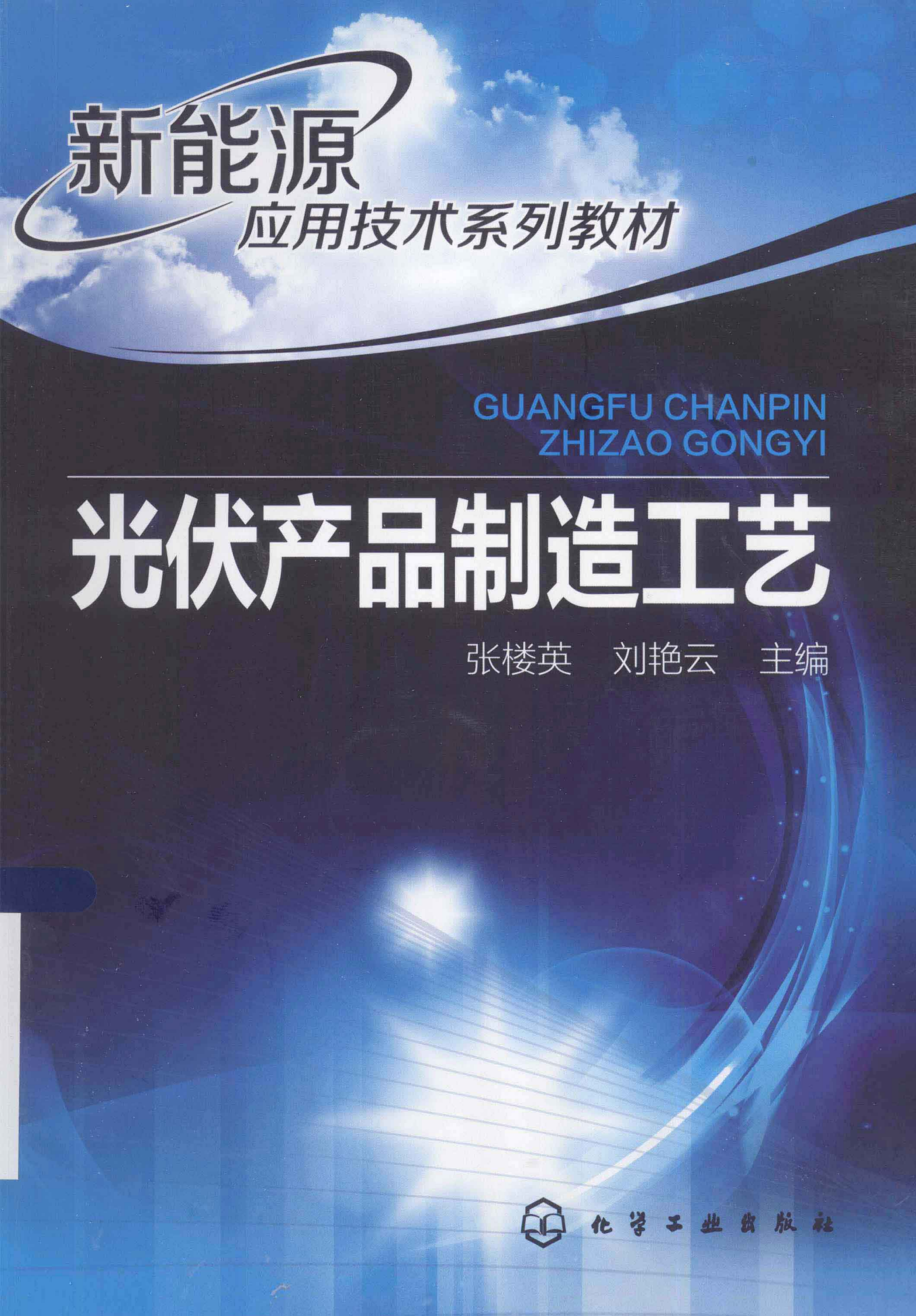




新能源

应用技术系列教材

GUANGFU CHANPIN
ZHIZAO GONGYI

光伏产品制造工艺

张楼英 刘艳云 主编



化学工业出版社

新能源应用技术系列教材

光伏产品制造工艺

张楼英 刘艳云 主编

方 智 主审



化学工业出版社

· 北 京 ·



本书围绕光伏产品制造工艺, 将整个知识体系分成理论篇和实践篇 2 部分, 共 6 章。理论篇内容包括: 绪论、太阳电池的基本原理、晶体硅太阳电池、薄膜太阳电池、光伏组件; 实践篇介绍单晶硅太阳电池制备工艺过程中的硅片检验、单晶硅制绒、扩散、湿法刻蚀、PECVD、丝网印刷、烧结及电池片检测工艺操作规程, 对生产过程中的缺陷进行分析。

本书系统地从事材料生产、硅片制备、电池片制备、组件封装讲述了典型光伏产品制造工艺, 以工艺为主线, 既有理论又辅以实践, 可以有效地加强学生对内容的理解。

本书可作为普通高校、或职业技术学院工科微电子技术、光电子技术、新能源应用技术等专业课教材, 电子类专业选修课教材, 也可作为电池片制造企业、组件封装企业工程技术人员的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

