

太陽能光電技術

Solar Photovoltaics Technologies

郭浩中 賴芳儀 郭守義 蔡閔安 ◎編著



太陽能光電技術

Solar Photovoltaics Technologies

郭浩中 賴芳儀 郭守義 蔡閔安 ◎編著



五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

太陽能光電技術／郭浩中等著．——初版．——臺北市：五南，2012.10

面；公分

ISBN 978-957-11-6887-6（平裝）

1. 太陽能電池

448.167

101020863



5DF4

太陽能光電技術

Solar Photovoltaics Technologies

作者—郭浩中 賴芳儀 郭守義 蔡閔安

發行人—楊榮川

總編輯—王翠華

主編—穆文娟

責任編輯—楊景涵

文字編輯—許宸瑞

封面設計—簡愷立

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 2012年10月初版一刷

定價 新臺幣520元

誌謝

本書從籌備、收集資料到完成歷時約一年半，期間藉由許多貴人的幫忙才能順利完成此書。作者在此要感謝交通大學的余沛慈教授及林建中教授，國家奈米元件實驗室的謝嘉民博士、沈昌宏博士及黃文賢研究員，華盛頓大學的 L. Y. Lin 教授及杜長慶博士，工研院的謝東坡博士、趙主力博士及陳士偉博士，台積電的邱清華博士，崑山科技大學蘇炎坤校長、成功大學的李清庭教授、感謝他們寶貴的意見、研究成果的提供以及和本研發團隊長期的合作。

另外要感謝交大光電的研究生：張家華、陳信助、陳亭綱、王珣玗、廖佑廣、蔡育霖、韓皓惟、謝丹華、高名璿、陳仕誠、徐敏翔、晉良豪、曹庭耀、施懷翔等和半導體雷射技術實驗室的同學們、尖端奈米光子實驗室以及奈米太陽能光電實驗室的同學們，元智大學的研究生：林瑋婷、楊瑞福、胡毓杰、謝奇璋、胡純華、劉沛哲，長庚大學電子工程系先進光電實驗室的研究夥伴們及光電所廖祐廣，感謝你們幫忙收集、整理資料及在研究上的努力。

最後要感謝五南圖書出版公司董事長楊榮川先生與編輯群的鼎力幫忙。

要感謝的人實在太多，因此恐有遺漏之餘，敬請原諒。在此對所有與本研發團隊共同合作研究的伙伴、曾經幫助過我們的人以及長期默默在背後作為精神支柱的家人們致上由衷的感謝，因為有你們的幫忙，本團隊的研究才能持續精進，本書也才能順利完成，謝謝！

郭浩中 賴芳儀 郭守義 蔡閔安
二〇一二年十月

推薦序

自工業革命以來，由於動力機械造成生產效率的提升，加上二十世紀開始石化工業日漸發達，越來越多的民生物資、交通運輸、醫藥產品均仰賴石化原料，而自二次大戰以後開始發展的資訊電子產業也促使製造業能以前所未有的速度開發新產品並迅速普及到全球市場，充分體現了孫中山先生於民報發刊詞中所描寫的：『物質發舒，百年銳於千載』。但是活絡的製造業以及全球化經濟也造成了資源耗竭以及全球暖化等環境議題。因此如何減少石化燃料過度消費並減低碳排放量成為先進國家無可避免的重大課題，現階段的解決方案可以用很簡單的四個字總結：「開源節流」。開源就是尋找替代性與再生性能源，例如利用生長週期較短的植物像是芒草、稻稈甚至藻類，加上新開發的技術將這些有機物轉化為可供引擎或發動機使用的生質燃料；或者利用核能、水力、風力、太陽能、地熱以及潮汐等方式來取代傳統石化燃料發電，現階段替代能源當中以太陽能發電對環境影響衝擊較小，而且從大規模的太陽能發電廠到一般家庭住宅均可裝設，使用彈性相當高，因此先進國家大多投入資源從事太陽能發電的研究與設備建置。

除了「開源」以外，「節流」也是相當重要的議題，目前先進國家所消耗的能源以及電力有很高比例是應用在照明用途，傳統白熾燈泡的發光效率相當低，有許多能源都變成熟而浪費掉，採用日光燈管雖然可以有效提高電光轉換效率，但是一般螢光燈管大多含有汞等重金屬，廢棄燈管如果回收不確實很容易產生汞污染，同時螢光燈管壽命也相對較短，並且有閃爍的問題，如果能採用發光二極體（LED）固態照明技術，除了相同亮度下耗電量相對較低、壽命較長，同時也可以避免重金屬污染問題，預期將可以逐步取代效率較差的一些傳統光源，例如目前很多液晶顯示器背光源已經改用 LED，

