



国际制造业先进技术译丛

太阳电池： 材料、制备工艺及检测

**Solar Cells:
Materials , Manufacture and Operation**

(英) Tom Markvart 编
(西) Luis Castañer
梁骏吾 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际制造业先进技术译丛

太阳电池：材料、制备 工艺及检测

(英) Tom Markvart 编
(西) Luis Castañer
梁骏吾 等译



机械工业出版社

本书从基本物理概念出发,全面并深入地介绍了各种太阳电池的工作原理,各种太阳电池材料的性质、制备,以及太阳电池和组件的结构、制备方法和提高电池性能的途径。

书中既有物理基础的论述,也十分注重应用、工业成本和生产技术。可供从事太阳电池研究和生产的人员阅读和参考。

Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation/by Tom Markvart and Luis Castañer/ISBN: 978-1-85617-457-1

Copyright© 2005, Elsevier Ltd. All rights reserved.

No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China.

本书中文简体翻译版由机械工业出版社独家出版并在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2007-0480

图书在版编目(CIP)数据

太阳电池:材料、制备工艺及检测/(英)马克沃特(Markvart, T.), (西)卡斯特纳(Castañer, L.)编;梁骏吾等译. —北京:机械工业出版社, 2009. 4

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: Solar Cells: Materials, Manufacture and Operation

ISBN 978-7-111-26798-0

I. 太… II. ①马…②卡…③梁… III. 太阳能电池
IV. TM914.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第053784号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:刘本明

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·27.5印张·535千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-26798-0

定价:66.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379772

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的，它由机械制造技术发展而来，通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术，进行交叉、融合和集成，综合应用于产品全生命周期的制造全过程，包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等，以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产，快速响应市场的需求。因此，当前的先进制造技术是以产品为中心，以光机电一体化机械制造技术为主体，以广义制造为手段，具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题，与社会发展密切相关，是设想、概念、科学技术物化的基础和手段，是所有工业的支柱，是国家经济与国防实力的体现，是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题，特别是在市场经济高度发展的今天，它更占有十分重要的地位。

信息技术的发展并引入到制造技术，使制造技术产生了革命性的变化，出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成，物质流是本质，能量流是动力，信息流是控制；制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广，涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运输、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持，制造技术既有普遍性、基础性的一面，又有特殊性、专业性的一面；制造技术既具有共性，又具有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域：

- 机械、电子制造业，包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等；
- 资源加工工业，包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等；
- 轻纺工业，包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方向发展，在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等，在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来，国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到，我国制造业与工业发达国家相比，仍存在较大差距。因此必须加强原始创新，在实践中继承和创新，学习国外的先进制造技术和经验、引进消化吸收创新，提高自主创新能力，形成自己的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式，早在20世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料更方便、习惯，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平的不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选择把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等技术。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、

研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译 者 序

目前,能源短缺和环境问题得到越来越多的关注,国内读者对有关太阳电池的基础和应用方面的书籍也有强烈的需求,鉴于此,我们翻译了此书。

本书的英文版于2005年出版,Markvart博士和Castañer教授负责组织,由来自12个国家的28位学者编写而成。本书从基本物理概念出发,全面并深入地介绍了各种太阳电池的工作原理,各种太阳电池材料的性质、制备,以及太阳电池和组件的结构、制备方法和提高电池性能的途径。对电池和组件的测试、检验和标准也有论述。

本书是从《光伏实用手册:基础和应用》(Markvart博士和Castañer教授编写,2003年)一书中抽出并新加了“晶体硅太阳电池的低成本产业化技术”一章,及时地反映了当今世界对廉价晶硅太阳电池的需求。针对全世界电池用硅材料紧缺的局面,作者们对太阳电池的未来发展进行了仔细的分析。书中既有物理基础的论述,也十分注重应用、工业成本和生产技术。此外,本书还提供了丰富的参考文献及有关光伏技术的标准,可供太阳电池工作者阅读和参考。

由于时间仓促,书中错误在所难免,希望读者指正。

中译本译者分工如下:

梁骏吾(中国科学院半导体研究所)第1章、第2章、第3章,全书校正;

杨辉(中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所)第2章、第3章,附录;

李仲明(北京市太阳能研究所有限公司)第4章、第5章、第6章、第7章、第8章;

孔光临(中国科学院半导体研究所)第9章、第10章;

冯良桓(四川大学)第11章、第12章;

李晶(McMaster University)第13章;

周帅先(北京市太阳能研究所有限公司)第14章;

