

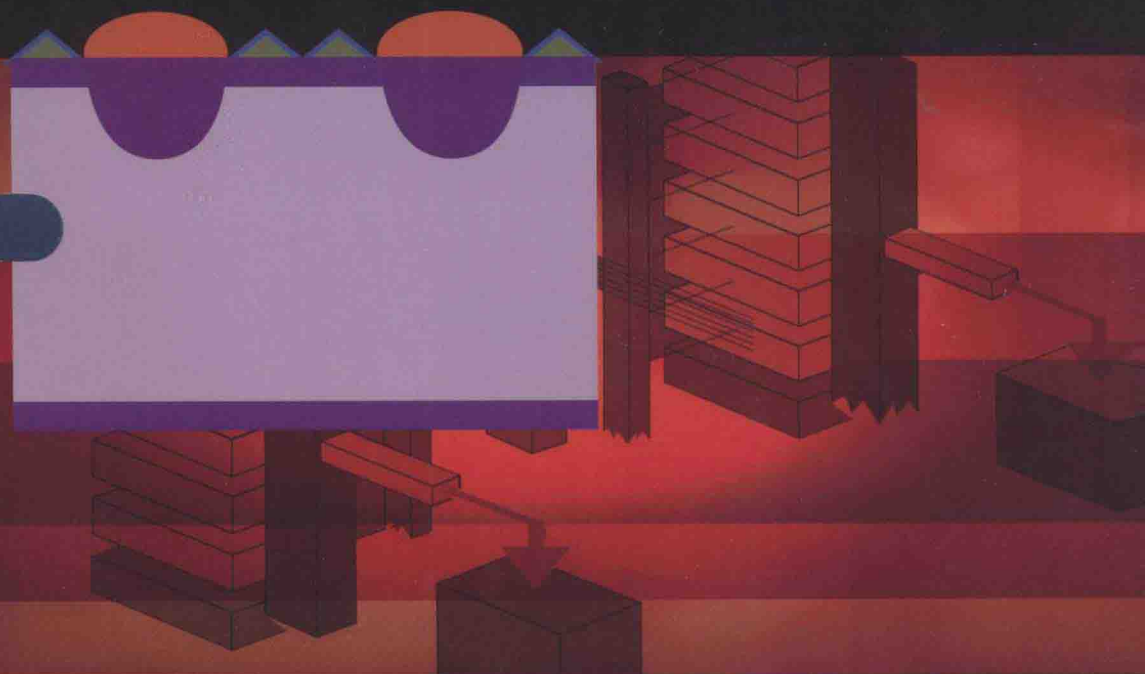


高新技术科普丛书

太阳能电池及其应用

SOLAR CELL AND ITS APPLICATION

■ 王文静 编著



化学工业出版社



高新技术科普丛书

太阳电池及其应用

SOLAR CELL AND ITS APPLICATION

■ 王文静 编著



化学工业出版社

目前我国光伏太阳能产业与太阳电池行业仍然处于高速发展之中。太阳电池可大致分为以半导体硅材料为主的单晶硅、多晶硅太阳光伏电池和薄膜太阳光伏电池两大类。本书以国内外先进、新型太阳电池为内容,全面介绍目前各种产业化和有产业化前景的太阳电池,涉及晶体硅太阳电池、硅薄膜太阳电池、碲化镉薄膜太阳电池、铜铟镓硒薄膜太阳电池、Ⅲ-V族太阳电池、染料敏化太阳电池;并对太阳电池基本概念、前沿技术及其各方面的最新应用进行了重点介绍。

本书既可以作为初涉太阳电池行业读者的快速入门图书,也可以作为其他领域读者了解太阳电池这一快速发展领域的科普图书。同时,本书对新能源材料、光伏太阳能专业领域的科技工作者、大专院校师生以及技术人员都值得关注和阅读。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池及其应用/王文静编著. —北京:化学工业出版社, 2013. 11
(高新技术科普丛书)
ISBN 978-7-122-18704-8

I. ①太… II. ①王… III. ①太阳能电池-普及读物 IV.
①TM914. 4-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 245799 号

责任编辑:朱 彤

文字编辑:王 琪

责任校对:边 涛

装帧设计:史利平

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:三河市前程装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 10 1/4 字数 189 千字 2014 年 3 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:38.00 元

