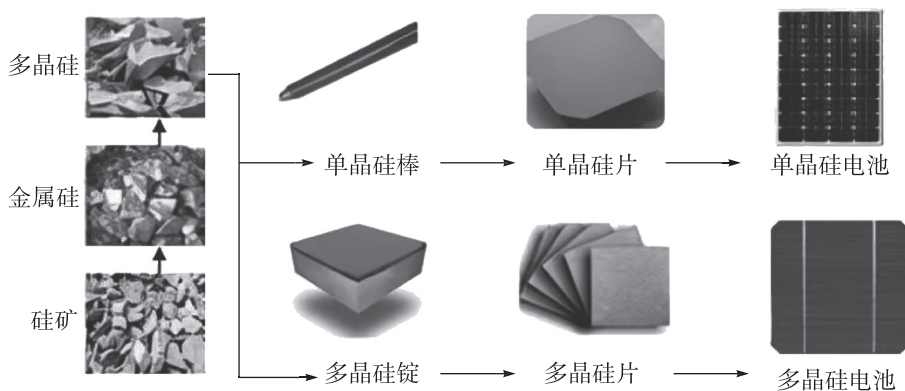


图 3-10 晶硅光伏电池产业链示意

一、金属硅的制备

硅矿石也称石英岩，是光伏产业最重要的基础材料，晶硅光伏电池的制备从硅矿石开始。硅矿石是制约光伏产业链发展的瓶颈之一，硅矿石的价格是影响晶硅光伏电池成本的最主要因素，硅材料的品质则直接影响晶硅光伏电池的光电性能。影响金属硅制备成本的因素主要是硅矿石、还原剂、电力等的价格，随着技术的进步，行业内涌现出多种金属硅的制备工艺，其工艺越来越简单、制备效率逐步提高、制备成本逐步降低，金属硅的品质越来越好。

金属硅的生产流程如下。

（1）将原料硅石经过洗选、筛分并干燥后，根据所用还原剂的种类（常用的还原剂为焦炭、石油焦、木屑等），分别按不同的比例配料，用计算机程序控制各料比例，通过送料过程进行混匀，进入电弧炉内。

（2）在电极上通入电流，加热炉内的物料，达到 1 800 ℃以上的高温，硅在炉内被焦炭等还原剂还原出来，呈液态，通过出硅口排放，铸成硅锭。

具体的化学反应方程式为 $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \xrightarrow{\text{高温}} \text{Si} + 2\text{CO} \uparrow$ 。

硅矿石冶炼后的产物是金属硅，其主要成分是硅元素，含量通常在 98% 左右，有时也可以达到 99.99%。金属硅中可能含有少量的杂质，如铁、铝、钙等，外观是灰褐色、具有金属光泽且硬而脆的硅块。

二、高纯多晶硅的制备

高纯多晶硅的制备需要将金属硅进行进一步的提纯和加工，通常采用化学气相沉积（CVD）工艺，使用高纯度的三氯氢硅（ SiHCl_3 ）或四氯化硅（ SiCl_4 ）与氢气反应来制备。

高纯多晶硅原料是硅产品产业链中的一个极为重要的中间产品，是制造直拉单晶硅和铸造多晶硅的原料，光伏行业中常说的高纯多晶硅是指纯度高于 7 个 9（7 N，即 99.999 99%）的多晶硅。一般需要经过复杂的工艺流程才能得到高纯度的晶体硅。随着技术的发展与进步，制造高纯多晶硅的工艺越来越成熟，而多晶硅的品质也越来越好。目前市场主流的方法有改良西门子法、硅烷流化床法等。改良西门子法以生产棒状多晶硅为主，而硅烷流化床法以生产颗粒状多晶硅为主，棒状和颗粒状多晶硅两种料在铸锭或拉晶过程中配合使用，可增加装料量，有利于降低硅锭制造成本。

三、硅锭的制备

高纯多晶硅必须加工成硅片才能用来制备光伏电池，制备硅片前需要先将高纯多晶硅加工成晶体硅锭。目前硅锭主要分为三类：第一类是通过直拉法、悬浮区熔法、磁控直拉法和连续加料直拉法等制备的单晶硅棒；第二类是通过布里奇曼法、热交换法、电磁铸造法、浇铸法等利用定向凝固原理铸造的多晶硅锭；第三类是用多晶铸锭的工艺，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锭，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。近年来，随着国内多晶硅厂商设备国产化率的不断提升，其生产成本也得以显著降低。目前，我国多晶硅企业的生产成本已显著低于国外企业。随着多晶硅新建产能的集中释放，我国逐步实现太阳能级多晶硅的国产替代。同时，在全球新能源需求持续攀升的环境下，光伏产业迎来了高速发展的阶段。然而，经过一轮产能扩张后，2023 年后我国多晶硅行业也迎来了产能过剩的挑战。

四、单晶硅片的制备

单晶硅片的制备流程：裁切单晶硅棒（去头尾）、滚圆 / 切方、倒角、粘胶、切片、化学清洗、硅片分选 / 检验 / 包装，如图 3-11 所示。

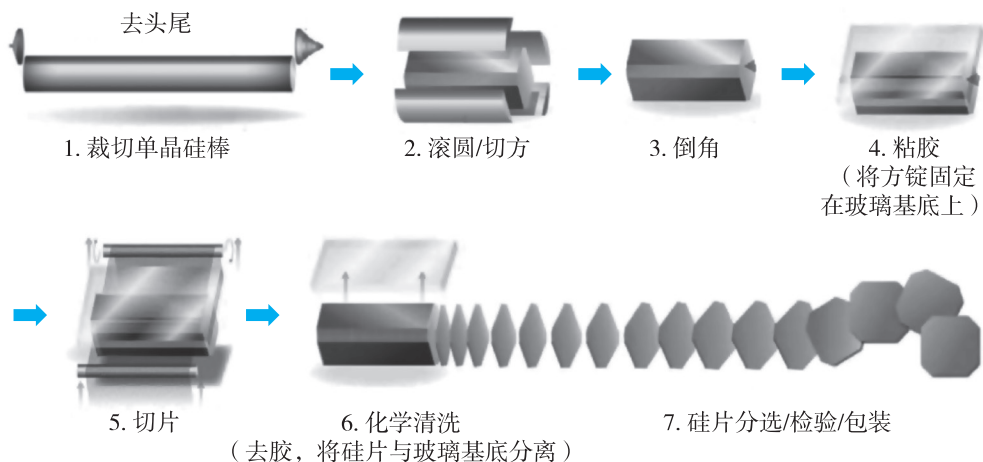


图 3-11 单晶硅片的制备流程

1. 裁切单晶硅棒（去头尾）

沿垂直于晶体生长的方向切去单晶硅棒的头部和尾部等外形尺寸小于规格要求的部分，再根据需求将晶棒分段切成切片设备可以处理的长度。

2. 滚圆 / 切方

滚圆即滚磨外圆。虽然单晶硅棒等径生长部分直径差异很小，但由于晶体生长时的热振动、热冲击等一些原因，晶棒表面并不光滑，整个晶棒的直径也不一致。因此需要对晶棒进行滚圆加工，使其形成规则的圆柱形表面，便于后续的工艺制作。

