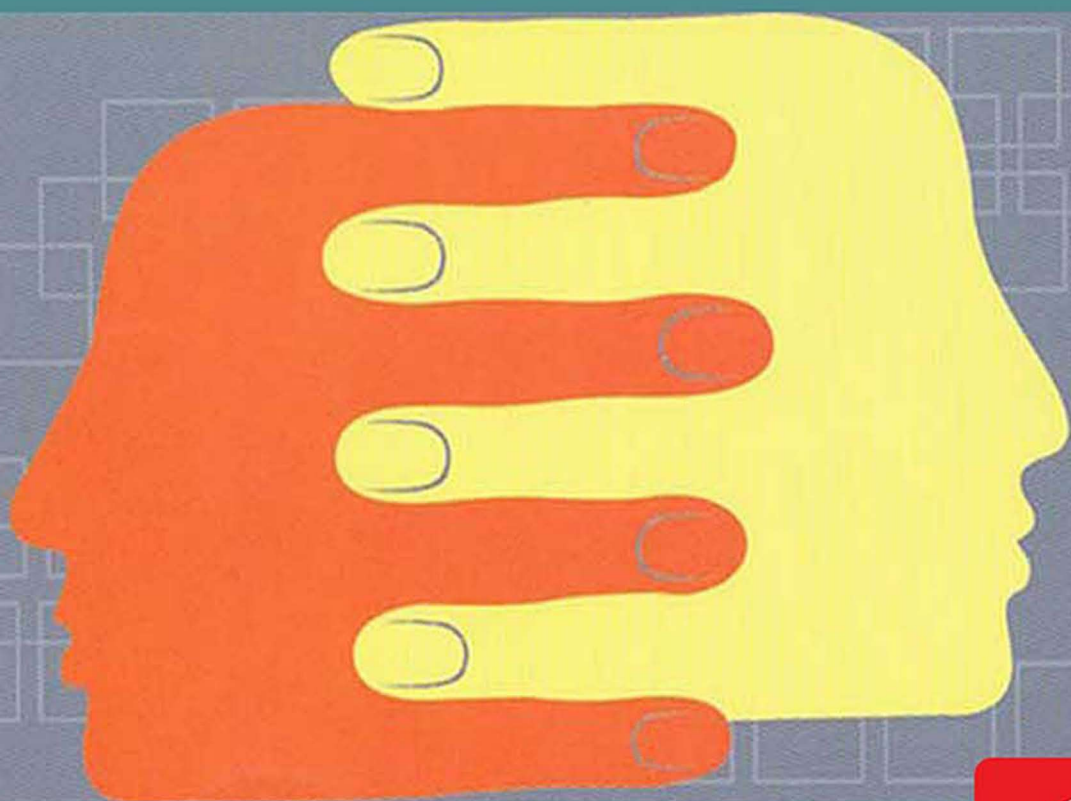


光伏组件制造技术

主 编 李一龙 张冬霞 袁 英



北京邮电大学出版社



普通高等教育“十三五”新能源类规划教材

光伏组件制造技术

主 编 李一龙 张冬霞 袁 英
副主编 代术华 潘红娜 胡军英 李 容



北京邮电大学出版社
www. buptpress. com

内 容 简 介

本书全面而深入地介绍了晶体硅太阳能电池的基础知识、工作原理及制造工艺等,并对蓬勃发展的晶体硅太阳能电池、组件原材料相关知识及相关设备使用做了简要介绍。

全书分为6章,具体内容包括太阳能光伏发电基础知识、太阳能光伏组件原材料相关知识、光伏组件相关设备的使用与维护、光伏组件生产加工工艺、光伏组件来料检验及常规试验操作、车间管理。

本书可作为高等院校(本科院校、高职院校)新能源技术及应用、光伏发电技术及应用、新能源科学与工程等专业的教学用书,也可供太阳能电池企业的技术人员、管理人员以及广大太阳能电池发电爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

光伏组件制造技术 / 李一龙, 张冬霞, 袁英主编. -- 北京: 北京邮电大学出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5635-5243-6

I. ①光… II. ①李… ②张… ③袁… III. ①太阳能电池—生产工艺 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第197201号

书 名: 光伏组件制造技术

著作责任者: 李一龙 张冬霞 袁 英 主编

责任编辑: 刘 颖

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发行部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷:

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 16.25

字 数: 425千字

版 次: 2017年8月第1版 2017年8月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-5243-6

定 价: 39.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

2016年我国太阳能光伏电池累计产量6 838.1万千瓦,产量同比增长1.9%,累计增长16.6%。经过十几年的发展,我国光伏产业已成为一个名副其实的大产业。太阳能光伏工程技术人才的培养主要依靠光伏企业内部培养,由于种种原因,远远不能满足迅猛发展的光伏行业需求。理论功底厚且实践能力强的高端工程技术人员更是凤毛麟角。