光伏产品制造工艺/张楼英, 刘艳云主编. —北京: 化学工业出版社, 2013. 5

新能源应用技术系列教材

ISBN 978-7-122-16839-9

I. ①光… II. ①张…②刘… III. ①太阳能电池-生产工艺-教材 IV. ①TM914. 45

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 058872 号

责任编辑: 张建茹 刘 哲

文字编辑: 高 震 杨 帆

责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 尹琳琳

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 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$ 字数 312 千字 2013 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 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: 28.00 元

版权所有 违者必究

新能源应用技术系列教材编审委员会

主 任：狄建雄

副主任：（按拼音排序）

成建生 金文兵 姚庆文 朱旭平

委 员：（按拼音排序）

成建生 狄建雄 韩迎辉 蒋正炎 金文兵

李金钟 刘洪恩 刘晓艳 刘艳云 刘 颖

夏敏磊 夏庆观 姚庆文 张楼英 张素贞

序

根据《国家战略性新兴产业发展规划》和国家“十二五”先进能源技术领域战略，国家出台了一系列扶持新能源产业发展的政策，在国家产业政策的引导和支持下，中国新能源产业呈现出快速发展的态势，推动了新能源产业规模化发展。新能源产业发展的速度和规模取决于新能源技术的发展，特别是核心技术的突破与进步，中国新能源增量在多个领域位居世界前列，部分新能源关键技术获得突破。中国风能与光伏产业具有较强的国际竞争力。目前中国风电产业链已逐步形成，并呈现出向产业链上游延伸、向垂直一体化发展的趋势。风电零部件制造业逐步成熟，已经有一套比较健全的风机制造供应链，市场整机设备的国产化率已经达到70%~80%的水平。光伏产业成熟度在不断提高，中国光伏产业目前已形成包括太阳能电池制造、光伏组件封装等在内的完备的产业链体系。光伏制造业规模较大，具有一定的技术和成本优势，国内光伏市场正在逐步启动，国外市场占有率稳居世界前列。新能源产业具有很大的发展前景和空间。

近年来国内20多家开设新能源应用技术专业的高职院校组成新能源专业建设协作组，与行业企业一起加强合作与交流，走访40多家光伏、风电企业，根据企业需求进行新能源专业设置和订单培养，与企业共同开发新能源应用技术人才培养方案、课程和实训基地建设方案，加快推进学校专业建设对接风电和光伏产业，人才培养目标对接企业岗位，实训设施对接企业生产实际，促进校企信息互通、人才融通，加强校企各项资源共享、交流与合作。在此基础上成立了新能源应用技术系列教材编委会。

新能源应用技术系列教材主要包括光伏和风电技术应用，涉及到光电子材料与器件、动力、机械、电气、电力电子、自动化等多个专业学科领域，具有技术性、工程性和实践性。为解决当前高职新能源应用技术专业教材匮乏，新能源专业建设协作委员会与化学工业出版社联合策划、组织编写了新能源应用技术系列教材。本系列教材从主编和主审的遴选到编写大纲，都是经教材编委会专家反复研讨确定的。在教材编写中，内容紧扣新能源行业和企业工程实际，以新能源技术人才培养为目标，重在提高专业工程实践能力，尽可能吸收企业新技术、新工艺和案例，并以教学项目、任务为载体，按照基础、应用到综合的思路进行编写，循序渐进，努力突出高职教材的特点。本系列教材取材新颖实用，层次清晰、结构合理；内容精练，具有易于学习、理解、教学、应用的特点。

本系列教材适合高等职业学校、高等专科学校和成人高校等新能源专业教育的需要，也可作为企业员工的培训教材。

教材编写过程中得到社会各界的关心和支持，在此一并表示感谢。

教材编审委员会

2013年5月

前 言

进入 21 世纪,人类面临实现经济和社会可持续发展的重大挑战,在有限资源和环保严格要求的双重制约下发展经济已成为全球性热点问题。而能源问题将更为突出,不仅表现在常规能源的匮乏,更重要的是化石能源的开发利用带来了一系列问题,如环境污染、温室效应都与化石燃料的燃烧有关。目前的环境问题,很大程度上是由于能源特别是化石能源的开发利用造成的。因此,人类要解决上述能源问题,实现可持续发展,只能依靠科技进步,大规模地开发利用可再生洁净能源。太阳能以其独具的优势,其开发利用必将在 21 世纪得到长足发展,并终将在世界能源结构转移中担纲重任,成为 21 世纪后期的主导能源。

中国太阳能光伏电池研究始于 20 世纪 60 年代末,1971 年首次成功应用于第二颗人造地球卫星。1973 年开始地面应用。1973~1987 年,先后从美国、加拿大等国引进了 7 条太阳能光伏电池生产线,促进了中国太阳能光伏电池相关技术水平及生产能力的逐步提高。但当时由于受电池成本及产量的制约,产业发展比较缓慢,主要用于卫星电源,以及航标灯、铁路信号系统、高山气象站的仪器用电、电围栏、黑光灯、直流日光灯等小功率地面电源系统。

伴随着中国光伏产业的发展,特别是太阳能光伏电池产业的发展,光伏技能型人才的培养迫切需求光伏电池方面的书籍。

本书将光伏电池制造分为基础篇和实践篇两个部分,共 6 章。本教材的参考学时为 60 课时。教学时,建议根据实际情况,对章节内容进行适当取舍或增补,适度掌握理论教学深度,注意配合和加强实践环节,以提高学生的专业素养和创新能力。

