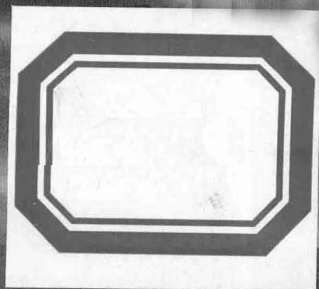


太陽能電池材料

Solar Cell Materials

楊德仁 ◎編著 顏怡文 ◎校訂





太陽能電池材料

Solar Cell Materials

楊德仁 ◎編著 顏怡文 ◎校訂



五南圖書出版公司 印行

國家圖書館出版品預行編目資料

太陽能電池材料 / 楊德仁編著. -- 初版. -- 臺北市 : 五南, 2008.06

面 ; 公分

含參考書目

ISBN 978-957-11-5204-2 (平裝)

1. 太陽能電池 2. 工程材料

337.42

97007064



5E52

太陽能電池材料

編 著 — 楊德仁

校 訂 — 顏怡文

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 — 李敏華

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/台中市中區中山路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 2008年6月初版一刷

定 價 新臺幣720元

版權聲明

作品版權(2006年10月)歸化學工業出版社所有,特此聲明,保留一切權利。繁體中文版的版權(2008年6月)歸五南圖書出版公司所有,保留一切權利。未經出版人書面許可,不得翻印或以任何形式或方法使用本書中的任何內容或圖片版權所有。

序

人類進入 21 世紀，對能源的需求不斷增加，經濟的騰飛又對能源提出了更多需求。能源，作為國民經濟、國家科技發展的發動機，引起了全世界的關注。特別是近兩年來，國際石油價格飛漲，更是引起了各國政府、有識人士，甚至一般老百姓對能源的關心。因此，清潔的可再生能源的研究和開發是國際學術界關注的重點。

太陽能是人類最重要的無污染、可再生、無窮無盡的新能源，因此，太陽能的研究和應用是今後人類能源發展的主要方向之一。早在 20 世紀 50 年代，第一塊矽太陽能電池的問世，揭開了現代太陽能電池研究和開發的序幕。太陽能電池的應用從太空衛星，到偏僻地區的獨立電源，到大規模光能電廠，再到屋頂太陽能電池的併網發電，應用領域不斷擴展；太陽能電池的產量從 20 世紀 80 年代的數十兆瓦，到 2005 年的 1800 MW，規模不斷增加，而且價格不斷降低。因此，太陽能電池產業發展迅速，成為世界上備受關注的新興的朝陽產業。

在過去的 50 年中，不僅太陽能電池的產業，相關的科學和技術也得到了很大發展。一方面，矽太陽能光電池的效率不斷提高，在實驗室中達到 25% 左右，逐漸接近理論值；另一方面，不斷有新的高性能半導體材料被用於太陽能光電材料。除薄膜矽晶體、鑄造多晶矽、帶矽等新型矽材料以外，許多化合物半導體材料甚至有機材料都被應用於製備太陽能電池。太陽能電池材料的研究和開發為太陽能電池效率的提高、產業的發展提供了重要基礎。

本書從材料製備和性能的角度出發，著重介紹了應用於太陽能電池的主要材料的基本性能、製備原理的製備技術，還介紹了太陽能電池材料的結構、組成以及對太陽能電池性能的可能影響，並介紹了相關材料研究的新概念、新技術和研究趨勢。本書的材料體系齊全，視野獨特，既包括直拉單晶矽、鑄造多晶矽、帶矽、非晶矽薄膜、多晶矽薄膜等矽材料，又包括 GaAs、CdTe 和 CuInSe₂ (CuInS₂) 化

合物半導體材料。本書可以為太陽能光電材料研究的科研人員、工程技術人員和學生以及太陽能電池製備領域的相關人員提供很好的參考資料。

目前，全球太陽能電池的研究和產業方興未艾，蓬勃發展，對相關著作多有需求。雖然太陽能電池方面的專著已有，但是專門介紹太陽能電池材料的著述尚不多見。相信本書的出版會對太陽能電池材料和太陽能電池的科研、產業和人才培養產生一定的積極作用。

閻端麟

前言

太陽能是一種重要的、有效的、可再生清潔能源，其儲量巨大，取之不盡，用之不竭，沒有環境污染，充滿了誘人的前景。廣義上講，太陽能的利用包括間接利用和直接利用。間接利用是指光合作用、風能、潮汐和海洋溫差發電等；而直接利用則主要分為兩方面，即光熱效應和光電效應。光熱效應是將太陽能的能量集聚起來，轉換成熱能，如正廣泛推廣的太陽能熱水器、太陽能灶等，這也包括將太陽能轉換成熱能後，利用熱能發電。光電效應則是將太陽能通過太陽能電池，轉換成電能，這種光電轉換主要借助於半導體元件的光電效應進行，應用於空間站、人造衛星以及遙遠地區的供電、輸油輸氣管路的保護方面，並且已經建成太陽能電站以並聯發電。