版权所有 违者必究

前言

为保证人类稳定、持久的能源供应，保护人类赖以生存的生态环境，必须采取措施减少化石能源的耗用，大力开发利用清洁的新能源和可再生能源，走与生态环境相和谐的能源之路。太阳能堪称无限的能源。太阳辐射能完全可以转换成人类所需要的能源。它可以方便地转换成热能、动力能、化学能等各种形式的能源，以满足人类生活、生产的需要。其中，光能转换为电能是一种重要的转化过程。专家们预言，到21世纪中叶，太阳能光伏发电将发展成为重要的发电方式，在世界可持续发展的能源结构中占有相当的比例。

由于国家和政府的大力支持，近几年我国的光伏产业就像雨后的春笋，发展特别迅猛，一跃成为全球第一大太阳能光伏电池生产大国。在目前大规模产业化的太阳电池中，晶体硅太阳电池一直占据80%~90%的份额，其余主要为各种薄膜太阳电池，包括碲化镉薄膜太阳电池、铜铟镓硒薄膜太阳电池、硅薄膜太阳电池。此外，还包括其他几种新型太阳电池，如砷化镓类的Ⅲ-V族太阳电池、染料敏化太阳电池等。这些太阳电池或因技术还不成熟，或因成本仍较高，还没有大规模应用于地面电站上，但是在未来有很强的潜力。

本书全面介绍目前各种产业化和有产业化前景的太阳电池，内容包括：太阳电池的历史、现状及未来（第1章）；太阳电池原理（第2章）；晶体硅太阳电池（第3章）；硅薄膜太阳电池（第4章）；碲化镉薄膜太阳电池（第5章）；铜铟镓硒薄膜太阳电池（第6章）；Ⅲ-V族太阳电池（第7章）；染料敏化太阳电池（第8章）；各种电池在应用中的比较（第9章）。

本书力图以较浅显的方式介绍各种太阳电池原理，尽量不采用复杂、难懂的公式推导，而是以图示和物理描述的方法阐述各种太阳电池的材料、原理、结构和工艺。同时，针对已经产业化的太阳电池，重点介绍了其生产工艺、流程以及最新产业化工艺技术、设备的发展状况，力图贴近实际应用。此外，在论述每种太阳电池时还特别介绍了此类太阳电池的发展历史，以使读者更清晰

地了解其发展脉络。本书作者希望通过本书，使太阳能电池领域的研究人员和产业技术人员能对太阳能电池有更全面而较为深入的认识和了解。

由于各种太阳能电池所涉及知识领域非常广泛，再加上各类新型太阳能电池技术日新月异，书中疏漏之处在所难免，望广大读者批评指正。

编著者

2013 年 12 月于北京

目录

第1章 太阳电池的历史、现状及未来

001

1.1 太阳电池发展简史	001
1.2 太阳电池产业现状	004
1.3 太阳电池的技术分类	007
1.4 太阳电池技术及产业的未来	009
参考文献	010

第2章 太阳电池原理

011

2.1 晶体结构与能带理论	011
2.2 光吸收	016
2.3 载流子的复合	020
2.4 半导体 pn 结	022
2.5 载流子的输运机制	024
2.6 载流子的收集	026
2.7 光管理	027
2.8 太阳电池的性能参数	029
参考文献	032

第3章 晶体硅太阳电池

033

3.1 晶体硅太阳电池的基本结构	033
3.2 晶体硅太阳电池的基本工艺	034
3.3 晶体硅太阳电池的结构参数优化	035
3.3.1 硅衬底的优化选择	035

3.3.2 硅衬底表面减反射结构优化	036
3.3.3 发射极优化	037
3.3.4 金属电极优化	040
3.4 晶体硅太阳电池产业链中的其他工艺环节	041
3.4.1 硅还原工艺	042
3.4.2 硅提纯工艺	043
3.4.3 硅片制备	045
3.4.4 组件封装	049
3.5 高效晶体硅太阳电池	051
参考文献	056

