

半导体科学与技术丛书

太阳能电池基础与应用 (第二版)

(上 册)

朱美芳 熊绍珍 主编



科学出版社

www.sciencep.com

014033501

TM914.4

31-2

V1

半导体科学与技术丛书

太阳电池基础与应用(第二版)

(上册)

朱美芳 熊绍珍 主编



科学出版社

北京



北航

C1722005

TM914.4
31-2
V1

内 容 简 介

本书较系统地介绍与阐述太阳电池的物理基础及运作原理、各类电池的研究进展及光伏发电应用的基本问题。全书上、下册共 12 章,第 1 章详细介绍太阳电池的发展以及由此引出的物理思考。第 2 章就光伏材料基本性质、电池工作原理、参数表征及理论模拟进行基础性分析。随后各章分别介绍各类电池的基本结构、技术特点、产业化与展望,其中包括:晶体硅电池(第 3 章);Ⅲ-V 族化合物电池(第 4 章);各种薄膜电池如硅基薄膜电池(第 5 章);CIGS 电池(第 6 章);CdTe 电池(第 7 章)及染料敏化与有机电池(第 8 章,第 9 章)。第 10 章介绍了高效“新概念”电池的基础理论与技术进展。第 11 章和第 12 章分别就太阳电池、组件以及光伏系统性能测试与光伏发电等相关应用问题,结合实际进行了较为全面与系统的介绍。

本书可作为高等院校高年级本科生、研究生、相关教师的教材或参考书,也可作为从事光伏与光电子器件领域科研人员与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池基础与应用. 上册/朱美芳,熊绍珍主编. —2 版. —北京:科学出版社,2014.3

ISBN 978-7-03-039789-8

I. ①太… II. ①朱…②熊… III. ①太阳能电池 IV. ①TM914.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 029152 号

责任编辑:钱 俊 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:陈 敬

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

*

2009 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 3 月第 二 版 印张:28 1/4

2014 年 3 月第四次印刷 字数:540 000

定价:148.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《太阳能电池基础与应用(第二版)》编撰人员名录

- | | | |
|------|-----|---|
| 第1章 | 熊绍珍 | 南开大学 |
| 第2章 | 朱美芳 | 中国科学院大学 |
| | 熊绍珍 | 南开大学 |
| 第3章 | 施正荣 | 尚德电力控股有限公司 |
| 第4章 | 向贤碧 | 中国科学院半导体研究所 |
| | 廖显伯 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第5章 | 阎宝杰 | 胜华电光公司(Wintek Electro-Optics Corporation) |
| | 廖显伯 | 中国科学院半导体研究所 |
| 第6章 | 李长键 | 南开大学 |
| | 张 力 | 南开大学 |
| 第7章 | 刘向鑫 | 中国科学院电工研究所 |
| 第8章 | 戴松元 | 中国科学院等离子体研究所 |
| 第9章 | 朱永祥 | 华南理工大学 |
| | 陈军武 | 华南理工大学 |
| | 曹 镛 | 华南理工大学 |
| 第10章 | 朱美芳 | 中国科学院大学 |
| 第11章 | 李长键 | 南开大学 |
| | 翟永辉 | 中国科学院电工研究所 |
| 第12章 | 王斯成 | 国家发展和改革委员会能源研究所 |
| | 王一波 | 中国科学院电工研究所 |
| | 许洪华 | 中国科学院电工研究所 |

《半导体科学与技术丛书》编委会

名誉顾问:王守武 汤定元 王守觉

顾问:(按姓氏汉语拼音排序)

陈良惠 陈星弼 雷啸霖 李志坚 梁骏吾 沈学础
王 圩 王启明 王阳元 王占国 吴德馨 郑厚植
郑有炘

主 编:夏建白

副 主 编:陈弘达 褚君浩 罗 毅 张 兴

编 委:(按姓氏汉语拼音排序)