本书由张楼英、刘艳云主编,方智主审。参加本书编写的还有周蕾、左长城等。其中张楼英、周雷、左长城编写了第 1 章至第 4 章、第 6 章,刘艳云编写了第 5 章。在本书的编写过程中,主审方智工程师提出了许多积极的意见和建议,同时编委和业界许多专家也给予了很大帮助,在此表示衷心感谢。由于编者水平所限,书中难免有不足之处,敬请业界人士及广大读者不吝赐教。

编者

2013 年 5 月

目 录

第 1 部分 基础篇

第 1 章 绪论	2	3.2 多晶硅制备	21
1.1 能源资源的需求与预测	2	3.3 多晶硅铸锭	23
1.2 太阳能光伏发展现状及趋势	4	3.4 单晶硅制备	27
1.3 中国光伏产业现状及对策	6	3.5 硅片加工	36
第 2 章 太阳能电池的基本原理	9	3.6 晶体硅太阳能电池制造	42
2.1 半导体材料	9	第 4 章 薄膜太阳能电池	84
2.2 硅原子结构	9	4.1 硅基薄膜太阳能电池	84
2.3 能带结构和导电性	10	4.2 III-V 族化合物薄膜	89
2.4 P-N 结 (P-N Junction)	11	4.3 CIGS 系列太阳能电池	97
2.5 太阳能电池工作原理	12	4.4 CdTe 系列太阳能电池	107
2.6 太阳能电池的基本特性	14	4.5 染料敏化电池	114
2.7 影响太阳能电池转换效率的因素	17	第 5 章 光伏组件	127
2.8 提高太阳能电池效率的方法	18	5.1 光伏组件概述	127
第 3 章 晶体硅太阳能电池	20	5.2 光伏组件的生产工艺流程	132
3.1 硅材料制备	20	5.3 光伏组件的检验	141

第 2 部分 实践篇

第 6 章 单晶硅太阳能电池制备	148	6.5 PECVD 作业指导	168
6.1 硅片检验作业指导	148	6.6 丝网印刷作业指导	171
6.2 单晶硅制绒作业指导	150	6.7 烧结工艺作业指导	187
6.3 扩散工艺作业指导	156	6.8 电池片检测工艺操作规程	192
6.4 湿法刻蚀作业指导	166		

参考文献	195
------------	-----

第 1 部分 基础篇

- 第 1 章 绪论
- 第 2 章 太阳电池的基本原理
- 第 3 章 晶体硅太阳电池
- 第 4 章 薄膜太阳电池
- 第 5 章 光伏组件

第 1 章 绪 论

进入 21 世纪,人类面临实现经济和社会可持续发展的重大挑战,在有限资源和环保严格要求的双重制约下,发展经济已成为全球性热点问题。而能源问题将更为突出,不仅表现在常规能源的匮乏,更重要的是化石能源的开发利用带来了一系列问题,如环境污染、温室效应都与化石燃料的燃烧有关。目前的环境问题,很大程度上是由于能源特别是化石能源的开发利用造成的。因此,人类要解决上述能源问题,实现可持续发展,只能依靠科技进步,大规模地开发利用可再生洁净能源。太阳能以其独具的优势,其开发利用必将在 21 世纪得到长足的发展,并终将在世界能源结构转移中担纲重任,成为 21 世纪后期的主导能源。

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源,生物质能、风能、海洋能、水能等都来自太阳能,广义地说,太阳能包含以上各种可再生能源。太阳能作为可再生能源的一种,则是指太阳能的直接转化和利用。通过转换装置把太阳辐射能转换成热能利用的属于太阳能热利用技术,再利用热能进行发电的称为太阳能热发电。通过转换装置把太阳辐射能转换成电能利用的属于太阳能光发电技术,光电转换装置通常是利用半导体器件的光伏效应原理进行光电转换的,因此又称太阳能光伏技术。

20 世纪 50 年代,太阳能利用领域出现了两项重大技术突破:一是 1954 年美国贝尔实验室研制出光电转换效率为 6% 的实用型单晶硅电池,二是 1955 年以色列 Tabor 提出选择性吸收表面概念和理论并研制成功选择性太阳吸收涂层。这两项技术突破为太阳能利用进入现代发展时期奠定了技术基础。

20 世纪 70 年代以来,鉴于常规能源供给的有限性和环保压力的增大,世界许多国家掀起了开发利用太阳能和可再生能源的热潮。1973 年,美国制订了政府级的阳光发电计划,1980 年又正式将光伏发电列入公共电力规划,累计投入达 8 亿多美元。1992 年,美国政府颁布了新的光伏发电计划,制定了宏伟的发展目标。日本在 20 世纪 70 年代制订了“阳光计划”,1993 年将“月光计划”(节能计划)、“环境计划”、“阳光计划”合并成“新阳光计划”。德国等欧盟国家及一些发展中国家也纷纷制订了相应的发展计划。20 世纪 90 年代以来联合国召开了一系列有各国领导人参加的高峰会议,讨论和制定世界太阳能战略规划、国际太阳能公约,设立国际太阳能基金等,推动全球太阳能和可再生能源的开发利用。开发利用太阳能和可再生能源成为国际社会的一大主题和共同行动,成为各国制定可持续发展战略的重要内容。20 多年来,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。