○ 第4章 硅薄膜太阳电池

057

4.1 非晶硅薄膜太阳电池发展简史	057
4.2 非晶硅薄膜的特性	059
4.3 非晶硅薄膜太阳电池的结构及特性	064
4.4 非晶硅薄膜太阳电池的辐照衰减	068
4.4.1 电荷转移模型	071
4.4.2 弱 Si—Si 键断裂模型	071
4.4.3 氢碰撞模型	072
4.5 叠层硅薄膜太阳电池	073
4.5.1 非晶硅锗叠层太阳电池	073
4.5.2 非晶硅/微晶硅叠层太阳电池	075
4.6 非晶硅薄膜太阳电池的制备技术	078
4.6.1 玻璃衬底准备	079
4.6.2 玻璃衬底上的 TCO 膜	079
4.6.3 激光划片	080
4.6.4 非晶硅薄膜沉积技术	080
4.6.5 组件封装	084
4.7 非晶硅薄膜太阳电池的工业化技术	084
参考文献	090

○ 第5章 碲化镉薄膜太阳电池

093

5.1 CdTe 薄膜电池的发展简史	093
--------------------------	-----

5.2	CdTe 材料特性	095
5.3	制备 CdTe 薄膜的方法	097
5.3.1	物理气相沉积技术	098
5.3.2	近空间升华	098
5.3.3	气相输运沉积	098
5.3.4	溅射沉积	099
5.3.5	电沉积	099
5.3.6	金属有机物化学气相沉积	099
5.3.7	喷涂沉积	100
5.3.8	丝网印刷	100
5.4	CdTe 太阳能电池的结构	100
5.4.1	窗口层	100
5.4.2	CdTe 吸收层	101
5.4.3	背电极	104
5.4.4	CdTe 太阳能电池组件	104
	参考文献	105

○ 第 6 章 铜铟镓硒薄膜太阳能电池

109

6.1	铜铟镓硒太阳能电池发展简史	109
6.2	铜铟镓硒的材料特性	110
6.3	制备铜铟镓硒薄膜的方法	111
6.3.1	衬底	112
6.3.2	背接触层	112
6.3.3	共蒸发制备 CIGS 层	112
6.3.4	两步法工艺	115
6.4	铜铟镓硒薄膜电池的结构及制备	116
6.4.1	化学浴法制备 CdS 层	117
6.4.2	无 Cd 缓冲层	118
6.4.3	透明导电膜	118
6.4.4	CIGS 组件的制备	120
6.5	铜铟镓硒薄膜电池的工业化生产	120
	参考文献	123

◎ 第7章 III-V族太阳电池

127

7.1 III-V族太阳电池的历史和现状	127
7.2 III-V族材料特性	129
7.2.1 能带匹配	129
7.2.2 晶格匹配	131
7.2.3 电流匹配	132
7.3 III-V族太阳电池的制备方法	134
7.4 III-V族太阳电池的器件结构	134
7.4.1 掺杂原子	135
7.4.2 窗口层	136
7.4.3 背场	137
7.4.4 隧道结互联	138
7.4.5 减反射膜	139
7.4.6 电极接触	139
7.5 III-V族太阳电池的应用和发展	140
参考文献	142

◎ 第8章 染料敏化太阳电池

144

8.1 染料敏化太阳电池的历史和现状	144
8.2 结构和材料	145
8.2.1 覆盖透明导电氧化物的玻璃衬底	146
8.2.2 TiO_2 光电极	146
8.2.3 钌络合物光敏化剂	146
8.2.4 对电极	147
8.2.5 密封材料	148
8.3 机理	148
8.4 DSSC 电池的产业化前景	151
参考文献	151

◎ 第9章 各种电池在应用中的比较

152

9.1 各种产业化电池效率的比较	152
9.2 温度系数	153

9.3 组件的衰减	154
9.4 光谱响应特性	155
9.5 不同组件的成本与发电成本	155
9.6 光伏发电的未来展望	158
参考文献	159

第1章

太阳电池的历史、现状及未来

太阳电池是一种半导体器件，通过光子辐照到具有一定内部结构的半导体材料时产生直流电（DC）。只要光照射到太阳电池上，它就产生电能。当光照停止后，发电也停止。太阳电池不像蓄电池一样需要充电，但是它也不能像蓄电池那样可以存储能量。