自 1954 年美國貝爾實驗室研製成功光電轉換效率 6% 的實用型單晶矽太陽能電池以來，太陽能光電技術由於可靠性高、壽命長且能承受各種環境變化等優點，在民間、軍事和高科技領域逐漸成為重要的「綠色」能源。特別是 20 世紀 70 年代能源危機爆發以來，各國政府努力發展的扶持太陽能光電材料的研究、開發、生產和應用，如美國的「陽光計畫」、「百萬屋頂計畫」，日本的「陽光計畫」、「月光計畫」、「朝日計畫」以及德國的「十萬屋頂計畫」等。目前太陽能光電方面的研究和應用在全世界範圍內方興未艾，相關的太陽能光電（photovoltaic）工業，發展迅速，90 年代以來一直以 30%～40% 的速度上升，在 2004 年甚至達到 60% 的增長速度，成為非常令人矚目的朝陽產業。

太陽能光電轉換的研究和應用可追溯到 1839 年。A. E. Becquerel 用光輻照電池中的銀電極時，發現有電壓出現。1877 年，W. Adams 和 R. Day 也發現，用光照射硒時會有電流產生。直到 1949 年，W. Shockley 等發明了電晶體和解釋了 p-n 接面的工作原理後，太陽能光電轉換的研究才真正開始。1954 年美國貝爾實驗室的 D. M. Chapin、C. S. Fuller 和 G. L. Pearson 在晶體矽的基礎上發明了第一種實際意義上

的太陽能電池，其光電轉換效率達到了 6%。隨後的研究進展迅速，太陽能電池的光電轉換效率很快達到 10%。太陽能電池首先應用於空間領域，為人造衛星提供電力能源。

目前，太陽能光電研究和應用取得了許多重大的進展，例如，與單晶矽材料相比，價格低廉的利用鑄造方法製備的鑄造多晶矽材料的應用、帶狀多晶矽材料的生產、低成本的網版印刷等技術的發明都大大推動了太陽能光電技術的研究和進展。目前，單晶矽太陽能電池產業化轉換效率已超過 16%，實驗室轉換效率超過 24%。

高的光電轉換效率和低的生產成本是太陽能光電工業和研究界始終追求的目標，這也是太陽能發電能否與其他能源技術相競爭的關鍵問題。顯然，為了達到這個目的，利用高效率、低成本的太陽能光電轉換材料是非常重要的。到目前為止，在太陽能光電工業中應用的主要有直拉單晶矽、鑄造多晶矽、帶矽、非晶矽、多晶矽和化合物薄膜半導體材料（如 GaAs、CdTe、CuInSe₂），從根本上講，太陽能光電工業主要是建立在矽材料基礎之上。

到目前為止，介紹太陽能電池的專著已有多種。但是，專門從材料製備、材料結構和性能角度出發介紹太陽能光電材料的專著還較少。本書正是試圖在介紹太陽能光電轉化基本原理和太陽能電池基本結構和技術的基礎上，重點介紹太陽能光電材料的製備、材料的結構和性能。本書分為三大部分。第一部分是太陽能光電轉換的基礎知識，包括第 1 章太陽能和光電轉換；第 2 章太陽能光電材料及物理基礎；第 3 章太陽能電池的結構和製備。第二部分是矽太陽能電池材料，包括第 4 章單晶矽材料；第 5 章直拉單晶矽中的雜質和差排；第 6 章鑄造多晶矽；第 7 章鑄造多晶矽中的雜質和缺陷；第 8 章帶矽材料；第 9 章非晶矽薄膜和第 10 章多晶矽薄膜。第三部分是化合物太陽能電池材料，包括第 11 章 GaAs 半導體材料；第 12 章 CdTe 和 CdS 薄膜材料；第 13 章 CuInSe₂（CuInS₂）薄膜材料。

太陽能光電材料體系較多，發展迅速。由於作者的知識水準有限，書中肯定會存在一些疏漏，懇請讀者批評指正。

編 者

目 錄

第一章	太陽能 and 光電轉換	001
1.1	太陽能	002
1.2	太陽能輻射和吸收	005
1.3	太陽能光電的研究和應用歷史	007
1.4	太陽能電池的研究和開發	010
	參考文獻	015
第二章	太陽能光電材料及物理基礎	019
2.1	半導體材料和太陽能光電材料	020
2.1.1	半導體材料	020
2.1.2	太陽能光電材料	023
2.2	載流子和能帶	024
2.2.1	載流子	024
2.2.2	能帶結構	025
2.2.3	電子和電洞	031
2.3	雜質和缺陷能階	033
2.3.1	雜質半導體	033
2.3.2	雜質能階	035

