



新 能 源 系 列

晶体硅光伏组件

沈 辉 徐建美 董 娴 编著



化 学 工 业 出 版 社



新 能 源 系 列

晶体硅光伏组件



JINGTIGUI
GUANGFU
ZUJIAN

沈 辉 徐建美 董 娴 编著



化 学 工 业 出 版 社

· 北 京 ·

本书共分8章, 主要内容包括光伏组件结构与原理、光伏组件封装材料及配件、生产设备与检测仪器、光伏组件生产工艺、光伏组件认证标准与测试、光伏组件可靠性及回收利用、光伏组件技术发展等。

本书可以作为光伏产业技术人员的参考书, 也可作为高等院校的教材和教学参考书, 也可供光伏技术爱好者自学选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

晶体硅光伏组件/沈辉, 徐建美, 董娴编著. —北京:
化学工业出版社, 2019.1
(新能源系列)
ISBN 978-7-122-33329-2

I. ①晶… II. ①沈… ②徐… ③董… III. ①硅太阳能电池
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 262702 号

责任编辑: 潘新文
责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 河北鹏润印刷有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 13 $\frac{1}{4}$ 字数 244 千字 2019 年 4 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究

“新能源系列”编委会

主任：沈 辉 蹇 路
副主任：王 丽 梅建滨 刘 忠
委员：沈 辉 蹇 路 王 丽 梅建滨 刘 忠
徐建美 董 娴 杨 岍 吴伟梁 陶龙忠
孙韵琳 刘仁生 王晓忠 曾祖勤

序

晶体硅光伏组件
JINGTIGUI GUANGFU ZUJIAN

通过二十多年的奋发努力，我国的光伏产业已经成为具有国际竞争力的高科技产业之一。我国光伏产业的发展是通过政策支持、科技创新和规模化发展而实现成本快速降低，现在光伏发电成本是原来的十分之一。随着技术进步，光伏发电必将走入市场经济，实现平价上网。在这个发展过程中，技术革新和技术进步一如既往地发挥第一生产力的作用。目前我国的光伏发电能源所占电能的比例还不到3%，需要全体光伏技术人员继续努力。未来几十年光伏产业仍将处于一个快速而持续的发展阶段，我预计到2050年，我国光伏电力将会占社会总电能40%以上的份额，成为第一大电力能源，光伏发电的市场发展前景是广阔的。

要使光伏成为更有影响力的、造福更多人的能源，除了继续降低成本增加效益外，我们还要将光伏和大数据、物联网和人工智能等技术结合起来，创造出更加贴近用户生活的产品，让更多的人认识并接受光伏智慧能源。我国的光伏行业应该追求高质量的发展，用更少的资源投入，创造更高的价值，并且让所有的用户对于光伏绿色能源有更好的感受。我们坚信，大力发展太阳能发电是能源利用的最重要的发展方向，阳光加上人类的智慧将会改变人类的生活与生产方式，世界也会因此变得更加和谐、更加美好、更加文明，一个生态文明的新时代即将到来。

光伏发电最核心的部件就是光伏组件，光伏组件是光伏智慧能源的最重要基石。光伏发电的主流产品是晶体硅光伏组件，晶体硅光伏组件是最早进入光伏发电市场的，从20世纪60年代算起，晶体硅光伏组件已经有将近六十年的发展与应用历史。目前，关于晶体硅光伏组件的技术发展的技术参考书与教科书比较缺乏，特别是近些年光伏组件新技术的发展很快，更需要总结与分析，以利于行业技术的推广与应用。作为最早从事光伏产业的科技公司，天合光能以创新、品牌和全球化为导向，经历了行业波澜壮阔的发展，经受了行业跌宕起伏的考验，在我

