



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



Key Science and Technology of Thin Film Solar Cells



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

薄膜太阳电池 关键科学和技术

戴松元 主编

上海科学技术出版社



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书
出版规划项目



薄膜太阳能电池关键科学和技术

Key Science and Technology of
Thin Film Solar Cells

戴松元 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

薄膜太阳能电池关键科学和技术/戴松元主编. —上海: 上海科学技术出版社, 2013. 1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1555-7

I. ①薄… II. ①戴… III. ①薄膜太阳能电池—研究
IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 271891 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社
(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

上海中华商务联合印刷有限公司

开本 787×1092 1/16 印张: 26.25 插页: 4

字数 540 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1555-7/TM·35

定价: 120.00 元

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,
请向本社出版科联系调换

内容提要

本书主要介绍薄膜太阳能电池的物理基础、制备技术及其最新进展。重点介绍各种薄膜太阳能电池的光电性能,如硅基薄膜太阳能电池、碲化镉太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、染料敏化太阳能电池、聚合物太阳能电池和新型量子点太阳能电池等。结合薄膜太阳能电池技术的进展,讨论了硅基薄膜太阳能电池和碲化镉太阳能电池制作过程中的工艺技术及器件物理;剖析了铜铟镓硒太阳能电池材料组成、微结构和性能;分析了染料敏化太阳能电池关键材料的物理化学特性和电池光伏性能;阐述了聚合物太阳能电池的基本物理过程及其技术发展趋势;论述了基于新型量子点太阳能电池的材料设计与物理性质、电池制备与性能分析等。同时,本书还对薄膜太阳能电池组件实用化中的成套工艺装备技术和设计方案以及大面积半导体薄膜的均匀性、稳定性等的关键技术问题进行了产业化前景分析。

本书可供光伏太阳能电池行业理论研究与技术开发人员、生产企业技术管理人员与生产工人使用,也可供各高等院校相关专业师生学习参考。

《新能源出版工程》

学术顾问(以姓氏笔画为序)

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

编委会

主 任

倪维斗

委 员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翱 徐洪杰

殷承良 阎耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元

本书作者名录

第 1 章	戴松元	中国科学院等离子体物理研究所
	胡林华	中国科学院等离子体物理研究所
第 2 章	赵 颖	南开大学
	张晓丹	南开大学
第 3 章	戴松元	中国科学院等离子体物理研究所
第 4 章	孙 云	南开大学
	刘 玮	南开大学
第 5 章	戴松元	中国科学院等离子体物理研究所
	张昌能	中国科学院等离子体物理研究所
第 6 章	谭占鳌	华北电力大学
	李永舫	中国科学院化学研究所
第 7 章	朱 俊	中国科学院等离子体物理研究所
	史成武	合肥工业大学
	戴松元	中国科学院等离子体物理研究所

序言一

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质保障,是国民经济和社会发展的基础。随着人类能源需求的快速增长和全球对“温室效应”的关注,开发利用清洁能源正成为现在和未来世界能源科技发展的重要方面。我国目前以化石能源为主的能源结构受到资源和环境的制约。能源技术的储备与可持续发展直接影响我国的国家安全和现代化进程。我国可再生能源资源丰富。开发利用可再生能源,既对解决当前某些地区能源供需矛盾起一定的作用,并可节约和替代部分化石能源,促进能源结构的调整、减轻环境压力;更是实现未来能源和环境可持续发展,保障国家能源与环境安全,促进我国经济与社会可持续发展的战略措施之一。太阳能光伏发电将太阳能直接转化为电能,是一种清洁的可再生能源。太阳能光伏发电研究近十年来一直受到高度重视,并得到较快的发展。国际能源署(IEA)对太阳能光伏发电未来发展作出了2020年世界光伏发电的发电量占总发电量的2%的预测。正是基于上述背景,出版该书就显得非常有意义。

该书集中介绍了目前常见的各类薄膜太阳能电池,详细、客观地介绍了硅基薄膜太阳能电池、碲化镉太阳能电池、铜铟镓硒太阳能电池、染料敏化太阳能电池和有机聚合物太阳能电池等太阳能电池的基本过程、原理、主要技术和特点及技术发展前景,就最近几年发展的新材料、新结构和新概念太阳能电池进行了简要介绍。同时该书还重点分析和探讨了薄膜太阳能电池大面积制作技术及未来技术的突破前景。该书各章的作者基本上是我国在各个薄膜太阳能电池研发和大面积电池制作等方面的领军人物,书中很多内容和观点是亲身体会和认识。这当然也是该书的一个重要亮点。该书的出版期望能够对太阳能电池行业有所助益,对从事薄膜太阳能电池乃至光伏技术研究的研究生和专业人员提供帮助和指导。