1.1 太阳电池发展简史

太阳电池是基于光伏效应制造的器件，1839年法国科学家埃德蒙·贝克勒尔（Becquerel）发现光投射到液体电解质中可以产生电流和电压，称为光生伏特效应。他是另一位法国物理学家安东尼·亨利·贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel, 1852~1908年）的父亲，后者因发现了放射性现象而获得了诺贝尔物理学奖。光伏发电器件及太阳电池的历史列于表 1.1。1883年 Fritts^[1]制备了第一个光伏器件。Fritts 先将硒熔化后倒在一个金属衬底的薄片上，然后压上金箔作为电极，电池面积约为 30cm²。Fritts 记录到：“产生的电流，如果不想立即使用，可以就地存储在蓄电池中……或者传输到需要使用的地方。” Fritts 在一百年以前就预见到了如今的光伏技术的应用方式。光伏技术的新纪元开始于 1954 年，当时美国 Bell 实验室的研究人员意外地发现，当 pn 结二极管被室内光线照射时会产生电压。在一年内，他们得到了 6% 效率的硅 pn 结太阳电池^[2]。同一年中，美国的 Wright Patterson 空军基地发表了 Cu₂S/CdS 薄膜异质结太阳电池的结果，效率达到了 6%^[3]。一年以后，美国的 RCA 实验室报道了 6% 的 GaAs 电池效率^[4]。到 1960 年，Prince^[5]、Loferski^[6]、Rappaport 和 Wysocki^[7]、Shockley（诺贝尔物理学奖获得者）以及 Queisser^[8]等发表了重要论文，研究了 pn 结太阳电池的工作原理，包括带隙宽度、入射光谱、温度、热力学等与效率的关系。CdTe 薄膜也得到了 6% 的效率^[9]。美国空间项目使用硅太阳电池来为卫星提供电力。既然空间仍是光伏器件的主要应用场所，就需要提高器件对于辐射的耐受程度，使用 Li 掺

杂的硅制备电池可以提高器件的抗辐射性^[10]。在1970年，Alferov（诺贝尔物理学奖获得者）领导前苏联的Loffe研究所开发了一种异质结的GaAlAs/GaAs^[11]太阳电池，这种电池解决了GaAs电池的一个主要问题，并且指出了新的器件结构发展方向。人们对GaAs电池感兴趣主要是因为它效率高，并且对空间离子辐射不敏感。1973年对于光伏产业来说，不论在技术还是在非技术方面都是重要的一年。在1973年，“紫光电池”的出现很大程度地改善了电池对太阳光短波的响应，导致电池相对效率提升30%^[12]。在美国IBM公司，GaAs异质结电池获得了13%的效率^[13]。在1973年10月，波斯湾石油生产国发起了第一次世界石油禁运，这对工业国家造成很大冲击，于是大多数国家的政府开始制定计划鼓励使用可再生能源，特别是太阳能的发展。有些人认为这导致了光伏新纪元的到来，并且使人们明白了光伏技术地面应用的紧迫性。

表 1.1 光伏发电器件及太阳电池历史上一些著名事件

年 份	事 件
1839 年	Becquerel(法国)在液体电解质里发现光电流效应
1873 年	Smith(英国)发现了固体硒的光电导率
1877 年	Adams 和 Day(英国)在硒管发现光生电流,第一次在固体上观察到 PV 效应
1883 年	Fritts(美国)制备了第一个大面积硒薄膜太阳电池
1954 年	报道了世界上第一个 6%效率的太阳电池,Si(Bell 实验室,美国)和 Cu ₂ S/CdS (空军,美国)
1955 年	Hoffman 电子(美国)以 1500 美元/W 提供了 2%效率的硅光伏电池
1958 年	NASA 先锋卫星使用了硅太阳能组件
1959 年	Hoffman 电子(美国)提供了 10%效率的硅光伏电池
1963 年	Sharp 公司(日本)生产了世界上第一个商业化硅组件
1966 年	NASA 轨道“天文台”带着 1kW 的阵列发射
1970 年	Alferov、Andreev 等在前苏联制造出了世界上第一个 GaAs 异质结太阳电池
1973 年	光伏产业很重要的一年,世界范围的能源危机促使很多国家开始考虑可再生能源,包括光伏技术;世界上第一个太阳能供电的社区(Delaware 大学,美国)出现,使用的是 Cu ₂ S 组件(不是硅的)
1974 年	日本启动了阳光(Sunshine)计划来培育光伏产业;Tyco(美国)生长了 2.5cm 宽的硅带用于光伏组件,第一次取代了硅片
1975 年	Hovel(美国)撰写的第一本专注于光伏技术的书问世
1980 年	获得第一个大于 10%效率的薄膜太阳电池,使用 Cu ₂ S/CdS(美国)
1981 年	沙特阿拉伯安装了 350kW 的聚光阵列
1982 年	第一个 1MW 的光伏发电站(CA,美国)被建立,使用 Arco 公司的硅组件,双轴跟踪技术

