

职业院校理论实践一体化系列教材

光伏技术基础与技能

郑 军 张玉琴 / 主 编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

职业院校理论实践一体化系列教材(光伏专业)

光伏技术基础与技能

主 编 郑 军 张玉琴

副主编 胡东升 张卫民 杨宗斌

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍光伏产业的发展现状、硅材料基础、多晶硅生产工艺、单晶硅生产工艺、太阳能电池生产工艺、光伏组件生产工艺、光伏发电系统设计与安装等内容,大部分章节后附有视野拓展知识和阅读材料内容,以帮助读者全面、系统地掌握本书内容。本书每节后都附有相应的练习与思考题目,读者可以及时掌握和巩固相关的知识点。

本书层次分明、深入浅出、图文并茂、内容新颖且实用性强。

本书可作为高等职业院校及中等职业学校光伏技术及相关专业的教材。也可作为从事光伏产业生产和维修人员的培训及自学用书。

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

光伏技术基础与技能/郑军,张玉琴主编. —北京:电子工业出版社,2010.9

职业院校理论实践一体化系列教材·光伏专业

ISBN 978-7-121-11800-5

I. ① 光… II. ① 郑… ② 张… III. ① 太阳能发电-专业学校-教材 IV. ① TM615

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 176682 号

策划编辑:刘永成

责任编辑:刘 凡

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 字数:205 千字

印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:18.50 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

《光伏技术基础与技能》编辑委员会

主 任：翁孝川

副主任：张玉琴 朱云福 崔慧林

委 员：蒋宏达 郑德荣 徐洪泉

蔡文兰 郑 军 胡金龙

前 言

自进入近代社会以来，人类主要依赖煤和石油作为能源而生存。随着现代社会的经济发展，人类对能源的需求迅速扩大，这就给现实社会带来了两大问题：能源危机——煤和石油储藏量有限，取之有尽；环境污染——以煤、石油作为燃料排放的废气已经使人类的生存条件严重恶化，这两大问题必然迫使人们将眼光投向绿色新能源的开发。现有能源主要有3种，即火电、水电和核电。火电需要燃烧煤、石油等化石燃料。一方面，化石燃料蕴藏量有限，越用越少，正面临着枯竭的危险，据估计，全世界石油资源再有30年便将枯竭；另一方面，燃烧燃料将排出 CO_2 和硫的氧化物气体，会导致温室效应和酸雨，恶化地球环境，淹没大量土地，有可能导致生态环境破坏，而且大型水库一旦塌崩，后果将不堪设想。另外，一个国家的水力资源也是有限的，而且还要受季节的影响。核电在正常情况下固然是干净的，但万一发生核泄漏，后果同样是可怕的，前苏联切尔诺贝利核电站事故，已使900万人受到了不同程度的损害。新能源要同时符合两个条件：一是蕴藏丰富不会枯竭；二是安全、干净，不会威胁人类和破坏环境。目前新能源主要有两种：一是太阳能，二是燃料电池。另外，风力发电也可算是辅助性的新能源。其中，最理想的新能源是太阳能。

从太阳能获得电力，需要通过太阳能电池进行光电变换来实现。它同以往其他电源发电原理完全不同，具有以下优点：①无枯竭危险；②绝对干净（无公害）；③不受资源分布地域的限制；④可在用电处就近发电；⑤能源质量高；⑥使用者从感情上容易接受；⑦获取能源花费的时间短。不足之处是：①照射的能量分布密度小，即要占用巨大面积；②获得的能源与四季、昼夜及阴晴等气象条件有关。

当前，世界各国都在积极提倡低碳生活，利用太阳能发电，加大对太阳能这一新能源的开发与应用，已成为世界各国政府的共识。西方发达国家不惜投入巨资研制太阳能发电产品，推广太阳能发电的应用领域。所谓“低碳生活（low-carbon life）”，就是指生活作息时所耗用的能量要尽力减少，从而降低二氧化碳的排放量。低碳生活，对于我们普通人来说是一种态度，而不是能力，我们应该积极提倡并去实践低碳生活，注意节电、节油、节气，从点滴做起。“低碳经济”的理想形态是充分发展“阳光经济”、“风能经济”、“氢能经济”、“生物质能经济”。但现阶段太阳能发电的成本是煤电、水电的5~10倍，一些地区风能发电价格高于煤电、水电；作为二次能源的氢能，目前离利用风能、太阳能等清洁能源提取的商业化目标还很远；以大量消耗粮食和油料为代价的生物燃料开发，在一定程度上引发了粮食、肉类、食用油价格的上涨。从世界范围看，预计到2030年太阳能发电也只能达到世界电力供应的10%，而全球已探明的石油、天然气和煤炭储量将分别在今后30、50和100年左右耗尽。因此，在“碳素燃料文明时代”向“太阳能文明时代”（风能、生物质能都是太阳能的转换形态）过渡的未来几十年里，“低碳经济”、“低碳生活”的重要含义之一，就是节约化石能源的消耗，为新能源的普及利用提供时间保障。