高端工程技术人员培养离不开适宜的、优质的教材。纵观国内太阳能光伏著作,适合作为本科及专科教学使用的并不多。部分早期太阳能光伏著作,理论分析深刻,但其中太阳能电池制造工艺已属于传统的、被淘汰的制造工艺,缺少对当前主流制造工艺的深入介绍。最新的专著往往在一些具体问题上过于深入而难以全面深入介绍太阳能电池发电机理。

晶体硅太阳能电池工艺经过了40余年的不断创新,发电机理清晰,技术成熟,电性能稳定,是目前乃至今后相当长时间内光伏行业主流的太阳能电池,为了适应目前蓬勃发展的光伏行业对工程技术人才的需求及配合国内高等院校开展光伏课程教学,我们组织编写了本书,全面而深入地介绍晶体硅太阳能电池的基础知识、工作原理及制造工艺等。

本书具有以下特色:

(1)按从太阳能电池的应用到微观的太阳能电池工作原理及制造工艺的顺序编写,旨在让读者先获得对太阳能光伏行业整体的感性的认识,再逐步深入学习,由表及里逐步加深理性认识;旨在使读者不仅知其然,而且知其所以然。

(2)对太阳能电池及组件制造工艺的讲解具体、深入而细致。以当今太阳能电池主流制造工艺为例,介绍了主流制造企业所应用的生产设备、操作方法,甚至包含了具体的工艺参数。

(3)主要章节后面附有一定数量的习题,有利于读者检验学习效果、教师组织课程练习及课程考核。

本书由李一龙、张冬霞、袁英担任主编,代术华、潘红娜、胡军英、李容担任副主编。具体编写分工如下:张冬霞编写第1章,袁英编写第2章,代术华编写第3章,潘红娜编写第4章,胡军英编写第5章,李一龙编写第6章,李容编写复习资料。全书由李一龙统稿。

由于编者水平有限,书中的疏漏和不足之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 太阳能光伏发电基础知识	1
1.1 太阳能光伏发电概述	1
1.1.1 太阳能光伏发电简介	1
1.1.2 太阳能发电的优点	2
1.1.3 太阳能发电的缺点	2
1.1.4 太阳能发电的发展	2
1.2 太阳能发电系统的原理及组成	5
1.2.1 太阳能电池方阵	6
1.2.2 控制器	13
1.2.3 直流/交流逆变器	16
1.2.4 蓄电池组	20
1.3 太阳电池及其组件	28
1.3.1 太阳电池的历史	28
1.3.2 太阳电池的参数及介绍	30
1.3.3 光伏组件相关知识	33
习题一	34
第 2 章 太阳能光伏组件原材料相关知识	37
2.1 太阳能电池组件基础知识	37
2.1.1 太阳能电池组件的概念	37
2.1.2 太阳能电池组件技术参数	37
2.2 太阳能电池组件封装相关材料	40
2.2.1 电池片	40
2.2.2 EVA 太阳电池胶膜	42
2.2.3 背板材料	45
2.2.4 涂锡带	48
2.2.5 钢化玻璃	51
2.2.6 铝型材	54
2.2.7 硅胶	56
2.2.8 助焊剂	57
2.2.9 接线盒	60

2.2.10	旁路二极管	63
2.2.11	四氟布	63
	习题二	64
第3章 光伏组件相关设备的使用与维护		65
3.1	电池片测试仪	65
3.1.1	电池片测试仪设备介绍	65
3.1.2	电池片测试仪技术参数	66
3.1.3	电池片测试仪操作规程	66
3.1.4	电池片测试仪保养及维护	68
3.2	激光划片机	68
3.2.1	激光划片机设备介绍	68
3.2.2	激光划片机技术参数	69
3.2.3	激光划片机操作规程	69
3.2.4	激光划片机保养及维护	70
3.3	EVA/背板裁剪台	71
3.3.1	EVA/背板裁剪台设备介绍	71
3.3.2	EVA/背板裁剪台技术参数	71
3.3.3	EVA/背板裁剪台操作规程	71
3.3.4	EVA/背板裁剪台保养及维护	72
3.4	切带机	72
3.4.1	切带机设备介绍	72
3.4.2	切带机技术参数	72
3.4.3	切带机操作规程	73
3.4.4	切带机保养及维护	73
3.5	电烙铁	73
3.5.1	电烙铁设备介绍	73
3.5.2	电烙铁技术参数	73
3.5.3	电烙铁操作规程	74
3.5.4	电烙铁保养及维护	74
3.6	焊接加热板	75
3.7	自动焊接机	75
3.7.1	自动焊接机设备介绍	75
3.7.2	自动焊接机技术参数	77
3.7.3	自动焊接机操作规程	78
3.7.4	自动焊接机保养及维护	78
3.8	空气压缩机	79
3.8.1	空气压缩机设备介绍	79
3.8.2	空气压缩机技术参数	79