陈弘毅 陈诺夫 陈治明 杜国同 方祖捷 封松林
黄庆安 黄永箴 江风益 李国华 李晋闽 李树深
刘忠立 鲁华祥 马骁宇 钱 鹤 任晓敏 邵志标
申德振 沈光地 石 寅 王国宏 王建农 吴晓光
杨 辉 杨富华 余金中 俞育德 曾一平 张 荣
张国义 赵元富 祝宁华

《半导体科学与技术丛书》出版说明

半导体科学与技术在 20 世纪科学技术的突破性发展中起着关键的作用,它带动了新材料、新器件、新技术和新的交叉学科的发展创新,并在许多技术领域引起了革命性变革和进步,从而产生了现代的计算机产业、通信产业和 IT 技术。而目前发展迅速的半导体微/纳电子器件、光电子器件和量子信息又将推动本世纪的技术发展和产业革命。半导体科学技术已成为与国家经济发展、社会进步以及国防安全密切相关的重要的科学技术。

新中国成立以后,在国际上对中国禁运封锁的条件下,我国的科技工作者在老一辈科学家的带领下,自力更生,艰苦奋斗,从无到有,在我国半导体的发展历史上取得了许多“第一个”的成果,为我国半导体科学技术事业的发展,为国防建设和国民经济的发展做出过有重要历史影响的贡献。目前,在改革开放的大好形势下,我国新一代的半导体科技工作者继承老一辈科学家的优良传统,正在为发展我国的半导体事业、加快提高我国科技自主创新能力、推动我们国家在微电子和光电子产业中自主知识产权的发展而顽强拼搏。出版这套《半导体科学与技术丛书》的目的是总结我们自己的工作成果,发展我国的半导体事业,使我国成为世界上半导体科学技术的强国。

出版《半导体科学与技术丛书》是想请从事探索性和应用性研究的半导体工作者总结和介绍国际和中国科学家在半导体前沿领域,包括半导体物理、材料、器件、电路等方面的进展和所开展的工作,总结自己的研究经验,吸引更多的年轻人投入和献身到半导体研究的事业中来,为他们提供一套有用的参考书或教材,使他们尽快地进入这一领域中进行创新性的学习和研究,为发展我国的半导体事业做出自己的贡献。

《半导体科学与技术丛书》将致力于反映半导体学科各个领域的基本内容和最新进展,力求覆盖较广阔的前沿领域,展望该专题的发展前景。丛书中的每一册将尽可能讲清一个专题,而不求面面俱到。在写作风格上,希望作者们能做到以大学高年级学生的水平为出发点,深入浅出,图文并茂,文献丰富,突出物理内容,避免冗长公式推导。我们欢迎广大从事半导体科学技术研究的工作者加入到丛书的编写中来。

愿这套丛书的出版既能为国内半导体领域的学者提供一个机会,将他们的累累硕果奉献给广大读者,又能对半导体科学和技术的教学和研究起到促进和推动作用。

夏建白

2005 年 3 月 16 日

第二版前言

光伏发电作为洁净的可再生能源,在改变现有能源结构、改善生态环境,以及未来能源中将占据重要地位,已成为世界各国极为关注的领域。自贝尔实验室的第一个晶体硅太阳电池起,太阳电池的研发至今已半个世纪有余,但从未像现在这样受到高度重视与蓬勃发展。

《太阳能电池基础与应用》一书于2009年10月出版。在本书出版后的这几年中,以提高电池效率、降低电池成本为主要目标的技术取得了大的发展。太阳电池的新技术成果不断涌现,各类太阳电池的世界纪录不断刷新,特别是产业化中太阳电池组件效率与成本明显下降;光伏发电应用市场得到迅速发展,成为新能源市场不可或缺的领域;有机太阳电池的高速进展,是由电池新材料研发带动的新技术、新工艺与出现新型太阳电池为典型代表;过去纯属“新概念”的高效太阳电池的实验研究,其理论模型亦得以部分验证。为能反映光伏技术领域的快速发展,本书作者本着实时更新的觉悟,决定编写第二版。为规范对太阳电池的称谓,第二版的书名为《太阳电池基础与应用》。