从20世纪70年代开始，各国政府都投入了很大的力量来支持太阳能电池的发展。美国于1973年率先制订了政府光伏发电发展计划，明确了近、中、远期的发展战略目标；日本

从1974年开始执行“阳光计划”，投资5亿美元，迅速发展成为世界太阳能电池的生产大国。自20世纪80年代以来，其他发达国家，如德国、英国、法国、意大利、西班牙、瑞士、芬兰等，也纷纷制订了光伏发展计划，并投入了大量资金进行技术开发和加速工业化进程。20世纪80年代末至今，西方发达国家从环境和能源的可持续发展的角度出发，纷纷制定政策，鼓励和支持光伏并网发电。随着经济的发展、社会的进步，人们对能源提出越来越高的要求，寻找新能源已成为当前人类面临的迫切课题。

我国于1958年开始研究太阳能电池，2001年全世界太阳能电池的产量达到350万kW，我国太阳能电池的实际产量已达到4.5万kW，按照2007年国家发改委发布的《中国可再生能源发展规划》，计划到2020年，光伏发电累计装机容量达180万kW，市场前景十分远大。光伏行业在全世界的迅速发展也带动了我国对光伏行业的重视，一大批知名专家学者学成归国，我国在光伏技术上已达到国际领先水平。过去几年也是我国光伏行业发展最快的时期，诞生了一批知名企业和上市公司，尤其以无锡尚德、南京中电、河北晶奥、浙江昱辉、常州天合、正泰集团等企业为代表。

根据浙江省发展和改革委员会发布的《浙江省硅材料及光伏产业发展总体思路》，到2010年浙江省的硅材料及光伏产业年销售收入将突破1100亿元，硅材料及光伏产业将成为全省新的经济增长点和重要支柱产业，使浙江成为我国重要的硅材料及光伏产业基地。其中，年产高纯硅料20000t，实现年销售收入320亿元；建成若干家多晶硅铸锭和切片企业，年产多晶硅片2500t，实现年销售收入470亿元；建设三条单晶硅片生产线，年销售收入150亿元；建成一批原材料、耗材、配套设备生产企业，实现年销售收入40亿元，在良好市场的大环境下迅猛崛起。宁波太阳能、正泰太阳能、浙江向日葵、浙江乐叶光伏、万向硅峰等企业已成为远近闻名的光伏产业支柱企业。

当前，国内还没有光伏技术方面的中职教材出版，为更好地使职业技术教育与社会实际用工需求和工作技术要求接轨，探索职业技术教学的新方法，提升光伏技术专业学生的操作技能和综合素质，结合光伏产业的发展，以成熟的单晶硅和多晶硅为对象，结合学校的教学需求出发，我们编写了本书。

本书在编写过程中，浙江省衢州市教育局、衢州中等专业学校、浙江乐叶光伏有限公司及国家电网公司的领导给予了指导和大力帮助，在此表示衷心感谢。

本书的全部章节由浙江省衢州中等专业学校老师编写完成，其中第一章由周利林老师编写；第二章由徐宏芳老师编写；第三章由徐斌老师编写；第四章由徐忆老师编写；第五章由宁小红老师编写；第六章由姜忠平老师编写；第七章由杨勇华老师编写，本书部分插图由王振老师指导和设计。

光伏技术是一门新兴的学科，它的发展潜力十分巨大。新技术、新工艺在不断涌现，教学理念和教学方法也在不断发展，由于时间仓促，加上编者的水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2010年6月

目 录

第一章 概述	1
第一节 光伏产业的发展现状	1
第二节 光伏产业链的工艺概述	6
第三节 太阳与太阳能	11
第二章 硅材料基础	16
第一节 硅材料基础	16
第二节 硅矿的分布	19
第三节 硅材料的检测	23
第三章 多晶硅生产工艺	30
第一节 多晶硅生产工艺	30
第二节 多晶硅生产设备	36
第三节 多晶硅片生产工艺	44
第四节 多晶硅生产的环保	50
第四章 单晶硅生产工艺	56
第一节 单晶硅基础	56
第二节 直拉单晶炉	58
第三节 直拉单晶硅生产工艺	62
第四节 单晶硅的切割与抛光工艺	65
第五章 太阳能电池生产工艺	70
第一节 制绒与扩散	70
第二节 刻蚀与去 PSG	73
第三节 PECVD、丝网印刷与烧结	76
第四节 电池片的检测	80
第六章 光伏组件生产工艺	85
第一节 组件生产工艺概述	85
第二节 电池片的焊接工艺	88
第三节 EVA 及层压工艺	92
第四节 光伏组件固化与装框	94
第五节 光伏组件结构与检测	96

