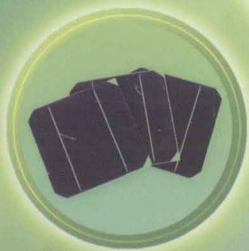
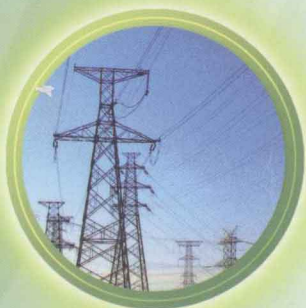




电力科技专著出版资金资助项目

光伏发电与并网技术

汪光裕 / 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



电力科技专著出版资金资助项目

光伏发电与并网技术

汪光裕 / 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书从半导体光伏发电原理出发,较系统地描述了太阳能电池材料、电池制作、组件装配、发电系统和并网的完整产业链。特别探讨了用四氯化硅氢化和冶金等方法制作低成本多晶硅的技术;比较了不同制绒、刻边、抗反射膜、生产设备和布局等对于提高晶体硅太阳能电池生产效率和质量的影响;较详细地描述了薄膜太阳能电池的生产流程和设备,特别关注了新型BIPV组件的应用,阐述了并网系统中逆变器核心器件和储能电池的制作原理等。此外,还介绍了下一代高效太阳能电池的发展前景。

本书既包括光伏发电基础知识、电池制作技术现状和国际上最新技术发展趋势,又比较贴近生产实际,反映了光伏产业链中一些有待解决的问题。

本书为电力科技专著出版资金资助项目,反映了光伏发电领域的最新进展。本书适合光伏产业的科研工作者、工程技术人员和管理人员阅读及参考,也可作为光伏企业职工培训和技术提高的教材。

图书在版编目(CIP)数据

光伏发电与并网技术/汪光裕编著. —北京:中国电力出版社,2010

ISBN 978-7-5123-0761-2

I. ①光… II. ①汪… III. ①太阳能发电 IV. ①TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第159168号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2010年9月第一版 2010年9月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 12.125印张 297千字 1彩页

印数 0001—3000册 定价 42.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

在化石能源日益枯竭的 21 世纪，光伏发电必将从太空能源、应急能源、军用能源、便携式能源、扶贫能源，最终发展成为最重要的、可再生的替代能源之一。目前，许多国家开始把发展可再生的清洁能源上升为国民经济的战略高度。在我国政府的鼓励下，科技界、企业界和金融界纷纷积极投入光伏发电事业，依靠技术进步迅速使我国太阳能电池和组件的产量高居世界首位。同时，并网技术也在发展之中。

中国科学院有许多科技人员都以满腔热情积极参与国家新能源的建设，本书作者汪光裕就是其中的一位。他系中国科学院微系统与信息技术研究所研究员，是我国自己培养的第一批博士之一，现任上海市光电子行业协会副理事长，兼任宜兴经济开发区和多家光电子企业技术顾问。汪光裕自 1965 年北京钢铁学院（现北京科技大学）毕业至今，一直在半导体和光电子企业及研究所工作，具有较深厚的半导体材料、器件等科学理论知识和实际产业经验。他退休后，利用行业协会平台和担任光电企业顾问的机会，顺应科技发展潮流，发挥余热，与著名国际高科技公司深层次接触，尽量将国外先进技术介绍给国内相关企业。此外，还为光伏企业编写太阳能电池方面的教材，希望将自己积累的知识和工作经验回报社会。

本书从半导体光伏发电基本原理出发，比较系统地描述了太阳能电池材料、电池制作、组件装配和发电系统的完整产业链，特别探讨了降低光伏发电成本和提高电池质量等重大课题，介绍了并网逆变器中核心器件（IGBT）和储能电池等的应用原理。内容有一定的深度和广度，接近产业化，贴近最新

技术发展，可使读者比较清晰地了解光伏发电原理和并网技术，对于当前正在蓬勃发展的光伏产业有促进意义，适合光伏产业的科研工作者、工程技术人员和高级管理人员阅读及参考。

汪光裕所在的宜兴经济开发区已经设立了“华东光电子创新基地”、“江苏新能源产业园”、“江苏光电子产业园”等科技园区，进驻了“国电晶德太阳能”、“东方迈吉太阳能”、“佳成太阳能”、“迅天宇硅品”和“昊阳新能源”等一批光伏材料、太阳电池及其组件的生产企业，形成了以一代晶硅、二代薄膜和三代聚光太阳电池为核心的光伏产业链体系。我相信本书的出版，将有利于宜兴地区，乃至江苏省和国内其他地区光伏产业的发展。