续表

年 份	事 件
1984 年	美国 CA Carrisa Plains 安装了 6MW 电池阵列 ^[14]
1985 年	高效硅电池很重要的一年,在标准太阳光下硅电池效率实现大于 20%[新南威尔士大学(UNSW),澳大利亚] ^[15] ,在 200 倍聚光条件下实现了大于 25%的效率(斯坦福大学,美国) ^[16]
1986 年	第一个商业化薄膜组件出现,a-Si G4000,Arco Solar 公司提供
1987 年	14 辆太阳能驱动车参加了 3200km 的世界太阳能汽车挑战赛(澳大利亚),冠军的平均时速达到了 70km/h
1994 年	GaInP/GaAs 两端子多结聚光电池效率超过 30%(NREL,美国) ^[17]
1995 年	德国的“1000 个屋顶”示范项目将光伏系统安装在屋顶上,这成了现在德国、日本和其他国家立法支持光伏技术的推广应用的开始
1996 年	光电化学“染料敏化”固/液电池实现了 1%的效率(EPFL,瑞士) ^[18]
1997 年	全世界的光伏组件产量达到了 100MW/a
1998 年	Cu(InGa)Se ₂ 薄膜太阳能电池效率达到了 19%(NREL,美国) ^[19] ,可以和多晶硅太阳能电池相比。美国发射的“深空 1 号”上首次使用了聚光阵列(5kW,使用的是高效 GaInP/GaAs/Ge 三结电池)
1999 年	全世界共安装光伏组件 1000MW
2000 年	澳大利亚悉尼奥林匹克运动会突出展示了光伏技术的不同应用,并且第一次授予了光伏和太阳能工程学科的学士学位(UNSW,澳大利亚)
2002 年	全世界安装的光伏系统达到 2000MW。这期间共花费了 25 年达到第一个 1000MW,然后仅仅又花费了 3 年就翻了一番。日本夏普公司的晶体硅电池产量超过了 100MW/a。BP 太阳能公司停止了 a-Si 和 CdTe 薄膜组件的研发,结束了其二十多年的努力
2004 年	德国政府启动光伏发电上网电价补贴政策,当年全球光伏系统安装量达到 3.9GW
2012 年	全世界光伏系统安装量达到 30GW

20 世纪 80 年代,光伏产业开始逐渐成熟。美国、日本和欧洲都建造了晶体硅电池的组件封装设备。新技术开始走出政府、学校和企业实验室,开始了大规模产业化之前的中试生产。很多公司开始打算将薄膜光伏技术推向规模化生产,如非晶硅和 CuInSe₂,其效率在实验室的小面积(1cm²)上获得了超过 10%的效率。但是,产业化并不仅仅是将实验室设备放大。大多数美国的半导体公司(IBM、General Electric、Motorola)由于缺少私人或政府的支持而放弃了研发的努力,结果很多美国公司和他们的技术都被外国公司收购。在 20 世纪 90 年代,世界最大的太阳能制造商是 Arco Solar(CA, USA),为 Atlantic Richfield 石油公司所拥有,它有晶体硅和硅薄膜生产线及薄膜 CuInSe₂ 电池的中试线,后来被德国的西门子公司收购,并且更名为西门子太阳能公司