切方即将圆形晶棒加工成方形。切方后的硅块截面近似为正方形，被切下来的边缘部分可以回收使用，当成制备单晶硅棒的硅原料。切方会在硅块的表面造成机械损伤，因此加工时所达到的尺寸与所要求的硅片尺寸相比要留出一定的裕量，而且切方后硅块表面留有大量的切削液，因此需要进行清洗。

3. 倒角

通常采用高速运转的金刚石磨轮对硅棒边缘进行磨削，从而获得钝圆形边缘（切片后形成硅片的小倒角，可以有效避免硅片崩边和产生位错及滑移线等缺陷）。由于切片后即是单晶硅片的大倒角，因此，单晶光伏硅片也可以不做倒角处理。

4. 粘胶

使用多线切割机切割硅块时，需要将硅块粘在玻璃制成的垫板上（起到固定作用，防止切割过程中硅块移动影响切割效果），再在其上放置导向条，便于多线切割机进行切片。

5. 切片

切片是硅片制备中的一道重要工序。它决定了硅片的厚度、翘曲度、平行度和表面质量等因素。经过这道工序后，晶体硅棒质量会损耗约 1/3，严格控制工艺可以减少硅棒损耗。

6. 化学清洗

切好的硅片表面残留有粘胶和切削液（砂浆），需要进行清洗。脱胶通常采用热除胶

法，即将自来水加热到 80 ℃ 以上进行长时间的浸泡达到软化粘胶使其脱落的目的。去除砂浆主要采用大量自来水反复冲洗硅片的方法。另外，硅片在滚圆、切方及切片过程中，被加工的表面都会有不同程度的损伤层，因此需要对硅片表面进行化学腐蚀清洗。硅表面的化学腐蚀一般采用湿法腐蚀，目前主要使用氢氟酸（HF）、硝酸（HNO₃）混合的酸性腐蚀液，以及氢氧化钾（KOH）液或氢氧化钠（NaOH）液等碱性腐蚀液。

7. 硅片分选 / 检验 / 包装

最终要对硅片进行全面的检测，以便分析其是否能够进入晶硅电池制备环节，若不能就会被淘汰，其检测内容大致可以分为外观检测、尺寸检测及物理性能检测。外观检测主要包括有无裂纹、缺口、线痕、划伤、凹坑等；尺寸检测主要包括边宽、对角线宽度、中心厚度、总厚度偏差、弯曲度等；物理性能检测主要包括少数载流子寿命、电阻率、碳氧含量、导电属性等。

随着每一步工艺的完成，硅片的价值随之升高，对清洁度的要求也越来越高，因此硅片的包装非常重要。包装的目的是为硅片提供一个无尘的环境，并使硅片在运输时不受到任何损伤，还可以防止硅片受潮。理想的包装是既能提供清洁的环境，又能控制保存和运输时环境的整洁。常用的包装材料为聚丙烯（PP）、聚乙烯（PE）等，这些塑料材料不会释放任何气体并且可以做到无尘，这样硅片表面才不会被污染。

五、多晶硅片的制备

铸造多晶硅是一个方形的铸锭，不需要进行切断、滚圆等工序，只需要将晶锭去除头尾料和边料后，根据硅锭的大小，沿纵向将硅锭切割成一定数目的晶块，最后利用线切割机切成硅片。多晶硅片的制备流程：切除头尾料和边料、切方 / 检测、倒角 / 粘胶、切片、化学清洗、硅片分选 / 检验 / 包装，如图 3-12 所示。

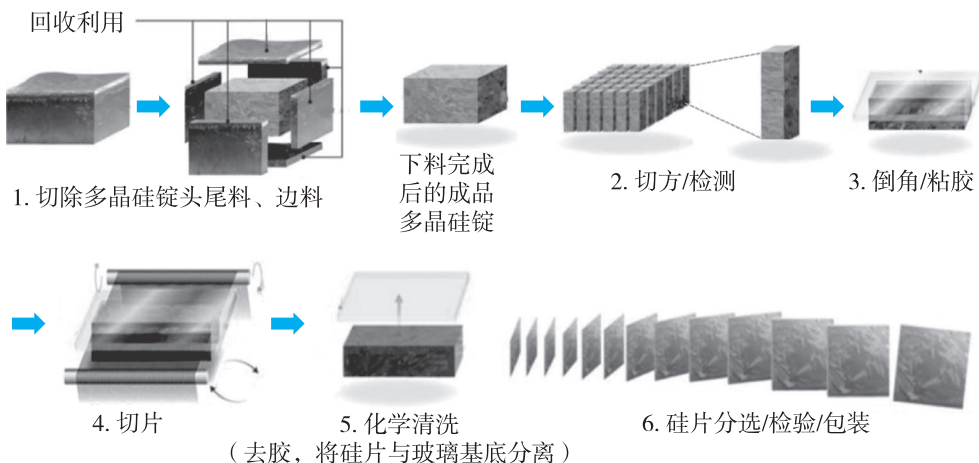


图 3-12 多晶硅片的制备流程

一般铸造完成的多晶硅锭顶部、底部和周边聚集了高浓度杂质、位错和微晶等缺陷，

这些缺陷会产生大量的复合，导致少数载流子寿命较短，严重影响光伏电池的转换效率，影响光伏电池性能。因此，在制备硅块之前，需要把多晶硅锭的头尾料和边料切除，切下来的部分可以回收利用。

判断硅块去除头尾料和边料的依据主要有杂质阴影、电阻率、少数载流子寿命等。杂质阴影主要利用红外探伤测试仪测试，应将含有杂质阴影的部分全部去除。电阻率通过电阻率测试仪进行测试，硅锭的电阻率在铸锭前配料时会经过理论计算，但实际生产中会有些偏差。少数载流子寿命通过少数载流子寿命测试仪进行测试。