武涛(McMaster University)第15章、第16章;

王力功(中国电子科技集团公司第十八研究所)第17章、第18章。

梁骏吾

前 言

为适应太阳电池技术发展的需求，出版了这部专著《太阳电池：材料、制备工艺及检测》。本书实际上是从《光伏使用手册：基础和应用》一书中不加修改地抽出部分内容而编成的。该手册也是由 Markvart 博士和 Castañer 教授组织编写，出版于 2003 年。

新的一章“晶体硅太阳电池的低成本产业化技术”由 Szlufcik 等提供，这一章选自一部会议文集且进行了更新。

参编者名单

Vyacheslav M. Andreev, Ioffe Physico-Technical Institute, 26
Polytekhnicheskaya str., St. Petersburg 194021, Russia
email: vmandreev@mail.ioffe.ru

Allen Barnett, 19 Nivin Lane, Landenberg, PA 19350, USA
email: ambarnett@aol.com

Dieter Bonnet, Breslauer Ring 9a, D-61381 Friedrichsdorf, Germany
email: DieterBonnet@aol.com

David E. Carlson, BP Solar, 989 Corporate Boulevard, Linthicum, MD 21090,
USA
email: carlsde@bp.com

Luis Castañer, GDS, Modulo C4 Campus Nord, Universidad Politecnica de
Catalunya, Calle Jordi Girona 1, 08034 Barcelona, Spain
email: castaner@eel.upc.es

Andres Cuevas, Department of Engineering, Australian National University,
Canberra, Australia 0200
email: Andres.Cuevas@faceng.anu.edu.au

Emilio Fernandez Lisbona, Solar Array Section, ESA-Estec, Keplerlaan 1, 2200
AG Noordwijk, The Netherlands
email: Emilio.Fernandez.Lisbona@esa.int

Francesca Ferrazza, Eurosolare S.p.A. Via Augusto D'Andrea 6, 00048
Nettuno, Italy
email: francesca.ferrazza@eurosolare.agip.it

Martin A. Green, Centre of Excellence for Advanced Silicon Photovoltaics and
Photonics, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia
email: m.green@unsw.edu.au

Peter T. Landsberg, Faculty of Mathematical Studies, University of
Southampton, Southampton SO17 1BJ, UK
email: ptl@maths.soton.ac.uk

Tom Markvart, School of Engineering Sciences, University of Southampton,
Southampton SO17 1BJ, UK
email: t.markvart@soton.ac.uk

Michael Mauk, AstroPower, Inc., 300 Executive Drive, Newark, DE 19702-
3316, USA
email: mauk@AstroPower.com

Augustin McEvoy, Institute for Molecular and Biological Chemistry, Faculty of
Basic Sciences, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015
Lausanne, Switzerland.
email: augustin.mcevoy@epfl.ch

Robert P. Mertens, Interuniversity Microelectronic Center (IMEC), Kapeldreef
75, 3001 Leuven, Belgium
email: robert.mertens@imec.be

Jenny Nelson, Centre for Electronic Materials and Devices, Department of
Physics, Imperial College, London SW72BW, UK
email: jenny.nelson@ic.ac.uk

Johan F. Nijs, Photovoltech, rue de l'Industrie 52 Nijverheidsstraat, 1040
Brussels, Belgium
email: johan.nijs@photovoltech.be

Carl R. Osterwald, NREL, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-
3393, USA
email: carl_osterwald@nrel.gov

Roger van Overstraeten (deceased), formerly of Interuniversity
Microelectronic Center (IMEC), Kapeldreef 75, Leuven B-3001, Belgium

James Rand, AstroPower, Inc., 300 Executive Drive, Newark, DE 19702-3316,
USA
email: jimrand@AstroPower.com

Uwe Rau, Institute of Physical Electronics, University of Stuttgart,
Pfaffenwaldring 47, D-70569 Stuttgart, Germany
email: uwe.rau@ipe.uni-stuttgart.de

Hans Werner Schock, Institute of Physical Electronics, University of Stuttgart,
Pfaffenwaldring 47, D-70569 Stuttgart, Germany
email: schock@ipe.uni-stuttgart.de

Paul Sims, AstroPower, Inc., 300 Executive Drive, Newark, DE 19702-3316,
USA
email: pesims@AstroPower.com

Ronald A. Sinton, Sinton Consulting, Inc., 1132 Green Circle, Boulder, CO
80305, USA
email: Ron@Sintonconsulting.com

