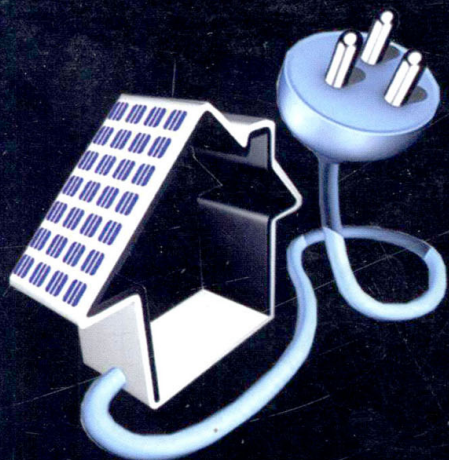




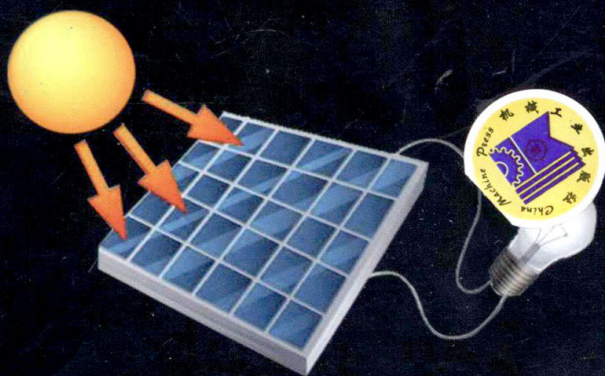
段光复 © 著

高效晶硅 太阳电池技术—— 设计、制造、测试、发电

GAOXIAO JINGGUI

TAIYANG DIANCHI JISHU

SHEJI-ZHIZAO CESHI FADIAN



高效晶硅太阳能电池技术

——设计、制造、测试、发电

段光复 著



机械工业出版社

本书系统地介绍高效晶硅太阳能电池技术。着重介绍单晶硅太阳能电池在非聚光条件下,产业化效率达到 20% 以上的技术,内容包含设计、制造、测试、发电四方面。设计方面系统地论述了高效晶硅太阳能电池原理,太阳能电池光学,高效晶硅太阳能电池设计,首次提出了太阳能电池光学这一概念。制造方面包括从工业硅的制造到晶硅太阳能电池组件的制造的整个过程及控制要点,其中谈到了光致衰减问题并提出解决方法。测试方面介绍晶体缺陷、氧、碳、基硼、基磷、少子寿命等测试技术。发电方面着重介绍清洁微电网,微电网完全摒弃了传统电力,以高效晶硅太阳能电池作为主力能源为工业企业供电。

本书可作为从事晶硅太阳能电池行业的技术人员的学习培训资料;可供大专院校固体物理、动力与能源、材料、太阳能、光电子信息、新能源等专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高效晶硅太阳能电池技术:设计、制造、测试、发电/段光复著. —北京:机械工业出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-111-44730-6

I. ①高… II. ①段… III. ①硅太阳能电池—研究 IV. ①TM914. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 267766 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:曲彩云 责任编辑:曲彩云 蒋有彩

版式设计:霍永明 责任印制:乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2014 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 30. 5 印张 · 1 插页 · 758 千字

0 001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-44730-6

定价: 89.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前言

近几年世界光伏产业飞速发展，晶硅太阳能电池处于主流地位，占据 78% 的市场份额，未来 10~15 年晶硅太阳能电池仍将占据市场主导地位。

晶硅太阳能电池经过几十年不懈研发，已积累了丰富的经验。就单晶硅太阳能电池来说，在 AM1.5 太阳光辐射条件下，晶体硅电池的理论极限效率为 33%（称之为 Shockley-Queisser 极限，S-Q 极限），实验室效率已达 25.4%，产业化率已达 19%。多晶硅太阳能电池比单晶硅太阳能电池的效率低 2%~4%。选定了太阳能电池所用的半导体材料，禁带宽度就确定，所能接受的阳光波长范围也就确定。如何大幅度地提高阳光的利用率，使光电转换效率接近 S-Q 极限，是世上光伏研究和产业界十分关注的热点研究方向，对众多科学家有极大的吸引力。因此，系统地对晶硅太阳能电池进行总结，在实践-认识-再实践-再认识的基础上，将晶硅太阳能电池光电转换效率提升，使其接近 33%。如果开路电压达到 750mV 以上，短路电流达到 65mA 以上，填充因子达到 0.8 以上，单元转换效率就能达到 27%。要想达到这个效率，不需要从根本上、大量地改变电池的设计，只是从整体入手，制定解决方案，即对原材料杂质、电子寿命、受光面的构造、电极、钝化膜的膜质、电极周围的接触电阻、背接触及异质结等元器件构造等，进行一次彻底的改进。

在激烈的市场竞争中，性价比高、质量好的电池将胜出。高效晶硅太阳能电池将在市场中胜出，即产业化硅单晶电池（平均效率为 23%）将在市场中胜出。效率的提高是产业链的全过程竞争。

本书介绍了产业链的全过程，从硅料→硅片→电池片→组件→发电，系统地讲述高效晶硅太阳能电池技术。每一项中间产品都有不同的技术路线。例如：工业硅的制备方法有单相电炉冶炼、三相电炉冶炼；多晶硅的制备方法有氯硅法、硅烷法、流化床法、改良西门子法等；单晶硅的制备方法有直拉法、区熔法、基座法、片状生长法、气相生长法、外延法等。各种方法都在发展、变化，本书突出高效，因此只介绍效率最高的技术，仅对能使晶硅太阳能电池达到高效率的设计、工艺作介绍。