去除头尾料和边料后的多晶硅锭是规则的方锭，需要将其分割成一定尺寸的小方锭。倒角、粘胶、切片、清洗、硅片分选 / 检验 / 包装等工艺与单晶硅片的相同。

六、晶硅光伏电池的制造

制造晶硅光伏电池的主要流程如图 3-13 所示。

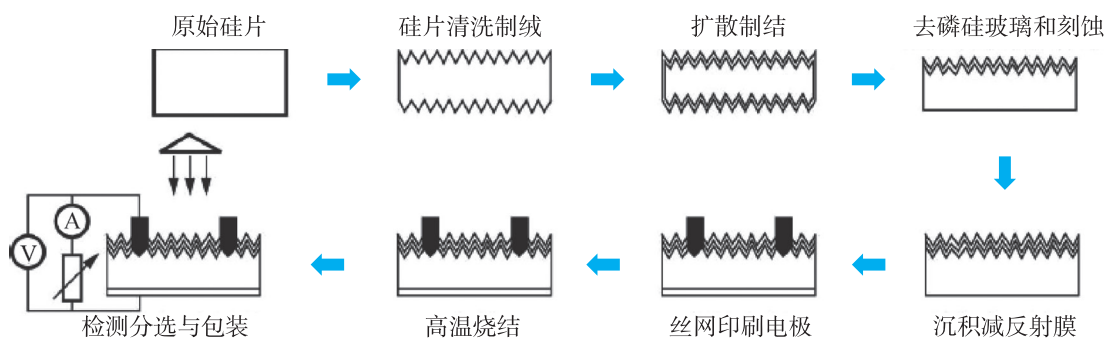
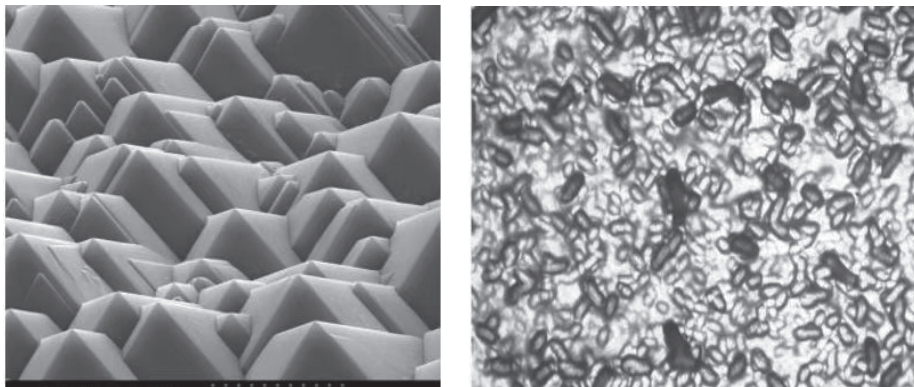


图 3-13 晶硅光伏电池的制造流程

1. 硅片清洗制绒

硅片清洗制绒是半导体设备制造过程中不可或缺的关键步骤。在进行硅片清洗时，利用先进的清洗设备和化学清洗剂，通过超声波振动和化学腐蚀的协同作用，对硅片表面进行深度净化。这一阶段旨在彻底清除硅片在生产、储存和运输过程中可能附着的一切污染物，包括油污、金属颗粒、氧化物及其他微粒杂质，确保硅片表面达到极高的洁净度，为后续的制绒工序创造良好的基础条件。

制绒工艺是提升硅片光电转换效率的重要手段。通过精心调控的化学腐蚀溶液或物理刻蚀方法，根据硅片的特性，单晶硅片一般采用碱制绒，多晶硅片一般采用酸制绒（图 3-14），在硅片表面精心构建一层细腻而均匀的绒面结构。这一结构能够有效增加硅片对太阳光的吸收面积，从而提高光的捕获效率。绒面的形成还能够帮助减少光反射损失，使更多的光能转化为电能，对于提高光伏电池的整体性能至关重要。



(a) 单晶硅片的碱制绒绒面形状

(b) 多晶硅片的酸制绒绒面形状

图 3-14 单晶硅片的碱制绒绒面形状和多晶硅片的酸制绒绒面形状

制绒效果是评估硅片预处理质量的重要指标之一。为了确保制绒质量符合工艺要求，需要对制绒后的硅片进行严格的检测。通过显微镜观察和光反射率测试等手段，可以评估绒面的均匀性、粗糙度和深度等参数。这些参数直接影响到硅片对光的吸收和反射性能，进而影响整个光伏电池的性能。因此，对制绒效果进行检测是确保硅片预处理质量的重要保障。

在完成清洗和制绒工序后，硅片需要经过专门的甩干设备进行高速旋转，以去除表面附着的水分和残留的清洗液。这一过程中，需要精确控制甩干速度和甩干时间，以确保硅片表面不会被过度磨损或造成二次污染。如果甩干不彻底，可能会导致水分和清洗液残留，进而在后续工序中产生问题，影响产品的质量和性能。因此，甩干处理是确保硅片预处理质量的关键步骤之一。

2. 扩散制结

(1) 磷扩散形成 P-N 结。在晶硅光伏电池的制造过程中，扩散制结是一道极其关键的工序。它通过高温下的原子扩散机制，将磷原子引入硅片内部，从而在硅片中形成 N 型区域。当磷原子成功注入硅片后，通过高温处理使磷原子扩散进入硅片，形成磷硅玻璃层。这一层磷硅玻璃不仅改变了硅片的导电类型，还为后续的电池制备提供了必要的结构基础。

P-N 结是晶硅光伏电池的核心结构之一。它是由 P 型硅和 N 型硅通过扩散形成的异质结，具有整流效应和光电效应。在光照条件下，P-N 结能够吸收光能并转化为电能，实现光电转换。因此，P-N 结的质量直接影响到晶硅光伏电池的光电转换效率和性能。

(2) 扩散过程与反应。扩散过程需要在高温下进行，以加快磷原子的扩散速度。在扩散过程中，需要精确控制扩散温度、时间和气氛纯度等参数。这是因为在高温下，磷原子会不断扩散并进入硅片内部，形成 N 型区域。如果温度过高或时间过长，可能会导致磷原子过度扩散，从而影响电池的性能。

磷原子扩散进入硅片形成磷硅玻璃层，磷硅玻璃是一种脆性材料，容易在后续步骤中

破裂或脱落。因此，在扩散完成后，需要采取适当的措施去除磷硅玻璃层。

3. 去磷硅玻璃和刻蚀

去磷硅玻璃和边缘刻蚀是晶硅光伏电池制备过程中的重要步骤。在扩散完成后，硅片表面会残留一层磷硅玻璃。这层玻璃不仅影响电池的美观性，还可能对电池的性能产生不利影响。因此，需要通过化学腐蚀法或物理方法将其去除。化学腐蚀法主要是利用腐蚀液与磷硅玻璃发生化学反应，从而将其溶解。物理方法则主要是通过机械摩擦或激光照射等方式去除磷硅玻璃。

为了避免电池边缘的短路问题，还需要对硅片边缘进行刻蚀处理。这是因为在制备过程中，电池边缘可能会受到损伤或污染。通过刻蚀处理，可以去除这些不良影响，从而提高电池的可靠性。

4. 沉积减反射膜

(1) 氮化硅 (Si_3N_4) 减反射膜制备。氮化硅减反射膜的制备通常采用化学气相沉积法 (CVD) 或物理气相沉积法 (PVD)，如磁控溅射、电子束蒸发等。在 CVD 过程中，通常使用硅烷 (SiH_4) 和氨气 (NH_3) 作为反应气体，在高温下通过化学反应生成氮化硅薄膜。而在 PVD 方法中，则是将硅靶材与氮气 (N_2) 反应，通过物理撞击将硅原子溅射到硅片表面形成薄膜。在沉积过程中，可以通过控制反应温度、气体流量、压力等参数来调节薄膜的厚度和性能。

(2) 减反射与钝化效果。由于氮化硅的折射率与硅相近，因此氮化硅减反射膜可以有效地减少光线在硅片表面的反射，增加光的吸收，从而提高电池的光电转换效率。此外，氮化硅薄膜还具有优异的钝化性能，能够有效地减少硅片表面的悬挂键和缺陷，降低载流子的复合速率，提高电池的开路电压和短路电流。因此，氮化硅减反射膜在晶硅光伏电池的制备中得到了广泛应用。

