



新能源技术 应用系列

· 导读版 ·

实用光伏手册

原理与应用(下)

(原著第2版)

Practical Handbook of Photovoltaics
Fundamentals and Applications (Second Edition)

Augustin McEvoy
Tom Markvart
Luis Castañer



原版引进



科学出版社

新能源技术应用系列

Practical Handbook of Photovoltaics

Fundamentals and Applications

(Second Edition)

实用光伏手册

原理与应用 (下)

(原著第2版)

Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castaner



科学出版社

北京

图字: 01-2012-4161 号

Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications (Second Edition)

by Augustin McEvoy, Tom Markvart, Luis Castañer

Copyright © 2012, Elsevier Inc. All rights reserved.

ISBN: 9780123859341

Authorized English language reprint edition published by the proprietor. Printed in China by Science Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR, Macao SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书英文影印由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权科学出版社在中国大陆境内独家发行。本版仅限在中国境内 (不包括香港特别行政区、澳门特别行政区以及台湾) 出版及标价销售。未经许可之出口, 视为违反著作权法, 将受法律之制裁。

本书封底贴有 Elsevier 防伪标签, 无标签者不得销售。

图书在版编目(CIP)数据

实用光伏手册: 原理与应用=Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications: 第2版. 下册: 英文 / (瑞士) 麦克沃伊 (McEvoy, A.) 等编著. —北京: 科学出版社, 2013

(新能源技术应用系列)

ISBN 978-7-03-035791-5

I. ①实… II. ①麦… III. ①光电池—手册—英文 IV. ①TM914-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 245753 号

责任编辑: 霍志国 / 责任印制: 钱玉芬

封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年1月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2013年1月第一次印刷 印张: 44

字数: 884 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

导 读

自工业革命以来,随着生产力的飞速发展,世界范围的能源消费量大幅度增长。由于目前大量使用的煤、石油、天然气等化石燃料有可能在几十年以内枯竭,而且这些常规能源会带来严重的空气污染并加剧温室效应,因此,在 21 世纪发展清洁高效的新能源被摆在了重要的位置。而在新能源技术中,太阳能是取之不尽、用之不竭的清洁能源,具有不消耗常规能源、无转动部件、寿命长、无噪声、无污染等优点。所以,光伏发电技术被认为是最有前景的领域之一。

太阳能光伏发电技术已有了 100 多年的历史。1839 年,法国物理学家 Edmond Becquerel 第一次发现了光生伏打效应:在光的照射下,一些材料会产生少量的电流。19 世纪 70 年代 Heinrich Hertz 第一次研究了 Se 中的光伏效应。20 世纪四五十年代,随着 Czochralski 法制备纯净的晶体硅技术的发展,光伏材料的商业应用开始起步。1954 年,贝尔实验室的科学家们用 Czochralski 法制得了第一个晶体硅光伏电池,它的转化效率达到了 4%。而在之后的数十年之间,伴随着半导体工业的巨大发展,太阳能光伏技术已发展成为一个极具潜力的产业。

太阳能电池是利用半导体的 pn 结或由异种材料构成的异质结,将光转换成电能的光电变换半导体元件。其原理如图 1 所示。当光照射形成 pn 结的半导体时,入射光中能量比半导体禁带宽度 E_g 大的光子,会激发价带中的电子跃迁到导带,与此同时,在价带中产生空穴。由于太阳能电池中半导体 pn 结电场的存在,导致受光子激发产生的电子和空穴在电场作用下分别向 n 型区和 p 型区累积,结果产生光生伏打效应。如果将 pn 结两端外接电路,就可形成电流,实现光能到电能的转换。这就是太阳能光伏发电的基本原理。