国光伏产业与技术突飞猛进发展过程中持续创新，勇立潮头，目前正在向“新能源物联网”的目标挺进。沈辉博士是一位非常令人尊敬的学者，他曾经对我说过，天合光能在晶体硅光伏组件的技术发展方面起到了很重要的作用，应该对晶体硅光伏组件的技术进行分析与总结，为行业的健康发展提供好的理论指导与技术参考，我深表赞同，并且给予支持，并请我公司的徐建美给予全力支持。由沈辉博士、徐建美女士、董娴女士编著的《晶体硅光伏组件》一书，对光伏组件的原理和结构、封装材料、组件生产工艺、生产装备与检测仪器、认证和可靠性、光伏组件的新技术新产品等都做了非常详实的介绍，是一本比较全面地介绍光伏组件的教材与技术参考书，也希望能够对广大读者有较大的帮助。

高纪凡

2019.1

常州

前言

晶体硅光伏组件
JINGTIGUI GUANGFU ZUJIAN

经过多年的发展，我国光伏组件的产量已经牢牢占据世界第一的位置，而且国内光伏产业已经形成了一个完整的体系，包括生产装备、封装材料、生产技术与工艺、检测与认证标准体系等，并且具备了很强的创新能力和核心竞争力。

光伏组件是光伏电站中最核心的部件，是绿色环保的“直流发电机”，不管是技术还是成本，都对光伏电站的先进性起到决定性的作用。一直以来行业对光伏组件的要求主要是基于三点：

(1) 高效率 这主要取决于太阳电池的效率，但是组件封装工艺的优化也有助于提升发电功率；

(2) 稳定性 组件是在室外条件下应用的，因此组件的结构、封装材料与工艺对于组件稳定性的影响至关重要，组件能正常使用 30 年甚至更长，是行业一直以来追求的目标；

(3) 低成本 电能是生活与生产的必需品，光伏发电要全面推广，一定要不断降低度电成本，实现平价上网。所以不断降低光伏组件成本，才能有利于光伏发电的推广和应用。

各种光伏组件中，晶体硅光伏组件的发展历史最久，是最早得到应用的光伏产品。国内外的大量实践案例表明，晶体硅组件正常使用可以达到 25 年甚至更久的时间。可以预见，在未来很长一段时间内，晶体硅组件仍将占据市场的主导地位。晶体硅电池生产技术还在不断发展与进步，光伏组件技术也将继续提升与不断完善。

本书主要包括组件结构与原理、封装材料与配件、组件生产工艺、生产装备与检测仪器、环境试验与检测认证、组件可靠性与回收利用及新技术发展等内容。全书由沈辉博士组织策划与统稿，并编写第 1、2 章；徐建美女士编写了第 3、4、5 章；董娴女士主要负责第 6、7、8 章的编写。全书部分插图的加工处理由黄嘉培完成。本书在编写过程得到了冯志强、张万辉、宋昊、刘超、梁学勤、陈奕峰、陈达明、韩会丽、

张舒、沈慧、季志超、孙权、杨泽民、黄宏伟、茅静、闫萍、杨小武、邹驰骋等人的大力支持，在此表示真诚的感谢！

本书编写过程中，天合光能有限公司、国家光伏科学技术重点实验室、中山大学太阳能系统研究所、顺德中山大学太阳能研究院给予了大力支持，提供了很多非常有价值的资料，在此表示真诚的感谢！

本书可以作为高等院校相关专业的教材和教学参考书，也可作为广大光伏产业技术人员参考用书，还可供光伏技术爱好者自学选用。光伏组件技术还在不断发展之中，由于作者学术水平所限，本书会存在一些不足之处，欢迎广大读者提出宝贵意见和建议，以便再版时进一步完善。

沈 辉

2018.12

于广州南国奥园

目 录

晶体硅光伏组件
JINGTIGUI GUANGFU ZUJIAN

第 1 章	绪论	1
1.1	太阳能概述	1
1.2	光伏组件概述	4
1.2.1	光伏产业发展历程	4
1.2.2	技术发展现状	4
1.3	能量回收期	9
第 2 章	光伏组件结构与原理	11
2.1	光伏组件的发展历史	11
2.2	封装目的与要求	12
2.3	光伏组件工作原理与技术参数	13
2.3.1	工作原理	13
2.3.2	技术参数说明	14
2.4	光伏组件的结构设计	17
2.4.1	设计原理	18
2.4.2	设计实例	21
第 3 章	光伏组件封装材料及配件	24
3.1	涂锡焊带	24
3.2	助焊剂	26
3.3	盖板材料	27