3.8.3	空气压缩机操作规程	80
3.8.4	空气压缩机保养及维护	80
3.9	真空泵	81
3.9.1	真空泵设备介绍	81
3.9.2	真空泵技术参数	82
3.9.3	真空泵操作规程	82
3.9.4	真穴泵保养及维护	83
3.10	叠层中测台	84
3.10.1	叠层中测台设备介绍	84
3.10.2	叠层中测台技术参数	84
3.10.3	叠层中测台操作规程	84
3.10.4	叠层中测台保养及维护	85
3.11	中检测试台	85
3.11.1	中检测试台设备介绍	85
3.11.2	中检测试台操作规程	85
3.11.3	中检测试台保养及维护	85
3.12	EL 测试仪	85
3.12.1	EL 测试仪设备介绍	85
3.12.2	EL 测试仪技术参数	86
3.12.3	EL 测试仪操作规程	86
3.12.4	EL 测试仪保养及维护	87
3.13	层压机	87
3.13.1	层压机设备介绍	87
3.13.2	组件层压机技术参数	88
3.13.3	层压机配置	88
3.13.4	层压机系统	89
3.13.5	层压机操作	89
3.13.6	层压机维护	90
3.13.7	层压机故障检修	90
3.13.8	应急处理操作规程	93
3.13.9	层压机操作注意事项	94
3.13.10	层压机时间设定	94
3.14	装框机	94
3.14.1	装框机设备介绍	94
3.14.2	装框机结构	95
3.14.3	装框机技术参数	96
3.14.4	装框机安装与调试	96
3.14.5	调整组装铝合金边框的长边尺寸	97
3.14.6	调整组装铝合金边框的短边尺寸	98

3. 14. 7	装框机操作规程	98
3. 14. 8	装框机保养及维护	99
3. 15	大面积太阳能电池组件测试仪	99
3. 15. 1	大面积太阳能电池组件测试仪设备介绍	99
3. 15. 2	大面积太阳能电池组件测试仪技术参数	100
3. 15. 3	大面积太阳能电池组件测试仪操作规程	101
3. 15. 4	大面积太阳能电池组件测试仪保养及维护	101
	习题三	102
第 4 章 光伏组件生产加工工艺		103
4. 1	主要任务	103
4. 2	场地条件	103
4. 3	学生素质要求	103
4. 4	场地要求	103
4. 5	光伏电池组件设计	104
4. 5. 1	光伏电池的串并联设计	104
4. 5. 2	光伏电池组件构造	106
4. 6	电池片的分选	110
4. 7	电池片的切割	113
4. 8	背板/EVA 准备	114
4. 9	焊带的准备	115
4. 10	单焊	116
4. 11	串焊	118
4. 12	叠层	120
4. 13	中检	125
4. 14	层压	126
4. 15	组件装框	130
4. 16	安装接线盒	132
4. 17	清洗	133
4. 18	组件终测试	134
4. 19	包装	139
	习题四	140
第 5 章 光伏组件来料检验及常规试验操作		141
5. 1	光伏组件来料检验	141
5. 1. 1	晶体硅电池片	141
5. 1. 2	EVA 薄膜	145
5. 1. 3	TPT 背板	146
5. 1. 4	钢化玻璃	148

5.1.5	涂锡铜带	149
5.1.6	接线盒	150
5.1.7	铝型材	151
5.1.8	硅胶	153
5.1.9	助焊剂	154
5.1.10	旁路二极管	156
5.1.11	四氟布	156
5.2	太阳能电池组件常规试验操作	157
5.2.1	剥离强度试验	157
5.2.2	交联度试验	157
5.2.3	耐压绝缘试验	157
5.2.4	玻璃钢化程度破碎试验	158
5.2.5	组件生产过程检验	158
5.3	太阳能电池组件成品检验	160
5.4	太阳能电池组件常见质量问题案例分析	161
5.5	太阳能电池组件返工技术要求	167
	习题五	170
第6章	车间管理	171
6.1	生产管理	171
6.1.1	工序人员分配	171
6.1.2	日常管理	172
6.1.3	生产统计	175
6.1.4	生产控制	175
6.1.5	6S管理	179
6.1.6	安全与防火	189
6.2	质量管理	189
6.2.1	抽样	191
6.2.2	进料检验	193
6.2.3	出货检验	196
6.2.4	过程巡检	199
6.2.5	工序检验	208
6.2.6	终检	209
6.2.7	品质保证	210
6.3	工艺管理	215
6.3.1	文件编制	216
6.3.2	组件设计	217
6.3.3	技术试验	222

6.4 设备管理	223
6.4.1 设备维修管理规定	223
6.4.2 设备事故的处理	224
6.4.3 设备管理考核指标	224
6.4.4 设备日常表格	225
复习资料	226
参考文献	250