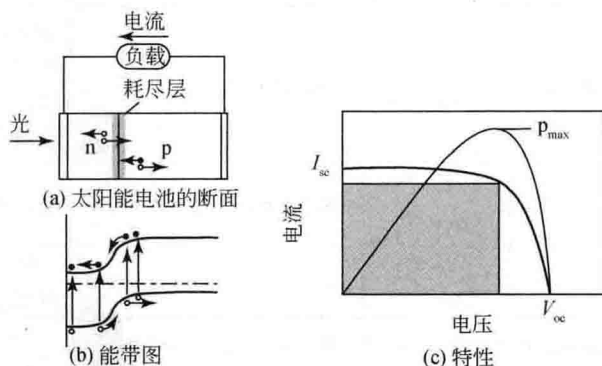


图 1 太阳能电池的原理及特性示意图

表 1 汇总了太阳电池的种类、转换效率和作为电力用途的现状等。太阳电池

分块体型和薄膜型两大类，到目前为止作为电力用而生产的，九成以上为块体型 Si 太阳电池，市售大面积组件的转换效率一般在 13%~18%。以超高转换效率为目标，采用Ⅲ-V 族化合物半导体的太阳电池也被归类为块体型。采用这种化合物半导体体系并藉由集光系统的 3 串结型太阳电池已实现超过 40% 的转换效率。藉由集光系统，Ⅲ-V 族化合物半导体禁带宽度各不相同（从而可以实现多串结）的组合优势得以淋漓尽致地发挥。

表 1 各种太阳电池材料的生产量、转换效率的现状 & 作为电力用途的展望

太阳电池材料	商用水平的 组件转换 效率/%	研究开发水 平的组件转 换效率/%	小面积电池的转 换效率（研发 开发阶段/%）	2007 年全世 界的产量** /MW	作为电力用途 对将来的展望
块体太阳电池					
1. 单晶硅	13~18	22.9 (778cm ²)*	25.0 (4cm ²)*	1355	到 2010 年，设备制造能力*** 达到 25GW
2. 多晶硅	13~15	15.5 (1.017cm ²)*	20.4 (1cm ²)*	1837	
3. GaInP/GaAs/ Ge 3 串结型	—	—	41.1 (0.05cm ²) 454 倍集光*	—	目前，主要由集光系统 配合使用
薄膜太阳电池					
4. 非晶硅单结型	6~7	6~8	9.5 (1cm ²)*	168 (4 项 和 5 项的 合计)	到 2010 年，设备制造能力 达到 4.8GW
5. 非晶硅/微晶硅 2 串结型	9~10	12~13	15.0 (1cm ²)*		
6. Cu (InGa) Se ₂	10~11	13~15 (900cm ²)	19.4 (1cm ²)*	40	到 2010 年，设备制造能力 达到 1.3GW
7. CdTe	10~11	11~12 (10×120cm ²)	16.7 (1cm ²)*	219	2008 年仅 First Solar 就 生产 504MW。到 2010 年，设备制造能力 达 1GW
8. 色素增感	—	8.4 (17cm ²)*	10.4 (1cm ²)*	—	首先从民生用途开始
9. 有机半导体	—	2.05 (223cm ²)*	5.15 (1cm ²)	—	目前，在转换效率、可靠 性方面还存在不少问题

注 * 源于 Progress in Photovoltaic 刊物中以 Efficiency Table (转换效率表) 的形式发表的数据。

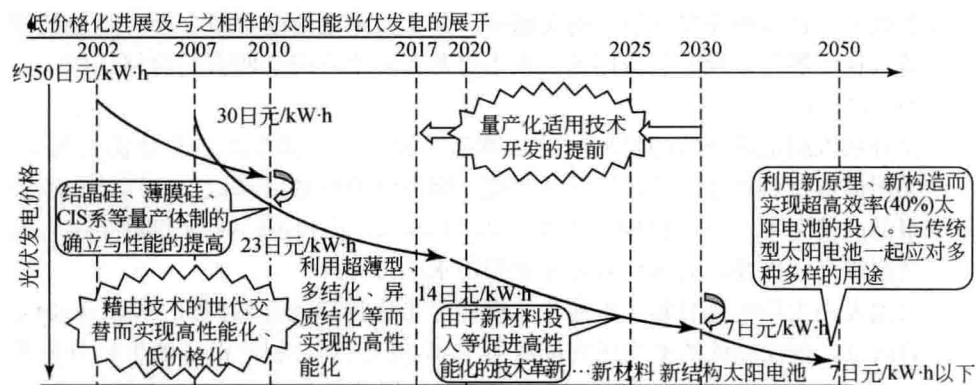
** 2008、2009、2010 年全世界的新增装机容量（一般说来小于当年的产量）分别是 5.95、7.37、15.7GW，2011 年预计为 19.0GW。