太阳能电池要做强，要强大到阴雨天也可发电，要强大到一半可以存起来晚上用，要强大到太空电站投入商业化运行。

提高效率要有扎实的知识作为基础，包括光子学、光电子学、集成电路制造、固体物理学、纳米材料学、材料学。要有综合的、跨学科的、扎实的基础知识，广泛吸收、借鉴相关学科技术，积累知识、融会贯通、灵活应用，才能将太阳能电池的效率一步步地提上去。本书提供了这方面的知识。

我国厂家众多，技术平平，在竞争激烈的形势下，必须凭借领先一步的尖端技术，才能以大气魄率先建立起新的行业格局。这个格局就是以高效太阳能电池为主角，顶起供电大梁的清洁微型智能电网，即与大规模储能技术结合在一起，二十四小时都可供给高质量的电能，并能保证负荷的需求。

本书的目的是在理清晶硅太阳能电池脉络的基础上，从结构上、制造工艺上作出改进，在

非聚光条件下,明确地能使单晶硅太阳能电池的产业化率达到 23%,多晶硅太阳能电池的产业化率达到 20%。五年内使单晶硅太阳能电池转换效率超过 25%。

本书总结了作者十多年来从事太阳能电池的多项研究成果。从 1998 年以来,不停地办电池厂、建光伏电站、钻研课题,将产业化中存在的问题,归纳、总结,解决。希望本书能为“十二五”新能源计划的实现作技术上的微薄奉献。

本书分为四篇,共有十三章。第一篇为高效晶硅太阳能电池设计,系统地论述了太阳能电池光学,高效晶硅太阳能电池工作原理,高效晶硅太阳能电池设计。其特点是理论正确,叙述简明易懂。其中,第二章太阳能电池光学,系统、完善地叙述了太阳光的特性,首次提出了太阳能电池光学这一概念。太阳能电池就是太阳光的利用,为建立完善的太阳能电池光学理论奠定基础,这是太阳能电池设计的依据。提高太阳能电池的效率主要有两个途径:一是尽可能多地吸收太阳光子,并在电池空间合理分布;二是吸收的光子要能产生电子-空穴对,并能被电极所收集。设计围绕这两个途径展开。

第二篇为高效晶硅太阳能电池制造,介绍工业硅、多晶硅、单晶硅、晶硅太阳能电池及其组件的制造,产业化中存在的问题,整个产业链制程。每道工序力求容易掌握,易于操作。制造中谈到了光致衰减问题,并提出可行的解决方法。

第三篇为高效晶硅太阳能电池测试。研发、设计、制造都与测试密切相关。研发、设计的数据来自于测试结果,设计是否合理,也要由测试检验;电池质量的保证要由中间测试加以控制;电池组件是否合格也要由测试来把关。测试内容不但重要,而且丰富,因此将测试单独成为一篇。

第四篇为发电,介绍清洁智能微电网与分布式发电。微电网完全摒弃了传统电力,以晶硅太阳能电池作为独立的能源供电。分布式发电与电网成为一体,瞬间可以轻松地做到自动地、准确地、可靠地切换与计量。

本书“第三章高效晶硅太阳能电池工作原理”由广东粤电集团段伦先生撰写。

本书可作为从事晶硅太阳能电池行业的技术人员的学习培训资料,大专院校新能源专业师生的参考书;可供大专院校物理、动力与能源、材料、太阳能、光电子信息等专业的师生参考;可供风险投资、政府官员、涉足太阳能的人员开拓视野,还可提供给欲投资晶硅太阳能电池的商家,作可行性研究报告的参考资料。

本书在编写过程中,得到太阳能电池应用专家彭立斌先生指导,在此表示诚挚的感谢。向参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于本人水平所限,书中存在欠缺、疏漏之处,恳请广大读者批评指正,不吝赐教。

段光复 (13825191998)
于湖南株洲

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 高效晶硅太阳能电池技术现状	1
一、晶硅太阳能电池主流技术	1
二、晶硅太阳能电池设备	2
三、相关技术	2
四、国内技术现状	3
第二节 光伏市场现状	5
一、国外市场现状	6

二、国内市场现状	7
第三节 晶硅太阳能电池发展方向	14
一、晶硅太阳能电池组件	14
二、高转换技术用材	15
三、过渡技术	15
第四节 光伏产业战略设计	16
一、我国能源基本情况	16
二、战略设计	16

第一篇 高效晶硅太阳能电池设计

第二章 太阳能电池光学	18
第一节 太阳能电池光学基础知识	18
一、原子结构	18
二、几何光学	21
三、波粒二象性	22
第二节 光学历史及其体系	31
一、光的历史	31
二、光学体系	33
第三节 太阳光	34
一、电磁波	34
二、太阳辐射能	35
三、影响接收太阳辐射能的因素	38
第四节 量子光学	38
一、量子光学定义及研究内容	39
二、辐射	39
三、黑体辐射	44
四、能量假设	46
五、光的波粒二象性	48
第五节 光电子学	49
一、光在半导体薄片上的反射、 折射和透射	49
二、半导体中的光吸收	50
三、光电效应	53
四、光热效应	60
第六节 光谱学	63
一、光谱学基本器件	63

二、光学表征方法	76
第七节 薄膜光学	81
一、透明导电薄膜	81
二、太阳能光热转换薄膜	84
三、光学薄膜特性测试	85
第三章 高效晶硅太阳能电池工作原理	106
第一节 太阳能电池基础——半导体	106
一、半导体能带	106
二、本征半导体和掺杂半导体	107
三、费米能级	108
四、载流子浓度	109
五、载流子的输送	111
六、载流子的产生与复合	114
七、半导体 p-n 结及其能带图	116
第二节 高效晶硅太阳能电池工作原 理及性能	119
一、高效晶硅太阳能电池工作原理	119
二、高效晶硅太阳能电池外特性	121
第三节 高效晶硅太阳能电池结构及 能量损失	123
一、高效晶硅太阳能电池结构	123
二、高效晶硅太阳能电池能量损失	124
第四章 高效晶硅太阳能电池设计	126
第一节 高效晶硅太阳能电池总体设计	126
一、总体设计要求	126
二、材料和结构选择	128