1.1 能源资源的需求与预测

1.1.1 能源现状

(1) 能源短缺

从 2006~2030 年,全球能源消费将仍旧以石油、天然气和煤炭三种化石能源为主。美

国能源部能源信息管理综合分析及预测办公室（EIA）于2007年5月发表的“2007能源形势”（Energy Outlook 2007）[DOE/EIA—0484（2007）]估计，世界能源消费量从2004年到2030年预计将增加57%。在燃料中，石油一直占有最大份额，2004年占38%，到2030年将降低为34%。煤炭是消费量增长最快的燃料，在世界能源份额中从2003年的25%，只经过一年，2004年就提高到26%，预计2030年将增加到28%。在这期间，发电用煤将占世界煤耗量的2/3。世界工业用煤增长量中，中国将大约占78%。表1-1为1990~2030年世界各种燃料能源消费量的统计和预测。

表 1-1 1990~2030 年世界各种燃料能源消费量的统计和预测 单位：×10Btu

燃料种类	年度	历史数据		预测数据				2004~2030 年平均 增长率/%
		1990 年	2010 年	2015 年	2020 年	2025 年	2030 年	
石油		136.2	183.9	197.6	210.6	224.1	238.9	1.4
天然气		75.2	120.6	134.3	147.0	158.5	170.4	1.9
煤炭		89.4	136.4	151.6	167.2	182.9	199.1	2.2
核能		20.4	29.8	32.5	35.7	38.1	39.7	1.4
其他		26.2	40.4	43.4	46.5	50.1	53.5	1.9
总计		347.4	511.1	559.4	607.0	653.7	701.6	1.8

注：Btu 为英热单位符号，1Btu=2.93071×10kW·h。

不难看出，到2030年，全世界消耗的一次能源比1990年增加1倍多。但是地球上的化石燃料的储量是有限的。根据已探明的储量，全球石油可开采约45年，天然气约61年，煤炭约230年，铀约71年（图1-1）。预计2060年全球人口总量将增加到100亿，增幅达26%。如果所有人的能源需求都达到发达国家的水平，到2060年则地球上主要的25中矿物有1/3将消耗殆尽，所以世界化石燃料的供应面临严重短缺的局面。

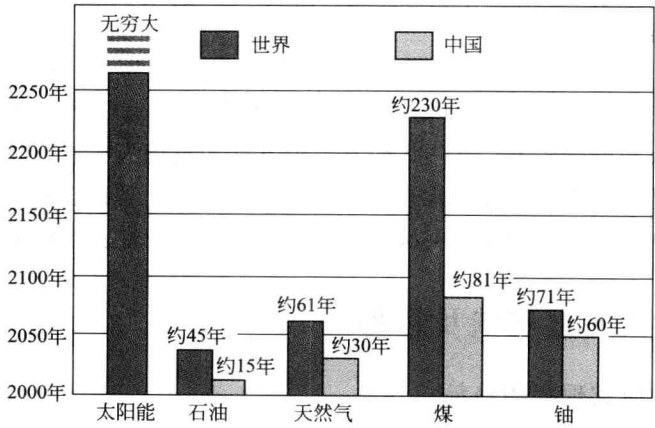


图 1-1 世界和中国主要常规能源储量预测

为了应对化石燃料逐渐短缺的严重局面，必须逐步改变能源消费结构，大力开发可再生能源，在能源供应领域走可持续发展的道路，只有这样才能保证人类社会的不断进步。

(2) 环境污染

当前，由于燃烧煤、石油等化石燃料，每年有数十万吨硫等有害物质排向天空，使大气

环境遭到严重污染,直接影响居民的身体健康和生活质量;局部地区形成酸雨,严重污染水土。这些问题最终将迫使人们改变能源结构,依靠利用太阳能等可再生洁净能源来解决。

(3) 温室效应

化石能源的利用不仅造成环境污染,同时由于排放大量的温室气体而产生温室效应,引起全球气候变化。这一问题已提到全球的议事日程,有关国际组织已召开多次会议,限制各国 CO₂ 等温室气体的排放量。

1.1.2 太阳能资源

(1) 储量的“无限性”

太阳能是取之不尽的可再生能源,可利用量巨大。太阳每秒钟放射的能量大约是 $1.6 \times 10^{23} \text{ kW}$, 其中到达地球的能量高达 $8 \times 10^{13} \text{ kW}$, 相当于 $6 \times 10^9 \text{ t}$ 标准煤。按此计算,一年内到达地球表面的太阳能总量折合标准煤共约 1.892×10^{16} 亿吨,是目前世界主要能源探明储量的 1 万倍。太阳的寿命至少有 40 亿年,相对于人类历史来说,太阳可源源不断供给地球的时间可以说是无限的。相对于常规能源的有限性,太阳能具有储量的“无限性”,取之不尽,用之不竭。这就决定了开发利用太阳能将是人类解决常规能源匮乏枯竭的最有效途径。