*** 截至 2010 年，我国太阳电池组件产能达到 21GW（有关权威部门宣传是 30GW）。

另一方面，今后可期待真正进入实用阶段的是薄膜太阳电池。目前市售的非晶硅系太阳电池组件的转换效率一般在 $6\% \sim 10\%$ 。作为薄膜系重点开发的项目是由非晶 Si/微晶 Si 双串结构构成的混合 (hybrid) 型太阳电池和 $\text{Cu}(\text{InGa})\text{Se}_2$ 太阳电池。近年来，薄膜太阳电池的产量迅速增加，截至 2010 年，其制造设备的产能已超过 5GW。最近，CdTe 薄膜太阳电池的市场占有率急速增加，正紧紧追赶其他薄膜系。

太阳光伏发电所面对的课题是如何降低发电价格。所谓发电价格，是在假定一年中的电发电量、系统寿命等的基础上，通过计算而导出的数值。现在在日本， $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 的发电价格估计在 40~45 日元上下。日本于 2007 年往回追溯 5 年，而面向 2030 年的太阳能光伏发电技术发展路线图以 PV2030 的名称于 2007 年公开发表，而且在此基础上，在 2009 年进一步对 PV2030 路线图进行了修订，将 2030 年的目标提前于 2025 年实现的加速化修订版，以 PV2030 plus (+) 的名称于 2009 年公布。

图 2 表示修订版 PV2030 plus。该路线图中的几个关键点是，到 2017 年要达到等同于业务用电力价格的 14 日元/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)，到 2025 年要达到等同于事业用电力价格的 7 日元/ ($\text{kW} \cdot \text{h}$)。为了实现上述发电价格的目标，同时设定了太阳电池组件的制造价格及寿命，以及与转换效率相关联的目标。到 2025 年，要求实用组件的转换效率达到 25%。



实现时期 (开发完成)	2010 年以后	2020 年 (2017 年)	2030 年 (2025 年)	2050 年
发电价格	等同于家庭用电力价格(23 日元/kW·h)	等同于业务用电力价格(14 日元/kW·h)	等同于事业用电力价格(7 日元/kW·h)	作为通用电源而采用(7 日元/kW·h)
组件转换效率 (研究水平)	实用组件: 16% (研究中的电池: 20%)	实用组件: 20% (研究中的电池: 25%)	实用组件: 25% (研究中的电池: 30%)	超高效率组件: 40%
面向国内的产量 (GW/年)	0.5~1	2~3	6~12	25~35
面向海外的产量 (GW/年)	约 1	约 3	30~35	约 300
主要用途	用户住宅, 公共设施	住宅(住户, 集体宿舍) 公共设施, 事务所等	住宅(住户, 集体宿舍) 公共设施, 民生业务用电动汽车等的充电	各种民生用户产业用, 运输用农业等, 独立电源

图 2 太阳能光伏发电技术开发路线图 PV2030 plus

为了加速促进太阳能发电系统的导入, 在加快技术开发的同时, 需要实施普及优惠政策。在太阳能发电系统的价格中, 除了太阳电池的价格之外, 还包括辅助设备(逆变器等)及安装费用等。太阳电池在整个系统中所占的价格比例, 一般在 60%左右。

在分析太阳电池今后的发展时, 必须考虑的一个关键因素是能量转换效率。无论采用何种材料系统, 若转换效率不高, 则发电价格难以降低。特别是在转换效率很低的情况下, 与面积相关联的 BOS (balance of systems, 系统的平衡) 价格会变得很高。因此, 高转化效率是必须追求的目标。

根据发布太阳电池材料、电池片、组件等市售价格的互联网址 PV Insights. tom 的信息, 现在组件的平均现货价格为 1.87 美元/W, 制造设备的平均分散售价为 2.8 美元/W, 且呈不断下降趋势。而且, 据称是最便宜的美国 First Solar 公司的 CdTe 薄膜太阳能电池组件的制造价格, 已经下降到 1 美元/W。随着新材料的实用化, 这种价格必将成为业界竞相追逐的目标。

表 2 针对不同材料系统, 列出需要开发的课题。

表 2 针对不同材料系统需要开发的课题

材料系统	需要开发的课题
结晶 Si 太阳电池	• 极高品质（单晶水平）且低价格的浇铸 Si 晶片的开发（包括原料技术） • 硅片厚度为 50~100μm 的太阳电池制作工艺的开发 • 载流子复合速度接近零的表面钝化技术的开发 • Si 材料禁带宽度的控制（利用量子点、量子线等新概念）
薄膜系（Si, CIGS）	• 可完全抑制非晶 Si 光劣化的材料的开发 • 以多结（多串结）化为目标的新材料开发（非晶态系合金、新型黄铜矿化合物等） • 作为低成本工艺的非真空制造技术（特别是针对 CIGS 系） • 透明导电膜（光封闭技术，自由载流子（free carrier）吸收的抑制）
有机半导体、色素增感	• 提高转换效率，提高可靠性是最优先的课题
组件	• 可耐 40 年、50 年使用的组件技术及材料（特别是封装材料）
针对提高效率的技术革新	• 多激发子（multi exciton）、中间能带、等离子体振子（plasmon）等新概念的探索，以及与之相关的超高效率的验证 • 以转换效率 40% 为目标的薄膜多串结材料、器件结构的研发 • 化合物系以转换效率 50% 以上为目标的集光型太阳电池技术