三、系统设计	128	二、下电极设计	138
四、掺杂设计	129	第四节 掺杂设计	139
五、组件要求	129	一、掺杂基本要求及基本概念	139
第二节 光学设计	129	二、掺杂设计	141
一、硅的光学性质	129	三、理想化的高效率电池模型	142
二、高效晶硅太阳能电池光学设计要求	134	第五节 组件设计	142
三、高效晶硅太阳能电池光学设计	134	一、组件结构要求	142
第三节 电学设计	137	二、组件设计	143
一、上电极设计	137	三、组件测试要求	146

第二篇 高效晶硅太阳能电池制造

第五章 多晶硅制备	147	四、异常情况及处理	237
第一节 概述	147	第二节 原辅材料	239
一、硅的特性	147	一、硅原料	239
二、多晶硅的制造	155	二、石英坩埚	240
第二节 工业硅制备	155	三、掺杂剂	241
一、工业硅制备工艺	155	四、籽晶、钼丝、氩气	242
二、工业硅制备设备	163	五、原辅材料的腐蚀及清洗	243
三、生产操作及存在的问题	165	第三节 单晶硅掺杂技术	244
四、烟气净化及硅粉利用	169	一、杂质作用及杂质效应	245
第三节 改良西门子法制备多晶硅	173	二、杂质分布规律	249
一、氢气的制备	173	三、掺杂	250
二、液氯的汽化	176	第四节 直拉单晶炉	253
三、氯化氢的合成	177	一、机械部分	254
四、三氯氢硅的合成	179	二、电气部分	256
五、精馏法提纯三氯化硅	185	三、工作环境	258
六、三氯氢硅还原制备多晶硅	209	第五节 直拉单晶炉的热系统及热场	258
七、还原尾气干法回收工艺	213	一、热系统	258
八、硅芯的制备	218	二、热场	260
第四节 铸锭法制备多晶硅	223	第六节 晶体生长控制器	263
一、铸锭法制备多晶硅生产工艺	223	一、主要功能及控制原理	263
二、铸锭法制备多晶硅工艺的优缺点	224	二、设定曲线	265
第五节 硅烷法制备多晶硅	224	三、内部参数的设置	266
一、硅烷的制备	225	四、晶体生长控制器的使用	266
二、硅烷的提纯	225	第七章 高效晶硅太阳能电池制备	268
三、硅烷热分解	225	第一节 切割硅片	268
四、硅烷法的优缺点	225	一、多线切割原理	269
第六章 单晶硅制备	227	二、切割工艺	270
第一节 单晶硅直拉制备技术	227	三、线切割系统组成	273
一、直拉单晶硅工艺	227	四、国内外切割设备状况及发展趋势	274
二、长度拉速温校曲线的设定	234	五、其他硅片制造工艺	275
三、坩埚上升随动速度确定	236	第二节 清洗	276

一、清洗原理	277	四、设备维护	308
二、清洗技术	278	第九节 刻槽埋栅电极 (BCSC)	308
三、清洗工艺方案	283	一、刻槽埋栅电极结构及工艺流程	309
第三节 硅片制备	285	二、刻槽埋栅电极主要制造工艺	309
一、磨削	285	第十节 印刷制备背电极背场	316
二、腐蚀	285	一、丝网印刷原理	316
第四节 制绒技术	287	二、丝网印刷主要技术	316
一、制绒 (金字塔) 原理	287	三、丝网印刷工艺	319
二、制绒 (金字塔)	288	四、丝网印刷常见问题及解决方法	322
三、主要生产工艺及影响因素	288	第十一节 烧结	323
四、制绒设备	289	一、烧结原理	323
五、制绒不良情况	290	二、烧结工艺	324
第五节 扩散制结	292	三、烧结常见问题及解决方法	325
一、扩散原理	292	四、烧结炉	327
二、扩散工艺	293	第十二节 检测分级	330
三、扩散制结技术要点	295	一、太阳能电池片的规格	330
四、扩散故障及解决方案	296	二、太阳能电池片的电气性能分级	330
五、扩散炉的使用、安全与维护	297	三、电池片表面质量检查项目及标准	333
第六节 去磷硅玻璃 (PSG)	299	第十三节 组装	336
一、去 PSG 原理	299	一、组装流程	336
二、去 PSG 工艺	299	二、组装存在的问题	338
三、去 PSG 材料与设备	300	第十四节 光致衰减	339
第七节 修周边	300	一、光致衰减机理	339
一、干法刻蚀	300	二、光致衰减试验	340
二、湿法刻蚀	301	三、光致衰减解决方案	341
第八节 镀减反射膜	302	第十五节 制硅废水处理	343
一、减反射原理及减反射膜材料	303	一、制硅废水的产生	343
二、镀减反射膜工艺	304	二、废水处理方法	343
三、PECVD 常见问题及处理办法	307	三、废水处理工艺	343

第三篇 高效晶硅太阳能电池测试

第八章 测试分析技术	345	二、X 射线	358
第一节 物理测试分析技术	345	第九章 硅晶体结构测试	366
一、电子显微镜	345	第一节 单晶晶向测定	366
二、金相显微镜	346	一、X 射线衍射定向方法	366
第二节 化学腐蚀测试分析技术	353	二、光图定向方法	368
一、电化学腐蚀条件	353	三、两种测向方法比较	369
二、电化学腐蚀反应	353	第二节 硅晶体缺陷的测试	370
三、影响电化学腐蚀速度的因素	354	一、测试原理	370
四、腐蚀在半导体技术中的应用	355	二、测试干扰因素	370
第三节 光电测试分析技术	356	三、试剂和材料	370
一、红外光谱	356	四、设备和仪器	371