3.3.1	超白压花钢化玻璃	27
3.3.2	镀膜玻璃	28
3.3.3	化学钢化玻璃	30
3.3.4	有机玻璃	30
3.3.5	聚氟乙烯类	31
3.4	黏结材料	31
3.4.1	EVA 胶膜	31
3.4.2	POE 胶膜	37
3.4.3	PVB 胶膜	37
3.4.4	环氧树脂	37
3.4.5	液态有机硅胶	38
3.5	背板材料	39
3.5.1	结构和功能	39
3.5.2	技术要求	40
3.5.3	各类背板材料介绍	41
3.5.4	新型背板及应用	42
3.6	接线盒	44
3.6.1	功能和分类	44
3.6.2	技术要求	46
3.6.3	新型接线盒	49
3.7	密封材料	50
3.7.1	密封硅橡胶	50
3.7.2	灌封硅橡胶	52
3.7.3	硅酮胶	52
3.7.4	硅橡胶密封剂的性能要求	53
3.8	组件边框	55

第 4 章 生产设备与检测仪器 57

4.1	生产设备	57
4.1.1	切割设备	57
4.1.2	玻璃清洗机	59
4.1.3	焊接设备	60
4.1.4	真空层压设备	66
4.1.5	自动生产线	70
4.2	检测仪器	72

4.2.1	太阳能模拟测试仪	72
4.2.2	隐裂测试仪	81

第5章 光伏组件生产工艺 87

5.1	常规生产工艺	87
5.1.1	电池分选	88
5.1.2	单焊	89
5.1.3	串焊	92
5.1.4	叠层	94
5.1.5	EL 检查和外观检查	97
5.1.6	层压工艺	99
5.1.7	装铝边框与接线盒	101
5.1.8	固化与清洗	104
5.1.9	耐压绝缘测试	104
5.1.10	组件功率测试	106
5.1.11	EL 隐裂测试	107
5.1.12	外观检查	107
5.1.13	包装入库	108
5.2	其他封装工艺	109
5.2.1	滴胶封装	109
5.2.2	高压釜封装	110
5.2.3	硅酮胶灌封	110

第6章 光伏组件认证标准与测试 111

6.1	光伏产品认证的要求和类型	111
6.1.1	认证的总体要求	111
6.1.2	认证的类型	112
6.2	光伏检测机构介绍	114
6.2.1	国外检测机构	114
6.2.2	国内检测机构	116
6.3	光伏组件的相关技术标准	118
6.3.1	光伏组件标准发展历史	118
6.3.2	IEC 61215	120
6.3.3	IEC 61730	120

6.3.4	UL 1703	120
6.4	IEC 61215 可靠性测试项目	124
6.4.1	湿热试验	124
6.4.2	热循环试验	124
6.4.3	湿-冻试验	125
6.4.4	热斑耐久测试	126
6.4.5	湿漏电试验	127
6.4.6	静态机械载荷试验	127
6.4.7	重测导则	128
6.5	UL 1703 中的关键测试项目	135
6.5.1	温度测试	135
6.5.2	漏电流测试	135
6.5.3	冲击试验	136
6.5.4	防火测试	136
6.5.5	热斑耐久试验	137

第 7 章

光伏组件可靠性及回收利用

138

7.1	光伏组件的常见问题	138
7.1.1	热斑效应	138
7.1.2	PID 效应(电势诱导衰减)	138
7.1.3	蜗牛纹	139
7.1.4	接线盒失效	140
7.1.5	EVA 黄变	141
7.1.6	背板老化	141
7.2	光伏组件可靠性评估概述	142
7.2.1	可靠性评估工作难点	142
7.2.2	相关研究机构的工作	143
7.3	组件可靠性案例分析	144
7.3.1	案例 1——1982 年生产多晶硅组件(Solarex)	144
7.3.2	案例 2——1987 年生产单晶硅组件(BP Solar)	149
7.3.3	案例 3——1996 年生产单晶硅组件(Siemens Solar)	153
7.4	光伏组件的回收	157
7.4.1	光伏组件回收的方法	157
7.4.2	光伏组件回收再利用难点	160