首先，对于结晶 Si 系统，今后为了实现低价格化，必须将 Si 晶片的厚度从目前的 200 μm 减薄到 50 μm 。为此，最重要的技术课题是表面钝化。如果有可能将表面复合速度抑制到 0~1cm/s，则转换效率能做到比现在晶片厚度的情况更高。另外，为了在薄型电池的情况下获得高的光电流，还必须开发光封闭技术。进一步还要注重对质量不亚于单晶 Si（如载流子寿命不相上下）的浇铸多晶 Si 的开发。着眼于将来，期待开发以控制 Si 的禁带宽度为目的的量子点结构及 Si 纳米线结构，进一步将这些材料用于宽禁带顶部电池，以便制作 Si 串结型高转换效率太阳电池。

对于薄膜 Si 系，当前藉由 2 串结、3 串结结构以提高转换效率是紧迫的课题。为此，光吸收层的高品质化是最优先的开发项目。而且，若能完全抑制非晶硅的光劣化，即使单结电池也可期待 15% 左右的转换效率，因此，这也是紧跟前两项之后的重点研究开发课题。

对于 CIGS 系薄膜来说，在现存 Cu-In-Ga-Sn 系基础上，期待与 Al、Ag、S、Te 等相组一合等，开发丰富多彩的材料体系。进一步，代替 In 的 Sn Zn 系的开发也是刻不容缓的课题之一。现在，CIGS 太阳电池藉由硒化法已实现量产，但作为制膜方法，各种非真空工艺正在开发之中，采用这些低成本工艺实现量产

的技术开发正在如火如荼地进行。

对于有机半导体和色素增感太阳电池，提高适合于电力用途的组件效率和确立长期可靠性是优先课题。

进一步，对于现在可使用 20~30 年的组件的耐用性（寿命），要求提高到 40 年或 50 年，为此，需要开发的技术项目很多。如果组件的寿命提高到两倍，简单地讲，发电价格可期待降低到一半。

关于以 2050 年达到实用化为目标的革新型太阳电池的开发，包括多激发子（multiexciton）、中间能带（band）、等离子体振子（plasmon）等新概念的探索，以及利用这些原理的超高效率电池的证实，以转换效率 40% 为目标并与薄膜多串结材料相关的器件构成法的开发，采用单晶化合物系以转换效率 50% 为目标的集光型太阳能电池的技术开发等看来是必不可少的。作为新材料的探索和创新，人们对 SiGe 笼形包合物（clathrate）以及新型透明导电膜的开发等，将在更广泛的范围内继续坚韧地进行。

田民波

清华大学材料科学与工程系

第 2 版序言

“那里有光!” 1968 年 12 月, 当阿波罗 8 号在绕月球运转时, 宇航员第一次在寒冷的空间里, 看到了翠绿色的地球, 这是最初用人类文化表达最高技术的相关文献。这是一个对动态科学和工程非常自信的时刻, 几乎可以骄傲地说: 核电站的前景“便宜得无需装表计费”, 还有超音速客机、半导体器件、远程通信、新材料, 当然也包括硅太阳电池的出现和最早的应用等。我们关于地球蓝色的、光与水的运动星体的想象, 成了一个技术成就的象征, 但更多的是传达了一种认识, 即地球的脆弱和在原本空洞的宇宙中的孤立。当时, 我们有压倒性的信心, 藉由人类开创的新技术, 依靠能力、应用和资源, 任何事情都是有可能的。现在, 相反地, 也许一定程度上是基于对地球新的认识, 我们有一种悲观意识, 即大自然是人类无法控制的, 甚至完全蔑视我们的努力。正如福岛的地震和海啸, 或新奥尔良由飓风导致的洪水, 大自然可以摧毁我们最好的工程成就。在能源危机的背景下, 用整体的“系统”眼光看我们的世界, 我们的技术是破坏地球平衡的一个不可避免的结果, 该平衡使我们在蓝色星球上舒适地居住。地球的图像从荒芜的月球上传回, 这不仅作为环保运动的图标, 而且对保护我们自己、我们的技术、经济和社会永久地与地球协调提出了挑战。通过光电、光热系统, 也许遗传工程的光有机体, 并在每一个环节施加人类的智慧, 太阳光和太阳能资源的开发一定会为实现这一目标做出重要贡献。在 2007 年, 超过 80% 的主要商业能源的需求仍然由可燃矿物燃料提供, 这是对挑战的衡量。除了水电和核能, 其他真正意义上的地球上可用的能源技术, 特别是要消除能够诱发气候失衡的排放量, 在这个时候只有微小的贡献。为了决定性地改变这种状况, 需要的承诺可与阿波罗计划相比。这是一项艰巨的任务。