(在 2001 年, 荷兰的壳牌太阳能公司收购西门子太阳能公司, 成为拥有多种光伏技术的大型国际化公司)。同样在 1990 年, 能量转换器件 (Energy Conversion Devices, ECD) 公司 (MI, USA) 和日本制造商佳能成立了一个合资公司——美国太阳能系统公司 (United Solar System Cop.), 开展卷对卷三叠层 a-Si 技术。1994 年, 美孚太阳能 (Mobil Solar) 公司 (MA, USA) 被出售给了德国的 ASE 公司。该公司开发了一种在硅带 (被称为限边喂膜技术或 EFG 技术) 而不是常用的较贵的硅片上制备太阳电池的工艺, 后来该技术被转让给 REC, 接着是德国的肖特 (Schott) 公司。当 BP Solar 的母公司 BP 石油公司收购了位于美国俄亥俄州的美国石油巨头标准石油公司后, 这家英国太阳能公司在 1989 年获得了电沉积 CdTe 太阳电池的专利。与此同时, 该公司还获得了澳大利亚新南威尔士大学的激光刻槽埋栅 (lasergrooved buried-grid, LG-BG) 电池的专利, 这是当时效率最高的电池之一。在 1996 年, BP Solar 和马德里的 Polytechnic 大学签订了协议来共同开发 Euclides 聚光技术, 使用他们的 LGBG 电池作为聚光电池。1999 年 BP Solar 从 Enron (一家大型化石燃料能源公司) 收购了 Solarex 公司, Solarex 有晶体硅和非晶硅电池技术。这样, BP Solar 几乎涵盖了所有的太阳电池技术 (标准硅片、薄膜和聚光)。同时, 日本的光伏技术开始快速发展。晶体硅组件生产和对薄膜电池的密集研究导致了許多创新的器件设计、改善的材料工艺和在光伏领域地位的增长。

1.2 太阳电池产业现状

2004 年可以看成是世界光伏产业真正大发展的起始之年, 当年德国光伏发电上网电价政策的出台极大地刺激了光伏产业的增长, 德国是世界上最早出台光伏发电上网电价政策的国家, 当年光伏系统安装量的增长率达到 92.27%。2008 年, 西班牙出台光伏发电上网电价政策, 当年成为世界第一大光伏市场, 2008 年光伏市场增长率达到 145.39%。2009 年, 意大利出台光伏发电上网电价政策, 当年成为世界第二大光伏市场。随后德国和意大利一直处于快速发展阶段, 分列世界第一位和第二位。2010 年, 除德国和意大利外, 欧洲的捷克、法国, 亚洲的日本、中国, 大洋洲的澳大利亚, 及北美洲的美国、加拿大, 都出现不同程度的增长, 导致 2010 年世界新增光伏系统装机量达到 16.6GW。2011 年, 在收紧的补贴政策下依然实现了 29.7GW 的新增容量, 实现近 80% 的市场增长率, 其主要得益于光伏系统价格的超预期下降。2011 年, 除德国、意大利外, 日本、美国、印度, 特别是中国增幅显著。中国和美国分别以 2.2GW 和 1.8GW 分列世界第三位和第四位, 成为新兴的主要光伏市场。截止到 2011 年全球光伏系统安装