本书旨在全面、深入地介绍光伏器件的工作原理及特性参数、各类电池的结构与制备技术及发展前景,并涉及光伏器件的应用及新型电池的基本概念,同时希望尽可能地反映目前科研和生产的最先进水平和技术,力求写成一本既具有较深基础理论又有实用价值,既有实际指导意义又具有科学前瞻性的光伏书籍,使读者对未来光伏器件发展的新概念和新技术有所启示,能够成为有参考价值的教科书与光伏研究人员的参考书。

本书第二版对各类电池进行了全面的介绍。基于“既具有扎实基础理论又有实用价值,既有实际指导意义又有科学前瞻性的光伏书籍”的宗旨,各章作了必要的修改,特别是跟进太阳电池的新概念、新技术、新成果与光伏各领域的新进展。在第二版中,我们增添了三章;CdTe薄膜太阳电池列为第7章。将发展极为迅速的有机聚合物太阳电池从原来的染料敏化电池章节中分出,作了充实与展开,独立为第9章。为了增加与光伏应用有关的内容,将测试部分与应用分开,增设第11章太阳电池与组件的测试以及第12章光伏发电系统及应用。希望改版后的内容能给读者提供更为全面与有益的帮助。

本书第二版上、下册共12章,从内容而言分四个方面:

- (1) 太阳电池的发展史与基础理论(第1章,第2章);
- (2) 各类电池的基本结构、技术特点、产业化与展望(第3章~第9章);

(3) 新概念电池的详细阐述及进展(第 10 章);

(4) 光伏电池测试与光伏发电应用的基本问题(第 11 章,第 12 章)。

本书各章主笔均是长期工作在光伏领域第一线的专家,他们不仅就太阳能电池的原理以及相关技术深入浅出地进行概括与阐述,并总结了在第一线进行科研与生产指导的丰富经验,提供了及时的参考文献。十分感谢他们对本书付出大量的伏案工作,为提高本书的质量提供了保证。

特别感谢陈文浚研究员对本书第 4 章的审阅,孙云教授对本书第 6 章的审阅,吴选之研究员对本书第 7 章的审阅,肖志斌研究员对测试有关部分的审阅。

在编写过程中,作者力求物理图像表述清晰、数学推导准确、文字叙述流畅。但由于时间紧迫,作者学识有限,不足与疏漏难免,衷心希望得到广大读者和同行的批评、指正。

作 者

2013 年 12 月

第一版序言

当今,越来越多的人认为,不论是通过光热途径还是光伏途径,直接应用太阳能不可避免地将成为人类使用能源的方式,特别是,这种方式将成为人类最终使用能源的重要组成部分。太阳能将在 21 世纪(或者可能在 22 世纪内)世界范围内直接替代数十亿吨人类现在主要使用的化石能源。太阳能具有环境友好特性,当前太阳能的一些直接应用,特别是前面提到的“光明前景”,驱使人们在言论中、在宣传上、在各国政策方面、在直接或风险投资方面都给予太阳能事业越来越强烈的支持。世界各国也确立了更多的太阳能项目,其中有一些在十万千瓦以上。这些情况的确使人激动,也将以前所未有的力量与速度推动整个太阳能事业,使太阳能大规模的使用更早到来。就拿我国来说,未来如果十几亿人都能过上“小康”的现代生活;如果我国要有与其他发达国家相比的生产能力与防卫能力;如果我国要承担在世界上应承担的责任,即便节能水平能与美、欧、日相当,到 2050 年左右我国能耗也将达到 40 亿~50 亿吨标煤以上,我国发电能力也将达十几亿千瓦电功率。有些人还认为这些是比较保守的估计,因为到那时我国人均年能耗也只约是美国的 1/3,西欧和日本的一半。长期支撑这样大的能耗,并考虑到我国资源情况及国际环境和我国的环境状况,到 22 世纪初如果不能用非化石能源,如核能、太阳能,替代相当一部分化石能源,我们国家、我们民族的发展都会受重大影响。因此,大规模推进太阳能的发展和应用,对我国尤为重要。这里特别强调的是着眼于为大规模发展太阳能、使太阳能在我国整个能源结构中占相当比重而去工作、去布局。在上述背景下,出版该书是非常有意义的。该书比较公正、全面介绍各主要光伏太阳能的途径,它们的基本过程及主要技术,它们各自的特点及发展前景。该书各章的作者基本上都是我国在各光伏太阳能途径上研究、开发的领军人物,因此各章除了介绍各途径外,对途径发展的分析和讨论,也是有很多亲身体会和真知灼见的。应该说,这些体会和见解是我国多年来发展太阳能工作的收获,在某种程度上的凝练。这是该书与其他介绍太阳能书籍的一个区别。对于今后越来越多投身太阳能事业的年轻科技工作者来说,阅读该书应该有可能得到更多的收益,产生一些真正的潜移默化。