同时, 太阳能光伏发电正是提供所需要的可持续能源系统的一个选项, 这种可能性是存在的。照射到地球上的太阳光表示为连续的功率输出约为 173PW 或 $173 \times 10^{15} \text{ W}$; 而 1PW·h 的能量即高于全球每年的能源需求。但是, 在任何给定的位置, 它是一个低强度的和间歇的能源。必须提供大面积、低成本的系统用于入射太阳能的采集和转换; 当太阳能电力资源成为总装机容量的一个重要部分, 存储问题最终也将成为关键。

Practical Handbook of Photovoltaics 的修订是一个机会, 可望对了解和推广光伏发电技术做出贡献。作为本版的编辑, 我首先要感谢 Tom Markvart 和 Luis Castañer 在编辑第 1 版时开创性的工作。同时, 我要感谢本书的所有作者, 尤其是那些负责新的或大量修订章节的作者。能与这些专家, 在光伏科学和工程

基础开创方面做出了贡献的富有经验的研究人员，建立了光伏世界的一些著名的人物和许多当代的工艺行家互动，我倍感荣幸，正是通过他们的研究努力为未来做出贡献。我想提及参与了本手册编辑工作的两个人：Peter Landsberg 和 Roger Van Overstraeten，可悲的是，他们已经远离我们而去，但他们都值得尊敬与铭记，他们的工作仍然是有意义的。我也要感谢 Elsevier 出版公司的团队，没有他们，这项工作将不能得见天日，尤其是 Jill Leonard, Tiffany Gasbarrini 和 Meredith Benson。

因为形势发展瞬息万变，因此关于光伏产业目前的商业状况没有单独作为一章。市场和总装机的光伏发电能力连续按指数增长，自 2000 年以来，年增长率超过 40%。但是，确实如此，附录中汇总了对全行业的调查结果。这里要特别答谢意大利伊斯普拉欧洲委员会联合研究中心 Arnulf 博士的工作，因为他提供了最新的统计。光伏发电是目前增长最快的能源技术，累积装机容量从 1992 年的 100MW 增加到 2008 年的 14GW（国际能源机构数据，2010 年 10 月<http://www.iea.org/papers/2010/pv_roadmap.pdf>）。为维持且如有可能最好加速这一进程，以保护我们的地球与在 40 年前从太空中看到的一样，这是科学、工程、经济和社会共同参与的具有历史性担当和重大意义的事业，呼吁光伏发电技术在这一事业中发挥重大作用。

1. J. McEvoy

Lausanne, Switzerland

2011

（田民波 译）

第 1 版序言

光伏发电即将迎来其开创现代纪元的 50 周年。在此期间，该行业已经从小卫星电源供应成长到常规安装在世界上许多国家的公用事业规模系统。在 2002 年，制造出了发电功率超过 500MW 的太阳电池，为各种应用提供电力，从小型消费产品、独立的住宅发电系统和远程工业设备到建筑一体化的太阳电池阵列和兆瓦级发电站。

这本 *Practical Handbook of Photovoltaics* 解决了对总结这一领域当前状态的专门知识的书籍的需要。它代表了资料的详细来源，包括整个太阳能光伏发电的广度和来自世界各地顶级专家的贡献。超过 1000 篇文献、参考书目和网站引导读者获得进一步的细节，它为工业生产和科研提供具体信息或为决策者提供广泛概述。手册中的 37 章内容包括从太阳电池运行基础到工业生产过程，从分子光伏发电到系统建模，从太阳辐射的详细介绍到为安装工程师和电力工程师提供指导，从太阳电池的建筑一体化到能源回收、CO₂ 排放和光伏市场。附录包括大量的参考书目，相关标准的列表、期刊，以及其他可以通过印刷或电子形式获得的信息来源。