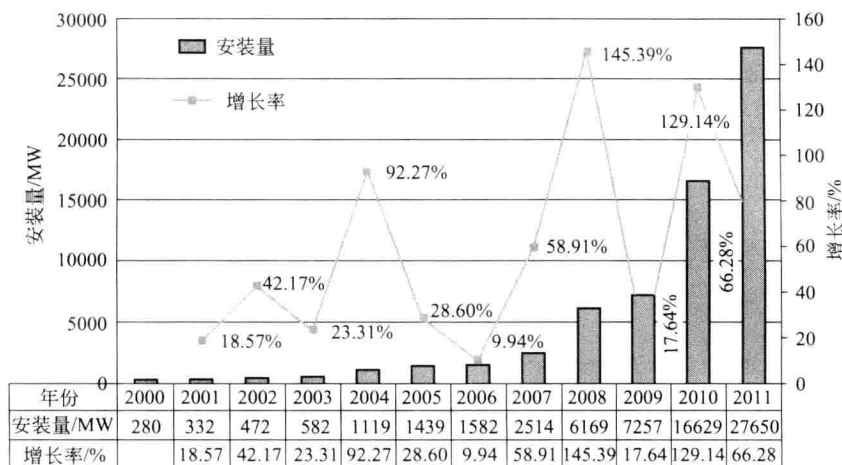


图 1.1 截止到 2011 年全球光伏系统安装量的变化情况

量的变化情况如图 1.1 所示。

随着市场规模的逐步扩大，太阳能电池制造行业也发生了深刻的变革。早年的光伏技术中心主要在美国，但是随着日本和欧洲光伏市场的发展，光伏制造中心先后转移到了日本和欧洲。在 1998 年之前，美国是世界太阳能电池产量最大的国家，1998 年日本取代美国成为太阳能电池产量最大的国家，日本的优势地位一直保持到 2006 年，当年日本生产了 922.1MW 太阳能电池，占世界总产量的 36.4%。日本的夏普公司成为世界最大的太阳能电池制造商。但是德国借着本土市场规模的不断扩大，大力发展太阳能电池制造产业，德国当年生产了 507.6MW，占世界总产量的 20%。德国的 Q-Cell 公司成为世界产量位居第二的公司。自 2007 年中国异军突起成为世界太阳能电池产量最大的国家，当年中国产量占世界总产量的 28%（1200MW），而日本位居第二，占 22%（932MW），当年德国 Q-Cell 公司成为世界太阳能电池产量最大的厂家。图 1.2 给出了截止到 2012 年世界太阳能电池产量的变化情况。

自 2007 年起直至 2012 年，中国连续六年保持了世界最大的太阳能电池制造国的地位，可以毫不夸张地说世界太阳能电池制造基地已经向东亚尤其是中国转移。2002 年无锡尚德电力公司成立，当时产能为 10MW，已经是此前中国建成的所有太阳能电池制造产能的 2.5 倍，也标志着真正具有现代水平的太阳能电池制造业的诞生。此前中国只有 4 家太阳能电池制造厂，它们分别是秦皇岛华美太阳能公司、云南半导体厂、宁波太阳能公司、开封半导体厂，晶体硅太阳能电池产能总计只有 2MW。另外，还有两家非晶硅太阳能电池生产厂，分别是哈尔滨克罗拉太阳能公司、深圳宇康太阳能公司，两家公司都是从美国科罗拉公司引进的非晶硅太阳能电池生产线，各有 1MW。但是在 2002~2004 年中国光伏产业

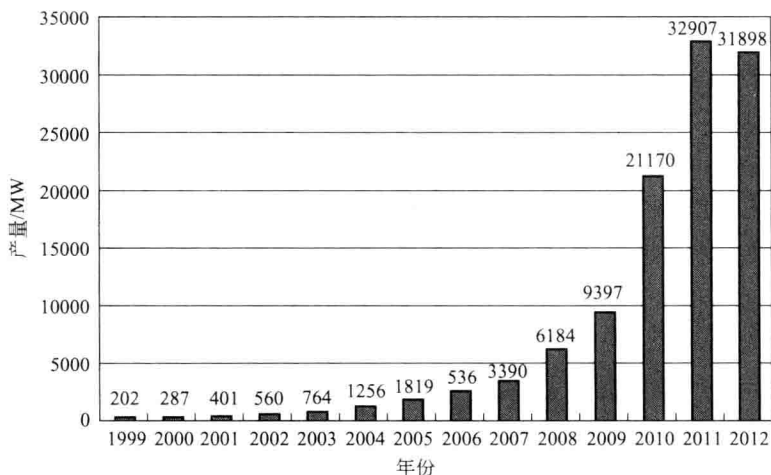


图 1.2 截止到 2012 年世界太阳能电池产量的变化情况

发展得并不顺利。中国光伏产业的腾飞得益于欧洲特别是德国光伏市场的发展，自从 2004 年中国太阳能电池制造业出现大量的投资，2005 年 12 月 4 日无锡尚德电力公司在美国纽交所上市，成为中国光伏产业大发展的一个标志，随后苏州阿特斯、南京中电、LDK、河北晶澳、浙江昱辉、常州天合、江苏林洋、保定英利、江阴浚鑫、晶科能源等公司陆续在纽交所和纳斯达克上市，还有多家公司在港交所、伦敦交易所、深交所、上交所上市，开启了中国光伏产业大发展的时代。从 2007 年起中国太阳能电池产量跃居世界第一（图 1.3），随后一直到 2012 年一直稳居世界第一，而且占世界太阳能电池总产量的份额逐年增大，到 2011 年已经占到世界总产量的 57.3%。到 2011 年，无锡尚德电力公司也超越美国的 First Solar 公司成为世界最大的太阳能电池制造公司。