五、试样制备	371
六、检测程序	372
第十章 硅晶体杂质测试	377
第一节 氧浓度测试	377
一、硅中氧原子状况	377
二、测试原理	378
三、测试程序	381
四、测试干扰因素	383
第二节 碳浓度测试	384
一、硅中碳原子状况	384
二、测试原理	384
三、测试程序	385
四、测试干扰因素	386
第三节 基硼含量测试	387
一、硅中硼原子状况	387
二、测试原理	387
三、测试程序	390
四、测试干扰因素	394
五、安全操作	394
第四节 基磷含量测试	394
一、硅中磷原子状况	394
二、测试原理	395

三、测试程序	395
第十一章 电学性能测试	397
第一节 导电类型测试	397
一、测试方法、特征及测试范围	397
二、测试干扰因素	398
三、测试材料	399
四、测试装置	399
五、测试程序	401
六、DT307-STY-3 导电测试仪	402
第二节 硅单晶电阻率测试	403
一、直流四探针法	403
二、直流二探针法	412
第三节 少子寿命测试	418
一、直流光电导衰减法	418
二、高频光电导衰减法	425
第四节 组件测试	429
一、电气参数测试	429
二、质量性能测试	430
第五节 认证	432
一、认证特点	432
二、认证标签所对应的认证机构	433

第四篇 发 电

第十二章 清洁智能微电网	436
第一节 清洁智能微电网总体设计	438
一、项目地址	438
二、清洁智能微电网功能	438
三、总体设计目标	439
四、设计要求	439
五、效益	439
六、总体设计参数	440
七、设计思想	440
第二节 光伏电站	441
一、太阳能电池阵列	441
二、逆变器及升压系统	443
第三节 风力电站	444
一、风力电站基本知识	444
二、测风技术	447
三、风能资源评估资料及风能判据	449
四、风力发电机选型	451
五、风力发电机选址	451

六、风力发电量计算及风机装机量	453
第四节 抽水蓄能电站	454
一、抽水蓄能电站方案	454
二、上、下水库	455
三、水轮机	456
四、水轮发电机	457
五、水泵	458
六、水泵用电动机	462
第五节 智能控制系统	463
一、光电、风电整合	464
二、水轮发电机组发电	464
三、平衡系统	464
第六节 超导储能简介	465
一、超导储能优越性	465
二、超导储能的运用	466
第十三章 分布式民用住宅电站	467
第一节 国外分布式民用住宅电站	467
一、英国	467

二、澳大利亚	467	二、国外智能电表	471
三、日本	468	三、我国智能电表	471
第二节 国内分布式民用住宅电站	468	附录	472
一、上海	468	附录 A 有关硅标准	472
二、山东	468	附录 B 常用物理常数表	473
三、杭州	469	附录 C 国际单位制 (SI)	474
四、国家政策	469	附录 D 元素周期表	插页
第三节 智能电表简介	470	参考文献	476
一、智能电表主要功能	470		

第一章 概述

高效晶硅太阳电池走过了近半个世纪的历史。高效晶硅太阳电池最初由空间技术的需要而研发。20 世纪 70 年代初期，各种空间飞行器对功率的需求越来越大，世界上空间技术比较发达的美国、日本和欧洲等相继开展了高效晶硅太阳电池的研究，研制的背表面场（BSF）、背表面反射器（BSR）、双层减反射膜技术为第一代高效硅太阳电池。这种类型的电池典型效率最高可以做到 15% 左右，目前在轨的许多卫星应用的是这种类型的电池。

到了 20 世纪 70 年代中期，研究者们提出了无反射绒面电池，使电池效率进一步提高。但这种电池制备过程复杂，表面会吸收所有波长的光，包括那些光子能量不足以产生电子-空穴对的红外辐射。红外辐射使太阳电池的温度升高，抵消了采用绒面而提高效率。

到了 20 世纪 80 年代中期，引入了电子器件制作的一些工艺手段，采用了倒金字塔绒面、激光刻槽埋栅、选择性发射结等制作工艺，并采用带通滤波器消除温升。这些工艺的采用，使电池的效率进一步提高，因此成了当时空间电源的主角。为了降低电池背面复合影响，背面结构采用背面钝化后开孔，形成点接触，即局部背场。这类电池典型结构为 PESC（钝化发射极）、PERL（钝化发射极及背面点接触），最薄的电池厚度只有 100 μm ，典型效率为 17% ~ 18%。其特征是正面具有倒金字塔绒面的选择性发射结构，前后表面均采用钝化结构来降低表面复合，背面场采用全部或局部背场。局部背场的缺点是抗辐照能力差。

到了 20 世纪 90 年代中期，光致衰减问题突显出来。虽然电池的初期效率比较高，但末期效率比初期效率下降 25% 左右；另外，卫星对电池阵位置的要求比较苛刻，如果太阳电池阵不对日定向，或对日定向差等都会影响到卫星电源的功率，这在一定程度上限制了卫星整体系统的配置。为此，俄罗斯侧重研究提高电池的末期效率，并在结合电池阵研究方面提出了双面电池的构想，做出了双面高效长寿命和低成本晶硅太阳电池。

进入 21 世纪，空间电池以砷化镓太阳电池为主，高效晶硅太阳电池的应用逐渐由空间转向了地面。应用环境变了，对电池的要求也不同了，强烈辐射现象没有了，对日定向要求也不严格了，因此，其结构也相应作了变动。本书全面介绍地面用高效晶硅太阳电池技术，包括设计、制造、测试、发电在内的整条产业链技术。