8.1 光伏组件功率和成本发展趋势	161
8.1.1 功率发展和提效技术	161
8.1.2 成本发展和降本方向	162
8.2 高功率光伏组件	163
8.2.1 半片电池组件	163
8.2.2 叠片电池组件	164
8.2.3 双面电池组件	165
8.2.4 多主栅组件	168
8.3 组件结构的发展	171
8.3.1 1500V 组件	171
8.3.2 双玻组件	171
8.3.3 轻质化组件	172
8.3.4 易安装组件	174
8.3.5 建筑构件型组件	175
8.4 智能型光伏组件	179
8.4.1 Switch-off 型	179
8.4.2 DC-DC 型	180
8.4.3 DC-AC 型	181
8.5 概念型组件	182
8.5.1 光伏/光热一体化组件系统	182
8.5.2 集成二极管光伏组件	182
8.5.3 柔性晶体硅电池组件	185
8.5.4 彩色光伏组件	186
8.6 高端组件和特殊应用	187

附录 1 光伏组件外观检验标准	190
附录 2 EL 判定标准	193
附录 3 光伏组件相关的国家标准、行业标准和国际标准对照表	194

第 1 章

绪 论

太阳能光伏发电系统中最重要部件是太阳电池，而在光伏电站中得到实际应用的则是由太阳电池组成的光伏组件。太阳电池的工作原理是以半导体的光伏效应 (Photovoltaic effect) 为基础的，因此光伏组件就是实现光电转换的直流发电设备。太阳电池主要包括晶体硅电池和薄膜电池，而晶体硅太阳电池与组件是最早实现产业化应用的光伏发电产品。根据不同的生长工艺和结晶形式，晶体硅分为单晶与多晶两种类型。晶体硅太阳电池一般以高纯多晶硅为原料，经过掺杂等工艺制造而成。在实际电站应用中，晶体硅光伏组件里的电池通过光伏效应将太阳能转换为直流电后，可以直接给直流负载供电，也可以通过配置交流逆变器，将直流电转变为交流电，给交流负载供电。太阳能光伏发电系统既可离网运行，也可并网运行，成为公共电网的一个组成部分。

1.1 太阳能概述

太阳是位于太阳系中心的恒星，表面温度约为 5800K，它的能量来自内部的氢聚变反应。太阳已经存在了 50 亿年，它每秒消耗约 6.2 亿吨氢，按照这一燃烧速度，太阳还可以继续为人类服务约 50 亿年。

太阳辐射的基本参数可以通过黑体模型进行估算。太阳半径 $R_s = 6.96 \times 10^8 \text{ m}$ ，地球半径 $R_E = 6.38 \times 10^6 \text{ m}$ ，日地距离 $d = 1.496 \times 10^{11} \text{ m}$ 。太阳辐射波谱中，最大能量值对应的波长为 $\lambda_m = 490 \text{ nm}$ 。如果将太阳视作黑体，则根据维恩位移定律 $T\lambda_m = b$ ，得到太阳表面温度为 $T = 5900 \text{ K}$ （很接近实际值 $T = 5800 \text{ K}$ ，其中 b 是常数，也称为维恩常量， $b = 0.002897 \text{ m} \cdot \text{K}$ ）。再根据斯特潘-玻尔兹曼定律 $W_0(T) = \sigma T^4$ ，可得到单位面积上的发射功率

$$W_0 = 6.87 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

式中， σ 是斯特潘-玻尔兹曼常数， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

则太阳辐射的总功率 $P_s = W_0 \times 4\pi R_s^2 = 4.2 \times 10^{26} \text{ W}$ 。设太阳辐射分布在以