在内容结构方面,该书首先集中地介绍了各类薄膜太阳能电池的技术优势和“瓶颈”技术。在随后的各个章节中,不仅总结和分析了各类薄膜太阳能电池的工作机制和材料制作方法,还重点介绍了各类薄膜太阳能电池的技术发展态势,对每种薄膜太阳能电池的发展和突破方向进行了评述。同时,从该书中也可以看出,各类薄膜太阳能电池在过去的十年中,都取得了长足的进步。部分

薄膜太阳能电池已达到中试规模。当然,但在今后多年内,大规模发展与应用仍然面临众多技术难题。实现薄膜太阳能电池规模化应用也将是很艰巨的工作和事业,仍需更多的思考。

该书的编者戴松元研究员从材料的组织到文字的撰写,以及后续的思考等方面,都颇具匠心,同时力求深入浅出和通俗易懂。该书即可作为青年科技人员的基础阅读材料,可能也会对纳米材料、电化学、薄膜物理等专业人士有所启发。相信该书的出版,将有助于我国薄膜光伏事业的发展和进步。

中国科学院院士

A handwritten signature in black ink, likely belonging to Dai Songyuan, the Chinese Academy of Sciences Academician mentioned in the text.

序言二

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质保障。随着我国经济的持续快速发展,人民生活水平逐步提高,能源消耗也随之快速增长。以煤炭为主的能源结构及过快增长的能源需求使我国能源和环境形势面临着严峻挑战。大力发展低碳可再生能源是实现能源和环境可持续发展的重要途径,越来越受到世界各国重视。作为可再生能源的重要应用领域,太阳能光伏发电在过去 10 年中得到了快速发展,全球太阳能电池产量平均年增长率超过 40%。据欧盟联合研究中心(JRC)预测,到 2030 年可再生能源在总能源结构中占到 30%以上,太阳能光伏发电在世界总电力的供应中达到 10%以上,到 21 世纪末可再生能源在能源结构中占到 80%以上,太阳能发电占到 60%以上,显示出重要的战略地位。

作为太阳能电池家族中的重要一员,薄膜太阳能电池有其巨大优势,是未来太阳能光伏发电的重要技术之一,其发展潜力巨大。随着薄膜太阳能电池技术的不断成熟,后发优势逐渐显现。在此之际,该部论述薄膜电池专著的出版有着重要意义。

该书集中介绍了目前常见各类薄膜太阳能电池的技术优势和“瓶颈”,分析和探讨了各类薄膜太阳能电池大面积制作的关键技术及未来技术上突破的前景;该书还就硅基薄膜、碲化镉、铜铟镓硒、染料敏化和有机聚合物等太阳能电池的基本原理、主要制作技术与特点和技术优势等做了详细、客观的介绍,并就最近几年发展的新型量子点太阳能电池进行了简要介绍。该书还就薄膜光伏的技术优势及更多多样性的应用领域和市场空间同其他技术进行了比较。

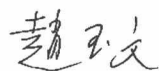
该书各章的作者基本上是我国在各类薄膜太阳能电池研发和大面积电池制作等方面的领军人物,也是我国“973”项目和“863”重点项目的主要负责人。书中很多内容和观点都是他们多年的实践体会和认识。该书的出版将会对太阳能电池行业有所助益,对从事薄膜太阳能电池乃至光伏技术研究的专业人员和研究人员提供帮助和指导。

该书的编著者戴松元研究员在大面积染料敏化太阳能电池关键技术等方面具有十多年的研发经历,深谙薄膜太阳能电池技术发展趋势;编著者在文字

撰写、章节组织及后续思考等方面颇具匠心,力求深入浅出,图文并茂,可读性很强。

光伏的发展并非一帆风顺,薄膜太阳能电池技术复杂,大面积工业化生产难度大,虽然未来会遇到诸多挑战,但凭其自身优势和潜力,其前景是美好的。相信该书的出版,将有助于我国薄膜光伏事业的发展和进步。