Siva Sivoththaman, University of Waterloo, Faculty of Electrical and Computer
Engineering, 200 University Ave, Waterloo, Ontario, Canada N2L 3G1
email: sivoththman@uwaterloo.ca

Jozef Szlufcik, Photovoltech, rue de l'Industrie 52 Nijverheidsstraat, 1040
Brussels, Belgium
email: Jozef.Szlufcik@imec.be

Pierre J. Verlinden, Origin Energy, GPO Box 1097, Adelaide, SA 5001,
Australia
email: Pjverlinden@aol.com

Christopher R. Wronski, 215 Electrical Engineering West, The Pennsylvania
State University, University Park, PA 16802, USA
email: crwece@engr.psu.edu

Kenji Yamamoto, Kaneka Corporation, 2-1-1, Hieitsuji, Otsu, Shiga, 520-0104,
Japan
email: yamamoto@pv.kaneka.co.jp

目 录

译丛序言	
译者序	
前言	
参编者名单	

第1篇 绪 论

第1章 太阳能电池工作原理	1
第2章 半导体材料和建模	20
第3章 理想效率	44

第2篇 晶体硅太阳能电池

第4章 晶体硅：制造和性质	54
第5章 晶体硅太阳能电池的低成本产业化技术	68
第6章 硅薄膜太阳能电池	96
第7章 硅片及器件的表征和诊断	131
第8章 高效硅太阳能电池	152

第3篇 薄膜技术

第9章 非晶硅太阳能电池	174
第10章 微晶硅太阳能电池	204
第11章 CdTe（碲化镉）薄膜光伏组件	216
第12章 $\text{Cu}(\text{In}, \text{Ga})\text{Se}_2$ 薄膜太阳能电池	245

第4篇 空间电池和聚光电池

第13章 砷化镓和高效空间电池	286
第14章 高效聚光硅太阳能电池	301

第5篇 有机和染料敏化太阳能电池

第15章 光电化学太阳能电池	319
第16章 有机和塑料太阳能电池	337

第 6 篇 检测和校准

第 17 章 光伏组件和太阳电池的评价和测试 361

第 18 章 空间太阳电池的评价和测试 383

附 录

附录 A 缩略语及其含义 408

附录 B 有关太阳电池技术的参考书目 414

附录 C 有关光生伏特技术的国际和美国标准 418

附录 D 有用的网站、期刊或通讯 425

第 1 章 太阳能电池工作原理

作者: Tom Markvart (School of Engineering Sciences, University of Southampton, UK)
Luis Castañer (Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, Spain)

1.1 引言	1
1.2 电学特性	4
1.2.1 理想的太阳能电池	4
1.2.2 实际太阳能电池的特性	6
1.2.3 量子效率与光谱响应	7
1.3 光学特性	9
1.3.1 抗反射膜	9
1.3.2 陷光	10
1.4 典型太阳能电池的结构	11
1.4.1 PN 结太阳能电池	11
1.4.2 异质结电池	14
1.4.3 PIN 结构	16
1.4.4 串联电阻	17
本章参考文献	18

1.1 引言

太阳能电池中的光伏能量转换有两个必要的步骤。首先, 电池吸收光, 产生电子-空穴对; 然后, 由器件结构将电子和空穴分开, 电子流向负极而空穴流向正极, 从而产生电流。

图 1-1 示出了上述过程。此图清楚地描绘了当今所用的典型太阳能电池的原理。每种电池用两种示意图来描绘。一种示意图描绘器件的物理结构以及在能量转换过程中起支配作用的电子传输过程; 另一种示意图则用半导体的能带图或分

子器件的能级来描述这一过程。

在图 1-1a 中，电池主体由一层厚的 P 型基区构成，这里吸收了绝大部分的入射光并产生绝大部分的功率。吸收光后，少子（电子）扩散到结区并被强内建电场扫过结区。电功率则由电池正反面的金属电极上收集（见第 5 章和第 8 章）。图 1-1b 所示的典型砷化镓太阳电池中，由于表面覆盖了薄 GaAlAs 钝化膜，因此，有时也被称为异质面结构。GaAlAs “窗口”层防止少子（电子）由发射区到达表面而复合，并能让绝大部分入射光通过而进入发射区，能量的主要部分产生在此区域。这种 PN 结太阳电池的作用和晶硅太阳电池在许多方面都类似，但是其厚度的差异很大（见第 13 章）。图 1-1c 所示的典型单结非晶硅太阳电池，