5. 丝网印刷电极

电极是晶硅光伏电池与外部电路连接的桥梁，直接影响到电池的性能和效率。在晶硅光伏电池的生产过程中，通过丝网印刷等方法，可以在硅片表面印刷上银浆或铝浆等电极材料。丝网印刷是一种常用的电极制作技术，它使用含有银或铝等导电材料的浆料，通过丝网模板将浆料涂抹在硅片表面，形成所需的电极图案。银浆具有良好的导电性和较低的电阻率，因此常用于正面电极的印刷。而铝浆则因其成本较低而广泛应用于背面电极的印刷。

在印刷过程中，正面电极通常印刷在减反射膜上，而背面电极则直接印刷在硅片背面。将正面电极印刷在减反射膜上，可以增加电池对光的吸收和利用。而背面电极直接印刷在硅片背面，可以增加电池与外部电路的连接面积，提高电池的性能。为了确保电池具有优良的性能和稳定性，需要严格控制电极制作的各项参数和技术要求。这些参数包括印刷质量、烘干温度和烧结条件等。通过优化这些参数和技术要求，可以确保电极与硅片之

间的良好接触和导电性。良好的电极印刷质量可以确保电池具有较低的串联电阻^①和较高的填充因子^②，从而提高电池的输出功率和效率。同时，合理的电极形状和布局也可以优化电池的性能和可靠性。

6. 高温烧结

印刷完成后，需要对电极进行烘干和烧结处理。烘干可以去除电极中的溶剂和水分，使电极更加牢固地附着在硅片表面。这一过程通常在一定的温度下进行，以使溶剂和水分充分挥发，同时使电极材料与硅片表面形成良好的黏附力。烧结则是将电极材料与硅片形成冶金结合的关键步骤，通过高温处理，可以使电极材料与硅片之间形成良好的接触和导电性。在烧结过程中，电极材料中的金属颗粒会与硅片表面的硅原子发生反应，形成硅化物等冶金结合产物，增强了电极与硅片之间的附着力，使电极与硅片接触变得更加紧密，导电性能更好，电阻消耗更小。

7. 检测分选与包装

(1) 电池片检测。在电池片制造流程的末期，需要对电池片进行全面的检测。检测的目的在于确保电池片的性能和质量符合预设的标准和要求。外观检查是电池片检测中的重要环节，通过目视检查或机器视觉系统对电池片表面进行细致的观察和分析。主要关注电池片表面是否有裂纹、划痕、污渍、气泡等缺陷，这些缺陷可能影响电池片的外观质量及后续的电性能表现。

电性能测试是验证电池片性能是否达标的关键步骤。通过专业的测试设备和仪器，对电池片的各项电性能参数进行全面评估，包括但不限于开路电压、短路电流、填充因子、转换效率、内阻、电容等。这些参数直接决定了电池片在工作状态下的性能表现，如输出电压、电流和功率等。同时，为了评估电池片在长时间使用过程中的稳定性和耐久性，可靠性测试显得尤为重要。这包括但不限于湿热测试、热循环测试、紫外线（UV）照射测试、干热测试、湿漏电流测试、机械负载测试等，通过这些测试可以模拟电池片在不同环境条件下的工作状况，预测其长期使用的可靠性和寿命。

(2) 分选与分类。根据检测结果，将电池片进行分选和分类。分选和分类的目的是将性能相近的电池片归为同一类别，以便后续的封装和应用。分类过程中，需要严格控制分类标准和分类精度，以确保电池片的性能和质量符合客户要求。同时，还需要对分类结果进行标识和记录，以便后续的追溯和管理。

(3) 包装入库准备。对分类后的电池片进行包装和入库准备。包装过程是确保电池片在运输和储存过程中不受损坏的关键环节，需要选择合适的包装材料和包装方式。同时，还需要对电池片进行标识和记录，以便后续的追溯和管理。标识应清晰明了，记录应准确完整，以便在需要时能够快速准确地找到所需的电池片。同时，还需要对电池片进行再次检查和确认，以确保其质量和性能符合入库要求。

① 串联电阻是电池内部阻碍电流流动的阻力，降低串联电阻可以提高电池的输出电流和功率。

② 填充因子是电池的一个重要性能参数，它反映了电池在特定电压下的输出电流与开路电压的比值。

任务四 太阳能光伏电池的生产实训

任务说明

本任务以小组协作形式开展太阳能光伏电池生产实训，通过模拟真实生产流程，探索光伏电池制造技术要点。实训涵盖原料预处理、硅片清洗制绒、扩散制结、刻蚀镀膜、丝网印刷及烧结测试等环节。同学们需自主查阅行业标准与技术资料，设计各工序操作方案，规范操作清洗机、扩散炉等专业仪器。最终使用实训室专业测试设备完成电池性能检测，形成实训报告，详细记录操作过程、问题分析及解决方法。通过本次实训，同学们将熟悉太阳能光伏电池生产流程，提升实践操作与技术应用能力。

任务实施

一、实训准备

1. 原材料

(1) 单晶硅片。单晶硅片因其原子排列高度有序且纯度极高，成为制备高效光伏电池的优质选择。在实际生产中，高纯度的单晶硅片可有效减少电子-空穴对的复合概率，从而显著提升光伏电池的光电转换效率。例如，在一些高端光伏电池生产线中，使用纯度达到 99.999 9% 以上的单晶硅片，其制成的光伏电池光电转换效率可突破 25%。

(2) 多晶硅片。多晶硅片虽然在原子排列规整性上逊于单晶硅片，但因其成本相对较低，在大规模光伏电池生产中应用广泛。多晶硅片通过铸锭工艺制备，生产过程相对简单，能够满足市场对中低端光伏电池的大量需求。目前，市场上大部分常规光伏组件多采用多晶硅片，其光电转换效率一般在 18%~22%。

(3) 银浆。银浆作为光伏电池电极的关键材料，具有优良的导电性。在丝网印刷过程中，银浆需均匀地印刷在硅片表面，形成良好的导电通路，以确保光伏电池产生的电流能够高效引出。优质银浆的选择对于提高电池的填充因子和短路电流至关重要，不同品牌和型号的银浆在导电性、烧结特性等方面存在差异，会对电池性能产生显著影响。

(4) 铝浆。铝浆主要用于在硅片背面形成背电场，其作用是降低硅片背面的复合速率，提高电池的开路电压和填充因子。在烧结过程中，铝浆与硅片发生合金化反应，形成良好的欧姆接触。铝浆的成分和粒度等参数会影响其在硅片上的附着力和烧结效果，进而影响电池的性能。

(5) 减反射膜材料。常见的减反射膜材料为氮化硅，其具有合适的折射率，能够有效减少光在硅片表面的反射，增加光的吸收量。在等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 设备中，通过控制工艺参数，在硅片表面沉积一层厚度均匀的氮化硅减反射膜。减反射膜