第七章 光伏发电系统设计与安装..... 100

 第一节 光伏方阵..... 100

 第二节 光伏组件..... 103

 第三节 光伏发电系统组成和设计..... 105

 第四节 光伏系统的安装及维护..... 111

 第五节 光伏发电的防雷接地..... 113

附录 A 20MW 组件生产线配置..... 116

附录 B 光伏技术专业实验室设备清单..... 117

参考文献..... 120

第一章 概 述



学习要求

1. 掌握光伏产业的现状和发展历程。
2. 掌握光伏发电的基本原理及其优、缺点。
3. 掌握光伏产业链的构成环节及工艺。
4. 了解太阳、太阳能的概况及其主要应用。
5. 掌握太阳能发电系统的组成和特点。



学习重点

1. 掌握光伏发电的基本原理。
2. 太阳能发电系统的组成和特点。

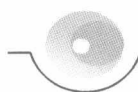
第一节 光伏产业的发展现状

自从 1839 年法国科学家 E. Becquerel 发现液体的光生伏特效应以来,太阳发电已经经过了 160 多年的漫长发展历史。20 世纪 50 年代,美国贝尔实验室三位科学家首次研制成功实用的单晶硅太阳能电池,诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术,成为太阳能电池发展史上的里程碑。

光伏发电的基本原理就是“光生伏特效应”,简称“光伏效应”,它是指在光的照射下,使半导体或某些特定材料的不同部位之间产生电位差的现象。它将光能量转化为电能,然后形成电压的过程,从本质上讲是能量相互转换的过程。有了电压,就像筑高了的大坝,如果两者之间连通,就会形成电流回路。能产生光伏效应的原材料有许多,常见的有单晶硅、多晶硅、非晶硅和砷化镓等,它们的发电原理基本相似,现以硅为例进行说明和分析。

带正电荷的硅原子旁边围绕着 4 个带负电荷的电子,可以通过向硅晶体中掺入其他杂质,如硼、磷等来改变其特性,形成 N 型或 P 型半导体。当 P 型和 N 型半导体结合在一起时,形成具有电位差的 PN 结。具体形成过程如图 1-1 和图 1-2 所示。

在图 1-1 中,正电荷表示硅原子,负电荷表示围绕在硅原子旁边的 4 个电子。当硅晶体中掺入其他杂质,如当掺入硼时,硅晶体中就会存在 1 个空穴。如图 1-2 所示,正电荷表示硅原子,负电荷表示围绕在硅原子旁边的 4 个电子,实心圆表示掺入的硼原子,因为硼原子



周围只有 3 个电子，所以就会产生如图所示的空穴（图中的“空心圆”表示空穴），这个空穴因为没有电子而变得很不稳定，容易吸收电子而中和，形成 P 型（positive）半导体。

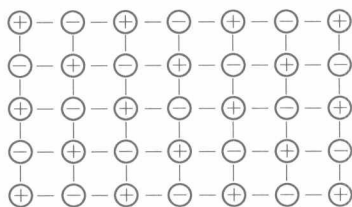


图 1-1 硅原子图

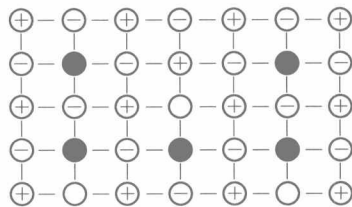


图 1-2 掺硼的硅原子（P 型）

同样，掺入磷原子以后，因为磷原子有 5 个电子，所以就会有 1 个电子变得非常活跃，形成 N 型（negative）半导体。实心圆为磷原子核，边上的负电荷为多余的电子，如图 1-3 所示。

当 P 型和 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个特殊的薄层，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 型半导体多自由电子，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，一旦扩散就形成了一个由 N 指向 P 的“内电场”，从而阻止扩散进行。达到平衡后，就形成了这样一个特殊的薄层，这就是 PN 结，如图 1-4 所示。当 PN 结受到光照射之后产生电子 - 空穴对，在“内电场”的作用下，N 型半导体的空穴获得能量后向 P 型区移动，而 P 型区中的电子获得能量后往 N 型区移动，形成从 N 型区到 P 型区的“内电流”，最后在 PN 结中形成电势差，形成了光伏电源。