(2) 存在的普遍性

虽然由于纬度的不同、气候条件的差异造成了太阳能辐射的不均匀,但相对于其他能源来说,太阳能对于地球上绝大多数地区具有存在的普遍性,可就地取用。这就为常规能源缺乏的国家和地区解决能源问题提供了美好前景。

(3) 利用的清洁性

太阳能像风能、潮汐能等洁净能源一样,其开发利用时几乎不产生任何污染,加之其储量的无限性,是人类理想的替代能源。

(4) 利用的经济性

可以从两个方面看太阳能利用的经济性。一是太阳能取之不尽,用之不竭,而且在接收太阳能时不征收任何“税”,可以随地取用;二是在目前的技术发展水平下,有些太阳能利用已具经济性,如太阳能热水器一次投入较高,但其使用过程不耗能,而电热水器和燃气热水器在使用时仍需耗能。有关研究结果表明,太阳能热水器已具很强的竞争力。随着科技的发展以及人类开发利用太阳能的技术突破,太阳能利用的经济性将会更明显。

1.2 太阳能光伏发展现状及趋势

1.2.1 太阳电池的研究现状和趋势

1839 年法国科学家贝克雷尔发现了光生伏特效应,1954 年美国科学家制成实用的单晶硅太阳电池,诞生了将太阳光能转换为电能的实用光伏发电技术。最初,硅太阳电池的成本很高,是常规电力能源的 1000 倍以上,仅仅能用于太空卫星和航天器上。20 世纪 70 年代起,全球许多国家掀起了开发太阳能、利用太阳能光伏发电热潮。进入 20 世纪末期,欧盟、美国、日本、印度等国家率先制订雄心勃勃的太阳能光伏发电中长期发展规划。截至 2008 年年底,全球至少有 73 个国家制定的可再生能源发展目标,以及至少 64 个国家出台的鼓励

发展可再生能源政策中,涉及发展太阳能光伏的相关计划。这些政策和措施为太阳能光伏产业提供了巨大的推动力,创造了巨大的市场空间。采取这些措施,使太阳能电池成本降低、太阳能电池实行并网发电、建立大型太阳能发电站成为可能。

目前,太阳能电池技术研发的热点是以晶体硅材料为基础的太阳电池,提高效率和降低成本是研究太阳电池的目的,澳大利亚新南威尔士大学研发的高效单晶硅太阳电池转换效率已达 24.7%。美、日、德已达到 20% 以上;澳大利亚新南威尔士大学研发的多晶硅太阳电池转换效率已突破 19.8%,美、德等达到 18% 以上,薄膜太阳能电池的研究主要集中在非晶硅薄膜太阳电池、多晶硅薄膜太阳电池、CdTe 薄膜太阳电池、CIS 薄膜太阳电池上,非晶硅薄膜太阳电池实验室稳定转换效率已突破 13.2%,CdTe 太阳电池转换效率达到 15.8%,CIS 系太阳电池转换效率达到 18.8%,其中纳米多晶硅薄膜太阳电池的研究进展迅速,成为了该领域新的研究热点。

1.2.2 太阳能光伏产业发展动态

全球各国“太阳能光伏计划”的实施、投资额度的不断增长及其相关促进政策的相继出台,极大地推动了全球太阳能光伏产业的蓬勃发展。特别是进入 21 世纪,随着太阳能光伏产业高纯度硅(Si)料开采、提炼、生产技术与工艺的不断完善,太阳电池组件生产技术与设备日益成熟,太阳电池并网发电逐步具体应用,以及太阳电池在与机电产业、建筑材料相结合(光伏集成建筑)等取得的重大进展,使得全球太阳电池产量逐年获得突破。

进入 21 世纪以来,全球太阳电池产业平均年增长率达 30% 以上,其中 2001 年电池组件全球销售接近 400MW,年增长超过 40%。最近几年更是迅猛发展,2004 年为 1200MW,2005 年总产量接近 1800MW,同比增长 38.7%。而太阳电池的成本则以每年 7.5% 的平均速度下降,据欧洲光伏工业协会(EPIA)统计数据显示,全球光伏产业在过去 20 年平均复合增长率达 30.48%。尤其是 20 世纪 90 年代后期,全球光伏组件市场供不应求局面的出现,更加显著地加速了光伏电池产量的迅猛发展。1990~2008 年,全球太阳能光伏电池产量增长近 150 倍。2003~2008 年,全球太阳电池产量增长尤为明显,从 2003 年的 7443MW,跃升到 2008 年的 6.85GW,平均增长率达 55.88%,同比 2007 年产量增长达 71.25%,其发展速度超过了集成电路。预计今后 10 年,太阳能光伏产业还将以 20%~30% 的速度增长。