中国可再生能源学会副理事长 光伏专委会主任



前 言

人类利用太阳能有着悠久的历史,但将太阳能作为一种能源和动力加以利用,也仅有 300 多年的历史。伴随着半导体技术的进步和单晶硅太阳能电池的诞生,人类迎来了太阳能电池技术高速发展的时代。随着器件理论和光伏工业的发展,单晶硅太阳能电池效率不断提高而且技术逐渐成熟,并实现了并网运行。但由于工艺复杂和耗能耗材较多,单晶硅太阳能电池的发展受到技术上的限制,开发高效宽光谱薄膜太阳能电池技术日益受到人们的重视。薄膜太阳能电池有着良好的半导体物理和器件物理基础,我国从“七五”开始就大力加强薄膜太阳能电池的研发,并逐年增加薄膜太阳能电池科研经费的投入。“十一五”和“十二五”期间,国家重点基础研究发展计划(973 计划)先后七次对不同类薄膜太阳能电池进行立项研究;国家高技术研究发展计划(863 计划)先后对不同类薄膜太阳能电池及其成套关键设备技术进行立项研究,并加强新型薄膜太阳能电池探索性研究;国家自然科学基金委的各学科也加强了新概念太阳能电池探索和关键技术的研究。目前,具有自主知识产权的薄膜太阳能电池技术已在我国进行了中试,并逐步实现产业化。希望本书的出版对薄膜太阳能电池技术发展起到积极的推动作用。

本书主要介绍各种薄膜太阳能电池的器件物理、电池的组成与结构以及电池关键材料制备和工艺技术,对新型量子点太阳能电池也进行了阐述。与国内外已出版的同类书相比,本书主要阐述薄膜太阳能电池关键材料和组件制备技术问题,探讨了电池实用化技术。全书共分 7 章,重点介绍各种薄膜太阳能电池最新技术成果。其中第 1 章主要介绍了薄膜太阳能电池技术物理基础和研究现状,以及对高效宽光谱薄膜太阳能电池发展前景的思考。第 2 章主要介绍硅基薄膜太阳能电池制备技术和工艺原理,并深入讨论电池组件设计鉴定和定型等关键问题。第 3 章系统介绍了碲化镉太阳能电池制备技术与器件物理,讨论了薄膜制备和实用化技术问题。第 4 章主要介绍了铜铟镓硒太阳能电池材料组成、微结构和性能,对薄膜制备工艺进行了系统分析。第 5 章主要介绍染料敏化太阳能电池关键材料的物理化学特性与性能,并讨论大面积半导体薄膜的均匀性、稳定性以及实用化电池的成套工艺技术等关键问题。第 6 章主要对影响聚合物太阳能电池电荷收集的电极界面进行论述,讨论了聚合物薄膜

制备和电池实用化等问题。第7章主要介绍了新型量子点太阳能电池材料设计与工艺,并对电池效率提高的方法进行了展望。

本书材料来源于作者长期从事薄膜太阳能电池基础研究和技术研发所取得的研究成果,图文并茂,物理图像表述清晰。在编写过程中,作者参考了一些国内外有关领域最新进展的成果,引用了参考文献中的部分内容、图表和数据,在此特向书刊的作者表示诚挚的谢意。本书稿形成过程中,作者的博士生、硕士生和实验室研究人员对书中内容的形成作出了不同程度的贡献。此外,本书是在上海科学技术出版社的大力支持下出版的,作者对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢。

本书力求反映目前薄膜太阳能电池实用化技术发展现状及未来发展趋势,希望能有利于薄膜太阳能电池的进一步发展,有益于相关科研人员、博士生、硕士生和本科生的培养以及研究水平的提高,使读者对薄膜太阳能电池的未来发展有所启发,并希望能够成为有实用价值的光伏领域参考书。近年来,由于薄膜太阳能电池的迅速发展,新材料、新器件和新观点等不断涌现,限于作者知识水平,书中难免会出现不妥甚至错误之处,恳请各位专家学者和广大读者批评指正,以使本书再版中能得到改正。