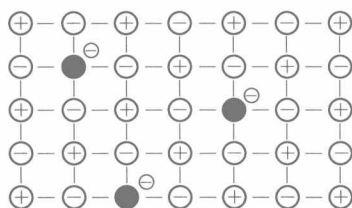


图 1-3 掺磷的硅原子（N 型）

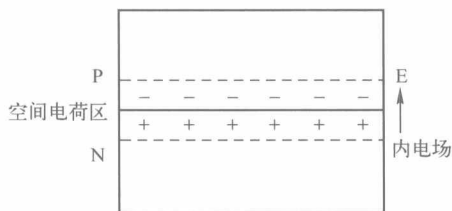


图 1-4 PN 结内电场

以太阳能硅材料的应用开发所形成的产业链条称为光伏产业，如高纯多晶硅原材料生产、太阳能电池生产、太阳能电池组件生产、相关生产设备的制造、光伏电站等均属于光伏产业。

目前，传统的化石能源与经济、环境的矛盾越来越突出，能源是经济与社会发展的基本动力，但由于常规能源的有限性和分布不均匀性，造成世界上大部分国家的能源供应不足，不能满足经济可持续发展的需要。从长远来看，全球已探明的石油储量大约只能用到 2040 年，天然气也只能延续到 2060 年左右，即使储量丰富的煤炭资源也只能维持一两百年。而传统的化石能源所带来的环境问题更令人担忧，每年有数十万吨二氧化硫和二氧化碳等有害物质排向空间，使大气环境遭到严重污染，直接影响人们的身体健康和生活质量，局部地区形成严重的酸雨区，又严重污染水土。同时，由于排放大量温室气体而产生的温室效应，已引起全球气候恶化。

发展可再生能源已成为全球课题，可再生能源可分为：风能、生物能、太阳能。太阳能的利用前景最好，潜力最大。近 30 年来，太阳能利用技术在研究开发、商业化生产、市场开拓方面都获得了长足发展，成为世界快速、稳定发展的新兴产业之一。而其中的太阳光伏

发电是世界上节约能源、倡导绿色电力的一种主要的高新技术产业。发展光伏产业已经成为全球各国解决能源与经济发展、环境保护之间矛盾的最佳途径之一。

光伏产业具有明显的优越性。首先，丰富的太阳辐射能，是取之不尽用之不竭、无污染、廉价的能源。太阳每秒辐射到地球的能量高达 80 万 kW，如果把地球表面 0.1% 的太阳能转为电能，转变率为 5%，那么每年发电量可达 $5.6 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，相当于目前全世界能耗的 40 倍。其次，太阳能光伏发电在近些年来得到了长足的发展和进步。太阳能光伏发电是一种零排放的清洁能源，而且十分容易规模产业化，可用于独立发电和并网发电。近几年来，国际上光伏发电快速发展，2008 年全球太阳能新装机容量达 5559MW，其中德国约为 1500MW，西班牙约为 2511MW，日本约为 230MW，美国约为 342MW，如图 1-5 所示。

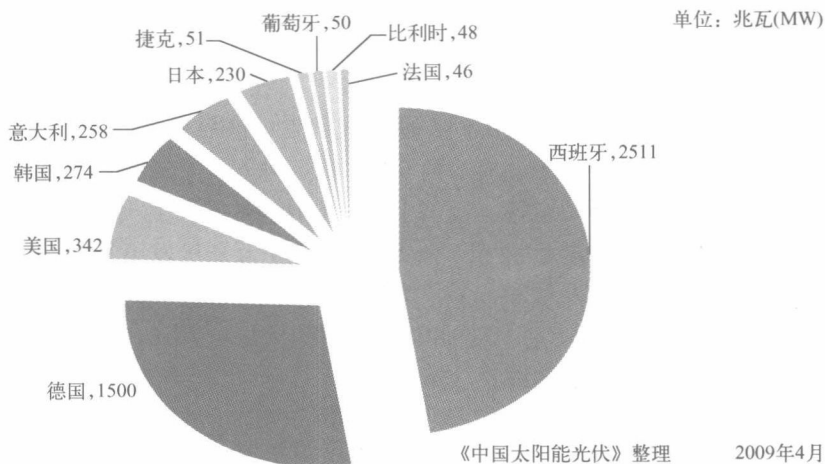


图 1-5 2008 全球太阳能光伏市场

PV 为 photovoltaic 的缩写，意思是光伏发电。光伏发电作为一种清洁能源，受到了世界各国的重视，2008 年全球光伏装机容量为 5559MW，比 2007 年增长了 135%。如图 1-6 所示为 2003—2008 年全球光伏装机容量。