中国科学院院士
中国科学院上海技术物理研究所研究员
上海太阳能电池研究与发展中心主任



2010年8月

世界化石能源逐渐枯竭及其带来的环境污染和气候变暖等问题引起了人们的高度重视。1997年京都协议的签订和2009年哥本哈根全球气候变化大会的召开，各国政府都已将可再生能源的利用提高到国家能源战略的高度，充分认识到大力发展太阳能等可再生能源的必要性和迫切性，因为太阳能是最具战略意义的、可长期持续利用的理想清洁可再生能源。可以预计，未来1~2个世纪内，太阳能和风能等可再生能源必然会从补充能源逐渐发展成为替代能源。

光伏发电产业的发展速度之快，是现代工业中罕见的。然而，目前光伏发电占全球能源消耗总量之比仍是微不足道的。其主要原因是，一方面光伏发电的成本仍比较高，需要采用更廉价的材料和更先进的工艺来制造低成本和高效率的太阳电池；另一方面光伏发电等可再生能源随地点和气候变化所出现的分散性和不稳定性会给电网造成波动等不利影响。因此，要实现光伏发电的广泛应用，除了宣传世界能源危机、光伏发电的绿色环保优势来争取政府政策支持外，更应该在发电成本和安全并网等方面开发新的技术，使之能与化石能源相竞争。

本书作者汪光裕是我国改革开放后中国科学院上海微系统与信息研究所（前上海冶金研究所）培养的第一位博士。他自1965年大学毕业后就从事硅材料和光电子器件方面的科研和产业化工作。1978年攻读研究生学位期间以及参加工作后，汪博士一直从事半导体材料和光电子器件的理论研究和产品开发工作，在本领域具有很高的学术造诣和实践经验。2003年汪博士退休后，担任上海市光电子行业协会领导和多家光电子企

业顾问，有机会接触国内外先进的科技前沿和产业发展动态。为了帮助光伏企业，他不顾年事已高，仍然坚持学习、不断更新知识，一直活跃在光电子产业第一线。我曾经阅读过他为电力企业编写的一些教材，这些教材不仅在学术上有一定深度，反映光伏产业链中一些有待解决的技术问题，而且能贴近当前这个领域产业的最新进展。这些教材受到了很好的评价。

本书与通常大学教科书相比，主要特点是接近实际生产和大规模产业化，同时也力求反映光伏发电技术的世界发展潮流。作者结合自己从事过的一些工作，比较全面地介绍了太阳能电池材料、电池制作、组件装配、发电系统和并网技术及其相关设备，并着重描述降低光伏发电成本的途径和介绍光伏并网中储能电池和 IGBT 等核心器件。

我国自 2007 年起，太阳能电池产量已经连续 3 年高居世界首位。当前我国政府连续出台扶持新能源的政策，我相信本书的出版能够成为众花絮中的一朵。

中国科学院院士
上海微系统与信息技术研究所所长

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of the characters '王' and '康' written in a cursive, expressive style.

2010 年 9 月

当前,世界面临常规化石能源即将枯竭、环境污染和气候变化问题日益突出的严峻形势,各国政府相继出台支持新能源的政策,学术界、企业界和金融界不少有识之士纷纷致力于新能源事业。在政府支持和技术进步的推动下,21世纪太阳能和风能等新能源开发和应用进入了快速发展时期。光伏发电自20世纪50年代第一块太阳电池问世以来,从太空应用到地面独立电源,从屋顶发电到并网电站,经历半个多世纪后,该产业出现了“井喷式”发展。太阳电池产量年平均增长率超过了40%,这样的发展速度在人类文明发展史上是前所未有的。可以预计,未来1~2个世纪内,太阳能和风能等可再生能源必然会从补充能源逐渐发展成为替代能源。然而,光伏发电与传统化石能源发电相比,对于电力系统来说,从发电原理到输电、供电、用电以及电网调度等都将发生较大的变化,需有一个重新认识和学习的过程。此外,目前光伏发电成本远高于传统化石能源的发电成本,光伏产业的整体提升需要全社会的关注和政府的支持,同时更应该通过自身技术进步和规模利用才能实现。