作 者

目 录

第 1 章 薄膜太阳电池基础 / 1

- 1.1 太阳电池及薄膜太阳电池分类 / 2
 - 1.1.1 硅基薄膜太阳电池 / 2
 - 1.1.2 化合物半导体薄膜太阳电池 / 2
 - 1.1.3 染料敏化太阳电池 / 3
 - 1.1.4 有机聚合物太阳电池 / 3
- 1.2 薄膜太阳电池的物理基础 / 3
 - 1.2.1 硅基薄膜太阳电池 / 3
 - 1.2.2 碲化镉太阳电池 / 4
 - 1.2.3 铜铟镓硒太阳电池 / 4
 - 1.2.4 染料敏化太阳电池 / 5
 - 1.2.5 有机聚合物太阳电池 / 5
 - 1.2.6 新型太阳电池 / 6
- 1.3 薄膜太阳电池的研究现状 / 6
 - 1.3.1 硅基薄膜太阳电池 / 7
 - 1.3.2 碲化镉太阳电池 / 7
 - 1.3.3 铜铟镓硒太阳电池 / 8
 - 1.3.4 染料敏化太阳电池 / 9
 - 1.3.5 有机太阳电池 / 10
 - 1.3.6 新型太阳电池 / 10
- 1.4 薄膜太阳电池的未来发展 / 11
 - 1.4.1 硅基薄膜太阳电池 / 11
 - 1.4.2 碲化镉太阳电池 / 11
 - 1.4.3 铜铟镓硒太阳电池 / 11
 - 1.4.4 染料敏化太阳电池 / 11
 - 1.4.5 有机太阳电池 / 12
 - 1.4.6 新型太阳电池 / 12

参考文献 / 12

第2章 硅基薄膜太阳能电池 / 14

- 2.1 硅基薄膜材料的基本物性 / 14
 - 2.1.1 非晶硅(a-Si:H) / 14
 - 2.1.2 微晶硅($\mu\text{c-Si:H}$) / 27
 - 2.1.3 硅基合金薄膜 / 34
- 2.2 硅基薄膜材料制备技术 / 43
 - 2.2.1 简介 / 43
 - 2.2.2 非晶硅、微晶硅薄膜材料的生长 / 49
 - 2.2.3 工艺参数对微晶硅薄膜材料的影响 / 56
- 2.3 硅基薄膜太阳能电池制造技术、工艺原理 / 67
 - 2.3.1 硅基薄膜太阳能电池工作原理 / 67
 - 2.3.2 硅基薄膜太阳能电池分类 / 73
 - 2.3.3 玻璃衬底 a-Si/a-Si 双结太阳能电池制造技术 / 76
 - 2.3.4 不锈钢衬底 a-Si:H/a-SiGe:H/a-SiGe:H 三结太阳能电池制造技术 / 82
 - 2.3.5 溅射镀膜技术 / 86
 - 2.3.6 太阳能电池中的欧姆接触 / 94
- 2.4 薄膜太阳能电池组件设计鉴定和定型试验 / 102
 - 2.4.1 简介 / 102
 - 2.4.2 地面用薄膜光伏组件鉴定试验 / 107
 - 2.4.3 地面用薄膜光伏组件鉴定试验合格判据与认证程序 / 115
- 2.5 高效低成本硅基薄膜太阳能电池的发展瓶颈与关键技术 / 116
 - 2.5.1 限制高效低成本硅基薄膜太阳能电池发展的因素 / 116
 - 2.5.2 提高硅基薄膜电池效率的设计考虑 / 120
 - 2.5.3 硅基薄膜太阳能电池的技术展望 / 126
- 参考文献 / 127

第3章 碲化镉太阳能电池 / 131

- 3.1 II-VI族化合物半导体材料 / 131
 - 3.1.1 II-VI族化合物半导体材料的基本性质 / 131
 - 3.1.2 多晶薄膜的结构模型及性质 / 133
- 3.2 II-VI族化合物半导体薄膜的制备技术 / 136
 - 3.2.1 近空间升华 / 136
 - 3.2.2 电沉积 / 139
 - 3.2.3 共蒸发 / 140
 - 3.2.4 化学浴沉积 / 140