从该书的结构也可以看出,在今后很多年内,发展大规模太阳能资源都将是非常艰巨的工作和事业,当今也还只能看成是事业的起始。对所涉及的各种光伏太阳能,各有各的优点,也各有各的问题,尽管都发展多年,但都还未能确切地判断其是否适合于大规模发展。此外,由于太阳能的一些特点,如何在国家能源网络中接

纳一定比例的太阳能,是从现在开始就必须考虑或准备的。例如,是否要发展大规模氢能系统,作为存储及传送太阳能及其他非均匀产能能源(如风能等)的调整、分配,或作为整个能源系统中的储能系统;如果以光伏太阳能途径为主,则发展和建设一个能接纳一定比例非均匀光伏电能输入的电网,其难度也不亚于建设相应规模的光伏电站。这些问题,通常的“环保人士”是不太会提及的,但却是从事太阳能事业的科技工作者、从事当前光伏应用的人士所必须考虑、必须反映的。

相信该书的出版,将会促进我国太阳能事业的发展与扩大。

霍裕平

中国科学院院士 郑州大学教授

2009年7月1日

第一版前言

面临严峻的能源形势和生态环境的恶化,改变现有能源结构、发展可持续发展的绿色能源已成为世界各国极为关注的课题。太阳能电池是从太阳获得洁净能源的主要途径之一,虽然从太阳能电池的发明到现在已有半个世纪,但从来没有像现在这样受到重视和获得高速的发展。《太阳能电池基础与应用》一书受到这样的大环境的推动,成为科学出版社的《半导体科学与技术丛书》之一。

本书旨在全面、深入地介绍光伏器件的工作原理及特性参数、各类电池的结构与制备技术及发展前景,并涉及光伏器件的应用及新型电池的基本概念。同时希望尽可能地反映目前科研和生产的最先进的水平和技术。力求写成一本既有较深基础理论又有实用价值,有实际指导意义又有前瞻性科学意义的光伏书籍,使读者对未来光伏器件发展的新概念和新技术有所启示,并能够成为有参考价值的教科书与光伏电池研究人员的参考书。

本书共分9章。从内容而言分4个层面:

- 太阳电池的发展史与基础理论(第1章,第2章);
- 各类电池的基本结构、技术特点、产业化与展望(第3~7章);
- 光伏应用的基本问题与示例(第8章);
- 新概念电池的详细阐述,现状与展望(第9章)。

本书各章的主笔均是长期工作在光伏领域第一线的人员与工程技术人员。以他们在进行科研与生产指导时的丰富学识和专业经验,就太阳能电池的原理、相关技术,系统地进行了概括与阐述。

其中第1章由熊绍珍编写,该章详细介绍了太阳能电池的发展史,以及由此引出的物理与发展前景的思考。第2章由朱美芳和熊绍珍编写,主要内容为光伏电池的物理基础,包括半导体材料与物理的基本性质、太阳能电池工作原理、参数表征及模拟计算等。该章为后续各章提供了必要的基础知识。第3章由施正荣编写,主要介绍晶体硅太阳能电池及其组件,特别讨论了高效晶体硅电池产业化前沿中的重要问题。第4章由向贤碧及廖显伯编写,主要叙述高效Ⅲ-V族化合物电池的发展和展望。第5章由阎宝杰与廖显伯编写,该章全面介绍了硅基薄膜材料与电池的基本性质,硅基薄膜电池的不同结构与工艺,并深入讨论了产业化中的关键问题。第6章是由李长健编写的铜铟镓硒化合物薄膜电池,该章全面介绍了铜铟镓硒薄膜材料的基本性质,电池结构与制备技术,讨论了该电池的发展动向。第7章由戴松元与李永舫编写,该章对染料敏化电池与有机电池进行了比较系统深入