第 1 章 太阳能光伏发电基础知识

1.1 太阳能光伏发电概述

1.1.1 太阳能光伏发电简介

太阳能光伏发电的基本原理是基于半导体 PN 结的光生伏打效应将太阳辐射能直接转换成电能。所谓的光生伏打效应,就是当物体受到光照时,其体内的电荷分布状态发生变化而产生电动势和电流的一种效应。太阳能光伏发电的能量转换就是太阳能电池,也叫光伏电池。当太阳光照射到由 P、N 型两种不同导电类型的同质半导体材料构成的太阳能电池上时,其中一部分光线被反射,一部分光线被吸收,还有一部分光线透过电池片。被吸收的光能被束缚的高能级状态下的电子产生电子-空穴对,在 PN 结的内建电场作用下,电子、空穴相互运动(图 1-1),N 区的空穴向 P 区运动,P 区的电子向 N 区运动,使太阳能的受光面有大量负电荷积累。于是在 PN 结附近就形成与势垒电场方向相反的光生电场。光生电场的一部分抵消势垒电场,其余部分使 P 型区带正电,N 型区带负电,使得 P 区与 N 区之间的薄层产生电动势,即光生电压,如在电池上、下表面做上金属电极,当接通外电路时,便有电流从 P 区经负载流至 N 区,此时就有电能的输出,这就是 PN 结型硅太阳能电池发电的基本原理。

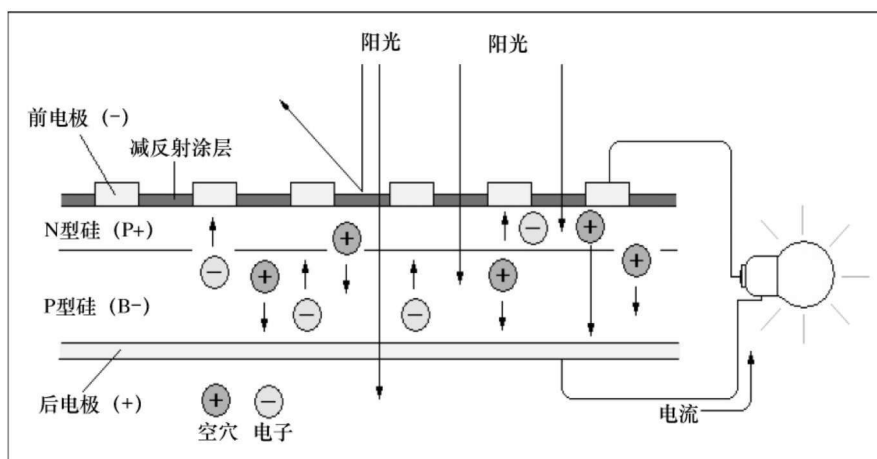


图 1-1 太阳能光伏电池发电原理

1.1.2 太阳能发电的优点

(1) 太阳能资源取之不尽,用之不竭,地球表面接受的太阳辐射能是全球能源需求的1万倍。只要全球4%的沙漠装上太阳能光伏系统,所发的电就可以满足全球的需要。太阳能发电安全可靠,不会遭受能源危机或者燃料市场不稳定的冲击。

(2) 太阳能随处可得,可就近供电,不必长距离输电,避免了长距离输电线路的损失。

(3) 太阳能发电不用燃料,运行成本很低。

(4) 太阳能发电特别适合无人值守。

(5) 太阳能发电不产生任何废弃物,没有污染、噪声等公害,对环境无不良影响,是理想的清洁能源。

(6) 太阳能发电系统建设周期短,方便灵活,而且可以根据负荷的增减,任意添加或减少太阳能电池方阵容量,避免浪费。

(7) 太阳能发电系统无机械转动部件,操作、维护简单,运行稳定可靠,使用寿命长(30年以上)。

(8) 太阳能电池组件结构简单,体积小、重量轻,便于运输和安装。光伏发电系统建设周期短,而且根据用电负荷容量可大可小,方便灵活,极易组合、扩容。

1.1.3 太阳能发电的缺点

(1) 地面应用系统有间歇性和随机性,发电量与气候条件有关,在晚上或者阴雨天就不能或者很少发电。

(2) 能量密度较低,标准条件下,地面接收到的太阳辐射强度为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,大规模使用时,占地面积较大。例如,1 580 mm × 808 mm 的一块组件发电的功率约为150 W。

(3) 目前价格较贵,发电成本为常规发电的5~15倍,初始投资高。

(4) 硅电池的制造过程高污染、高能耗。硅电池的主要原料是纯净的硅,硅是地球上含量仅次于氧的元素,主要存在是沙子(二氧化硅)。从沙子中提取二氧化硅并一步步提纯为含量99.999 9%以上纯净的晶体硅,期间要经过多道化学和物理工序的处理,不仅要消耗大量能源,还会造成一定的环境污染。

(5) 转换效率低。光伏发电的最基本单元是太阳能电池组件。光伏发电的转换效率指的是光能转换为电能的比率。目前晶体硅光伏电池转换效率为17%~24%,非晶硅光伏电池转换效率只有10%~15%。由于光电转换效率低,从而使光伏发电功率密度低,难以形成高功率发电系统。因此,太阳能电池的转换效率低是阻碍光伏发电大面积推广的瓶颈。