- 3.2.5 后处理对薄膜性质的影响 / 141
- 3.3 碲化镉太阳能电池的结构、制备技术及器件物理 / 143
 - 3.3.1 碲化镉太阳能电池的发展概况 / 143
 - 3.3.2 碲化镉太阳能电池的器件物理 / 146
- 3.4 碲化镉太阳能电池的几项特殊技术 / 150
 - 3.4.1 碲化镉薄膜的后处理 / 150
 - 3.4.2 碲化镉薄膜的表面刻蚀 / 151
 - 3.4.3 几种成功的背接触层技术 / 152
- 3.5 碲化镉太阳能电池制造和使用中的安全问题 / 153
- 3.6 碲化镉太阳能电池的发展趋势 / 154
- 参考文献 / 155

第4章 铜铟镓硒太阳电池 / 158

- 4.1 简介 / 158
 - 4.1.1 CIGS 太阳电池的发展历程 / 158
 - 4.1.2 CIGS 太阳电池的制备工艺 / 160
 - 4.1.3 大面积 CIGS 电池组件与工业化发展 / 160
 - 4.1.4 CIGS 太阳电池特点 / 162
 - 4.1.5 CIGS 太阳电池研究的热点与趋势 / 164
- 4.2 CIGS 太阳电池结构与工作原理 / 166
 - 4.2.1 CIGS 太阳电池结构 / 166
 - 4.2.2 CIGS 太阳电池能带结构及工作原理 / 167
 - 4.2.3 CIGS 太阳电池异质结特点 / 168
 - 4.2.4 CIGS 太阳电池量子效率 / 168
- 4.3 CIGS 太阳电池吸收层 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 薄膜 / 171
 - 4.3.1 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 薄膜材料结构与特性 / 171
 - 4.3.2 CIGS 薄膜材料的制备方法 / 175
 - 4.3.3 $\text{Cu}, \text{In}, \text{Ga}$ 在硒化过程中的相变 / 187
- 4.4 CIGS 太阳电池过渡层薄膜 / 199
 - 4.4.1 CdS 薄膜结构与特性 / 200
 - 4.4.2 CBD 法沉积 CdS 薄膜 / 201
 - 4.4.3 CdS 与 CIGS 薄膜之间的界面 / 206
 - 4.4.4 ZnS 薄膜及无 Cd 过渡层的 CIGS 太阳电池 / 209
- 4.5 CIGS 太阳电池金属背电极 / 213
 - 4.5.1 溅射工作气压对 Mo 薄膜性能的影响 / 214
 - 4.5.2 衬底温度对直流溅射 Mo 薄膜的影响 / 217

- 4.5.3 气体流量对溅射 Mo 薄膜的影响 / 219
- 4.5.4 不同类型 Mo 衬底对 CIGS 吸收层的影响 / 219
- 4.6 CIGS 太阳能电池窗口层材料 / 221
 - 4.6.1 窗口层 ZnO 薄膜 / 222
 - 4.6.2 ZnO 薄膜的制备 / 224
- 4.7 CIGS 太阳能电池发展方向 / 228
- 参考文献 / 229

第 5 章 染料敏化太阳能电池 / 232

- 5.1 太阳能电池结构和原理 / 232
- 5.2 纳米多孔薄膜特性与制备方法 / 234
 - 5.2.1 衬底材料 / 234
 - 5.2.2 半导体薄膜材料 / 234
 - 5.2.3 纳米 TiO_2 半导体薄膜掺杂与表面修饰 / 244
 - 5.2.4 纳米多孔薄膜性能表征 / 253
- 5.3 染料光敏化剂 / 254
 - 5.3.1 无机染料 / 254
 - 5.3.2 有机染料 / 256
 - 5.3.3 羧酸多吡啶染料的性能 / 257
- 5.4 电解质 / 261
 - 5.4.1 氧化还原电对 / 261
 - 5.4.2 无机阳离子 / 263
 - 5.4.3 添加剂 / 263
 - 5.4.4 液态电解质 / 263
 - 5.4.5 离子液体电解质 / 264
 - 5.4.6 液晶电解质 / 267
 - 5.4.7 准固态电解质 / 268
 - 5.4.8 固态电解质 / 272
- 5.5 对电极 / 274
 - 5.5.1 镀 Pt 对电极 / 274
 - 5.5.2 碳对电极 / 276
 - 5.5.3 柔性 DSC 对电极 / 276
- 5.6 制备与工艺 / 276
 - 5.6.1 影响薄膜丝印的质量因素 / 277
 - 5.6.2 工艺控制对薄膜性能的影响 / 278
 - 5.6.3 电极层压密封 / 279