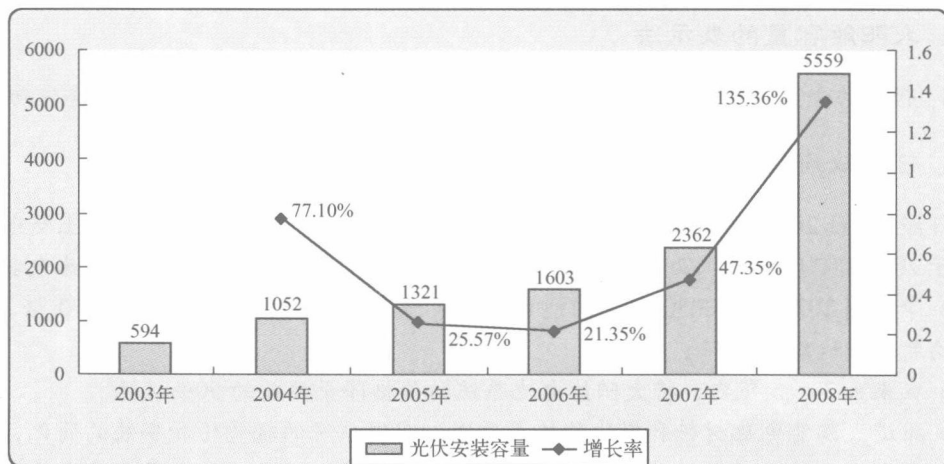


图 1-6 2003—2008 年全球光伏装机容量 (单位: MW)

光伏发电与其他能源的发电相比，主要有如下优点：

- (1) 结构简单，体积小且轻；
- (2) 易安装，易运输，建设周期短；
- (3) 使用方便，维护简单，在 $-50^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ 温度范围均可正常工作；
- (4) 清洁能源，安全、无噪声、零排放；
- (5) 可靠性高，寿命长；
- (6) 太阳能几乎到处都有，所以光伏发电应用范围广；
- (7) 降价速度快，能量偿还时间有可能缩短；
- (8) 可以与蓄电池相配组成独立电源，也可以并网发电。

它的主要缺点有：

- (1) 覆盖面积大但太阳能能量密度低；
- (2) 光伏发电具有间歇性和随机性；
- (3) 各个地区太阳能资源分布情况不同，所以光伏发电区域性强。

另外光伏发电的成本较高，是火电成本的 6 倍，是风电的 4 倍多，高额的发电成本决定了目前光伏发电必须依靠政策补贴运行。过去十几年光伏发电行业爆炸性增长的原因在于欧美发达国家相继出台光伏发电的补贴政策，补贴政策也成为光伏发电行业增长的主要驱动力。例如，日本政府于 2008 年 11 月发布了“太阳能发电普及行动计划”，确定太阳能发电量到 2030 年的发展目标是要达到 2005 年的 40 倍。2008 年 9 月 16 日，美国参议院通过了一揽子的减税计划，其中将光伏行业的减税政策（ITC）续延 2 ~ 6 年。

中国光伏发电产业于 20 世纪 70 年代起步，90 年代中期进入稳步发展时期，太阳能电池及组件产量逐年稳步增加。经过 30 多年的努力，已迎来了快速发展的新阶段，在“光明工程”先导项目和“送电到乡”工程等国家项目及世界光伏市场的有力拉动下，中国光伏发电产业迅猛发展。



视野拓展

一、太阳能容量的表示法

MW_p 代号的含义： MW 是兆瓦， 1MW 等于 1000kW ， W_p 是太阳能电池的峰值功率。

二、日本政府的太阳能发电普及行动计划

据日经 BP 社 2008 年 11 月 14 日报道：日本经济产业省、文部科学省、国土交通省以及环境省于 2008 年 11 月 11 日联合发布了“太阳能发电普及行动计划”，主要内容包括：

- (1) 争取到 2020 年、2030 年太阳能电池的发电量分别增加至 2005 年的 10 倍、40 倍，期间年均复合增速约为 16%；
- (2) 在未来 3 ~ 5 年内，将太阳能电池系统的价格降至目前的 50% 左右；
- (3) 推进太阳能电池材料和模块的技术开发、实现系统的轻量化和安装的简化；
- (4) 向家庭方面普及提供补助金，并加快公路、铁路、港口及机场等公共设施领域内的普及。



三、中国“光明工程”项目和“送电到乡”工程

1. 光明工程

1997年5月7日,国家确定“中国光明工程”已进入实施阶段,5年内将有800万无电贫困人口成为这一工程的首批受惠者。“中国光明工程”将通过开发利用风能、太阳能等新能源,以新的发电方式为那些远离电网的无电地区提供能量,为改变当地贫困落后的面貌提供条件。这一计划是我国政府为响应1996年在津巴布韦召开的“世界太阳能高峰会议”上提出的在全球无电地区推行“光明工程”的倡议而制订的。目前,我国有7656万无电人口、16个无电县、29783个无电村,这些人口和地区都远离电网,负荷小而分散,无法用延伸电网的方式供电。无电成为制约经济发展的一大障碍。据国家计委人士介绍,我国风能、太阳能资源丰富,风能可开发总量为2.53亿kW,年日照时间为2000h以上的地区占国土面积的2/3。同时,通过自主开发和引进技术,我国已能提供多种配套风能发电设备,为实施中国光明工程奠定了技术基础。据悉,“中国光明工程”近期将选择风力发电作为突破口。其目标是到2010年利用风力发电为我国有风无电地区的2300万人口供电。首期目标将在5年内完成2000个无电村、100个微波通信站的风电系统等的建设,装机总量40~60万kW,可以为全国1/10无电人口即800万人送去光明。