的厚度和折射率需精确控制，以达到最佳的减反射效果，一般氮化硅减反射膜的厚度在 70～80 nm 之间。

2. 设备工具

(1) 扩散炉 (图 3-15)。扩散炉是在硅片表面形成 P-N 结的核心设备。其工作原理是在高温环境下，使磷源气体（如三氯氧磷）分解，释放出的磷原子通过热扩散进入硅片表层，形成 P-N 结。扩散炉的温度均匀性、气体流量控制精度及升温降温速率等参数对 P-N 结的质量和性能有着关键影响。例如，温度不均匀可能导致硅片不同区域的 P-N 结深度不一致，从而影响电池的一致性。



图 3-15 扩散炉

(2) 等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 设备。PECVD 设备利用射频功率激发反应气体产生等离子体，在较低温度下实现薄膜沉积。在光伏电池生产中，主要用于在硅片表面沉积氮化硅减反射膜。设备的射频功率、反应压力、气体流量及沉积时间等参数相互关联，共同决定了减反射膜的质量。例如，射频功率过高可能导致薄膜生长过快，质量下降；反应压力不稳定则可能使薄膜厚度不均匀。

(3) 丝网印刷机。丝网印刷机用于将银浆和铝浆精确印刷在硅片表面，形成电极。其关键参数包括印刷压力、刮刀速度、网版间距及网版精度等。印刷压力过大可能导致浆料渗透过深，影响电池性能；刮刀速度过快则可能使浆料分布不均匀，出现漏印或虚印现象。高精度的网版能够保证印刷图案的准确性和清晰度，对电池的电极质量至关重要。

(4) 烧结炉。烧结炉对印刷后的硅片进行烧结，使电极与硅片形成良好的接触。烧结过程需严格控制温度曲线，包括升温速率、峰值温度和降温速率等。合适的温度曲线能够确保银浆和铝浆与硅片充分反应，形成低电阻的欧姆接触，同时避免对硅片造成热损伤。例如，升温速率过快可能导致电极开裂，峰值温度过高则可能使硅片变形。

(5) 测试仪。太阳能电池测试仪用于模拟太阳光照射条件,测量电池的各项性能参数。其核心部件包括光源系统、电子负载系统和数据采集系统等。光源系统需能够模拟标准太阳光的光谱和强度分布,电子负载系统用于精确控制电池的工作状态,数据采集系统则实时采集并处理电池的开路电压、短路电流、最大功率点电压、最大功率点电流等参数。测试仪的精度和稳定性直接影响电池性能测试结果的可靠性。

3. 安全防护装备

(1) 实验服。实验服采用防火、防腐蚀的材料制作,能够有效阻挡高温、化学试剂等对人体的伤害。在操作过程中,应全程穿着实验服,确保身体得到充分保护。

(2) 护目镜。护目镜用于保护眼睛免受高温、强光、化学飞溅物等的伤害。在接触扩散炉、PECVD 设备等可能产生强光或高温的操作环节,以及使用腐蚀性化学试剂时,必须佩戴护目镜。

(3) 手套。手套分为防高温手套和防化学腐蚀手套。防高温手套采用耐高温材料制作,可在操作高温设备时防止手部烫伤;防化学腐蚀手套则能有效抵御化学试剂对手部皮肤的侵蚀。在不同的操作场景中,需根据实际情况选择合适的手套佩戴。

二、生产实训流程

1. 硅片清洗

(1) 操作步骤。

①准备清洗剂。根据硅片表面杂质的类型和污染程度,选择合适的清洗剂。常用的清洗剂有酸性清洗剂、碱性清洗剂和有机溶剂清洗剂等。例如,对于油污较多的硅片,可选用含有表面活性剂的碱性清洗剂;对于金属杂质污染的硅片,酸性清洗剂可能更为有效。

②配置清洗液。按照清洗剂的使用说明,在超声波清洗槽中配置适量的清洗液。一般情况下,清洗液的浓度需严格控制,过高的浓度可能对硅片表面造成腐蚀,过低的浓度则可能无法达到清洗效果。例如,某碱性清洗剂的推荐浓度为 5%~10%,需使用去离子水进行稀释。

③放置硅片。使用干净的镊子或专用硅片承载工具,将硅片小心地放入超声波清洗槽中,确保硅片完全浸没在清洗液中。硅片之间应保持适当的间距,避免相互碰撞或重叠,影响清洗效果。

④开启超声波装置。设置超声波清洗的时间和功率,一般清洗时间为 15~20 min,功率根据清洗槽的规格和硅片的材质进行调整。超声波的高频振动能够产生微小的气泡,这些气泡在破裂时会产生强大的冲击力,有效去除硅片表面的油污、灰尘等杂质。

⑤冲洗硅片。清洗完成后,将硅片从清洗槽中取出,用大量的去离子水冲洗,去除硅片表面残留的清洗剂。冲洗过程中,需不断翻动硅片,确保各个表面都得到充分冲洗。

⑥甩干硅片。将冲洗后的硅片放入甩干机中,设置适当的转速和甩干时间,一般转速

为 $1\,000 \sim 2\,000\text{ r/min}$ ，甩干时间为 $2 \sim 3\text{ min}$ 。甩干机通过高速旋转产生的离心力，将硅片表面的水分去除，使硅片表面保持干燥、清洁，无杂质残留。

(2) 注意事项。

①清洗剂安全。清洗剂具有一定的腐蚀性，在配置和使用过程中，必须佩戴手套、护目镜等防护装备，避免清洗剂接触皮肤和眼睛。如不慎接触，应立即用大量清水冲洗，并及时就医。

②清洗参数控制。严格控制清洗液的浓度、超声波清洗的时间和功率及甩干机的转速和时间等参数。不同类型和规格的硅片可能需要不同的清洗参数，应根据实际情况进行调整。例如，对于薄型硅片，超声波功率不宜过大，以免造成硅片损伤。

③硅片转移。在硅片转移过程中，要使用干净的工具，避免硅片再次污染。硅片表面非常敏感，即使有微小的颗粒或杂质附着，也可能影响后续的生产工艺和电池性能。

2. 扩散制结

(1) 操作步骤。

①准备硅片和石英舟。将清洗后的硅片整齐地放置在石英舟上，硅片之间应保持一定的间隔，以确保气体能够均匀扩散。石英舟需提前进行清洗和烘干处理，保证其清洁度，避免引入杂质影响扩散效果。

②装载石英舟。将装载有硅片的石英舟小心地推入扩散炉的炉管内，确保石英舟放置平稳，位置准确。在推入过程中，要注意避免碰撞炉管内壁，防止硅片受损。

③设置扩散参数。根据生产工艺要求，设置扩散炉的温度、时间和气体流量等参数。扩散温度一般在 $800 \sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，温度的微小变化可能对 P-N 结的质量产生显著影响。扩散时间通常为 $30 \sim 60\text{ min}$ ，时间过短可能导致 P-N 结形成不完全，过长则可能使 P-N 结深度过大，影响电池性能。磷源气体（如三氯氧磷）的流量需精确控制，以保证磷原子在硅片表面的扩散均匀性。

④启动扩散过程。设置好参数后，启动扩散炉，炉管开始升温。在升温过程中，要密切关注炉温的变化，确保升温速率符合工艺要求。当炉温达到设定温度后，保持恒温一段时间，使磷原子充分扩散进入硅片表面，形成 P-N 结。