1.2.3 世界各国光伏计划

① 德国政府率先于 1990 年推出的“屋顶计划”,至 1997 年已完成近万套屋顶光伏系统,每套容量 1~5kW_p,累计安装量已达 33MW_p,远远超出当初制订的计划规模。2000 年 4 月 1 日出台了《可再生能源法》,政府引入“税收返还”政策,太阳能产品提供商承诺价格执行 20 年,并规定光伏发电并网后上网电价为 €0.5~€0.6/(kW·h)。在此政策的鼓励下,仅仅 4 年(1999-2003)的发展时间,德国光伏市场就增加了 10 倍,成本下降 20%,可再生能源满足了 50% 以上总能耗的需求。2004 年 7 月 31 日,公布了《可再生能源法》修订版,通过对其进行的修改与完善,保证了对光伏应用的新一轮补贴,使光伏市场呈现出井喷式的增长,并一跃成为超过日本的全球最大光伏市场。据 Solarbuzz 咨询公司统计数据:截至 2008 年年底,德国可再生能源占总能源供应比例已由 2007 年的 14.1% 提升至 15%。其中太阳能光伏市场已达 1500MW,占全球市场的 26.98%。2009 年 3 月 1 日,新出台的《关于可再生能源用于取暖市场的措施的促进方针》正式生效,将

通过促进投资扩大可再生能源技术在取暖市场中的份额,并由此降低费用及加强可再生能源的经济应用性。

② 1974年,日本政府实施“阳光计划”,规定以居民屋顶并网发电为主要目标,对光伏系统初始的政府补贴达到了光伏系统造价的70%,从1994年开始实施“朝日七年计划”,计划到2000年安装16.2万套屋顶系统,总容量达185MW_p,1997年又再次宣布实施“七万屋顶计划”,每套容量扩大到4kW_p,总容量为280MW_p。2006年,政府取消了政府补贴政策,致使2007年的光伏装机容量负增长,但2009年,政府又重启太阳能鼓励政策,出资2.16亿美元用于光伏系统补贴。目前,日本光伏电力已经逐渐具备了不需要依靠补贴的市场竞争力。2010年太阳能光伏电力的家庭电价由现在的47日元/(kW·h)减至23日元/(kW·h),基本达到了日本现有电价水平。日本政府接下来的投入主要用于研发和一些示范项目。

③ 1997年6月,美国总统克林顿宣布实施的美国“百万屋顶计划”,计划从1997年开始至2010年,将在百万个屋顶上,安装总容量达到3025MW_p的光伏系统,并使发电成本降到6美分/(kW·h)。2000年1月1日,实施新的5年“国家光伏计划”和“保持光伏产业全球领导地位”的战略目标。2007年3月,作为“先进能源计划(AWI)”的一部分,能源部将拨款1.68亿美元用于“13个太阳能计划”。2009年国会又延长了可再生能源发电补贴政策,使其发电上网退税政策得以延续,发电市场得到了法律的保障,预计将使美国年度光伏系统产量从2005年的240MW增加到2010年的2850MW,并使光伏成本从目前的\$0.18~\$0.23/(kW·h)降低到2015年的\$0.05~\$0.10/(kW·h)。

④ 欧盟颁布《可再生能源发展白皮书》,确立了欧盟可再生能源发展目标。提出到2010年,可再生能源占欧盟一次能源消耗总量的比例达12%(1997年为6%),其中太阳能光伏发电总装机容量计划达到3GW,其发电份额占总发电量的21%(1997年为14%)。到2050年,可再生能源在整个欧盟国家的能源构成中达50%。2007年年初,欧盟又提出了新的发展目标,要求到2020年,可再生能源消费占到全部能源消费的20%,可再生能源发电量占到全部发电量的30%,而太阳能光伏发电总装机容量计划达到15.5GW。目前提出的2030目标则是在2020目标的基础上,把可再生能源的份额提升至45%,并希望欧洲各国将2020年减排目标从20%提升至30%。

1.3 中国光伏产业现状及对策

中国太阳能光伏电池研究始于20世纪60年代末,1971年首次成功应用于第二颗人造地球卫星。1973年开始地面应用。1973~1987年,先后从美国、加拿大等国引进了7条太阳电池生产线,促进了中国太阳电池相关技术水平及生产能力的逐步提高。但当时由于受电池成本及产量的制约,产业发展比较缓慢,主要用于卫星电源,以及航标灯、铁路信号系统、高山气象站的仪器用电、电围栏、黑光灯、直流日光灯等小功率地面电源系统。

随着对太阳电池技术研发重视程度的日益加深,“七五”期间,将非晶硅半导体研究列入国家重大课题;“八五”、“九五”期间,重点研发大面积太阳电池等相关技术,“九五”期间,“科技攻关计划”部署了晶体硅太阳电池的规模生产制造技术研发。“973计划”设立了低成本长寿命的太阳电池研发等的系列项目,加速了中国在晶体硅高效电池、非晶硅薄膜电池、多晶硅薄膜电池以及应用系统等相关关键技术的研发。“十五”期间,国家在“863计

划”、“科技攻关计划”、“973 计划”中,部署了一批提升太阳电池技术及装备生产能力的重大技术项目。太阳能光伏电池技术水平进入逐步上升的发展时期,大幅度提高了光伏发电技术和产业的水平。通过能源研究开发与示范等工程,加速了太阳能技术和产品的集成开发及太阳能发电产业化,使商业化的光伏电池封装技术及其配套装备规模达到数十兆瓦级。晶硅电池及非晶硅电池的商业化光伏组件效率达 14%~15%,一般商业化电池效率达 10%~13%,其中非晶硅薄膜电池的规模化生产能力达 10MW,使中国成为世界非晶硅薄膜电池主要供应商之一:碲化镉(CdTe)和铜铟硒薄膜电池[CI(G)S]、敏化太阳薄膜电池、多晶硅薄膜电池以及应用系统关键技术已实现重大技术突破,CdTe、CI(G)S 薄膜电池小型电池组件的转换效率达 7%以上,接近国际技术水平,并有望形成小批量的生产能力。