2. 送电到乡

2002—2004年,国家组织实施了“送电到乡”工程,中央和地方财政共安排47亿元资金,在内蒙古、青海、新疆、四川、西藏和陕西等12个省(市、区)的1065个乡镇,建设了一批独立的光伏、风光互补、小水电等可再生能源电站,其中光伏电站占大部分,解决了当地居民生活用电问题。

3. 金太阳工程

金太阳工程是一个崭新的提法,意味着太阳能产业在政策面上,将会得到更大力度的支持。

2009年7月21日,财政部联合科技部和国家能源局发布财建公告,宣布金太阳示范工程正式启动,并制定了《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》同时印发。金太阳示范工程是我国促进光伏发电产业技术进步和规模化发展,培育战略性新兴产业,支持光伏发电技术在各类领域的示范应用及关键技术产业化的具体行动,计划在2~3年时间内实施完成。纳入金太阳示范工程的项目原则上按光伏发电系统及其配套输配电工程总投资的50%给予补助,偏远无电地区的独立光伏发电系统按总投资的70%给予补助。

金太阳示范工程项目计划实施年限为2009—2011年。补贴范围包括利用大型工矿、商业企业以及公益性事业单位现有条件建设的用户侧并网光伏发电示范项目,提高偏远地区供电能力和解决无电人口用电问题的光伏、风光互补、水光互补发电示范项目,在太阳能资源丰富地区建设的大型并网光伏发电示范项目,光伏发电关键技术产业化示范项目,包括硅材料提纯、控制逆变器、并网运行等关键技术产业化,光伏发电基础能力建设,包括太阳能资源评价、光伏发电产品及并网技术标准、规范制定和检测认证体系建设五项。《太阳能光电



建筑应用财政补助资金管理暂行办法》财政补贴的项目，已享受国家可再生能源电价分摊政策支持的光伏发电应用项目不在本办法支持范围。

工程要求单个项目装机容量不低于 300kW_p ，建设周期原则上不超过 1 年，运行期不少于 20 年，并网光伏发电项目的业主单位总资产不少于 1 亿元，项目资金不低于总投资的 30%。对于符合条件的示范工程项目，并网光伏发电项目原则上按光伏发电系统及其配套输配电工程总投资的 50% 给予补助，偏远无电地区的独立光伏发电系统按总投资的 70% 给予补助。光伏发电关键技术产业化和产业基础能力建设项目，给予适当贴息或补助。并要求各地电网企业应积极支持并网光伏发电项目建设，提供并网条件，用户侧并网的光伏发电项目所发电量原则上自发自用，富余电量及并入公共电网的大型光伏发电项目所发电量均按国家核定的当地脱硫燃煤机组标杆上网电价全额收购。原则上每省示范工程总规模不超过 20MW，全国采取财政补助方式支持不低于 500MW 的光伏发电示范项目。

金太阳示范工程是财政部继光伏建筑补贴政策推出之后的大举措。此次补贴的范围主要为用户侧并网光伏发电项目、无电地区光伏发电项目和大型并网光伏发电项目 3 项，是同光伏建筑补贴政策互为补充的，共同涵盖了光伏产业下游的主要应用领域，对开拓我国尚处于萌芽期的光伏市场，加速我国光伏产业的发展，有着不可估量的推动和促进作用。



练习与思考

1. 什么是光伏效应？哪些生产属于光伏产业？
2. 光伏发电与其他能源的发电相比，具有哪些优、缺点？
3. 名词解释：光明工程、送电到乡、金太阳工程。
4. 请简单描述光伏效应的工作原理。

第二节 光伏产业链的工艺概述

太阳能光伏产业链包括多晶硅原料生产、硅棒/硅锭生产、太阳能电池制造、组件封装、光伏产品生产和光伏发电系统等环节，如图 1-7 所示。在产业链中，太阳能电池制造是最重要的生产环节。目前，世界上太阳能光伏电池 90% 以上是以单晶硅或多晶硅为原材料生产的。



图 1-7 太阳能光伏产业链图

通常的晶体硅太阳能电池是在厚度为 $350 \sim 450\mu\text{m}$ 的高质量硅片上制成的，这种硅片从提拉或浇铸的硅锭上锯割而成，整个生产工艺非常复杂，生产环节众多，主要的生产环节如图 1-8 所示。