1.1.4 太阳能发电的发展

太阳能转换利用方式有光-热转换、光-电转换和光-化学转换三种方式。

(1) 太阳能热水系统是目前光-热转换的主要形式,它是利用太阳能将水加热储于水箱中以便利用的装置。太阳能产生的热能可以广泛应用到采暖、制冷、干燥、蒸馏、室温、烹饪等很多领域,并可以进行热发电和热动力。

(2) 利用光生伏打效应原理制成的光伏电池,可将太阳的光能直接转换成电能以利用,称为光-电转换,即光伏发电。本课程所讲的就是光伏发电,所以太阳能电池发电也称为光伏发电、光伏工程等。

(3) 光-化学转换尚处于研究试验阶段,这种转换技术包括光伏电池电极化水制成氢、利用氢氧化钙和金属氢化物热分解储能等。

自从1954年第一块实用光伏电池问世以来,太阳能光伏发电取得了长足的进步。但比计算机和光纤通信的发展要慢得多。其原因可能是人们对信息的追求特别强烈,而常规能源还能满足人类对能源的需求。1973年的石油危机和20世纪90年代的环境污染问题大大促进了太阳能光伏发电的发展。其技术及应用发展过程简列如下:

1893年,法国科学家贝克勒尔发现“光生伏打效应”,即“光伏效应”。

1876年,亚当斯等在金属和硒片上发现固态光伏效应。

1883年,制成第一个“硒光电池”,用作敏感器件。

1930年,肖特基提出 Cu_2O 势垒的“光伏效应”理论。同年,朗格首次提出用“光伏效应”制造“太阳能电池”,使太阳能变成电能。

1931年,布鲁诺将铜化合物和硒银电极浸入电解液,在阳光下启动了一个电动机。

1932年,奥杜博特和斯托拉制成第一块“硫化镉”太阳能电池。

1941年,奥尔在硅上发现光伏效应。

1954年,恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室,首次制成了实用的单晶硅太阳能电池,光电转换效率为6%。同年,韦克尔首次发现了砷化镓有光伏效应,并在玻璃上沉积硫化镉薄膜,制成了第一块薄膜太阳能电池。

1955年,吉尼和罗非斯基进行材料的光电转换效率优化设计。同年,第一个光电航标灯问世。美国RCA研究砷化镓太阳能电池。

1957年,硅太阳能电池转换效率达8%。

1958年,太阳能电池首次在空间应用,装备美国先锋1号卫星电源。

1959年,第一个多晶硅太阳能电池问世,转换效率达5%。

1960年,硅太阳能电池首次实现并网运行。

1962年,砷化镓太阳能电池转换效率达13%。

1969年,薄膜硫化镉太阳能电池转换效率达8%。

1972年,罗非斯基研制出紫光电池,转换效率达16%。

1972年,美国宇航公司背场电池问世。

1973年,砷化镓太阳能电池转换效率达15%。

1974年,COMSAT研究所提出无反射绒面电池,硅太阳能电池转换效率达18%。

1975年,非晶硅太阳能电池问世。同年,带硅电池转换效率达6%~9%。

1976年,多晶硅太阳能电池转换效率达10%。

1978年,美国建成100 kW_p太阳能地面光伏电站。

1980年,单晶硅太阳能电池转换效率达20%,砷化镓电池达22.5%,多晶硅电池达14.5%,硫化镉电池达9.15%。

1983年,美国建成1 MW_p光伏电站,冶金硅(外延)电池效率达11.8%。

1986年,美国建成6.5 MW_p光伏电站。

1990年,德国提出“2 000个光伏屋顶计划”,每个家庭的屋顶装3~5 kW_p光伏电池。

1995年,高效聚光砷化镓太阳能电池效率达32%。

1997年,美国提出“克林顿总统百万太阳能屋顶计划”,在2010年以前为100万户,每户安装3~5 kW_p光伏电池。有太阳时,光伏屋顶向电网供电,电表反转;无太阳时,电网向家庭

供电,电表正转。家庭只需交“净电费”。

1997年,日本“新阳光计划”提出到2010年生产43亿W_p光伏电池。

1997年,欧洲联盟计划到2010年生产37亿W_p光伏电池。

1998年,单晶硅光伏电池效率达25%。荷兰政府提出“荷兰百万个太阳光伏屋顶计划”,到2020年完成。

太阳能电池的发展历史呈现出一定的阶段性特征,大致可以分为下面几个阶段:

(1) 第一阶段(1954—1973)

1954年恰宾和皮尔松在美国贝尔实验室,首次制成了实用的单晶太阳能电池,转换效率为6%。同年,韦克尔首次发现了砷化镓有光伏效应,并在玻璃上沉积硫化镉薄膜,制成了第一块薄膜太阳能电池。太阳能电池开始了缓慢的发展。

