

太陽電池

工作原理、技術與系統應用

Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications



◎ **MARTIN A.GREEN** 著

◎ 曹昭陽 狄大衛 李秀文 譯

◎ 周儷芬 校閱

太陽電池

工作原理、技術與系統應用



- ◎ **MARTIN A.GREEN** 著
- ◎ 曹昭陽 狄大衛 李秀文 譯
- ◎ 周儷芬 校閱

五南圖書出版公司

國家圖書館出版品預行編目資料

太陽電池工作原理、技術與系統應用 / Martin A. Green 著；曹昭陽、狄大衛、李秀文等譯。——初版。——臺北市：五南，2009.08

面：公分

參考書目：面

含索引

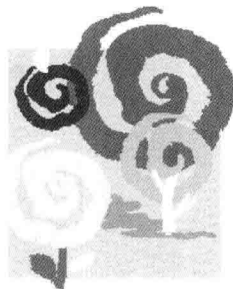
譯自：Solar cells: operating principles, technology, and system applications

ISBN 978-957-11-5756-6 (平裝)

1. 太陽能電池

337.42

98013815



5DB7

太陽電池工作原理、技術與系統應用

Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications

作 者 — Martin A. Green

譯 者 — 曹昭陽 狄大衛 李秀文等

校 閱 — 周儷芬

發行人 — 楊榮川

總編輯 — 龐君豪

主 編 — 穆文娟

責任編輯 — 蔡曉雯

文字編輯 — 施榮華

封面設計 — 林心馨

出 版 者 — 五南圖書出版股份有限公司

地 址：106 台北市大安區和平東路二段339號4樓

電 話：(02)2705-5066 傳 真：(02)2706-6100

網 址：<http://www.wunan.com.tw>

電子郵件：wunan@wunan.com.tw

劃撥帳號：01068953

戶 名：五南圖書出版股份有限公司

台中市駐區辦公室/台中市區中山路6號

電 話：(04)2223-0891 傳 真：(04)2223-3549

高雄市駐區辦公室/高雄市新興區中山一路290號

電 話：(07)2358-702 傳 真：(07)2350-236

法律顧問 元貞聯合法律事務所 張澤平律師

出版日期 2009年8月初版一刷

定 價 新臺幣560元

版權聲明

© The School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW

The School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, UNSW offers the publication of "Solar Cells Operating Principles, Technology and System Applications" in Complex Chinese Characters to Wu-Nan Book Inc.

※版權所有，欲利用本書內容，必須徵求本公司同意※

前言

當陽光照射到太陽電池時，可在無機械轉動或污染性副產物的情況下，將入射能量直接轉換為電能。而太陽電池早已不再是實驗室僅有的珍品，它已有廿多年的使用歷史。開始時只是提供太空用電源，近來已用於地面電力系統。在不久的將來，這類電池的製造技術很可能會有顯著改進。如此一來，太陽電池將可以在適當的價格下生產，進而對世界能源需求做出重要貢獻。

本書著重在太陽電池的基本工作原理和設計，目前採用的電池製造技術和即將實現的改進技術，以及這些電池系統設計上的考量重點。本書前面幾章概述了太陽光的性質、構成電池半導體材料的有關性質以及這兩者之間的交互作用。接下來幾章詳細地討論太陽電池設計中的重要因素、目前的電池製造技術以及未來可能的技術。最後幾章討論系統的應用，包括目前市售的小型系統和將來可能提供的住宅用和集中型發電系統。

本書可供受到這一迅速發展的領域所吸引而日益增多的從業人員，包括工程技術人員和科學研究工作者使用，也適合用作大學生和研究生的教課書。作者盡量使本書的內容能讓具有不同專業背景的讀者得以順利跨入這個領域。例如，以圖解的方式說明與太陽電池工作原理相關的半導體性質。對於許多讀者來說，這可作為簡捷的復習，而對其他讀者則可提供一個便於理解之後各章節內容的基礎。無論專業背景為何，藉由學習本書並做習題將使讀者未來可以勝任這個領域的工作。