部分路燈與絕大多數交通號誌也已採用 LED，而這些努力都是研究人員針對環保節能議題所做出的積極回應。

郭浩中教授以及郭守義教授、賴芳儀教授長期投入 LED 及太陽能電池相關光電半導體材料的研發工作已經累積多年經驗，並且獲得許多優異研究成果，連續多年獲得國科會能源國家型計畫補助，從事太陽能電池材料及結構與特性改善相關研究。由於研究成果傑出、績效良好，郭浩中教授近年來陸續獲得國科會頒發吳大猷先生紀念獎、光學工程學會青年獎章、傑出人才發展基金會優秀學者獎。並在 2008 年領先世界其他研究團隊，率先開發出藍光面射型雷射（VCSEL）製作技術，並且獲得連續波操作電激發光的卓越成果。也因為在光電半導體材料及元件研究領域的傑出成果，郭浩中教授在 2011 年獲頒美國光學學會會士 OSA Fellow 榮銜，以表彰郭教授的卓越成就。

目前台灣在 LED 以及太陽能電池產業產值均已位居全世界第二，為了提高產品的附加價值，需要有更多高階從業人員投入研發行列，因此郭教授團隊除了專注於從事新技術研發工作以外，同時也積極培育新一代光電科技人才，近年來已經出版「LED 原理與應用」一書，廣受國內光電產業從業人員以及學術研究單位同仁採用。目前郭浩中教授、郭守義教授以及賴芳儀教授更進一步針對太陽能電池常用的材料以及結構、最新技術進展撰寫專書介紹，希望能讓更多光電領域相關產業研發人員以及學生更進一步瞭解太陽能電池技術發展現況，這也是學術研究人員對於提升台灣光電產業競爭力的積極貢獻。因此本人很榮幸能有此機會為郭教授團隊的最新著作撰寫序文，並誠摯向各位讀者推薦。

國立成功大學名譽講座教授暨

崑山科技大學校長

IEEE Fellow

SPIE Fellow

蘇炎坤

蘇炎坤二〇一二年十月於台南

作者序

近年能源危機及二氧化碳溫室效應，世界各國莫不致力尋求潔淨之替代能源，以因應全球氣候變化綱要公約之國際潮流及傳統能源存量之嚴重短缺問題；在全球高度重視氣候變遷與節能減碳的趨勢中，綠色能源儼然成為全球科技發展新潮流。而綠色能源科技研發與應用，包含再生能源之應用、提高能源效率以節約能源、能源新利用技術之開發以提高能源有效利用率等；由於全球掀起再生能源發電熱潮，而太陽光電具備節能、安全、無移動組件、維修需求低，且發電 可依需求調整等特色，已成為世界各國全力開發與建置的綠色能源之一。目前全球前五大生產國依序為中國大陸、德國、台灣、日本及美國，佔全球產量的 80%，全球製造版圖重心已移往亞洲，台灣加中國大陸佔全球 > 50% 以上，因此更須著重於人才的培育。

本書共分為 9 章，從半導體基本原理到各種不同材料之運作原理和元件結構皆涵蓋在內。第 3、4 章以佔據市場率最高的矽晶太陽能電池為主；第 5 章以效率接近矽晶而成本最低的 CIGS 薄膜太陽能電池為主；第 6 章介紹效率最高的 III-V 多接面太陽能電池。第 7 章著重尚以學術界研發為主的新穎太陽能電池技術介紹。最後第 8、9 章則讓大家了解太陽能電池的應用及目前高科技的奈米檢測技術。內容涵蓋範圍廣泛，適合有志從事太陽光電研發、生產和應用的工程技術人員閱讀，也可作為研究生和大學高年級學生固態照明課程的教科書或半導體物理、材料科學、照明技術和光學課程的參考書。

目 錄

誌謝

推薦序

作者序

第一章	太陽能電池導論	1
	習題	10
第二章	太陽能電池原理	11
2.1	能帶	12
2.2	本質半導體	15
2.3	外質半導體	17
2.4	簡併半導體	20
2.5	外加電場下的能帶圖	21
2.6	直接和非直接能隙半導體	22
2.7	pn 接面理論	26
2.7.1	無外加偏壓（開路）	26
2.7.2	順向偏壓	29
2.7.3	逆向偏壓	36
2.7.4	空乏層電容	38
2.8	半導體和光之間的相互作用	39
2.8.1	半導體的光學特性	39

2.8.2	半導體和電磁波之間的相互作用	40
2.9	半導體的光吸收	41
2.9.1	光吸收係數和光譜	41
2.9.2	激子吸收	44
2.9.3	能帶邊的光吸收	45
2.10	用電子能帶結構解釋光學性質	46
2.10.1	直接躍遷型的光吸收	47
2.10.2	間接躍遷型的光吸收	48
2.10.3	Ge 的吸收光譜	49
2.10.4	GaAs、a-Si 的吸收光譜	51
2.11	太陽能電池的工作原理	53
2.11.1	太陽能電池的結構和作用	54
2.11.2	太陽能電池的性能	56
2.11.3	性能參數	58
2.11.4	高效率太陽能電池	59
2.11.5	理論極限效率	60
2.11.6	提高轉換效率的研究和開發	61
2.11.7	多結多層結構的太陽能電池	62
	習題	63
	參考文獻	64