这本手册之所以成功，主要归功于每章的作者创作了一份有关当代光伏科学和技术知识的独一无二的资料汇编。

我们要感谢我们的家人，没有他们的耐心和支持，这本书将不能得见天日。

Luis Castañer

巴塞罗那

Tom Markvart

南安普顿

(田民波 译)

引 论

这本 *Practical Handbook of Photovoltaics* 旨在给出有关太阳光伏所有方面的详细概述，内容力求使其很容易地被专家和非专家接受。该手册反映了这种现代发电技术当前的状况，尽管已经处于成熟阶段，该技术仍然继续探索新方向，以提高性能和降低成本。但是，关注实用性方面并不意味着忽视基础研究和理论，这两者都在一定深度上加以覆盖，同时还涉及对环境的影响、商业方面和政策见解。

Part I 专门讨论太阳能电池制造技术。Part I A 给出的原理事项，包括太阳能电池运行的物理学、材料和模型化，以及基础理论框架，构成光伏器件各个方面的引论。Part I B 给出了晶硅技术的详细描述，从硅的制造和性能到以晶圆硅为基础的工业化和高效率太阳能电池，以及薄型硅太阳能电池。Part I C 讨论了薄膜太阳能电池的所有方面，包括非晶硅、CdTe、Cu(In, Ga)Se₂ 和它们的派生形式。介绍了取得快速进展的新型非晶/微晶硅电池。Part I D 侧重于介绍在空间和聚光系统中使用的高效率电池。Part I E 涉及基于分子结构的器件。

Part IV 讨论了地上用和空间用太阳能电池的测试和校准。对硅圆片和器件的材料表征方法的概述将在 III-1 找到。

太阳辐射已被称为光伏的燃料，它的特征形成了系统设计的基础，从阵列结构到据置独立光伏系统电力供应的可靠性。对太阳辐射形式的理解可以说是物理学最古老的部分，但是，直到最近才在某些细节上详细地理解了太阳能的统计特征。在 Part I 中详细地介绍了目前现有的一些先进计算机模型，同时总结了太阳辐射作为能量来源的相关方面，并考查了主要属性和现有计算机工具的限制。

Part III 讨论了系统工程。通过对光伏系统设计一般方面的概述来介绍这个领域，包括对相关模型化和模拟工具的评价。讨论了系统构件的平衡，提供了光伏系统中蓄电池运行的深入分析，以及电子控制和功率调节设备的概述。

Part III 从几个观点考虑了并网系统迅速增长的领域，考查了并网连接的技术和管理事项，以及民用系统的建筑和电力安装。分析了有关用户体验和性能指标的国际能源机构数据；评价了类似的系统监控主题。

此外，还介绍了太阳能电池作为一种消费产品的供电能源。讨论了可以说是光伏最令人兴奋的方面——新太阳能建筑的视觉冲击，它也给出这种新趋势的许多令人惊叹的实例。

Part IV 通过对支持机制的概述给出了世界光伏市场的深入分析。Part IV 也评价了太阳能电池制造中的潜在危害，并探讨了更广泛的环境问题，包括 CO₂ 排放

和能量回收期。

太阳电池的空间应用一直被认为是光伏产业中独特的和特殊的应用领域。器件的各个方面，包括辐照损伤，也进行了讨论，还对材料的有关方面进行了简要的介绍。II D-2 对太阳电池在空间环境中的运行，连同它的历史和太空使命要求给出了深入细致的回顾。

高效率电池在太空中的使用不受限制，但是在聚光系统中得到了越来越多的应用，对此，II D-1 做了介绍。Part II D 讨论了相应的太阳电池。

这本手册包括许多章节，这些章节中都包含了很强的科研要素。II A-3 讨论了太阳电池可以达到的最高效率。几十年来，晶硅光伏的高效率概念推动了该领域的进展，这在 I B-1 中进行了分析。Part I E 分析了染料敏化和有机/塑料太阳电池吸引了大量的科研投入。Part II D 和 II C-2 覆盖了工业生产和科研之间边界的广泛的领域，Part I C 中有关薄膜太阳电池的其他许多章节也是如此。