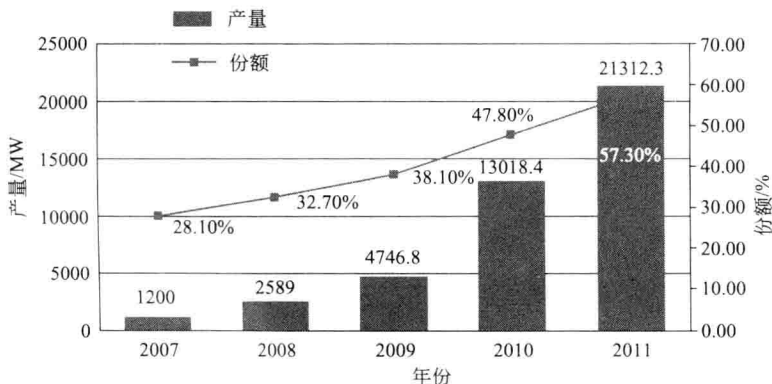


图 1.3 中国太阳能电池产量的变化及其在世界所占的份额

1.3 太阳能电池的技术分类

太阳能电池有多种类型，一般按照材料分类，有以下几种。

- ① 晶体硅太阳能电池。包括单晶硅太阳能电池和多晶硅太阳能电池。
- ② 硅薄膜太阳能电池。包括非晶硅薄膜太阳能电池、微晶硅薄膜太阳能电池和非晶硅锗薄膜太阳能电池以及以上三种薄膜电池的叠层太阳能电池。
- ③ 碲化镉 (CdTe) 薄膜太阳能电池。
- ④ 铜铟镓硒 (CIGS) 薄膜太阳能电池。
- ⑤ 砷化镓类单层及叠层太阳能电池。
- ⑥ 染料敏化太阳能电池。
- ⑦ 有机薄膜太阳能电池。
- ⑧ 新概念太阳能电池。包括量子点太阳能电池、热光伏太阳能电池和中间带太阳能电池。

在近几十年的发展中，这些太阳能电池的实验室效率不断提高，图 1.4 给出了近年来各种太阳能电池效率提高的情况以及获得效率纪录的单位的名字。从图中可以看出，目前效率最高的是Ⅲ-V族材料制成的叠层聚光太阳能电池，由美国 Solar Junction 公司制备的Ⅲ-V族三结叠层太阳能电池在 418 倍聚光条件下效率达到 43.5%。而非聚光的三结叠层太阳能电池效率最高为夏普公司的 35.8%。但是，这种太阳能电池原材料昂贵，制备工艺十分复杂，因此成品价格昂贵，目前主要用在航天工业中，地面应用正在少量的聚光跟踪电站上进行示范，评估其性价比。

在所有这些种类的太阳能电池中，只有晶体硅太阳能电池、硅薄膜太阳能电池、CdTe 薄膜太阳能电池、CIGS 薄膜太阳能电池进入产业化。单晶硅和多晶硅太阳能电池一直占据着主要的市场份额，这主要得益于该技术的成熟以及价格的低廉。图 1.5 给出这几年各种电池的市场份额。从图中可以注意到，从 1999 年开始非晶硅薄膜太阳能电池份额在逐年减少，这是由于在 20 世纪 90 年代非晶硅太阳能电池比晶体硅太阳能电池的价格低很多，因此非晶硅太阳能电池所占市场份额很高，但是随着晶体硅太阳能电池制造成本的大幅度下降，晶体硅太阳能电池渐渐占据了主流地位。在 2009 年前后，新出现的 CdTe 薄膜太阳能电池以其非常有竞争性的成本而占据较大份额，该技术主要由美国 First Solar 公司开发并大规模生产。而且在当时随着太阳能电池产业的突然爆发，多晶硅材料提纯产业的产能扩张无法跟上需求，因此造成晶体硅太阳能电池的原材料价格急剧暴涨，一方面使得晶体硅太阳能电池价格居高不下，另一方面还使得硅材料短缺造成产出不足。因此在 2009 年前后，薄膜电池尤其是 CdTe 薄膜电池产能扩张很快，但随着多晶硅提纯产能的扩张，供需矛盾解决，晶体硅太阳能电池价格大幅度下