本书初稿是在我担任东方电气集团峨嵋半导体材料厂顾问和参加境外两家太阳电池设备公司国内业务期间编写的。一年前我到宜兴经济开发区华东光电子创新基地工作,该开发区已经进驻国电晶德、东方迈吉、佳成、昊阳等诸多太阳电池制作公司。这些企业生产的产品从太阳能材料、电池、组件、系统到光伏电站,构成了一条相对完整的产业链。在宜兴经济开发区领导和中电联同仁的鼓励下,我在原来教材和文章的基础

上，编写了这本既能阐明光伏发电原理，又能尽可能贴近规模生产和市场的书籍。

光伏发电产业链涉及半导体材料、器件、光学、化学、物理、机械和电学等多学科领域的知识。虽然我自1965年大学毕业后至今一直从事半导体、光电子的科研和产业化工作，直接参加过太阳电池产业化的一些项目，对于其中一些领域比较熟悉，但对不少领域仍深感力不从心，特别是近年来光伏产业迅猛发展，技术进步很快，工艺流程和设备不断更新，因此迟迟不敢完稿。幸好近年来我经常参加太阳能材料和光伏发电的学术研讨会，因此有机会不断补充新的内容。为了反映光伏产业界最新发展动态，书中不少素材引自近两年的学术会议论文，在此向这些作者表示感谢。

本书为电力科技专著出版资金资助项目，在编著过程中，得到了褚君浩院士、王曦院士、胡蕴成高级工程师、魏光普教授等人的指导和帮助，以及宜兴经济开发区朱旭峰书记、中电联张静怡女士等人和江苏华创光电科技公司同仁们的许多帮助。初稿完成后，又得到冯勇博士、张文总经理、姚华文博士、张复才博士、王睿博士、黄仑博士、纪黎萍工程师、李玉龙工程师等国电晶德太阳能科技公司和东气迈吉太阳能科技公司等企业技术专家的审校，他们对本书提出了许多宝贵意见，在此一并表示衷心感谢。

虽然我长期在中国科学院和光电企业中从事光电子产业工作，但在编著本书过程中仍深感知识不足，衷心希望广大读者和同行批评指正。

汪光裕

2010年7月

序言 1

序言 2

前 言

第一章 太阳电池的物理基础知识 1

第一节 太阳电池发展历程 1

第二节 太阳光辐照与大气质量 5

第三节 半导体基础知识 10

第四节 半导体材料的光吸收 16

第五节 P-N 结和太阳电池光伏效应原理 21

第六节 异质结太阳电池 37

第二章 太阳电池材料 41

第一节 低成本太阳电池级多晶硅 41

第二节 铸造多晶硅 60

第三节 直拉单晶硅 73

第四节 带硅材料 79

第五节 硅薄膜 84

第六节 非晶硅和微晶硅薄膜的制备方法 92

第七节 化合物半导体材料 101

第八节 半导体材料中的杂质分析 104

第三章 晶体硅太阳电池的制备方法 109

第一节 晶体硅太阳电池的制造工艺流程 109

第二节	硅片原材料性能检测和分选	112
第三节	硅片表面清洗和制绒	117
第四节	扩散制结	125
第五节	等离子腐蚀刻边和激光刻边	134
第六节	去除磷硅玻璃 (PSG)	139
第七节	PECVD 和 PVD 方法制备减反射膜	142
第八节	制作上下电极 (表面金属化)	157
第九节	电池检测分选	165
第十节	晶体硅太阳电池生产工艺的自动化	168
第十一节	晶体硅太阳电池生产流程中 的有关参数测量	171
第十二节	太阳电池生产线产品质量 控制和成本分析	175

第四章 薄膜硅太阳电池制备方法 181

第一节	薄膜硅太阳电池的优势和发展前景	181
第二节	薄膜硅太阳电池结构及发电原理	186
第三节	薄膜硅太阳电池制作工艺	192
第四节	制作薄膜硅太阳电池的主要生产设备	199
第五节	薄膜硅太阳电池制作的几个问题的讨论	209
第六节	薄膜硅太阳电池能带结构的调整	216
第七节	PECVD 物理原理和硅薄膜的沉积	221
第八节	物理溅射原理与制作 TCO 和背金属的系统	227