的介绍。第8章由王斯成与李长健编写,该章系统地介绍了太阳能电池实际应用中的相关技术,并结合实际,给出了有意义的示例。最后,第9章由朱美芳编写,该章主要介绍了太阳能电池的理论极限效率,以及为获得高的光电转换效率所提出的各类新概念太阳能电池,电池的基本物理过程及技术展望,给读者以深入思考的空间。

我们特别感谢王占国院士、耿新华教授、孙云教授、林原研究员和翟永辉研究员分别对本书第4章,第5章,第6章,第7章与第8章的审阅。该书受到国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202600)的资助。特别感谢973项目首席专家戴松元研究员与赵颖教授对本书编写过程中的多方面支持。

在编写过程中,作者力求物理图像表述清晰,数学推导准确,文字叙述流畅。主编最后对全书各章进行了仔细评阅与校对。但由于作者学识有限,时间紧迫,错误及遗漏难免。特别是,本书的出版与近年光伏电池的许多创新性的结果,尤其是与光伏产业年均增长50%以上的高速发展相比,仍有不够全面与完善之处。衷心希望能得到广大读者和同行的批评、指正,以便在后续再版中不断完善。

作者

2009年5月

《半导体科学与技术丛书》已出版书目

(按出版时间排序)

- | | | |
|-------------------------|--|-------------|
| 1. 窄禁带半导体物理学 | 褚君浩 | 2005 年 4 月 |
| 2. 微系统封装技术概论 | 金玉丰 等 | 2006 年 3 月 |
| 3. 半导体异质结物理 | 虞丽生 | 2006 年 5 月 |
| 4. 高速 CMOS 数据转换器 | 杨银堂 等 | 2006 年 9 月 |
| 5. 光电子器件微波封装和测试 | 祝宁华 | 2007 年 7 月 |
| 6. 半导体科学与技术 | 何杰, 夏建白 | 2007 年 9 月 |
| 7. 半导体的检测与分析(第二版) | 许振嘉 | 2007 年 8 月 |
| 8. 微纳米 MOS 器件可靠性与失效机理 | 郝跃, 刘红侠 | 2008 年 4 月 |
| 9. 半导体自旋电子学 | 夏建白, 葛惟昆, 常凯 | 2008 年 10 月 |
| 10. 金属有机化合物气相外延基础及应用 | 陆大成, 段树坤 | 2009 年 5 月 |
| 11. 共振隧穿器件及其应用 | 郭维廉 | 2009 年 6 月 |
| 12. 太阳能电池基础与应用 | 朱美芳, 熊绍珍 等 | 2009 年 10 月 |
| 13. 半导体材料测试与分析 | 杨德仁 等 | 2010 年 4 月 |
| 14. 半导体中的自旋物理学 | M. I. 迪阿科诺夫 主编
(M. I. Dyakanov)
姬扬 译 | 2010 年 7 月 |
| 15. 有机电子学 | 黄维, 密保秀, 高志强 | 2011 年 1 月 |
| 16. 硅光子学 | 余金中 | 2011 年 3 月 |
| 17. 超高频激光器与线性光纤系统 | [美]刘锦贤 著
谢世钟 等译 | 2011 年 5 月 |
| 18. 光纤光学前沿 | 祝宁华, 闫连山, 刘建国 | 2011 年 10 月 |
| 19. 光电子器件微波封装和测试(第二版) | 祝宁华 | 2011 年 12 月 |
| 20. 半导体太赫兹源、探测器与应用 | 曹俊诚 | 2012 年 2 月 |
| 21. 半导体光放大器及其应用 | 黄德修, 张新亮, 黄黎蓉 | 2012 年 3 月 |
| 22. 低维量子器件物理 | 彭英才, 赵新为, 傅广生 | 2012 年 4 月 |
| 23. 半导体物理学 | 黄昆, 谢希德 | 2012 年 6 月 |
| 24. 氮化物宽禁带半导体材料与电子器件 | 郝跃, 张金凤, 张进成 | 2013 年 1 月 |
| 25. 纳米生物医学光电子学前沿 | 祝宁华 等 | 2013 年 3 月 |
| 26. 半导体光谱分析与拟合计算 | 陆 卫 傅 英 | 2014 年 2 月 |
| 27. 太阳能电池基础与应用(第二版)(上册) | 朱美芳, 熊绍珍 | 2014 年 3 月 |