(2) 第二阶段(1973—1980)

1973年10月爆发中东战争,引起了第一次石油危机,从而使许多国家,尤其是工业发达国家,加强了对太阳能及其他可再生能源技术发展的支持,在世界上再次兴起了开发利用太阳能的热潮。1973年,美国制订了政府级阳光发电计划,太阳能研究经费大幅度增长,并且成立太阳能开发银行,促进太阳能产品的商业化。1978年美国建成100kW_p太阳能地面光伏电站。日本在1974年公布了政府制订的“阳光计划”,其中太阳能的研究开发项目有:太阳能房、工业太阳能系统、太阳能热发电、太阳能电池生产系统、分散型和大型光伏发电系统等。为实施这一计划,日本政府投入了大量人力、物力和财力。至1980年,单晶硅太阳能电池转换效率达20%,砷化镓电池达22.5%,多晶硅电池达14.5%,硫化镉电池达9.15%。

(3) 第三阶段(1980—1992)

进入20世纪80年代,世界石油价格大幅度回落,而太阳能产品价格居高不下,缺乏竞争力;太阳能光伏技术没有重大突破,提高效率和降低成本的目标没有实现,以致动摇了一些人开发利用太阳能的信心;核电发展较快,对太阳能光伏的发展产生了一定的抑制作用。在这个时期,太阳能利用进入了低谷,世界上许多国家相继大幅度削减太阳能光伏研究经费,其中美国最为突出。

(4) 第四阶段(1992—2000)

由于大量燃烧矿物化石能源,造成了全球性的环境污染和生态破坏,对人类的生存和发展构成威胁。在这样的背景下,1992年联合国在巴西召开“世界环境与发展大会”,会议通过了《里约热内卢环境与发展宣言》《21世纪议程》和《联合国气候变化框架公约》等一系列重要文件,把环境与发展纳入统一的框架,确立了可持续发展的模式。这次会议之后,世界各国加强了清洁能源技术的开发,将利用太阳能与环境保护结合在一起,国际太阳能领域的合作更加活跃,规模扩大,使世界太阳能光伏技术进入了一个新的发展时期。

此期间的标志性事件主要有:1993年,日本重新制订“阳光计划”;1997年,美国提出“克林顿总统百万太阳屋顶计划”。至1998年,单晶硅光伏电池转换效率达24.7%。

(5) 第五阶段(2000年至今)

进入21世纪,原油价格也进入了疯狂上涨的阶段,从2000年的不足30美元/桶,暴涨到2008年7月的接近150美元/桶,这让世界各国再次意识到不可再生能源的稀缺性,加强了人们发展新能源的欲望。此阶段,太阳能产业也得到了轰轰烈烈的发展,德国在2004年修正EEG法案补贴新能源,西班牙在2004年开始实施“Red Decreto”法案,意大利实施“Conto Energia”法案,对光伏购电进行补偿,许多发达国家加强了政府对新能源发展的支持补贴力度,太

阳能发电装机容量得到了迅猛的增长。受益于太阳能发电需求的猛烈增长,我国由前几年的无名小卒到2007年一跃成为世界第一太阳能电池生产大国。在光伏电池转换效率方面,多晶硅太阳能电池实验最高转换效率达到了20.3%。至2007年,Spectrolab最新研制的GaAs多结聚光太阳能电池,转换效率达40.7%。

1.2 太阳能发电系统的原理及组成

太阳能(Solar)是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量,是各种可再生能源中最重要的基本能源,也是人类可利用的最丰富的能源。太阳每年投射到地面上的辐射能高达 1.05×10^{18} 千瓦时,相当于 1.3×10^{14} 亿吨标准煤,为全世界目前一年耗能的一万多倍。按目前太阳的质量消耗速率计,可维持 6×10^{10} 年,可以说它是“取之不尽,用之不竭”的能源。在地球大气层之外,地球与太阳平均距离处,垂直于太阳光方向的单位面积上的辐射能基本上为一个常数。这个辐射强度称为太阳常数,或称此辐射为大气质量为零(AM0)的辐射,其值为 1.367 kW/m^2 。太阳是距离地球最近的恒星,是由炽热气体构成的一个巨大球体,中心温度约为 10^7 K ,表面温度接近 5800 K ,主要由氢(约占80%)和氦(约占19%)组成。晴天,决定总入射功率的最重要的参数是光线通过大气层的路程。太阳在头顶正上方时,路程最短,实际路程和此最短路程之比称为光学大气质量。光学大气质量与太阳天顶角有关。当太阳天顶角为 0° 时,大气质量为1或称AM1;天顶角为 60° 时,大气质量为2或称AM2。天顶角为 48.2° 度时,大气质量为AM1.5,为光伏业界的标准。