我要對那些為數眾多以致不能一一提及的人們表示感謝。他們在過去十多年中促進了我對太陽電池的興趣。我要特別感謝 Andy Blakers, Bruce Godfrey, Phill Hart 和 Mike Willison 諸君的建議和間接支持我的這一嘗試。特別要感謝 Gelly Galang 幫我準備底稿以及 John Todd 和 Mike Willison 為書準備照片。最後我要感謝 Judy Green 在本書進展至緊鑼密鼓階段時給我的支持和鼓勵。

Martin A. Green

譯者序

太陽電池是一種經過特殊設計，藉由吸收陽光而產生電力的大面積光電元件。利用太陽電池發電具有下列優點：太陽光的取得較不受地形與地理位置之限制，所以在選址上遠較其他再生能源如風力發電、水力發電容易；太陽電池構造簡單，維護容易；無旋轉機構，因此故障率低，且運轉時不會產生噪音；不需要燃料也就無燃燒過程，故不會排放二氧化碳等溫室氣體或硫化物以及氮化物等污染。基於上述優點，太陽電池很適合安裝在負載端，例如安裝在屋頂或與建物整合，就近供應用戶所需電力。然而，早期受限於技術與成本，其應用偏重在人造衛星等特殊用途以及偏遠地區之電力供應，近幾年來受惠於各先進國家的政策性鼓勵，市場規模大幅成長，大量生產帶動產品價格逐年下降，目前已被廣泛應用在住宅與集中型市電並聯等發電系統。由於太陽光提供取之不盡、用之不竭的潔淨能源，因此，研發高效率且低成本的太陽電池，早已廣受各國重視。

澳洲新南威爾斯大學（UNSW）過去三十年來在太陽電池研究開發上的投入不遺餘力，並且在此領域一直扮演著重要角色。例如，當今世界紀錄的單晶矽太陽電池 24.7% 轉換效率便是由 UNSW 於 1999 年所創，該校並於 2000 年時成立全世界第一個專門研究太陽電池的工程學系—太陽光電與再生能源工程系（School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering），其幕後功臣則是 Martin Green 教授所領導的研發團隊。

本書英文版係 Martin Green 教授所著，並於 1982 年發行的經典教科書，至今仍被許多大學用來作為此一領域的重點教材，也是目前 UNSW 太陽電池與系統這門課程的用書。早在 1987 年，其簡體中文版便已經由大陸電子工業部第十八研究所的李秀文、巾春幸、郭印池、杜福生、鄭彝丞、趙海濱、宋禮彬、胡宏勳、謝鴻禮、羅榮萱、趙秀田、王保民、張德群、伍炳珍等十餘位先進協力翻譯並出版（目前已絕版）。本繁體中文版的翻譯乃是以英文版為主，該簡體版為輔，在此

謹對簡體中文版譯著前輩們的貢獻致上誠摯的敬意。此外，感謝博士班同學狄大衛先生的熱心參與以及 Peter Gress 先生在此翻譯期間提供的寶貴意見與協助，同時感謝台電同事周儷芬小姐對本書所做的細心校閱，並特別謝謝內人劉美琳在翻譯進行期間對我的支持與鼓勵。最後必須一提的是原書某些數據已落後現況，但是為了忠於原著，對於重要資訊，除了保留原數據外，並加註最新數據供讀者參考。譯者有幸投入 Martin 門下學習太陽電池技術，並承蒙系上委託此繁體中文版之翻譯，雖然力求採用台灣慣用術語，忠實呈現作者原意，惟才疏學淺，疏漏之處，尚祈各界先進不吝指教。