⑤降温与取出硅片。扩散完成后，缓慢降低炉温，降温速率一般控制在 $5 \sim 10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 。待炉温降至室温后，打开炉门，小心取出石英舟和硅片。在降温过程中，要防止硅片因温度变化过快而产生裂纹或变形。

(2) 注意事项。

①高温操作安全。扩散炉操作涉及高温环境，操作人员必须严格遵守操作规程，佩戴高温防护手套、护目镜等装备。在开启和关闭炉门、装载和卸载石英舟时，要小心谨慎，防止烫伤。

②参数准确性。扩散参数的设置直接关系到 P-N 结的质量和电池性能，必须仔细核对，确保参数准确无误。在生产过程中，如发现参数异常或设备故障，应立即停止操作，

并进行排查和修复。

③有害气体处理。扩散过程中会产生有害气体，如三氯氧磷分解产生的氯化氢气体等。扩散炉应配备完善的通风系统，及时将有害气体排出室外，并进行妥善处理，避免对环境和人员造成危害。

3. 减反射膜制备

(1) 操作步骤。

①准备硅片和反应腔。将扩散后的硅片放置在 PECVD 设备的反应腔内的承载台上，确保硅片放置平整、稳固。反应腔需提前进行清洗和抽真空处理，去除腔内的杂质和空气，保证反应环境的纯净度。

②通入气体。依次通入硅烷、氨气等反应气体，气体流量通过质量流量计进行精确控制。硅烷是氮化硅薄膜的硅源，氨气则提供氮源。在通入气体前，要检查气体管路是否连接正确、密封良好，防止气体泄漏。

③设置设备参数。设置 PECVD 设备的射频功率、反应压力和沉积时间等参数。射频功率一般在 100~200 W 之间，它决定了等离子体的产生和活性，对薄膜的生长速率和质量有重要影响。反应压力通常控制在 100~200 Pa，压力的稳定对于薄膜厚度的均匀性至关重要。沉积时间根据所需薄膜的厚度确定，一般为 20~30 min。

④启动反应过程。设置好参数后，启动 PECVD 设备的射频电源，激发反应气体产生等离子体。在等离子体的作用下，硅烷和氨气发生化学反应，在硅片表面沉积一层氮化硅减反射膜。在反应过程中，要密切观察设备的运行状态，如射频功率的稳定性、反应压力的变化等。

⑤停止反应与取出硅片。沉积完成后，先关闭反应气体的流量，然后关闭射频电源。待反应腔压力降至常压后，打开反应腔门，小心取出硅片。在取出硅片时，要注意避免划伤薄膜表面。

(2) 注意事项。

①设备操作复杂性。PECVD 设备操作较为复杂，操作人员需经过专业培训，熟悉设备的操作流程和参数设置。在操作过程中，要严格按照操作规程进行，避免因误操作导致设备损坏或生产事故。

②气体安全。硅烷等气体易燃易爆，且具有一定的毒性。在使用过程中，必须确保设备密封良好，气体管路无泄漏。同时，要配备气体泄漏检测装置和应急处理设备，一旦发生泄漏，应立即采取相应的应急措施。

③设备维护。定期对 PECVD 设备进行维护和保养，包括清洗反应腔、检查气体管路和射频电源等部件的工作状态。设备的良好运行状态是保证减反射膜质量的关键。

4. 丝网印刷与烧结

(1) 操作步骤。

①准备浆料和丝网印刷机（图 3-16）。将银浆和铝浆分别倒入丝网印刷机的浆料槽中，确保浆料的量足够满足印刷需求。同时，检查丝网印刷机的刮刀、网版等部件是否安装正确、清洁干净。网版的图案应根据电池电极的设计要求制作，确保印刷图案的准确性。

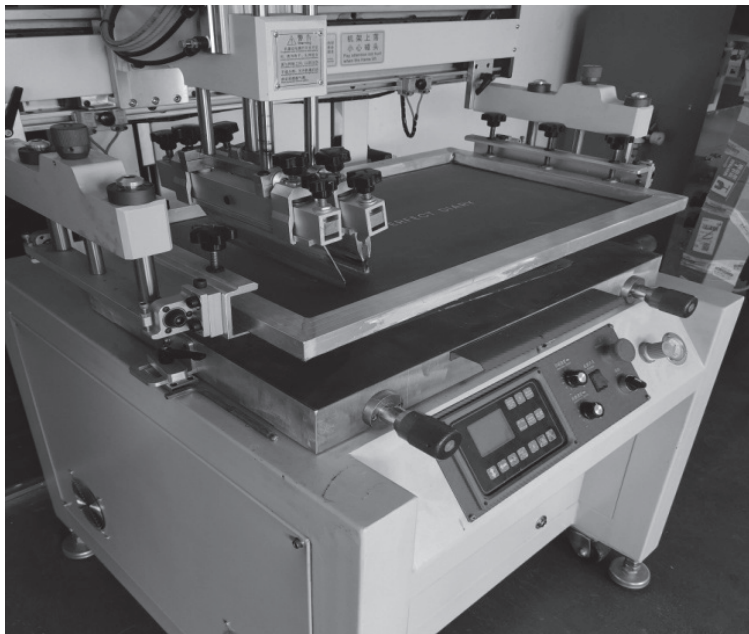


图 3-16 丝网印刷机

②调整印刷参数。根据硅片的材质、厚度及浆料的特性，调整丝网印刷机的印刷压力、刮刀速度和网版间距等参数。印刷压力一般在 $5 \sim 10 \text{ N}$ 之间，压力过大可能导致浆料渗透过深，影响电池性能；压力过小则可能使浆料附着不牢固，出现虚印现象。刮刀速度通常控制在 $10 \sim 30 \text{ mm/s}$ ，速度过快可能使浆料分布不均匀，过慢则会影响生产效率。网版间距一般设置为 $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ ，合适的间距能够保证印刷图案的清晰度和完整性。

③印刷正面电极。将硅片放置在丝网印刷机的工作台上，调整好位置后，启动印刷程序。丝网印刷机通过刮刀将银浆均匀地印刷在硅片的正面，形成正面电极。印刷过程中，要注意观察浆料的转移情况和印刷图案的质量，如有异常应及时调整参数或更换网版。

④印刷背面电极。正面电极印刷完成后，将硅片翻面，按照同样的方法印刷背面电极，使用铝浆在硅片背面形成背电场。印刷背面电极时，同样要严格控制印刷参数，确保铝浆印刷均匀、图案清晰。

⑤烧结硅片。将印刷好电极的硅片放入烧结炉中，设置合适的温度曲线进行烧结。烧结过程一般分为升温、保温和降温三个阶段。升温速率通常控制在 $5 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，使电极浆料逐渐干燥并与硅片表面发生初步反应。在保温阶段，温度一般保持在 $700 \sim 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，持续 $10 \sim 15 \text{ min}$ ，使电极与硅片形成良好的欧姆接触。降温速率一般控制在 $5 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，缓慢降温可防止电极和硅片因热应力产生裂纹或变形。待炉温降至室温后，小心取出烧结后的硅片。