地球上的风能、水能、海洋温差能、波浪能和生物质能以及部分潮汐能都是来源于太阳;即使是地球上的化石燃料(如煤、石油、天然气等)从根本上说也是远古以来贮存下来的太阳能,所以广义的太阳能所包括的范围非常大,狭义的太阳能则限于太阳辐射能的光热、光电和光化学的直接转换。太阳能既是一次能源,又是可再生能源。它资源丰富,既可免费使用,又无须运输,对环境无任何污染。太阳能的利用主要通过光—热、光—电、光—化学、光—生物质等几种转换方式实现。

太阳能发电系统是利用光生伏打效应原理制成的太阳能电池将太阳辐射能直接转换成电能的发电系统,光生伏打效应就是太阳光照到太阳能电池表面而产生电压的效应。太阳能发电系统分为离网型太阳能发电系统和并网型太阳能发电系统:太阳能光伏发电系统中,没有与公用电网相连接的光伏系统称为离网(或独立)太阳能光伏发电系统;与公共电网相连接的光伏系统称为并网(或联网)太阳能光伏发电系统。并网型太阳能发电系统是将所发电量送入电网;离网型太阳能发电系统是将所发电量在当地使用,不并入电网。离网(或独立)运行的光伏发电系统中,根据系统中用电负载的特点,可分为直流系统、交流系统、交直流混合系统。对于并网型太阳能发电系统要求全年所发电量尽可能最大,而对于离网型太阳能发电系统则要求全年发电量尽可能均衡,以满足负载需要。离网型太阳能发电与并网型太阳能发电的最大区别是前者一般需要蓄电池来储存电能。图1-2是离网型太阳能发电系统典型组成示意图,它包括太阳能电池方阵、控制器、蓄电池组、直流/交流逆变器等部分组成。

在并网型太阳能发电系统中需要防止孤岛效应,所谓孤岛现象是指当电网供电因故障或停电维修而跳脱时,各个用户端的分布式并网发电系统(如光伏发电、风力发电、燃料电池发电等)未能即时检测出停电状态而将自身切离市电网络,而形成由分布电站并网发电系统和周围的负载组成的一个自给供电的孤岛。

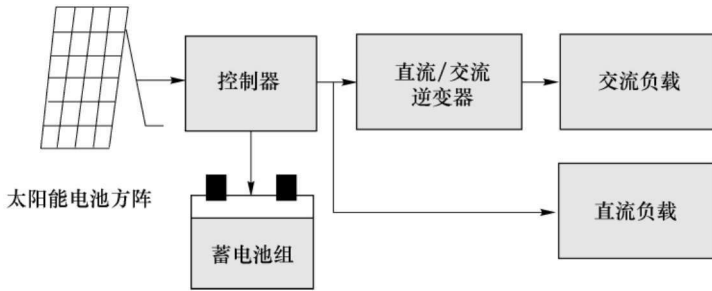


图 1-2 太阳能电池发电系统示意图

孤岛一旦产生将会危及电网输电线路维修人员的安全;影响配电系统上的保护开关的动作程序,冲击电网保护装置;影响传输电能质量,电力孤岛区域的供电电压与频率将不稳定;当电网供电恢复后会造相位不同步;单相分布式发电系统会造成系统三相负载欠相供电。因此对于一个并网系统必须能够进行防孤岛效应检测,逆变器直接并网时,除了应具有基本的保护功能外,还应具备防孤岛效应的特殊功能。从用电安全与电能质量考虑,孤岛效应是不允许出现的;当发生孤岛现象时,并网系统必须快速、准确地切除并网逆变器,向电网供电。孤岛发生时必须快速、准确地切除并网逆变器,向电网供电。

1.2.1 太阳能电池方阵

太阳能光伏发电系统的最核心的器件是太阳能电池,太阳能电池方阵由若干太阳能电池组件组成,太阳能电池组件由若干太阳能电池单体构成,太阳能电池单体是光电转换的最小单元。太阳能电池单体工作电压为 $0.4 \sim 0.5 \text{ V}$,工作电流为 $20 \sim 25 \text{ mA/cm}^2$,一般不能单独作为电源使用。将太阳能电池单体进行串并联封装后,就成为太阳能电池组件,其功率一般为几瓦至几百瓦,是可以单独作为电源使用的最小单元。太阳能电池组件再经过串并联组合安装在支架上,就构成了太阳能电池方阵,可以满足负载所要求的输出功率,如图 1-3 所示。

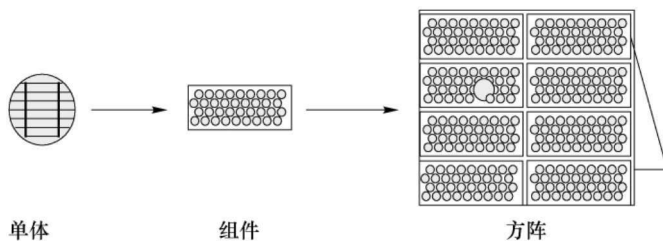


图 1-3 太阳能电池单体、组件和方阵

1. 太阳能电池单体

太阳能电池单体的材料一般为硅材料,在硅晶体中掺入其他的杂质(如硼等)时,硅晶体中就会存在着一个空穴,此时的半导体称为 P 型半导体。若在硅中掺入比其多一个价电子的元素(如磷),最外层中的 5 个电子只能有 4 个和相邻的硅原子形成共价键,剩下一个电子不能形成共价键,但仍受杂质中心的约束,只是比共价键的约束弱得多,只要很小的能量便会摆脱束缚,所以就会有一个电子变得非常活跃,此时的半导体称为 N 型半导体。