曹昭陽 謹識

2009 年 4 月於雪梨

目 錄

前 言	iii
譯者序	v
第 1 章 太陽電池和太陽光	1
1.1 前言	2
1.2 太陽電池發展概況	2
1.3 陽光的物理來源	3
1.4 太陽常數	4
1.5 地球表面的太陽輻射強度	5
1.6 直接輻射和漫射輻射	8
1.7 太陽的視運動	8
1.8 太陽的日照資料	10
1.9 結語	12
第 2 章 半導體特性的回顧	15
2.1 前言	16
2.2 晶體結構和方向性	16
2.3 禁止能隙 (FORBIDDEN ENERGY GAPS)	18

2.4	允許態的佔有機率	18
2.5	電子和電洞	22
2.6	電子與電洞的動力學	23
2.7	允許狀態的能量密度	25
2.8	電子和電洞的密度	26
2.9	IV 族半導體的鍵結模型	29
2.10	III 族和 V 族摻雜劑	30
2.11	載子濃度	32
2.12	摻雜半導體中費米能階的位置	34
2.13	其他類型雜質的影響	35
2.14	載子的傳輸	37
2.14.1	漂移	37
2.14.2	擴散	38
2.15	結語	40

第 3 章 | 產生、復合及元件物理的基本方程式 43

3.1	前言	44
3.2	光與半導體的交互作用	44
3.3	光吸收	47
3.3.1	直接能隙半導體	47
3.3.2	間接能隙半導體	48
3.3.3	其他吸收過程	52

3.4	復合過程	54
3.4.1	從鬆弛 (relaxtion) 到平衡	54
3.4.2	輻射復合 (radiative recombination)	54
3.4.3	歐歇復合	56
3.4.4	經由陷阱的復合	58
3.4.5	表面復合	58
3.5	半導體元件物理的基本方程式	59
3.5.1	概述	59
3.5.2	波松方程式	60
3.5.3	電流密度方程式	61
3.5.4	連續方程式	61
3.5.5	方程組	62
3.6	結語	63

第 4 章 | p-n 接面二極體 67

4.1	前言	68
4.2	p-n 接面的靜電學	69
4.3	接面電容	73
4.4	載子注入	74
4.5	準中性區內的擴散流	76
4.6	暗特性	78
4.6.1	準中性區內的少數載子	78

4.6.2	少數載子電流	81
4.7	照光特性	83
4.8	太陽電池的輸出參數	85
4.9	有限電池尺寸對 I_0 的影響	87
4.10	結語	89

第 5 章 | 效率的極限、損失和測量 91

5.1	前言	92
5.2	效率的極限	92
5.2.1	概要	92
5.2.2	短路電流	92
5.2.3	開路電壓和效率	94
5.2.4	黑體電池的效率極限	96
5.3	溫度的影響	97
5.4	效率損失	99
5.4.1	概要	99
5.4.2	短路電流損失	99
5.4.3	開路電壓損失	100
5.4.4	填滿因子損失	102
5.5	效率測量	105
5.6	結語	107

第 6 章 | 標準矽太陽電池技術 111

6.1	前言	112
6.2	矽砂還原為冶金級矽	112
6.3	冶金級矽提煉為半導體級矽	115
6.4	半導體級多晶矽變成單晶矽晶圓	116
6.5	從單晶晶圓到太陽電池	117
6.6	從太陽電池到太陽電池模組	119
6.6.1	模組構造	119
6.6.2	電池的工作溫度	122
6.6.3	模組的耐久性	123
6.6.4	模組電路設計	124
6.7	能量計算	126
6.8	結語	127

第 7 章 | 改進的矽電池技術 131

7.1	前言	132
7.2	太陽電池級矽	132
7.3	矽片	133
7.3.1	矽片的要求	133
7.3.2	鑄錠技術	134
7.3.3	帶矽 (Ribbon Silicon)	134
7.4	電池的製造和互連	138