（2）注意事项。

①浆料保存与使用。银浆和铝浆具有一定的保质期，且对储存环境有要求，一般需在阴凉、干燥处保存。在使用前，应检查浆料的状态，如是否有结块、分层等现象，若有异常则不可使用。取用浆料时，要避免污染剩余浆料，使用后应及时密封保存。

②印刷设备维护。定期对丝网印刷机进行清洁和维护，包括清洗刮刀、网版和浆料槽，检查设备的传动部件和电气系统等。保持设备的良好运行状态，能够提高印刷质量和稳定性，减少设备故障的发生。

③温度曲线控制。烧结炉的温度曲线设置至关重要，直接影响电极与硅片的结合质量和电池性能。在设置温度曲线时，要充分考虑硅片的材质、电极浆料的特性及设备的实际情况，确保温度控制的准确性和稳定性。同时，在烧结过程中，要密切关注炉温的变化，如有异常应及时调整。

5. 性能测试

（1）操作步骤。

①准备测试环境。将太阳能电池测试仪放置在稳定、无强光干扰的工作台上，确保测试仪的电源供应稳定。开启测试仪，预热 15～30 min，使仪器达到稳定工作状态。同时，准备好标准的测试夹具，用于固定待测试的光伏电池。

②安装电池。使用测试夹具将烧结后的光伏电池牢固固定，确保电池与夹具的电极接触良好，避免出现接触不良导致的测试误差。在安装过程中，要注意避免电池受到外力挤压或碰撞，防止电池损坏。

③设置测试参数。根据测试标准和电池的类型，设置测试仪的各项参数，包括模拟太阳光的光照强度（一般为 1 000 W/m²）、光谱分布（AM 1.5G 标准光谱）及测试温度（一般为 25 ℃）等。同时，设置测试模式，如短路电流测试、开路电压测试、最大功率点跟踪测试等。

④进行测试。启动测试程序，测试仪的光源系统发出模拟太阳光，照射在光伏电池上。电子负载系统根据设置的参数，自动调节电池的工作状态，数据采集系统实时采集电池的开路电压（ V_{oc} ）、短路电流（ I_{sc} ）、最大功率点电压（ V_{mp} ）、最大功率点电流（ I_{mp} ）等性能参数。测试过程中，要密切观察测试仪的运行状态和数据变化，确保测试结果的准确性。

⑤数据记录与分析。测试完成后，记录下各项性能参数。根据测试数据，计算电池的光电转换效率（ η ），计算公式为： $\eta=P_m/(P_{in}\times S)$ ，其中 P_m 为最大功率， P_{in} 为入射光功率， S 为电池面积。同时，分析电池的填充因子（ FF ），填充因子反映了电池的输出特性与理想状态的接近程度，计算公式为： $FF=P_m/(V_{oc}\times I_{sc})$ 。通过对测试数据的分析，评估电池的性能质量，查找可能存在的问题。

（2）注意事项。

①测试仪校准。定期对太阳能电池测试仪进行校准，确保其测量精度和准确性。校准

过程需使用标准的光伏电池或参考光源,按照测试仪的校准程序进行操作。未经校准的测试仪可能导致测试结果出现较大偏差,影响对电池性能的评估。

②测试环境稳定性。测试环境的光照强度、温度和湿度等因素会对电池性能产生影响,因此要保持测试环境的稳定性。在测试过程中,避免周围环境的光线变化,控制测试环境的温度在规定范围内,一般温度波动应不超过 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时,要注意环境湿度,湿度过高可能导致电池表面结露,影响测试结果。

③电池一致性。在进行批量测试时,要注意电池的一致性。尽量选择同一批次、相同规格的电池进行测试,减少因电池个体差异导致的测试误差。对于性能异常的电池,要进行单独分析和排查,找出原因。

三、实训成果与评估

1. 实训成果

按照生产实训流程制作出完整的太阳能光伏电池,利用实训工具测试得到电池的开路电压、短路电流、最大功率点电压、最大功率点电流、光电转换效率和填充因子等详细性能参数。根据这些参数,初步学会评估电池的性能质量。

对生产过程中出现的问题进行分析总结,撰写详细的实训报告。报告内容包括实训目的、操作步骤、遇到的问题及解决方案、对生产工艺的理解和优化建议等。通过实训报告,深入反思实训过程,进一步提升对太阳能光伏电池生产工艺的认识。

2. 实训评估

(1) 评估指标。

①操作技能。评估各组在实体实训或虚拟仿真操作中对设备的熟练掌握程度,包括设备操作的准确性、流畅性和规范性。例如,在实体实训中,操作扩散炉、丝网印刷机等设备时,能否正确设置参数、按照操作规程进行操作;在虚拟仿真操作中,对软件操作界面的熟悉程度,能否准确完成各项模拟操作。

②原理理解。通过提问、撰写报告、小组讨论等方式,重点考查对太阳能光伏电池生产原理的理解深度。例如,考查扩散制结的原理、减反射膜的工作机制、电极与硅片形成欧姆接触的过程等,评估对这些基础知识的掌握程度。

③实训成果质量。对于虚拟仿真实训,依据生成的操作记录和数据分析报告的完整性、准确性和深度,评估实训成果的质量。

④团队协作能力。评估在团队中的协作表现,包括沟通能力、分工合作能力、问题解决能力及团队成员之间的相互支持和配合程度。例如,小组在完成复杂的生产操作或解决问题时,成员之间的沟通是否顺畅、分工是否合理、能否共同协作达成目标。

(2) 评估方式。

实训评价方式分为自评、小组互评、教师评价三个部分,从多个角度对同学们在太

阳能光伏电池生产实训中的表现进行全面评估。评价指标包含知识与技能掌握、操作规范与安全意识、团队协作与沟通、问题解决与创新能力、工作态度与责任感五个维度，每个维度设定具体评价内容，采用 100 分制打分（90 分以上为优秀，80 分～90 分为良好，60 分～80 分为中等，60 分以下为不及格），实训评价表如表 3-1 所示。

表 3-1 实训评价表

组别： 组长： 组员：

评价维度	评价内容	分值	评分		
			自评	互评	师评
知识与技能掌握	对太阳能光伏电池生产原理、工艺流程、设备操作知识的掌握程度	10			
	能够熟练完成光伏电池生产各环节操作，操作技能准确、高效	10			
操作规范与安全意识	严格遵守实训操作规程，无违规操作行为	10			
	具备良好的安全意识，正确使用防护用具，能及时发现并规避安全隐患	10			
团队协作与沟通	在团队中积极承担任务，与团队成员分工明确、协作良好	10			
	能够有效进行沟通，清晰表达自己的想法，积极倾听他人意见	10			
问题解决与创新能力	在实训中遇到问题时，能独立思考或通过团队合作提出解决方案	10			
	能够提出创新性的改进建议，优化光伏电池生产流程或工艺	10			
工作态度与责任感	实训态度认真，积极参与各项任务，不迟到、不早退	10			
	对自己负责的工作任务认真负责，确保质量和进度	10			
总分		100			