目 录

第二版前言

第一版序言

第一版前言

(上册)

第 1 章 光伏发电——人类能源的希望	1
1.1 光伏能源是环境友好的最佳选择	1
1.1.1 能源是当今社会发展水平的标志	1
1.1.2 太阳能是未来能源的主力	4
1.2 光伏发展历史的启示——寻找新材料,开发新技术,开拓新领域	9
1.2.1 太阳能电池工作原理	10
1.2.2 新材料带动技术的跨越	12
1.2.3 新结构、新技术带动效率的提升	18
1.2.4 下一代电池的启示	25
参考文献	32
第 2 章 光伏原理基础	36
2.1 半导体基础	36
2.1.1 半导体材料结构与表征	36
2.1.2 半导体中电子态与能带结构	39
2.1.3 半导体中的杂质与缺陷	45
2.1.4 平衡态载流子分布	47
2.1.5 半导体光吸收	51
2.1.6 非平衡载流子产生与复合	53
2.1.7 载流子输运性质	60
2.2 半导体 pn 结基础	65
2.2.1 热平衡的 pn 结	65
2.2.2 pn 结伏安特性	69
2.2.3 pn 结电容	75
2.2.4 异质结	76
2.2.5 隧道结	84

2.3 太阳电池基础	86
2.3.1 光生伏特效应	87
2.3.2 太阳电池电流-电压特性分析	87
2.3.3 太阳电池性能表征	91
2.3.4 量子效率谱	93
2.3.5 太阳电池效率分析	96
2.3.6 太阳电池效率损失分析	104
2.3.7 p-i-n 结电池	105
2.4 太阳电池器件模拟	106
2.4.1 器件模拟的意义	106
2.4.2 硅基薄膜电池的电学模型示例	109
2.4.3 硅基薄膜电池的光学模拟	115
2.4.4 模拟计算示例	121
参考文献	129
第3章 晶体硅太阳电池	134
3.1 晶体硅太阳电池技术的发展	134
3.1.1 简介	134
3.1.2 早期的硅太阳电池	134
3.1.3 传统的空间电池	136
3.1.4 背面场	137
3.1.5 紫电池	138
3.1.6 “黑体电池”	139
3.1.7 表面钝化	141
3.1.8 PERL 电池设计	147
3.1.9 总结	151
3.2 高效电池的产业化	152
3.2.1 介绍	152
3.2.2 丝网印刷电池	152
3.2.3 埋栅太阳电池	156
3.2.4 IBC 电池	158
3.2.5 HIT 电池	162
3.2.6 Pluto 电池	170
参考文献	177
第4章 高效Ⅲ-V族化合物太阳电池	183
4.1 Ⅲ-V族化合物材料及太阳电池的特点	183