本章介绍地面用高效晶硅太阳电池技术现状、市场现状、高效晶硅太阳电池发展方向及光伏产业战略设计。

第一节 高效晶硅太阳电池技术现状

高效晶硅太阳电池技术现状，包括晶硅太阳电池主流技术、相关技术及国内技术现状。

一、晶硅太阳电池主流技术

晶硅太阳电池主流技术在光学方面是金字塔陷光结构，电学方面是扩散制结，电极采用

丝网印刷技术。该技术在晶硅太阳能电池技术中占到了 90% 左右，这个技术还在不断地改进，效率也在持续不断地上升。2000 年初，丝网印刷电池的效率基本在 11%、12%，现在多晶电池都在 16% 以上，单晶电池在 18% 以上。

1. 制绒（陷光结构） 现在的制绒技术已达到微米级，掌控好单晶绒面可以做到 3 ~ 5 μm ，已在向亚微米级发展。制绒技术可以在大绒面上再制小绒面，进一步改进表面的减反射效果。制绒工艺也不断改进，由单晶硅制绒溶液制绒，到高沸点酒精代替氢氧化钾制绒，到异丙醇制绒，腐蚀时间已比初期缩短了 50%，金字塔结构均匀、细密。

2. 扩散（制结） 扩散在链式扩散炉中进行。以前的扩散炉都是用开管的炉，现在改成用闭管的炉，采用喷淋技术，污染很少。

3. 离子注入（制结） 离子注入设备可以控制均匀性，材料含量（质量分数）控制在 2% 以内，p-n 结方块电阻可做到 90 ~ 100 Ω ，使短波响应、转换效率都得到改进。

4. 丝网印刷

1) 单次印刷改成两次印刷。两次印刷技术在对准上可以对到 $\pm 10\mu\text{m}$ 范围内。

2) 激光转移印刷。印刷机通过激光转移把银浆转移到硅片上去，不产生接触和压力，图形很容易在薄的硅片上形成，效率也很高。

5. 材料的开发

1) 铜部分代替银，可以降低成本。

2) 太阳能电池稳定性改进。用钾来代替硼，使初始衰减非常低；用铸造方法来形成准单晶（介于单晶与多晶之间），效率达 18.2%，功率达 290W，可以降低成本。

二、晶硅太阳能电池设备

我国半导体设备行业已有数十年的技术积累，通过和一流太阳能电池企业的深度合作，经过连续多年不懈的努力，从硅材料生产、硅片加工、太阳能电池片、太阳能电池组件，以及相应的纯水设备、环保处理、净化工程的建设，已经具备成套设备供应能力。部分产品，例如扩散炉、等离子刻蚀机、单晶炉、多晶铸锭炉等已出口。十种大型生产线的主要设备，已经可以生产八种。其中六种（扩散炉、等离子刻蚀机、清洗/制绒机、石英管清洗机、低温烘干炉）已在国内生产线上占据主导地位，两种（管式 PECVD、快速烧结炉）与进口设备并存，份额正逐步扩大。国产组件生产用的层压机、太阳能模拟器等，在行业获得广泛应用。硅材料加工设备中单晶炉，以优良的性价比占据了国内市场，并批量出口亚洲；多线切割机已获得突破；多晶铸锭炉在国内企业大量使用。

全自动丝网印刷机、自动分拣机、平板式 PECVD 则完全依赖进口。

三、相关技术

1. 用流化床生产多晶硅 成本在 14 ~ 16 美元/kg。

2. 采用 n 型单晶 组件效率 16.2%，国外 n 型单晶相对应用较多，国内英利集团已经采用。

3. 树脂金刚切割技术 可以提高单台设备的产能，同时改善硅片表面切割损伤和平面度，不再使用聚乙二醇切割液。但目前只适合切单晶，表面有划痕。

4. 澳洲 BT Imaging 公司新一代光致发光（PL）检测系统 可在生产线末端或电池片

生产线起点对硅片进行即时检测,根据其电性质量与价值进行分选。iS-G1 型可根据类单晶硅片中单晶区域所占比例进行分级;iLS-W2 型可对缺陷计数,并可对准单晶硅片进行分级。处理速度为 3600 片/h,比上一代速度提高一倍。

5. 推广 1.5 代技术 离子注入 p-n 结、双面钝化、优化光收集、表面看不到任何栅线。

6. 自动化技术 厚度 160 ~ 200 μm 、156mm $\times$ 156mm 标准电池片的生产,基本上是一项相当稳定的过程,因此,采用自动化生产可对整个生产系统进行优化。自动化方案对特定的工艺程序可兼顾现在和未来的需求,提高企业产能,将产品质量波动幅度降到最低,减轻管理工作。自动化内容包括工艺任务处理、传送、焊接、装配等。自动化系统能追踪和复制某个时刻的状态,以方便检查系统的影响和故障。一片极薄且易碎的硅片,需要在不同的工位间进行不同的处理,要进行分离、给料、定位、拾放,并且要处理速度达到 3600 片/h。这是一项有难度的课题,要采用标准夹钳。有两种处理系统:一种采用相当快的处理系统;另一种相对较慢,但采用几个系统同时进行操作。自动化系统包括:软件系统、数字图像处理、传感器、自动检测、数据收集和分析。很多软件供应商可量身定做自动化解决方案。

7. 逆变器低压穿透技术 (LVRT) 这是指在电网电压发生跌落的情况下,光伏逆变器能够在一定的条件和时间范围内保持并网,直到电网恢复正常。逆变器低压穿透技术是提高电网系统安全稳定性的最大保障。如果逆变器不具备低电压穿越功能,则会增加整个系统的恢复难度,甚至给已经不平衡的电网带来额外扰动,可能导致系统失稳风险。LVRT 已经成为全球范围内太阳能光伏发电和风电行业的重要技术要求,各国对此项功能提出强制性要求。