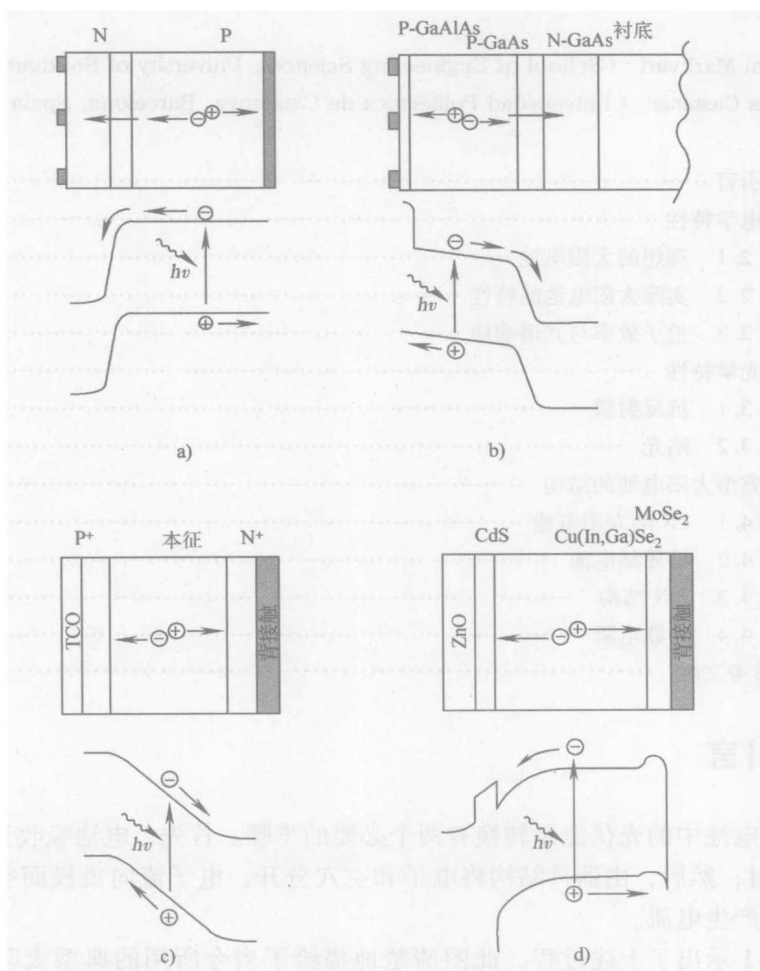


图 1-1 典型的太阳电池

a) 晶硅太阳电池 b) 砷化镓太阳电池 c) 单结非晶硅太阳电池 d) 硒化物太阳电池

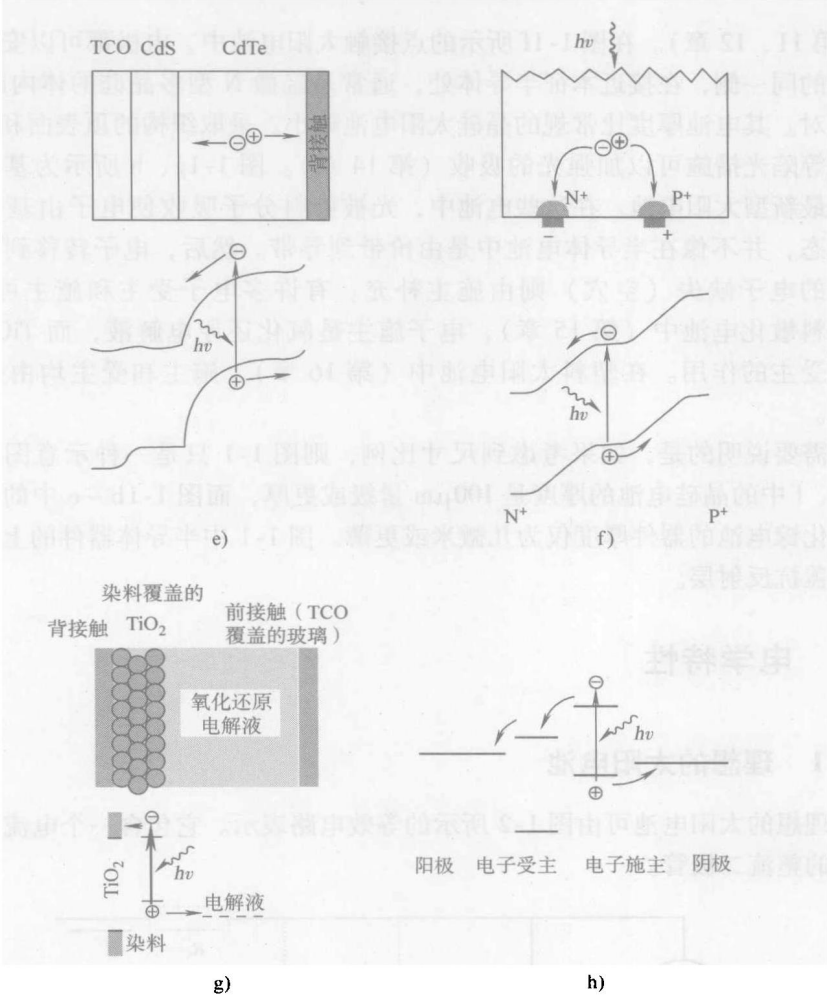


图 1-1 典型的太阳能电池 (续)

e) 碲化镉太阳能电池 f) 点接触太阳能电池 g) 染料敏化太阳能电池 h) 塑料太阳能电池

包含一个本征半导体层并将靠近两个电极的重掺杂 P 区与 N 区分开而形成 PIN 结。电子和空穴的产生主要在空间电荷区内。由于内建电场使电荷分离从而提高了收集效率。顶面电极通常使用透明导电氧化物 (TCO)，背电极则用金属。TCO 的陷光特性有助于减小厚度和降低退化作用。通常，a-Si 太阳能电池的厚度为几分之一微米到几微米 (见第 9 章)。图 1-1d、e 所示分别为基于化合物半导体 Cu (In, Ga) Se₂ 和 CdTe 太阳能电池的典型结构。结的前部由宽带隙材料 (CdS “窗口”) 形成，窗口让绝大部分入射光进入吸收层，几乎全部电子-空穴对在这里形成。顶部接触由透明导电氧化物构成。通常，这些太阳能电池厚度为几微米

(见第 11、12 章)。在图 1-1f 所示的点接触太阳电池中, 电极都可以安装在太阳电池的同一侧, 在接近本征半导体处, 通常是轻微 N 型多晶硅的体内产生电子-空穴对。其电池厚度比常规的晶硅太阳电池略小。采取织构的顶表面和反射式背表面等陷光措施可以加强光的吸收 (第 14 章)。图 1-1g、h 所示为基于分子材料的最新型太阳电池。