4.2 III-V 族化合物太阳电池的制备方法	187
4.2.1 液相外延技术	187
4.2.2 金属有机化学气相沉积技术	188
4.2.3 分子束外延技术	190
4.3 III-V 族单结太阳电池	191
4.3.1 GaAs/GaAs 同质外延单结太阳电池	191
4.3.2 GaAs/Ge 异质外延单结太阳电池	193
4.4 III-V 族高效多结叠层太阳电池	196
4.4.1 GaAs 基系叠层太阳电池工作原理	196
4.4.2 GaAs 基系两结和三结叠层太阳电池	199
4.4.3 GaAs 基系更多结(4 结以上)叠层太阳电池	204
4.4.4 GaAs/GaSb 机械叠层太阳电池	208
4.5 III-V 族聚光太阳电池	209
4.5.1 聚光太阳电池的特点	209
4.5.2 晶格匹配 GaInP/GaInAs/Ge 三结叠层聚光电池	210
4.5.3 晶格应变 GaInP/GaInAs/Ge 三结叠层聚光电池	210
4.5.4 晶格应变 GaInP/GaAs/GaInAs 三结叠层聚光电池	212
4.5.5 GaInP/GaAs/GaInNAs(Sb)三结叠层聚光电池	213
4.5.6 III-V 族太阳电池聚光系统	215
4.6 III-V 族太阳电池的空间应用	216
4.7 III-V 族化合物太阳电池的研究热点	219
4.7.1 薄膜型 III-V 族太阳电池	219
4.7.2 III-V 族量子阱、量子点太阳电池	220
4.7.3 热光伏电池	224
4.7.4 分光谱太阳电池的研究	225
4.7.5 其他类型新概念太阳电池	225
参考文献	227
第 5 章 硅基薄膜太阳电池	232
5.1 引言	232
5.2 硅基薄膜物理基础及其材料特性	233
5.2.1 硅基薄膜材料的研究历史和发展现状	233
5.2.2 非晶硅基薄膜材料的结构和电子态	234
5.2.3 非晶硅基薄膜材料的电学特性	239
5.2.4 非晶硅基薄膜材料的光学特性	241
5.2.5 非晶硅基薄膜材料的光致变化	248

5.2.6 非晶硅碳和硅锗合金薄膜材料	252
5.2.7 微晶硅及纳米硅薄膜材料	253
5.3 非晶硅基薄膜材料制备方法和沉积动力学	260
5.3.1 非晶硅薄膜材料制备方法	260
5.3.2 硅基薄膜材料制备过程中的反应动力学	280
5.3.3 硅基薄膜材料的优化	285
5.4 硅基薄膜太阳电池结构及工作原理	297
5.4.1 单结硅基薄膜太阳电池的结构及工作原理	297
5.4.2 薄膜硅太阳电池中的陷光效应	310
5.4.3 多结硅基薄膜太阳电池的结构及工作原理	325
5.4.4 硅薄膜太阳电池的计算机模拟	333
5.5 硅基薄膜太阳电池制备技术及产业化	334
5.5.1 以玻璃为衬底的硅基薄膜太阳电池制备技术	335
5.5.2 柔性衬底,卷到卷非晶硅基薄膜太阳电池制备技术	338
5.6 硅基薄膜太阳电池的产业化:现状、发展方向以及未来的展望	341
5.6.1 非晶硅基薄膜太阳电池的优势	342
5.6.2 硅基薄膜太阳电池所面临的挑战	342
5.6.3 硅基薄膜太阳电池的发展方向	343
参考文献	344
第6章 铜铟镓硒(CIGS)薄膜太阳电池	351
6.1 CIGS 薄膜太阳电池发展史	351
6.2 CIGS 薄膜太阳电池吸收层材料	356
6.2.1 CIGS 薄膜的制备方法	356
6.2.2 CIGS 薄膜材料特性	363
6.3 CIGS 薄膜太阳电池的典型结构及光伏组件	373
6.3.1 Mo 背接触层	373
6.3.2 CdS 缓冲层	374
6.3.3 氧化锌(ZnO)窗口层	375
6.3.4 顶电极和减反膜	376
6.3.5 CIGS 薄膜光伏组件	377
6.4 CIGS 薄膜太阳电池的器件性能	378
6.4.1 CIGS 薄膜太阳电池的电流-电压方程和输出特性曲线	378
6.4.2 CIGS 薄膜太阳电池的量子效率	381
6.4.3 CIGS 薄膜太阳电池的弱光特性	383
6.4.4 CIGS 薄膜太阳电池的温度特性	386