第三章 單、多晶矽太陽能電池 65

前言	66
----	----

3.1	單晶矽晶片之製作	67
3.1.1	直拉法製造單晶矽（柴氏法）	67
3.1.2	區熔法製造單晶矽（Floating zone technique, FZ）	71

3.2	太陽能級單晶矽晶片加工	72
3.3	多晶矽晶片之製作	75
3.4	矽晶錠法	77
3.4.1	坩堝下降法 (Bridgman-Stockbarger method)	77
3.4.2	熱交換法 (Heat exchanger method, HEM)	77
3.4.3	澆鑄法 (Casting)	79
3.4.4	電磁鑄造法 (Electromagnetic casting method, EMC)	79
3.5	矽晶帶法	80
3.5.1	邊緣成膜矽晶帶法 (Edge-defined film-fed growth method, EFG)	80
3.5.2	基板矽晶帶法 (Ribbon Growth on Substrate, RGS)	81
3.5.3	線狀矽晶帶法 (String ribbon, SR)	82
3.6	結晶矽太陽能電池的結構	83
3.6.1	矽基板	83
3.6.2	p-n 接面	84
3.6.3	粗糙面	84
3.6.4	抗反射層	85
3.6.5	上電極	86
3.6.6	背面電極	87
3.7	矽基晶片型太陽能電池製程技術	88
3.7.1	清洗處理 (cleaning)	89
3.7.2	粗糙化蝕刻 (textureing)	90
3.7.3	磷擴散 (diffusion)	91
3.7.4	磷玻璃蝕刻 (phosphorus glass etching)	92
3.7.5	抗反射層沉積 (anti-reflective coating)	92
3.7.6	金屬電極	93
3.7.7	燒結 (firing)	94
3.7.8	晶片邊緣絕緣 (edge isolation)	95

3.8 單晶矽和多晶矽太陽能電池的比較..... 96

3.8.1 單晶矽太陽能電池..... 96

3.8.2 多晶矽太陽能電池..... 96

3.9 高效率單晶矽太陽電池種類..... 98

3.10 射極鈍化背面局部擴散太陽電池..... 98

3.11 埋入式接點太陽電池..... 99

3.12 格柵太陽電池..... 100

習題..... 101

參考文獻..... 101

第四章 非晶矽薄膜太陽能電池..... 105

4.1 前言..... 106

4.2 矽薄膜太陽能電池優點..... 109

4.3 矽薄膜太陽能電池發展近況..... 110

4.4 非晶矽材料簡介..... 113

4.5 非晶矽太陽能電池製程技術..... 121

4.5.1 電漿輔助化學氣相沉積系統..... 121

4.5.2 多功能真空濺鍍系統..... 122

4.5.3 電子束金屬蒸鍍系統..... 123

4.6 非晶矽薄膜太陽能電池高效率化技術..... 124

4.6.1 堆疊型薄膜太陽能電池..... 125

4.6.2 光捕捉技術的應用..... 128

4.6.3 次波長結構製作方法..... 131

4.6.4 光捕捉技術之範例..... 135

結論..... 141

習題	142
參考文獻	142

第五章 CIGS 薄膜太陽能電池 147

5.1	基板	162
5.2	背電極	163
5.3	吸收層	164
5.3.1	共蒸鍍 (co-evaporation)	164
5.3.2	二階段製程 (Two-step process)	166
5.3.3	非真空製程	167
5.4	緩衝層	167
5.5	本質氧化鋅	168
5.6	透明導電層	168
5.7	發展現況	169
5.8	銅鋅錫硫 / 硒 $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S}, \text{Se})_4$ 太陽能電池	170
	習題	172
	參考文獻	175

第六章 III-V 族太陽能電池 179

6.1	III-V 族太陽電池發展簡史	180
6.2	III-V 族太陽電池優缺點	181
6.3	III-V 族太陽電池製程技術	181
6.3.1	液相磊晶法 (Liquid Phase Epitaxy, LPE)	182
6.3.2	有機金屬氣相磊晶法 (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) ...	183