8. 300W 微型逆变器及 DC/DC 电源优化器 它与单块组件相连,从而每块组件的电量输出得到控制和优化,以最大功率输出,减少电力损耗;并可以应对局部阴影,或者电池板明显不匹配的情况。以前电池板都是在一个串行模式中组合而成的,如果其中一个电池板的功能有损坏,整个系统的电力将会减少。这项技术是由美国 Power-one 公司推出。

9. 产业链各环节的竞争 从产业链各环节的竞争力来看,多晶硅环节在于工艺竞争,硅片-组件环节在于设备竞争,电站环节在于资源竞争。硅片-组件环节的企业如没有新设备的投入,原有设备价值会越来越低。

四、国内技术现状

我国晶体硅太阳能电池转换效率专项技术研究已实现重大突破。

1. 晶体硅高效太阳能电池的研究 中科院微电子研究所微波器件与集成电路研究室,开展了半导体纳米材料下转换晶体硅高效太阳能电池的研究。利用半导体纳米材料的尺寸量子限制效应来调节能带宽度,增加对短波长波段光的响应。该课题组目前已成功开发出新型半导体纳米材料。这种新型半导体材料能带宽度可以根据尺寸、材料组分等进行灵活调节。将该材料与大规模量产型 125mm $\times$ 125mm 晶体硅衬底结合,研究人员研制出下转换高效晶体硅电池。在对电池片进行封装后的相应测试表明,下转换晶体硅电池增强了在 300 ~ 630nm 波段光的吸收和利用,光谱响应增加的幅度提高了 10%。

2. n 型硅高效太阳能电池 英利集团自主研发的以“熊猫”命名的 n 型硅高效太阳能

电池,实验室转换效率达20%,规模化生产的单晶硅电池转换效率最高达19%,平均效率可达18%,多晶电池转换效率为17.5%。英利集团还掌握大容量磁悬浮飞轮储能技术、“新硅烷法”制备高纯硅技术。

3. 冥王星高效电池技术 尚德与新南威尔士大学之间合作研究冥王星高效电池技术,通过进一步完善,已经将该光伏电池单晶效率提高到了20.3%,已经得到新加坡太阳能研究所的证实。

4. 追踪系统 此系统故障较多,例如宁夏太阳山的追踪系统,由于风沙大,造成电动机损坏、电动机卡塞、推杆故障等。

5. 切割液 国内光伏行业已建成的产能具有相当规模,相应的晶硅切割液需求相当巨大。一方面积极改进晶硅切割液生产技术,使现有切割液产品的配方、技术日臻完善,降低产品成本;另一方面,致力于开发高端新产品,例如金刚石线晶硅切割液等,以满足晶硅切割行业升级和发展的需要。

6. 焊接 焊接是晶体太阳能电池片封装过程中一道重要的工序,包括单焊和串焊。其目的是将单个电池片进行串联,使其形成一个回路,收集各个电池片上的电荷。单焊是指将汇流带焊接到电池正面的主栅线上。汇流带是镀锡的铜带,长度一般为电池边长的两倍。多出的焊带在串焊时,与后面的电池片的背面电极相连。串焊是指将焊接好的单个电池片从背面互相焊接成一个电池串。

目前的焊接工艺大多为手工,电池的定位主要靠一个焊接模板,上面有放置电池片的凹槽。凹槽的大小与电池片的大小相对应,不同规格的组件使用不同的模板。模板兼有传热作用,可以减少电池片的隐裂和虚焊。操作者用电烙铁将“前电池”的正面电极,焊接到“后电池”的背面电极上,这样依次将单个电池片串接在一起,并在电池串的正负极焊接出引线。影响焊接效果的主要因素有焊接温度、助焊剂、焊带焊料、操作者的操作方法。

随着硅片厚度的不断减薄和面积的加大,焊接过程中的碎片率不断增大。因此引入无接触焊接,即激光焊接、超声波焊接。

1) 激光焊接。这是利用激光束优异的方向性和高功率密度等特点进行工作。通过光学系统将激光束聚焦在很小的区域内,在极短的时间内使被焊处形成一个能量高度集中的热源区,从而使被焊物熔化,并形成牢固的焊点和焊缝。常用的激光焊接方式有两种:脉冲激光焊和连续激光焊。脉冲激光焊主要用于单点固定和薄件材料的焊接。连续激光焊主要用于大、厚材料的焊接和切割。为了熔融焊料,激光束要传到涂覆焊料的电池栅条上,红外线热能照相机,通过实时测量辐射热对硅和金属条的温度进行探测,如果温度太高或太低,反馈控制电路会在毫秒内自动调整激光输出量,使每处连接点均能得到有效焊接。

2) 超声波焊接。这是利用高频振动波传递到两个需焊接的金属表面,在加压的情况下,使两个金属表面相互摩擦,形成分子层之间的熔合。其优点是:焊接速度快、能源消耗低、焊接后机械强度高、导电性好、接近于常温焊接、能减少热应力带来的冲击。要求是焊接点不能太厚,厚度 $\leq 5\text{mm}$;焊点位不能太大,需要加压。

7. 导电胶 这是一种固化或干燥后具有一定导电性能的胶黏剂。它通常以基体树脂和导电填料为主要组成部分。导电胶具有出色的耐湿、耐热性和导电稳定性,与锡、锡银和镀银带以及汇流条具有很好的兼容性,操作工艺简单,可减少电池破片、翘曲和虚焊,工作效