每个章节都给出了光伏科学和技术相关领域的完备概述。这些章节可以独立阅读，尽管丰富的交叉引用提供了它们之间的连接，遵循这个连接可以为手头上任何特定的应用建立一个知识库。对于非专家，在开始研究手册其他部分之前，Part I 和 II 这两个介绍章节可以作为一个起点。如果需要更多的教学方法，附加的章节和附录，包括参考书目，所选地点的太阳辐射数据，以及标准列表、网站和新闻报纸，将作为更详细的资料和教科书的指导。

(田民波 译)

目 录

第2版序言	xv
第1版序言	xix
编者	xx
引论	1
Part I A: 太阳电池	
I A-1. 太阳电池工作原理	7
<i>T. Markvart and L. Castañer</i>	
1. 引言	7
2. 电学特征	10
3. 光学特性	16
4. 经典太阳电池结构	19
I A-2. 半导体材料和模型化	33
<i>T. Markvart and L. Castañer</i>	
1. 引言	33
2. 半导体能带结构	34
3. 半导体中的载流子统计	38
4. 输运方程	40
5. 载流子迁移率	42
6. 光吸收作用下的载流子增殖	44
7. 复合	48
8. 辐射损伤	53
9. 重掺杂效应	55
10. 氢化非晶硅的性能	57
感谢	59
I A-3. 理想效率	63
<i>P. T. Landsberg and T. Markvart</i>	
1. 引言	63
2. 热力学效率	64
3. 与能量相关的效率	65
4. 使用肖特基太阳电池方程的效率	67
5. 对效率的一般解释	72

Part I B: 晶硅太阳电池

I B-1. 晶硅: 制造和性能	79
------------------------	----

F. Ferrazza

1. 引言	79
2. 用于光伏制造的硅晶片的特征	80
3. 原料硅	86
4. 晶体制备方法	87
5. 成形和硅片切割	94

I B-2. 高效率硅太阳电池概念	99
-------------------------	----

M. A. Green

1. 引言	100
2. 高效率实验室电池	100
3. 丝网印刷电池	111
4. 激光处理电池	116
5. HIT 电池	120
6. 背接触电池	121
7. 总结	124
致谢	125

I B-3. 晶硅太阳电池的低成本工业化技术	129
------------------------------	-----

J. Szlufcik, S. Sivothythaman, J. Nijs, R. P. Mertens and R. Van Overstraeten

1. 引言	130
2. 电池制程	131
3. 工业太阳电池技术	145
4. 商业光伏组件的成本	152

I B-4. 薄型硅太阳电池	161
----------------------	-----

M. Mauk, P. Sims, J. Rand and A. Barnett

1. 引言、背景和评价	162
2. 薄型硅太阳电池的光捕获	165
3. 薄型硅太阳电池的电压增强	174
4. 薄型太阳电池的硅沉积和晶体生长	179
5. 基于基板减薄的薄型硅太阳电池	188
6. 器件结果总结	190

Part IC: 薄膜技术

IC-1. 薄膜硅太阳电池	209
---------------------	-----

A. Shah

1. 引言	210
2. 氢化非晶硅 (a-Si: H) 层	215
3. 氢化微晶硅 ($\mu\text{c-Si: H}$) 层	225
4. p-i-n 和 n-i-p 结构的薄膜太阳能电池的功能	234
5. 串联和多结太阳能电池	252
6. 组件产品和性能	259
7. 总结	273
IC-2. CdTe 薄膜光伏组件	283

D. Bonnet

1. 引言	284
2. 制备 CdTe 薄膜太阳能电池的步骤	285
3. 集成组件的制备	303
4. CdTe 薄膜组件的生产	306
5. 产品及其应用	316
6. 未来展望	320
IC-3. Cu (In, Ga) Se ₂ 薄膜太阳能电池	323

U. Ran and H. W. Schock

1. 引言	324
2. 材料性能	325
3. 电池和组件技术	331
4. 器件物理	346
5. 宽带隙黄铜矿	354
6. 结论	361
致谢	362

IC-4. 为光伏应用的黄铜矿化合物半导体研究进展和研究成果转化为实际的太阳能电池产品	373
---	-----

A. Jäger-Waldau

1. 引言	374
2. 研究方向	375
3. 工业化	379
4. 结论和展望	390

Part I D: 空间太阳能电池和聚光电池

ID-1. GaAs 和高效率空间太阳能电池	399
------------------------------	-----