请把评语和建议填在下面。

① 自我反思。根据自己的实训表现和成果，进行自我评估。

② 小组建议。小组同学间互相进行客观评价，并提出建设性的意见和建议。

③ 教师评语。教师对同学们的表现和实训报告进行评价，给出相应的分数和评语。

通过本次太阳能光伏电池的生产实训，大家对太阳能光伏电池的生产过程有更深入、全面的理解和认识，极大地提高实践能力、创新思维和综合素质，为未来在太阳能光伏产业的职业发展和学术研究奠定坚实基础。

拓展阅读

比 A4 纸还薄！*Nature* 刊发隆基绿能最新科研成果

近日，隆基绿能与江苏科技大学、澳大利亚科廷大学三方合作，在国际上首次制造出高柔韧性、高功率重量比的晶硅异质结太阳能电池，相关研究成果以“Flexible silicon solar cells with high power-to-weight ratios”为题发表在国际期刊 *Nature*（《自然》）上，如图 3-17 所示。

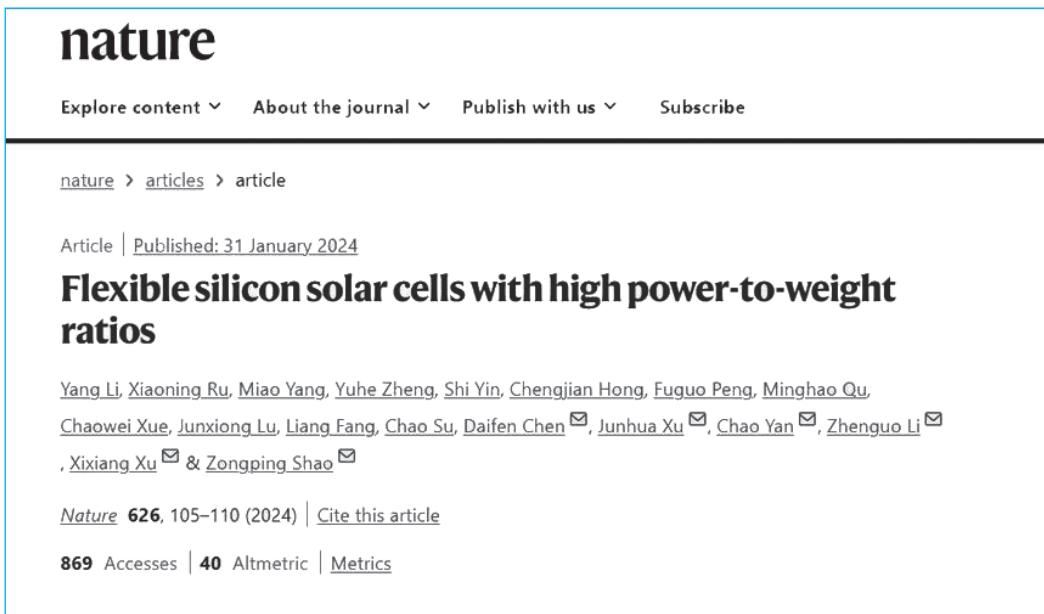


图 3-17 最新科研成果期刊页面

晶硅太阳能电池是目前最为成熟、应用最广的光伏发电技术，是全球大部分地区最具成本效益的发电选择。虽然晶硅太阳能电池目前占太阳能电池市场的 95% 以上，但难以应用于海面漂浮式光伏、曲面屋顶、卫星、航天器和无人机等对材料重量或柔韧性要求较高的场景，需要进一步减轻太阳能电池的重量、提升电池柔性。

因此，将硅片的厚度减小到比典型的晶硅太阳能电池薄得多的厚度，从而将薄膜太阳能电池的优势融入晶硅太阳能电池中，是许多研究的重点。此外，几十年来，所有研究的薄型晶硅太阳能电池（55~130 μm）的功率转换效率（PCE）一直保持在 23.27%~24.70% 的范围内，大面积的晶硅太阳能电池光电转换效率难以突破 26%。

在此次研究中，三方团队合作开发出了表界面钝化、掺杂接触生长等新工艺。测试

结果表明,厚度在 $57\ \mu\text{m}$ 至 $125\ \mu\text{m}$ 的 5 种产品,均取得 26% 以上的转换效率,最高达 26.81%。其中, $57\ \mu\text{m}$ 厚的这款电池,其电池功率重量比为 $1.9\ \text{W/g}$,曲率半径 $19\ \text{mm}$,功率重量比是市面现有产品的 2~3 倍。相关数据获权威检测机构德国哈梅林太阳能研究所认证。

(资料来源:《中国能源报》,2024 年 2 月 23 日,有删改)



巩固练习

一、填空题

1. 光伏电池是利用 _____ 原理,将太阳辐射光能直接转换为电能的器件。
2. 光伏电池的基本结构包括 _____、_____ 和 _____。
3. 单晶硅光伏电池的光电转换效率通常比多晶硅光伏电池 _____ (填“高”或“低”)。
4. 在光伏电池的生产工艺中, _____ 是形成 P-N 结的关键步骤。
5. 氮化硅减反射膜的主要作用是 _____ 和 _____。
6. 光伏电池按基体材料分类主要包括 _____ 光伏电池、_____ 光伏电池和 _____ 光伏电池。
7. 硅片制绒一般包括 _____ 和 _____ 两种。

二、选择题

1. 光伏电池的核心工作原理是()。
 - A. 热能转换
 - B. 光电转换
 - C. 化学能转换
 - D. 机械能转换
2. 以下哪种光伏电池的转换效率最高?()
 - A. 多晶硅光伏电池
 - B. 单晶硅光伏电池
 - C. 非晶硅薄膜光伏电池
 - D. 铜铟镓硒薄膜光伏电池
3. 在光伏电池的生产工艺中,扩散制结的主要目的是()。
 - A. 形成 P-N 结
 - B. 增加硅片厚度
 - C. 减少光反射
 - D. 提高电池重量
4. 以下哪种材料是制备减反射膜的主要材料?()
 - A. 银浆
 - B. 铝浆
 - C. 氮化硅
 - D. 磷硅玻璃
5. 在硅片切片过程中,以下哪项是关键控制参数?()
 - A. 硅片的颜色
 - B. 硅片的厚度和表面质量
 - C. 硅片的重量
 - D. 硅片的形状
6. 以下哪种光伏电池最适合用于柔性应用?()
 - A. 单晶硅光伏电池
 - B. 多晶硅光伏电池
 - C. 铜铟镓硒薄膜光伏电池
 - D. 非晶硅薄膜光伏电池

7. 在光伏电池的性能测试中，以下哪项参数反映了电池的输出特性与理想状态的接近程度？（ ）

- A. 开路电压 B. 短路电流 C. 填充因子 D. 光电转换效率

三、简答题

1. 简述光伏电池的工作原理，并解释“光生伏打效应”。
2. 列举三种光伏电池的分类方式，并说明它们的优缺点。
3. 简述单晶硅片制备的主要步骤。
4. 在光伏电池的生产工艺中，为什么需要进行减反射膜沉积？