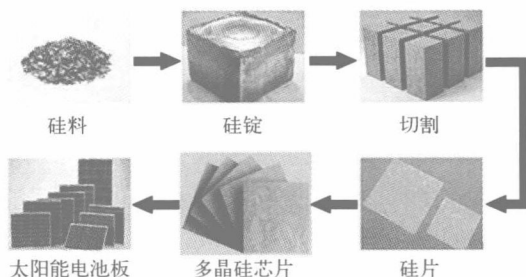


图 1-8 硅太阳能电池的生产流程

1. 多晶硅料

多晶硅料的提炼需要较大资金投入、较多能源消耗（每生产 1kg 多晶硅料需要耗电 200 ~ 500kW · h）和较高技术门槛。目前，国际上生产高纯度多晶硅料的生产工艺 85% 以上采用改良西门子法，它是利用氯气和氢气合成 HCl，HCl 和工业硅粉在一定的温度下合成 SiHCl_3 ，然后对 SiHCl_3 进行分离精馏提纯，提纯后的 SiHCl_3 在氢还原炉内进行化学气相沉积反应得到高纯多晶硅料。这种高纯多晶硅料的纯度要求较高，一般需达到 99.9999% 以上。

2. 铸锭切片

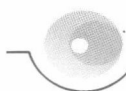
多晶硅料需要转化成单晶硅棒或多晶硅锭后，才能把它进一步加工成硅片、电池和组件。单晶硅棒生产最常用的工艺就是直拉法。在这个过程中，将多晶硅料放入石英坩埚中，经过加温后缓慢熔化，浸入一根具有一定晶向的籽晶，经过缩颈、放肩、转肩、等径、收尾生长和冷却过程，完成一根单晶的生长过程。多晶硅锭生产最常用的工艺是铸锭法。在这个过程中，将多晶硅放入石英坩埚中，经过加热、熔化、长晶、退火和冷却，完成一个多晶晶锭的生长过程。把单晶硅棒或多晶晶锭切割成硅片，目前基本上采用的是多线切割技术。将硅棒或硅锭经表面整形、定向、切割、研磨、腐蚀、抛光、清洗等工艺，加工成符合特定要求的硅片。硅片的厚度已经从 2004 年的主流厚度 $270\mu\text{m}$ 发展到现在的以 $200\mu\text{m}$ 为主。目前，国际上部分厂家生产的硅片厚度可以达到 $180\mu\text{m}$ 。目前硅片的利用率已经提高了 32% 以上。由于拉晶炉和铸晶炉设备生产基本上实现了国产化，再加上技术门槛较低，所以近年我国新上了一大批拉棒切片项目，大大促进了行业的发展。

3. 晶体硅电池

拉棒切片的下一个环节就是生产太阳能电池，太阳能电池分为晶体硅电池和薄膜涂层电池两大类。晶体硅电池占据了 90% 以上的市场份额，其中单晶硅电池的转换效率最高。多晶硅电池的转换率也突破了 16%。制造太阳能晶体硅电池需要经过很多工艺，其中包括硅片清洗、表面制绒、扩散制结、去磷硅玻璃、等离子刻蚀、镀减反射膜和丝网印刷等。

4. 电池组件

为了满足太阳能电池的实际使用要求，须将若干单体电池按电性能分类进行串、并联，经过封装后组合成可以独立作为电源使用的最小单元，这个独立的最小单元称为太阳能电池



组件。太阳能电池组件由光伏电池和金属框架、玻璃盖片、电缆引线以及黏结剂等组成。在封装过程中,单体太阳能电池之间是用金属导电带串联或并联焊接在一起的。目前常用的晶体硅太阳能电池封装一般是依次将钢化白玻璃-EVA(乙烯醋酸乙烯共聚物)-光伏电池片-虹吸玻璃-EVA-PVF(聚氟乙烯)复合膜叠起,放入层压封装机内进行封装,再组装上导线、接线盒、边缘密封带及金属框架,就完成了整套组件的封装工艺。在整个光伏产业链条中,太阳能电池组件封装的资金和技术门槛最低。多数设备已实现国产化,且价格比较便宜。由于电池片越来越薄,为了降低破碎率,一些企业习惯依靠手工操作。采取 OEM 代工方式,可进一步减少流动资金占用。近年来,电池组件这一环节发展最为迅速。