率和自动串焊机相同。

8. 高效电池技术 高效电池技术包括光陷阱结构、减反射膜、钝化层、增加背场。突出的是激光刻槽栅技术，是利用激光技术在硅表面上刻槽，然后填入金属，以起到前表面电接触栅的作用。高效晶硅太阳电池如图 1-1 所示。

(1) 光陷阱结构。一般高效单晶硅电池采用化学腐蚀制绒技术，制得绒面的反射率可达到 10% 以下。目前较为先进的制绒技术是反应等离子蚀刻技术 (RIE)。此技术的优点是该结构与晶硅的晶向无关，适用于较薄的硅片，通常使用 SF_6/O_2 混合气体。在蚀刻过程中，F 自由基对硅进行化学蚀刻，形成可挥发的 SiF_4 ；O 自由基形成 $\text{Si}_x\text{O}_y\text{F}_z$ ，对侧墙进行钝化处理，形成绒面结构。目前韩国周星公司应用该技术的设备，制得绒面反射率 2% ~ 8%。

(2) 减反射膜。它的基本原理是位于介质和电池表面具有一定折射率的膜，可以使入射光产生的各级反射，相互间进行干涉从而完全抵消。单晶硅电池一般可以采用 TiO_2 、 SiO_2 、 SnO_2 、 ZnS 、 MgF_2 单层或双层减反射膜。在制好绒面的电池表面上蒸镀减反射膜后，可以使反射率降至 2% 左右。

(3) 钝化层。钝化工艺可以有效地减弱光生载流子在某些区域的复合。一般高效太阳电池可采用热氧钝化、原子氢钝化，或利用磷、硼、铝表面扩散进行钝化。热氧钝化是在电池的正面和背面形成氧化硅膜，可以有效地阻止载流子在表面处的复合。原子氢钝化是因为硅的表面有大量的悬挂键，这些悬挂键是载流子的有效复合中心。原子氢可以中和悬挂键，所以减弱了复合。

(4) 增加背场。如在 p 型材料的电池中，背面增加一层 p^+ 浓掺杂层，形成 p^+/p 的结构，在 p^+/p 的界面就产生了一个由 p 区指向 p^+ 的内建电场。由于内建电场所分离出的光生载流子的积累，形成一个以 p^+ 端为正，p 端为负的光生电压，这个光生电压与电池结构本身的 p-n 结两端的光生电压极性相同，从而提高了开路电压 V_{oc} 。同时由于背电场的存在，使光生载流子受到加速，这也可以看作是增加了载流子的有效扩散长度，因而增加了这部分少子的收集几率，短路电流 I_{sc} 也就得到提高。

(5) 改善衬底材料。选用优质硅材料，例如 n 型硅具有载流子寿命长、制结后硼氧反应小、电导率好、饱和电流低等。

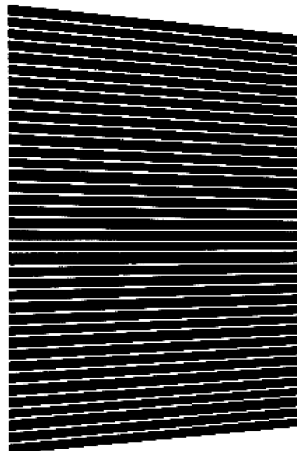


图 1-1 高效晶硅太阳电池

第二节 光伏市场现状

光伏市场有它的特殊性，即光伏市场是由政府扶持和推动的，一旦取消光伏发电补贴，这个市场就立即消失。但这只是暂时的，政府扶持的最终目的，是要形成一个按经济规律运行的、供需双方存在、合理的、长久的、能自我生长、自我淘汰、自我净化的健康的光伏市场。光伏市场已全球化，可分为欧美市场、亚太市场、非洲市场、中东市场。2012 年全球总量突破 30GW，亚太地区接近 10GW，美国 3GW。

一、国外市场现状

光伏市场与各国的政策密切相关。

1. 法国 法国能源委员会在 2012 年 6 月, 公布 100kW 以下上网电价补贴政策, 地面安装补贴降至 0.1079 欧元, 屋顶系统最高补贴为 0.1934 欧元。

2. 德国 截止 2011 年底, 德国光伏装机容量达到 25GW, 2011 年装机达 7.5GW, 建成大约 270 万个太阳能装置, 其中 80% 在屋顶, 其余的在建筑外表面或太阳能电站, 相关企业大约有 1.5 万家, 从业人数达 15 万人。德国 Q-CELLS 公司, 在政府光伏补贴不断下调和难获融资的情况下, 2011 年亏损已经超过了 8.46 亿欧元。德国是光伏产业主要材料、设备供应国, 最大客户是中国。全球第二位的设备厂商德国 Centrotherm, 其设备生产的光伏电池转换效率达到 20%, 订单达到 5.08 亿欧元。

德意志银行 2013 年 1 月 14 日发布报告表示, 在全球太阳能发电领域, 中国 2013 年将超越德国成为市场领头羊, 并预计 2013 年中国太阳能发电装机容量将翻倍, 由去年的 4GW, 增长到 10GW, 跃升为全球第一大太阳能市场。与此同时, 得益于德国能源市场转型, 中国太阳能电池板供应商将成为最大受益者。

目前德国正处于一场从核能向可循环使用能源转型的革命中。2011 年日本大地震爆发后, 德国政府决定逐步放弃国内所有核电站, 到 2020 年“绿色能源”占德国能源构成的比例将达 35%。目前德国实施太阳能上网电价优惠政策, 政府以高于核能发电的市场价从电力公司购买太阳能等“绿色能源”电力, 而后将额外支出分摊至用电的居民家庭。补贴政策促使绿色能源在 2012 年已上升至德国能源总量的 22%。目前有 56% 的绿色电力补贴流向了太阳能领域, 但由于德国使用的太阳能电池板三分之二从亚洲进口, 其中绝大部分来自中国, 当地光伏工业并未因政府优惠政策得以快速发展。