6.3.3	分子束磊晶法 (Molecular-Beam Epitaxy, MBE)	186
6.3.4	化學束磊晶法 (Chemical Beam Epitaxy, CBE)	189
6.4	III-V 族太陽電池材料簡介	191
6.5	單界面 III-V 族太陽能電池	193
6.5.1	簡介	193
6.5.2	理想的單界面太陽能電池條件	196
6.5.3	InGaP 單界面太陽電池	196
6.5.4	GaAs 單界面太陽能電池	199
6.6	InGaN 太陽電池	204
6.6.1	前言	204
6.6.2	磊晶的挑戰	205
6.7	結論	218
	習題	218
	參考文獻	219
第七章	新穎太陽能電池	221
7.1	前言	222
7.2	奈米結構矽太陽電池介紹	222
7.2.1	奈米結構矽太陽電池製程	223
7.2.2	奈米結構的非晶矽太陽能電池	225
7.2.3	奈米及微米複合結構抗反射層	227
7.3	量子點 (Quantum dot)	231
7.3.1	量子點的合成	233
7.3.2	量子點在太陽能上的應用	234
7.4	中間能帶型太陽能電池	241
7.5	熱載子太陽能電池	242

7.6	熱光伏特太陽能電池	243
7.7	頻譜轉換太陽能電池	244
7.8	奈米結構太陽能電池	245
	習題	247
	參考文獻	247
第八章	太陽能電池應用	249
8.1	前言	250
8.2	食	250
8.3	衣	255
8.4	住	258
8.5	行	263
8.6	育	267
8.7	樂	271
8.8	其他	280
	習題	281
	參考文獻	281
第九章	奈米檢測技術	285
9.1	表面或材料內部的顯微結構影像分析	286
9.1.1	掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)	286
9.1.2	穿透式電子顯微鏡 (Transmission Electron Microscope, TEM)	288
9.1.3	原子力顯微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM)	290
9.2	晶體結構與成分分析	291

9.2.1	X 光繞射分析儀 (X-ray Diffraction, XRD)	291
9.2.2	能量散射光譜儀 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS)	292
9.2.3	二次離子質譜儀 (secondary ion mass spectrometer, SIMS)	293
9.3	光學特性分析	294
9.3.1	光致發光光譜儀 (Photoluminescence Measurement system, PL) ..	294
9.3.1	光譜分析儀 (Spectroscope)	296
9.3.2	拉曼光譜儀 (Raman Spectrometer)	296
9.4	電性分析	298
9.4.1	霍爾量測 (Hall Measurement)	298
9.4.2	直流電性量測系統 (I-V Measurement)	299
9.4.3	光電轉換效率量測系統 (Incident Photo to Current Conversion Efficiency, IPCE)	300
	習題	301
	參考文獻	301

索引	303
----	-----

習題解答	310
------	-----

第 1 章

太陽能電池導論

● 習題

隨著科技發展與技術的日新月異，人們對物質生活的要求也愈來愈高。雖然科技發展確實為人類生活帶來便利性，但同時也製造了許多問題。在 1970 年代第一次能源危機爆發後，各國才開始認真思考對於石化能源過度使用與依賴所衍生的問題，並思考開發新的替代能源之方案。然而，在石油危機結束後，由於開發成本的考量下，新能源開發的計劃趨緩。1990 年代的波斯灣戰爭引發第二次石油危機，同時環保意識抬頭，再加以聖嬰現象的發生，促使人類再度重視石化能源過度使用的後果，以及新型能源取得方式的開發。已故的 1996 年諾貝爾化學獎得主 R.E. Smalley 曾在美國參議院委員會上發表聲明，指出未來五十年中，人類社會所遭遇的十大問題中，最迫切、最重要的課題便是能源問題。京都議定書的制定與實施，更讓各國紛紛尋找替代性能源，減少對高污染石化能源的依賴。美國再生能源實驗室（National Renewable Energy Laboratory, NREL）將太陽能、風能、地熱能、生質能以及氫氧燃料電池列為重點研究發展的再生能源。不同於水力、地熱、風力等會受到地形地物之侷限，太陽能的特性為：

1. 沒有可動部分：因為使用光電轉換之量子效應，為安靜的能源轉換，故不需要傳統發電原理上的可動機械裝置，因此無噪音與爆炸等危險，可說是安靜的能源。
2. 容易維修與無人化自動運作：因為沒有迴轉機械與高溫高壓裝置，亦不會產生機械磨耗，像人造衛星及無人看守燈塔之電源一般，容易維修且系統簡單自動化。
3. 無污染之能源：像傳統火力或核能發電，具有輻射洩漏及爆炸等危險，太陽能發電不會產生 CO_2 等造成溫室效應之氣體，是無公害之乾淨能源。
4. 構造模組化，具量產特性且易於放大，太陽電池系統為模組化構造，量產只是增加其串連電池數量，雖然會因串連阻抗而使效率稍微下降，但比其他發電系統模組放大的難度降低不少，且量產大時，容易用連續自動化製造來降低成本。

台灣本身為一海島型國家，天然資源匱乏，所使用的能源超過 98% 均