当硅掺杂形成的 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,在两种半导体的交界面区域里会形成一特殊的薄层,界面的 P 型一侧带负电, N 型一侧带正电。这是由于 P 型半导体多空

穴, N型多自由电子, 出现了浓度差。N区的电子会扩散到P区, P区的空穴会扩散到N区, 一旦扩散就形成一个由N区指向P区的“内电场”, 从而阻止扩散进行。当扩散达到平衡后, 就形成一个特殊的薄层, 这就是PN结。

常用的太阳能电池主要是硅太阳能电池, 晶体硅太阳能电池由一个晶体硅片组成, 在晶体硅片的上表面紧密排列着金属栅线, 下表面是金属层。硅片本身是P型硅, 表面扩散层是N区, 在这两个区的连接处就是所谓的PN结, PN结形成一个电场。太阳能电池的顶部被一层抗反射膜所覆盖, 以便减少太阳能的反射损失。

太阳光是由光子组成, 而光子是包含有一定能量的微粒, 能量的大小由光的波长决定, 光被晶体硅吸收后, 在PN结中产生一对正负电荷, 由于在PN结区域的正负电荷被分离, 因而就产生了电压, 由于电压的单位是伏特, 人们就称之为“光生伏打效应”, 这就是太阳能电池的工作原理。太阳电池的光谱响应是指一定量的单色光照到太阳电池上, 产生的光生载流子被收集后形成的光生电流的大小。因此, 它不仅取决于光量子的产额, 而且取决于收集效率。

将一个负载连接在太阳能电池的上下两表面间时, 将有电流流过该负载, 于是太阳能电池就产生了电流: 太阳能电池吸收的光子越多, 产生的电流也就越大。光子的能量由波长决定, 低于基能能量的光子不能产生自由电子, 一个高于基能能量的光子将仅产生一个自由电子, 多余的能量将使电池发热, 伴随能量损失的影响将使太阳能电池的效率下降。

2. 硅太阳能电池种类

目前世界上有3种已经商品化的太阳能电池: 单晶硅太阳能电池、多晶硅太阳能电池和非晶硅太阳能电池, 如图1-4所示。对于单晶和多晶太阳能电池, 外形尺寸一般为 $125\text{ cm} \times 125\text{ cm}$ 和 $156\text{ cm} \times 156\text{ cm}$ 两种, 也就是业内简称的125太阳能电池和156太阳能电池。

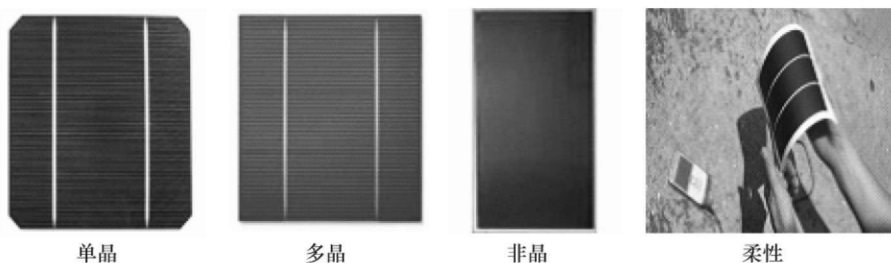


图1-4 太阳能电池外观图

对于单晶硅太阳能电池, 由于所使用的单晶硅材料与半导体工业所使用的材料具有相同的品质, 使单晶硅的使用成本比较昂贵。多晶硅太阳能电池的晶体方向的无规则性, 意味着正负电荷对并不能全部被PN结电场分离, 因为电荷对在晶体与晶体之间的边界上可能由于晶体的不规则而损失, 所以多晶硅太阳能电池的效率一般要比单晶硅太阳能电池低。多晶硅太阳能电池用铸造的方法生产, 所以它的成本比单晶硅太阳能电池低。非晶硅太阳能电池属于薄膜电池, 造价低廉, 但光电转换效率比较低, 稳定性也不如晶体硅太阳能电池, 目前多数用于弱光性电源, 如手表、计算器等。非晶硅太阳能电池可具有一定的柔性, 可生产柔性太阳能电池, 如图1-4所示。

太阳电池直流模型的等效电路如图1-5所示, 其中 I_L 为光生电流, I_0 为二极管电流, R_s 为串联电阻, R_{sh} 为并联电阻, I 为输出电流, V 为输出电压。