太阳至地球的距离为半径的球面上，地球单位面积所能接收到的太阳辐射的功率为

$$P'_E = P_s / 4\pi d^2 = 1490 \text{ W/m}^2$$

由于地球到太阳的距离远大于地球半径，可将地球看成半径为 R_E 的圆盘，地球接收到的太阳辐射功率为

$$P_E = P'_E \times \pi R_E^2 = 1.776 \times 10^{17} \text{ W}$$

由此即可算出地球全年接收到的太阳辐射能量为

$$W_s = 1.56 \times 10^{18} \text{ kWh}$$

有人估算过，只要在非洲 Sahara 沙漠几百平方公里的范围上铺满光伏组件，就可以满足全世界的用电需求。

相对于化石能源、风能、水能等而言，全球太阳能资源的分布更为均匀。全球太阳能资源较丰富的地区有北非、南非、中东、南欧、澳大利亚、美国西南部、南美洲东西海岸、我国西部地区。我国青藏高原的太阳辐射量与世界上太阳能资源最丰富的非洲 Sahara 沙漠地区接近；我国太阳能资源比较差的地区主要位于贵州与四川的部分地区，其他绝大部分地区都可以较好地利用光伏发电。我国西部地区具有大片沙漠、戈壁地带，非常适合建设大型地面光伏电站；而在东部沿海地区，有大量的厂房屋面，适合建设规模化屋顶光伏电站。

以 1000W 光伏组件为例，在太阳能资源中等水平地区，如上海地区，年发电量为 900kWh 左右，广州地区约为 1100kWh；在太阳能资源丰富地区，如昆明，年发电量可以达到 1400kWh，呼和浩特可达 1500kWh，甘肃嘉峪关地区能够达到 1600kWh，新疆乌鲁木齐约为 1700kWh，西藏日喀则地区则可以达到 1800kWh 以上。

光伏发电作为一种全新的发电方式，在全球范围内目前尚处于初级发展阶段。根据国家能源局的统计数据，截至 2017 年底，我国可再生能源发电装机容量达到 6.5 亿千瓦，占全部电力装机容量的 36.6%，其中水电装机容量达到 3.41 亿千瓦，风电装机容量达到 1.64 亿千瓦，光伏发电装机容量达到 1.30 亿千瓦，生物质发电装机容量达到 1476 万千瓦。我国不但是光伏发电设备第一生产大国，也是光伏发电应用第一大国。光伏发电技术之所以得到全球广泛关注与快速发展，主要是因为它具有以下优点：

(1) 太阳能取之不尽，用之不竭，在地球上分布广泛，不管在陆地还是在海洋、高山和岛屿，太阳能都可以得到很好的开发和利用；

(2) 太阳能和风能、海洋能、地热能等一样，属于可再生清洁能源，其利用过程中几乎不产生污染，基本无 CO_2 排放，光伏发电运行安全、可靠，无噪声、无污染物排放，因此太阳能是真正的绿色能源；

(3) 太阳电池所用的主要原料是硅材料，硅在地壳中的含量非常丰富，约占 26%，仅次于氧，因此不存在资源枯竭问题；

(4) 光伏发电设备既可以安装在地面上, 建成大型地面发电站, 也可以安装在屋顶或幕墙上, 甚至可以在每栋建筑上建成一个发电单元, 服务于千家万户, 这是其他能源所不及的;

(5) 与其他发电形式相比, 光伏电站安装简单快捷, 容易扩容与搬迁, 不会对环境造成影响与破坏;

(6) 光伏电站运行模式相对简单, 部件更换与维修方便, 可以做到无人值守, 维护费用低。作为光伏发电核心部件的光伏组件, 一般情况下至少可以正常工作 25 年, 具有明显的经济效益优势。

太阳辐射到地表的能量受自然界昼夜交替、季节变化、地理纬度、海拔高度、气象条件以及各种随机因素的影响较大, 呈间断性、不稳定的状态, 从而影响光伏发电效果。如晴天有阳光照射就可以正常发电, 阴雨天没有阳光照射, 发电效果就很差; 夏天和冬天的日照时间不同, 太阳辐射量不同, 因此光伏发电产出也不同。正因为如此, 目前光伏发电主要采用并网发电的形式, 这样就不会影响终端用户正常用电。

由于化石能源消耗所产生的环境污染问题日益突出, 新能源的发展得到世界各国的关注与重视。目前, 风能、太阳能及生物质能三大可再生能源技术得到了快速发展。美国杰里米·里夫金在《第三次工业革命》一书中, 提到第三次工业革命的五大支柱为:

- (1) 向可再生能源转型;
- (2) 将每一大洲的建筑转化成微型发电厂, 以便就地收集可再生能源;
- (3) 在每一栋建筑物以及基础设施中使用氢和其他存储技术, 以存储间歇式能源;

(4) 利用互联网技术将每一大洲的电力网转化为能源共享网络, 这一共享网络的工作原理类似于互联网(成千上万的建筑物能够就地生产出少量的能源, 这些能源多余的部分既可以被电网回收, 也可以在各大洲之间通过联网共享);

(5) 将运输工具转向插电式以及燃料电池动力车, 这种电动车所需要的电能可以通过洲与洲之间共享的电网平台进行买卖。

可以预见, 光伏发电还将向着与建筑结合、与储能结合、与智能电网结合的方向继续发展, 其生产成本会持续下降, 直至完全能够与常规能源发电相竞争, 成为人类社会电力供应的主要方式。目前在欧洲多个国家, 如丹麦、德国、西班牙、意大利等, 风能与太阳能发电已经占据了较大的份额。美国、日本及我国的可再生能源发展情况也已经表明, 可再生能源能够有效改变能源结构。

根据多家权威机构的统计数据, 当前全球太阳能的应用比例还很低, 只占全球能源应用总量的 2%, 而到 2050 年, 全球可再生新能源(包括太阳能)应用比例可以达到 70% 左右。从发展趋势看, 太阳能将逐渐从补充能源向主导能源过渡, 成为维持人类社会可持续健康发展的最终能源。



1.2 光伏组件概述

1.2.1 光伏产业发展历程

1973年世界石油危机发生之后，光伏发电技术很快得到世界发达国家的关注。1974年，美国第一家以地面发电应用为目标的公司 Solarex 成立，其主要生产晶体硅电池与光伏组件。后来，德国 Siemens、英国 BP、荷兰 Shell、日本夏普、京瓷等企业先后进入晶体硅太阳电池和组件产业。

我国从 20 世纪 80 年代开始，先后有开封半导体、秦皇岛华美、宁波太阳能、云南半导体及深圳大明五家企业开始从事晶体硅光伏组件生产，并有哈尔滨克罗拉、深圳宇康两家企业先后开始生产非晶硅光伏组件，但由于技术与市场多方面原因，这些企业大多没有发展起来。

从 2001 年开始，我国光伏产业开始迅速崛起，涌现出尚德、英利、天合、晶科、晶澳、阿特斯等一批光伏企业。2008 年金融危机后，欧美很多光伏企业纷纷倒闭，世界光伏产业重新洗牌。2011 年，欧美开始针对我国出口的光伏组件产品实行双反政策（反倾销，反补贴），我国政府审时度势，积极引导国内光伏应用市场，通过发展分布式光伏电站示范区，实施光伏电站发展计划等一系列措施，帮助我国光伏企业渡过难关，稳定发展。目前我国的光伏产业已具备很强的国际竞争力，从完全依靠引进国外技术发展到现在能自主掌握关键材料、核心工艺和重点装备，从产品完全依赖出口转变为国内国外市场并重。2015 年底，我国已经成为光伏电站建设规模最大的国家，在我国光伏产业发展史上具有里程碑意义。目前我国光伏产业已经牢牢占据世界主导地位。

1.2.2 技术发展现状

光伏组件最初以单晶硅技术为主，后来随着技术升级和成本变化，多晶硅技术逐渐发展起来，并成为市场主流。近几年来，随着各种基于单晶硅技术的高效电池及组件的出现，单晶硅技术再一次得到发展与提升。

得益于半导体工业的发展与技术进步，太阳电池与光伏组件技术发展速度加快，生产制造工艺日臻成熟完善，目前已实现大规模生产。当前一条光伏组件生产线平均可以实现年产能 200MW。世界上最大的几个光伏企业的组件产能已经达到 GW 量级。2017 年，全世界光伏组件产能超过 80GW，其中晶体硅光伏组件占了 90% 以上。

与非晶硅薄膜光伏组件相比，晶体硅光伏组件效率更高，而且由于硅片具有金刚石晶体结构，性能稳定，因而晶体硅光伏组件的使用寿命更长。多个工