20 世纪 90 年代以后,中国光伏产业进入稳步发展期。太阳电池成本的降低,推动了太阳电池向工业和农村电气化应用领域拓展。随着西藏的“阳光计划”、“光明工程”、“阿里光伏工程”,以及光纤通信电源、石油管道阴极保护、村村通广播电视、大规模推广农村户用光伏电源系统等国家与地方政府光伏发展计划的实施,使中国光伏市场规模进一步扩大。其中,1995 年太阳电池的产量达 1.55MW,年装机 3.3MW,累积装机 19MW。另外,通过屋顶并网发电技术、高压并网发电技术的科技攻关。一批 10~50kWp 的屋顶系统相继建成,其中深圳建成兆瓦级低压并网光伏电站,拉萨建成 100kWp 高压并网发电站,为中国光伏发电并网技术提供了坚实的技术积累,为 2020 年屋顶光伏并网发电技术和沙漠电站技术规模化积累了经验。“十一五”期间,太阳电池技术水平将进入稳步跃升的发展时期。为突破能源高效开发利用的技术瓶颈,明显提高资源和能源的综合利用效率,初步缓解制约经济社会发展的能源需求及资源环境问题,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》能源领域的优先主题有“可再生能源低成本规模化开发利用”,重点包含了“高性价比太阳光伏电池及利用技术、太阳能建筑一体化技术”等制约可再生能源高效利用的关键技术。《国家“十一五”科学技术发展规划》能源领域关于“建筑节能关键技术研究及示范”重大项目中,为重点突破太阳能光伏发电关键技术,实现太阳能光伏发电的低成本、规模化及产业化利用,已相继部署实施了“聚光太阳能电池及系统集成技术”、“太阳能光伏发电技术”、“太阳能光电-光热综合利用技术”、“兆瓦级光伏发电”等科技攻关项目。

但是,目前中国的光伏产业还存在以下问题。

① 产业链发展畸形,作为提炼太阳能级硅、制造硅棒和硅锭及切割硅片的产业上游的企业数量相对较少(7 大厂商控制多晶硅的生产),产业中游企业数量比上游多,产业下游企业的数目最多。

② 自主知识产权和高层次人才缺乏,核心技术和设备有待突破,太阳电池的制造涉及化工、电子、电气、机械、环保等相对复杂的高技术。与发达国家相比,中国在这些领域的自主知识产权相对落后,自主创新能力薄弱。太阳能光伏产业属于高新技术产业范畴,这方面的高技术人才相对缺乏。

③ 相对完善的行业标准体系尚未建立,缺少应对竞争的手段。在一定意义上讲,行业标准可以认为是对行业内的产品进行技术立法,并使之成为产品满足消费者适用功效、安全需求等的基本依据。

④ 产业发展政策滞后。美国、德国、日本等发达国家光伏产业的发展实践表明:除国

家层面制订鼓励计划、法律法规之外。出台鼓励和扶持政策成为推进、加速光伏产业发展的强大动力。

因此，中国应积极参与国际可再生能源发展计划，联合建立一批中国光伏技术应用示范项目和合作基地，通过引进并逐步培养光伏产业研发、产业化的高层次人才，进而不断汲取国际的先进成果，鼓励并推动国内企业“走出国门”。逐步扩大并开拓国际市场，积极参与国际光伏产业技术标准的制定，进而增强中国光伏产业的国际话语权。促进中国光伏产业又好又快发展。

第 2 章 太阳电池的基本原理

2.1 半导体材料

世界上的物体如果以导电的性能来区分，有的导电，有的不导电。导电的称为导体，如金、银、铜、铝、铅、锡等各种金属；不导电的物体称为绝缘体，常见的有玻璃、橡胶、塑料、石英等；导电性能介于这两者之间的物体称为半导体，主要有锗、硅、砷化镓、硫化镉等。众所周知，原子是由原子核及其周围的电子构成的，一些电子脱离原子核的束缚，能够自由运动时，称为自由电子。金属之所以导电，是因为在金属体内有大量能够自由运动的电子，在电场的作用下，这些电子有规则地沿着电场的相反方向流动，形成了电流。自由电子的数量越多，或者它们在电场的作用下规则流动的平均速度越高，电流就越大。电子流动运载的是电量，我们把这种运载电量的粒子，称为载流子。在常温下，绝缘体内仅有极少量的自由电子，因此对外不呈现导电性。半导体内有少量的自由电子，在特定条件下才能导电。

半导体可以是元素，如硅（Si）和锗（Ge），也可以是化合物，如硫化镉（CdS）和砷化镓（GaAs），还可以是合金，如 $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ，其中 x 为 0~1 之间的任意数。许多有机化合物，如蒽也是半导体。