第五章 高效晶体硅太阳电池及非硅基太阳电池 234

第一节	高效晶体硅太阳电池	234
-----	-----------------	-----

第二节	HIT 高效太阳电池	239
第三节	化合物半导体太阳电池	241
第四节	下一代太阳电池	252
第六章	太阳电池组件和方阵	260
第一节	概述	260
第二节	组件封装材料	268
第三节	组件封装工艺	276
第四节	组件封装设备	280
第五节	太阳电池组件的可靠性和封装后的检测 ..	284
第六节	太阳电池和组件参数实例和成本	293
第七节	太阳电池方阵	295
第七章	光伏发电系统	299
第一节	光伏系统概述	299
第二节	储能电池	306
第三节	逆变器中的核心——功率开关器件	319
第四节	逆变器	327
第五节	控制器	335
第六节	光伏发电的应用	340
第七节	光伏建筑一体化	347
第八节	并网光伏发电系统和智能电网	351
第九节	光伏发电系统相关标准及测试认证	356
参考文献	368

太阳电池的物理基础知识

第一节 太阳电池发展历程

一、太阳电池是最有前途的可再生能源

太阳每秒钟辐射到地球上的能量相当于 500 万 t 标准煤燃烧所放出的能量。太阳内部的热核反应足以维持 6×10^{10} 年，可以说是“取之不尽、用之不竭”的能源。地球上的风能、水能、海洋温差能、汛潮能和生物质能都来源于“今天”的太阳。目前人类应用最为广泛的石油、天然气、煤等化石燃料也是“昨天”太阳储存下来的能量。进入 21 世纪后，按目前常规化石能源探明储量和消耗速度，世界上常规化石一次能源即将枯竭，我国的化石能源更为短缺，见图 1-1。随着能源危机爆发和地球上化石能源逐渐枯竭，再加上化石能源带来的环境污染和气候变化问题，人们更加认识到大力发展太阳能等可再生能源的必要性和迫切性。1997 年京都协议的签订和 2009 年哥本哈根全球气候变化大会的召开，已经将可再生能源的利用提高到国家能源战略的高度。其中，太阳能是最具战略意义的、可长期持续利用的理想可再生能源。

据统计，2006 年全球人口已经突破 65 亿，若能源需求折合成发电装机容量为 14.5TW；2050 年全世界人口将达到 90 亿~100 亿，可折合发电装机容量将接近 60TW。那时由于一次能源消耗接近枯竭，只能主要依靠可再生能源来解决。据报

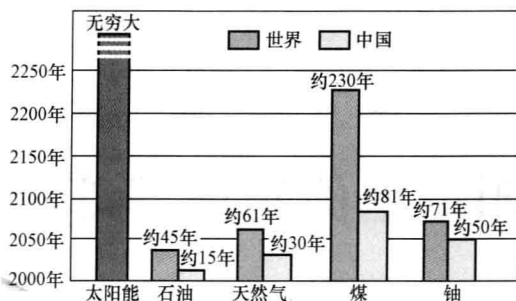


图 1-1 世界和中国常规能源耗尽年份
(按探明储量和目前消耗速度估算)

导，全球潜在水能资源 4.6TW，经济开发量只有 0.9TW；风能实际可开发资源 2TW；生物质能 3TW。可见，只有太阳能唯一能够保证人类能源的需求，其潜在资源为 120 000TW，实际可利用资源高达 600TW。未来能源结构中光伏发电必然占据极其重要的地位。

2005 年，美国能源部也发表了类似的报告，虽然世界各国对远期的世界预测能耗有些偏差，但能耗趋势是一致的，见表 1-1。

表 1-1 未来世界能源需求与再生资源可开发量

种 类	数 量
2004 年世界实际能耗	13TW
2050 年世界预测能耗	30TW
2100 年世界预测能耗	46TW
未开发水力资源	<0.5TW
海洋能 (潮汐、海浪、海流)	<2TW
地势能	12TW
可利用的风能	2~4TW
全球总太阳能	120 000TW

欧洲联合研究中心 (JRC) 也有类似预测, 太阳光伏发电在未来世界能源结构中会很快占据最重要的地位。到 2030 年, 可再生能源在总能源结构中占 30% 以上, 其中太阳光伏发电在世界电力供应中将达到 10% 以上。到 2040 年, 可再生能源在总能源结构中占 50% 以上, 其中太阳光伏发电在世界电力供应中将达到 20% 以上。到 21 世纪末, 可再生能源在总能源结构中占 80% 以上, 其中太阳光伏发电在世界电力供应中将达到 60% 以上。