在这些电池中, 光被染料分子吸收使电子由基态转移到激发态, 并不像在半导体电池中是由价带到导带。然后, 电子转移到受主, 而基态的电子缺失 (空穴) 则由施主补充。有许多电子受主和施主可供选择。在染料敏化电池中 (第 15 章), 电子施主是氧化还原电解液, 而 TiO_2 的导带则起受主的作用。在塑料太阳电池中 (第 16 章), 施主和受主均由分子材料担当。

需要说明的是, 如果考虑到尺寸比例, 则图 1-1 只是一种示意图。因为图 1-1a、f 中的晶硅电池的厚度是 $100\mu\text{m}$ 量级或更厚, 而图 1-1b ~ e 中的各种薄膜和砷化镓电池的器件厚度仅为几微米或更薄。图 1-1 中半导体器件的上表面还应当覆盖抗反射层。

1.2 电学特性

1.2.1 理想的太阳电池

理想的太阳电池可由图 1-2 所示的等效电路表示。它包含一个电流源和一个并联的整流二极管。

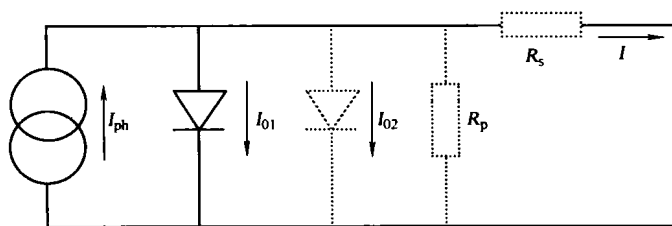


图 1-2 理想太阳电池的等效电路

注：虚线代表非理想组分。

相应的伏安特性可以用肖克莱 (Shockley) 太阳电池方程来描述：

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中, k_B 是玻耳兹曼常数; T 是热力学温度; q (>0) 是电子电荷; V 是电池两端的电压; I_0 是电子器件工程师所熟知的二极管饱和电流^[1], 它表示暗态太阳电池仅仅只是一个半导体整流器或二极管; 光生电流 I_{ph} 与入射在电池上的光子通