德国智库莱威世界经济研究所 (RWI) 认为, 中国太阳能电池板性价比好, 是德国市场最稳定的供货商, 中国太阳能电池板公司将成为德国能源转型的最大受益者。

3. 英国 英国能源与气候变化部太阳能补贴新政策, 4kW 系统补贴标准为 0.16 英镑/kW·h, 补贴时间从 25 年缩短至 20 年, 力争将投资回报率降为 4.5%~8%。

4. 意大利 2012 年初, 意大利上网电价下调 8%~10%, 并且每季度按 3%~4% 削减, 对每 4 个月装机超过 1GW 时追加下调幅度, 以此保持光伏装机平稳增长。新的政策 2012 年 10 月出台。

欧洲市场很难估计, 欧债危机还在发酵。德国两个月一个政策, 变化很快; 意大利、法国也不被看好; 保加利亚、捷克可能会有增长。欧洲的优势主要是上游的设备和下游的电站。

5. 美国 美国政府补贴定价每两个月根据市场情况进行调整, 补贴系统规模在 3MW 以下。安装系统价格在 3~4 美元/W, 价格较低, 促进美国市场增长。光伏产业价格下降所作贡献最多的是美国企业, 多晶硅从 400 多美元/kg, 降至 22 美元/kg, 采用细栅、高栅技术让银浆越用越少, 设备厂商一条生产线产能 25MW, 现在同样面积和价格的生产线产能可达 80MW。美国原认为核心技术在本土, 制造业出走无关紧要, 但在经济衰退、失业率猛增的情况下, 美国数十家太阳能企业破产。美国正在改变原有看法, 保护本土民族企业。美国拥有全球产能最大的多晶硅企业 Hemlock、MEMC, 主要原料来自中国, 主要客户也是中国。

6. 加拿大 加拿大安省将上网电价补贴削减 31.5%，屋顶系统补贴为 0.549 加元/W，地面安装系统补贴为 0.445 加元/W。

7. 日本 日本对于 10kW 的太阳能发电系统上网电价补贴为税前 42 日元/kW·h，税后 40 日元/kW·h，补贴时间 20 年；对于 10kW 以下的太阳能发电系统上网电价补贴为税前 42 日元/kW·h，补贴时间 10 年；是德国的两倍，中国的三倍以上。2012 年 7 月~2013 年 3 月 31 日期间实施。2012 年将超过 2GW。日本 2012 年 7 月实施可再生能源全量收购制度后，掀起大规模建设发电站的热潮。最大的光伏电站为 200MW，建在北海道苫小牧市东部。

日本太阳能光伏电池曾经领先世界，夏普、京瓷都具有 30 年以上的研究技术。然而，现代社会技术流通速度迅速，日本厂商拥有优势的时间已越来越短，太阳电池产地转向中国，核心技术难以突破，垂直集成生产模式（全产业链）制肘。垂直集成生产模式在于开始研发时产业链不成熟，大厂只能自己着手制造，延伸出许多厂，如今又不能撒手不管，最后败于水平分工生产模式。日本光伏产业正走传统工业模式失败的老路，中期被新兴国家厂商赶上。松下收购三洋电机后，充分发挥太阳能和锂电池领域的优势，准备进入中国市场。

8. 韩国 韩国多晶硅售价 23~24 美元/kg，有的甚至低于 20 美元/kg。

9. 印度 印度实施“国家太阳能计划”。2010~2013 年为计划第一期，1300MW 装机量；2013~2017 年为计划第二期，9000MW 装机量；2017~2022 年为计划第三期，10GW 装机量。2022 年太阳能并网装机 20GW。

10. 沙特阿拉伯 其国家资金充沛，到 2032 年装机总量将达 41GW。

二、国内市场现状

我国太阳能企业集中在产业链中附加值较低的中游电池、组件制造。上游的晶体硅材料主要被欧美和日本的几大厂商所垄断；下游光伏发电市场则主要集中在欧洲，造成“两头在外”的局面。同时，国内光伏行业产能上升较快，加上国外发展自身光伏产业的考虑，遭遇国际贸易壁垒。

1. 国内光伏企业

(1) 基本情况。国内有近 580 家光伏企业，从业人数约 30 万人。整个产业链包括光伏设备制造及配套产业得到快速发展。作为国家重点发展的七大新兴产业之首的新能源产业的重要支柱，太阳能光伏行业快速发展。2011 年，中国光伏企业产能占据全球市场 50% 以上，2012 年，我国太阳能电池产能突破 40GW，同比增长 50%。我国光伏产品转换效率比以往有了大幅提升。其中，晶硅电池工艺成熟，转换效率高，市场占有率约为 80%。规模生产的单晶硅电池转换效率可达 17% 以上，实验室转换效率最高达到 24.7%；规模生产的多晶硅电池转换效率可达 16% 以上，实验室的最高转换效率达 20.3%。我国一线企业在技术水平上与海外竞争对手差距并不大。我国 2012 年需求接近 6GW。2011 年我国进口多晶硅总量接近 6.5 万 t，大多来自美国、韩国。现在光伏行业关注的重点在于成本而不是效益。我国在成本控制上更具优势。我国长于中游的制造。国内销往美国的电池板平均价格在 0.75 美元/W 左右，美国公司的平均价格在 0.97 美元/W 左右。2011 年世界光伏企业十强，我国占有五席：尚德电力、英利绿色能源、天合光能、阿特斯、晶科能源。其余五席是 First Solar（美国）、Sun Power（美国）、韩华（韩国）、夏普（日本）、京瓷 Kyocera（日本）。

我国尚德电力早就用德国和日本生产的设备进行生产，很快就探索到核心技术，并握有