随着化石能源的逐年枯竭, 为了实现能源可持续发展, 可再生能源的替代速度必须加快。预计 2050 年后, 太阳能光伏发电和光热发电将超过化石能源和其他可再生能源, 图 1-2 (见文后彩页) 表示了 21 世纪全球能源结构发展趋势的推测。

光伏技术首先在太空中得到应用, 目前地面应用已经非常广泛。光伏发电, 以及光伏与建筑物的结合得到世界各国政府的政策支持, 并网发电和光伏电站更是今后光伏应用的最大市场和必然发展趋势。许多国家正在竞相开发各种新型光伏材料和高效光伏发电技术, 扩大太阳能的应用领域。

太阳电池产业的发展速度之快, 是现代工业中罕有的, 甚至连半导体工业都自叹弗如。全球太阳电池产量 1996~2006 年 10 年间增长 22 倍, 年复合增长率超过 36%。即便如此, 目前太阳能发电占全球能源消耗总量之比仍是微不足道的。德国是全球最大的光伏市场, 2008 年光伏电池的年发电量已超过 2TWh (20 亿 kWh), 并网应用超过 99%, 但光伏发电量占全国总发电量仍不到 0.6%。2007 年中国太阳电池产业迅速崛起, 虽然电池产量已连续 3 年高居世界第一, 但中国的并网应用只是刚刚开始。

应该指出, 太阳光伏发电成本目前仍比较高。有人估计, 如果仅仅靠光伏产业经营良性积累和自身技术进步, 大约到

2050 年才能将太阳能电池组件的价格降低到 1.0 美元/W 以下，才可与常规发电进行市场竞争，因此各国政府都对太阳光伏发电给予相当的政策支持。

二、太阳能电池发展历程

如今太阳能电池已成为全球增长最快的高新产业之一。从长远发展来看，它的研发将会经历体晶体、薄膜和量子器件等三个阶段。目前体晶体和薄膜太阳能电池已实现了产业化、规模化和商品化。据报导，2009 年全球太阳能电池产量为 10 500MW，晶体硅太阳能电池占 76.5%，a-Si 太阳能电池占 13.5%，CIGS 和 CdTe 薄膜太阳能电池综合占 10%。表 1-2 列出了太阳能电池的发展阶段。

表 1-2 太阳能电池发展阶段

太阳能电池发展阶段	组成	转换效率 (%)	商业状态	特征
体晶体 太阳能电池	单晶硅	16~18	商业	应用最久
	多晶硅	12~17	商业	生产量最大
	化合物半导体(GaAs)	28~35(GaAs)	太空应用	效率高，成本高
薄膜 太阳能电池	非晶硅薄膜	8~10(产品)	商业	前途大，但不稳定 颇有竞争力
	非晶/微晶硅薄膜	12	已产业化	
	化合物薄膜(CdTe)	10~12	已产业化	原料毒性
	化合物薄膜(CIGS)	10~15	正在产业化	原料紧张

续表

太阳电池发展阶段	组成	转换效率(%)	商业状态	特征
薄膜太阳电池	多结叠层薄膜		正在产业化	可吸收宽太阳光谱
	染料敏化电池(TiO ₂)	11(实验室)	研发	价廉,但不太稳定
新概念太阳电池	量子阱电池等		研发	效率高,难度大

不同技术的太阳电池效率和成本是不同的,见图 1-3。图中, I 为第一代太阳电池(晶体硅太阳电池); II 为第二代太阳电池(薄膜电池); III 为第三代太阳电池(量子阱等新概念电池)。

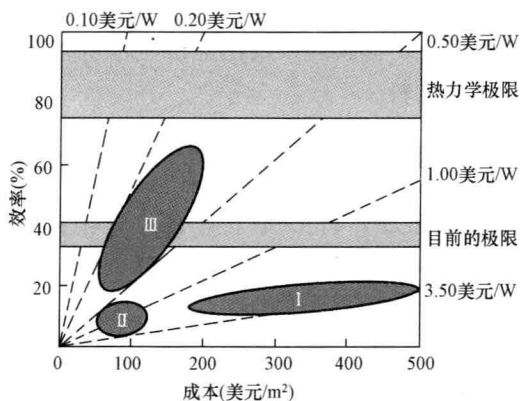


图 1-3 三代太阳电池成本和效率关系

I—硅片技术; II—薄膜技术; III—量子技术

本书主要介绍如何利用半导体材料将太阳能直接转换成电