半导体的电阻率较大（约 $10^{-5} \leq \rho \leq 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ），而金属的电阻率则很小（约 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ ），绝缘体的电阻率则很大（约 $\rho \geq 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ ）。半导体的电阻率对温度的反应灵敏，例如锗的温度从 20℃ 升高到 30℃，电阻率就要减小约 50%。金属的电阻率随温度的变化则较小，例如铜的温度每升高 100℃，电阻率增大约 40%。电阻率受杂质的影响显著。金属中含有少量杂质时，看不出电阻率有多大的变化，但在半导体里掺入微量的杂质时，却可以引起电阻率很大的变化，例如在纯硅中掺入百万分之一的硼，硅的电阻率就从 $2.14 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $0.004 \Omega \cdot \text{m}$ 左右。金属的电阻率不受光照影响，但是半导体的电阻率在适当的光线照射下可以发生显著的变化。

2.2 硅原子结构

硅是目前最主要的半导体材料，它不但广泛用在太阳能光伏产业上，也大量用在集成电路等半导体应用上。了解硅原子的原子结构，将有助于了解太阳电池的发电原理。

硅的原子序数为 14，其晶体具有类似于金刚石的结构。在这种金刚石结构中，它的最外层电子轨道上有 4 个电子环绕原子核运行，而这 4 个电子又称为价电子。每个硅的 4 个最外层电子，分别和 4 个邻近硅原子中的一个外层电子两两成对，形成共价键，如图 2-1 所示。在室温时，这些共价电子被局限在共价键上，所以不像金属一样具有可以导电的自由电子，如图 2-2 所示。但是在较高的温度，热振动可能足以打断共价键，并释放一个自由电子来参与导电。因此半导体在室温时的导电性如同绝缘体，但在高温就和导体一样具有高导电性。

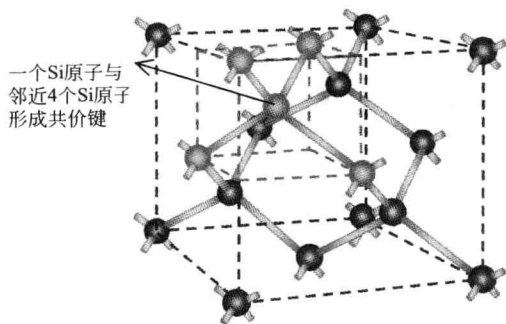


图 2-1 硅的原子结构图

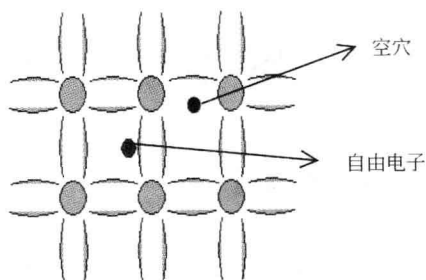


图 2-2 高温下硅释放自由电子

2.3 能带结构和导电性

在固体物理学上，根据一个物体的电子所占据的能阶大小，可以画出所谓的能带图。在稳定状态下，电子占据在所谓的价带里的不同能阶上，而价带与导带之间存在一个能量屏障，称为禁带宽度。以绝缘体为例，这个禁带宽度高达 8eV 以上，所以价带的电子无法被激发到导带来进行导电。而半导体的禁带较小，如硅的禁带是 1.12eV（如图 2-3 所示）。因此，位于价带的电子可以在吸收高于禁带的能量之后，被激发到导带来进行导电行为。至于导体，其价带和导带互相重叠，没有所谓的禁带宽度，所以不需要能量就可使电子自由在导带中进行导带行为。

半导体材料的导电能力与禁带宽度有关。在室温时像纯硅这样的本征半导体——化学成分纯净的半导体，它在物理结构上呈单晶体形态。其自由电子密度较低，导电能力弱，所以在实际应用上，必须在半导体材料中添加一些固定形态的杂质来改变半导体的导电性。

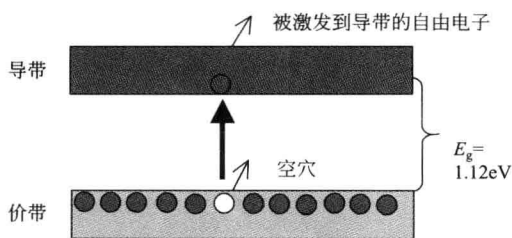


图 2-3 硅的热激发示意图

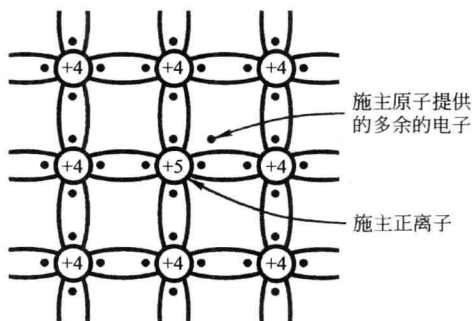


图 2-4 N 型半导体示意图

如图 2-4 所示，在纯硅中掺入少量的五价杂质原子如磷原子，由于磷的原子数目比硅原子少得多，因此整个结构基本不变，只是某些位置上的硅原子被磷原子所取代。但是，由于磷原子具有 5 个价电子，在和邻近的硅原子形成共价键的时候，会多出 1 个电子，而多余的 1 个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子。从而使硅晶体中的电子载流子数目大增。把提供自由电子的杂质原子称为施主，而掺杂施主的半导体称为 N 型半导体。在 N 型半导体中除了由于掺杂而产生的大量自由电子外，还有由于热激发而产生少量的电子-空穴