5. 光伏系统

光伏系统是利用太阳能电池组件和其他辅助设备将太阳能转换成电能的系统。一般将光伏系统分为独立系统、并网系统。光伏发电系统由电池方阵、蓄电池组、控制器和逆变器等组成。电池方阵是由多块光伏电池组件串联、并联构成的阵列,其作用是将太阳能转换为电能。蓄电池组由多只蓄电池串联或并联组成,其作用是储存光伏电池方阵发出的电能,并可随时向负载供电。控制器是防止蓄电池组被电池方阵过充电和被负载过放电,使蓄电池组使用达到最佳状态的中心控制设备。逆变器是光伏发电系统的电源转换设备,其作用是将直流电转换为单相或者三相交流电。由于电池组件是半导体材料,控制器和逆变器是电子设备,蓄电池是化学装置,所以发电系统无转动部件,运行可靠,故障率低,一次投资可保证 20 年不间断供电。发电系统按运行方式可分为离网运行系统和并网运行系统两大类。其中,离网运行系统主要用于为公共电网难以覆盖的边远农村、牧区和海岛的农、牧、渔民提供基本生活用电,为通信中继站、沿海与内河航标、气象台站及边防哨所等特殊场合提供电源。并网运行系统把太阳能转化为电能,不经过蓄电池储能,直接通过并网逆变器把电能送上电网。光伏并网发电是当今世界太阳能发电技术发展的主流趋势。

6. 光伏发电、安装工程及电站运营

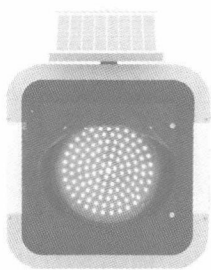
光伏发电,实际上就是太阳能电池在光伏产业链下游产业集群的核心功能价值表现。光伏产业链的下游企业,除太阳能电池并网发电在发电工程等领域的具体应用外,还包括太阳能光伏电池与机电产业、建筑材料的结合利用光伏集成建筑等方面,目前在国内市场的准入门槛还不是太高。光伏发电产业的普及,在当前需要政府的引导和激励。

光伏发电具有广泛的应用,太阳能光伏终端产品主要有室外照明装饰灯具、道路交通警示标志、太阳能多功能电源、电源转换器、太阳能户用电源、太阳能控制系统主板、光伏(风/光/柴互补)电站等,如图 1-9 所示。

(1) 居民用户太阳能电源:①小型电源为 10 ~ 100W 不等,用于边远无电地区(如高原、海岛、牧区、边防哨所等)军民生活用电,如照明、电视、收录机等;②3 ~ 5kW 家庭屋顶并网发电系统;③光伏水泵用于解决无电地区的深水井饮用、灌溉。

(2) 交通领域:如航标灯、交通/铁路信号灯、交通警示/标志灯、路灯、高空障碍灯、高速公路/铁路无线电话亭、无人值守道班供电等。

(3) 通讯/通信领域:太阳能无人值守微波中继站、光缆维护站、广播/通信/寻呼电源系统;农村载波电话光伏系统、小型通信机、士兵 GPS 供电等。



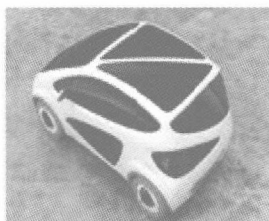
交通指示牌



太阳能路灯



太阳能手机



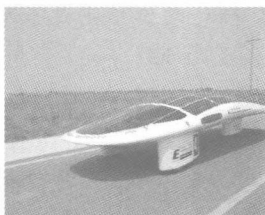
太阳能汽车



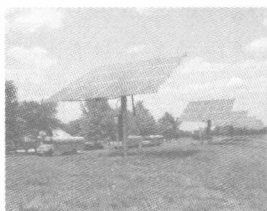
太阳能屋顶发电站



太阳能背包



太阳能电车



太阳能发电站



太阳能建筑

图 1-9 太阳能发电的应用

(4) 石油、海洋、气象领域：石油管道和水库闸门阴极保护太阳能电源系统、石油钻井平台生活及应急电源、海洋检测设备、气象/水文观测设备等。

(5) 家庭灯具电源：如庭院灯、路灯、手提灯、野营灯、登山灯、垂钓灯、黑光灯、割胶灯、节能灯等。

(6) 光伏电站：10kW ~ 50MW 独立光伏电站、风光（柴）互补电站、各种大型停车场充电站等。

(7) 太阳能建筑：将太阳能发电与建筑材料相结合，使得未来的大型建筑实现电力自给，是未来的发展方向。

(8) 其他领域包括：①与汽车配套的太阳能汽车/电动车、电池充电设备、汽车空调、换气扇、冷饮箱等；②太阳能制氢加燃料电池的再生发电系统；③海水淡化设备供电；④卫星、航天器、空间太阳能电站等。

7. 应用材料及相关产业

光伏产业链不仅涉及电池片项目，而且还带动多晶硅料、硅棒、硅锭、硅片、电池片、电池组件、发电系统和应用产品的发展，同时还需要大量的应用材料为其配套。低铁玻璃由于具有透光率高、反光率低、机械强度大和耐腐蚀等特点，被广泛应用于光伏组件的基板材