7.5	候選工廠（candidate factories）的分析	141
7.6	結語	146

第 8 章 | 矽太陽電池的設計 151

8.1	前言	152
8.2	主要考量	152
8.2.1	光生載子的收集機率	152
8.2.2	接面深度	157
8.2.3	頂層的橫向電阻（lateral resistance）	159
8.3	基板摻雜	161
8.4	背面場	163
8.5	頂層的限制	165
8.5.1	死層（dead layers）	165
8.5.2	高摻雜效應	167
8.5.3	對飽和電流密度的影響	167
8.6	上電極的設計	167
8.7	光學設計	176
8.7.1	抗反射層	176
8.7.2	絨面（textured surface）	179
8.8	光譜響應	179
8.9	結語	181

第 9 章 | 其他元件結構 185

9.1	前言	186
9.2	同質界面	186
9.3	半導體異質界面	188
9.4	金屬—半導體異質界面	190
9.5	實用的低電阻接觸	192
9.6	MIS 太陽電池	193
9.7	光電化學 (photoelectrochemical) 電池	197
9.7.1	半導體—液體異質界面	197
9.7.2	電化學太陽電池	197
9.7.3	光電解電池	198
9.8	結語	199

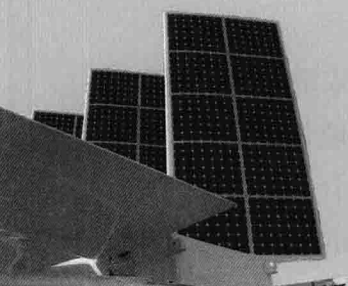
第 10 章 | 其他半導體 203

10.1	前言	204
10.2	多晶矽 (pc-Si)	204
10.3	非晶矽	205
10.4	砷化鎵太陽電池	209
10.4.1	GaAs 的特性	209
10.4.2	GaAs 同質界面	210
10.4.3	Ga _{1-x} Al _x As/GaAs 異質介面電池	211
10.4.4	AlAs/GaAs 異質界面	212

10.5	Cu ₂ S/CdS 太陽電池	212
10.5.1	電池結構	212
10.5.2	工作特性	213
10.5.3	Cu ₂ S/CdS 電池的優缺點	215
10.6	結語	216
 第 11 章 聚光型系統		221
11.1	前言	222
11.2	理想聚光器	222
11.3	固定式和定期調整式聚光器	224
11.4	具追日功能的聚光器	226
11.5	聚光型電池設計	228
11.6	超高效率系統	231
11.6.1	概要	231
11.6.2	多能隙電池概念	231
11.6.3	熱光伏特 (Thermophotovoltaic) 轉換	236
11.7	結語	237
 第 12 章 太陽光電系統：組成與應用		241
12.1	前言	242
12.2	能量的儲存	242
12.2.1	電化學電池	242

12.2.2	大容量儲能方法	244
12.3	功率調節裝置	246
12.4	太陽光電應用	247
12.5	結語	247
第 13 章	獨立型系統的設計	249
13.1	前言	250
13.2	太陽電池模組的性能	250
13.3	蓄電池性能	251
13.3.1	性能要求	251
13.3.2	鉛—酸蓄電池組	252
13.3.3	鎳—鎘蓄電池組	254
13.4	功率控制	255
13.5	系統的規模估算	258
13.6	抽水站	265
13.7	結語	266
第 14 章	住宅用和集中型太陽能電力系統	269
14.1	前言	270
14.2	住宅用系統	270
14.2.1	儲能方式的選擇	270
14.2.2	模組的安裝	271

14.2.3	供熱·····	274
14.2.4	系統的規劃·····	274
14.2.5	示範計畫·····	276
14.3	集中型發電廠·····	277
14.3.1	一般考量·····	277
14.3.2	運轉模式·····	279
14.3.3	衛星太陽能發電站·····	282
14.4	結語·····	283
附 錄	·····	287
參考書目	·····	293
索 引	·····	295



第1章

太陽電池和太陽光

- 1.1 前 言
- 1.2 太陽電池發展概況
- 1.3 陽光的物理來源
- 1.4 太陽常數
- 1.5 地球表面的太陽輻射強度
- 1.6 直接輻射和漫射輻射
- 1.7 太陽的視運動
- 1.8 太陽的日照資料
- 1.9 結語