- 2.3.3 深能階038
 - 2.3.4 缺陷能階039
- 2.4 熱平衡下的載流子040
 - 2.4.1 載流子的狀態密度和統計分布041
 - 2.4.2 本質半導體的載流子濃度046
 - 2.4.3 雜質半導體的載流子濃度和補償048
- 2.5 非平衡少數載流子052
 - 2.5.1 非平衡載流子的產生、複合和壽命052
 - 2.5.2 非平衡載流子的擴散056
 - 2.5.3 非平衡載流子在電場下的漂移和擴散058
- 2.6 p-n 介面061
 - 2.6.1 p-n 介面的製備062
 - 2.6.2 p-n 介面的能帶結構065
 - 2.6.3 p-n 介面的電流電壓特性068
- 2.7 金屬－半導體接觸和 MIS 結構071
 - 2.7.1 金屬－半導體接觸071
 - 2.7.2 歐姆接觸074
 - 2.7.3 MIS 結構075
- 2.8 太陽能光電轉換原理——光生伏特效應077
 - 2.8.1 半導體材料的光吸收077
 - 2.8.2 光生伏特079
- 參考文獻082

第三章	太陽能電池的結構和製備	083
3.1	太陽能電池的結構和光電轉換效率	085
3.2	晶體矽太陽能電池的基本技術	089
3.2.1	絨面結構	090
3.2.2	p-n 接面製備	094
3.2.3	鋁背板	095
3.2.4	金屬電極	096
3.2.5	減反射層	097
3.3	薄膜太陽能電池	99
3.3.1	砷化鎵薄膜太陽能電池	100
3.3.2	非晶矽薄膜太陽能電池	103
3.3.3	多晶矽薄膜太陽能電池	107
3.3.4	CdTe 薄膜太陽能電池	109
3.3.5	CuInSe ₂ 薄膜太陽能電池	112
參考文獻		115
第四章	單晶矽材料	117
4.1	矽的基本性質	119
4.2	太陽能電池用矽材料	123
4.3	高純多晶矽的製備	125
4.3.1	三氯矽烷氫還原法	126
4.3.2	矽烷熱分解法	127

4.3.3	四氯化矽氫還原法	128
4.4	太陽能階多晶矽的製備	129
4.5	區熔單晶矽	132
4.6	直拉單晶矽	135
4.6.1	直拉單晶矽的生長原理和技術	135
4.6.2	新型直拉晶體矽的生長技術	140
4.6.3	直拉單晶矽的摻雜	146
4.7	矽晶片加工	153
4.7.1	切斷	153
4.7.2	滾圓	154
4.7.3	切片	155
4.7.4	化學蝕刻	158
	參考文獻	159
第五章	直拉單晶矽中的雜質和差排	161
5.1	直拉單晶矽中的氧	163
5.1.1	氧的基本性質	163
5.1.2	氧熱施體	169
5.1.3	氧沉澱	172
5.1.4	硼氧複合體	182
5.2	直拉單晶矽中的碳	189
5.2.1	碳的基本性質	190

5.2.2	碳和氧沉澱	192
5.3	直拉單晶矽中的金屬雜質	195
5.3.1	金屬雜質的基本性質	196
5.3.2	金屬複合體和沉澱	204
5.3.3	金屬雜質的控制	206
5.4	直拉單晶矽中的差排	208
5.4.1	差排的基本性質	209
5.4.2	晶體矽中的差排結構	215
5.4.3	晶體矽中差排的蝕刻和表徵	216
5.4.4	晶體矽中差排對太陽能電池的影響	220
	參考文獻	221
第六章	鑄造多晶矽	223
6.1	概 述	224
6.2	鑄造多晶矽的製備技術	226
6.3	鑄造多晶矽的晶體生長	232
6.3.1	鑄造多晶矽的原材料	232
6.3.2	坩堝	233
6.3.3	晶體生長技術	233
6.3.4	晶體生長的影響因素	236
6.3.5	晶體摻雜	239
	參考文獻	240

第七章	鑄造多晶矽中的雜質和缺陷	243
7.1	鑄造多晶矽中的氧	244
7.1.1	原生鑄造多晶矽中的氧雜質	244
7.1.2	原生鑄造多晶矽中的氧施體和氧沉澱	247
7.1.3	鑄造多晶矽中氧的熱處理性質	250
7.2	鑄造多晶矽中的碳	255
7.2.1	原生鑄造多晶矽中的碳雜質	255
7.2.2	鑄造多晶矽中碳的熱處理性質	256
7.3	鑄造多晶矽中的氮	261
7.3.1	鑄造多晶矽中的氮雜質	266
7.3.2	鑄造多晶矽中的氮氧複合體圖	269
7.3.3	鑄造多晶矽中的氮對氧沉澱、氧施體的作用	269
7.4	鑄造多晶矽中的氫	269
7.4.1	鑄造多晶矽中的氫雜質	269
7.4.2	鑄造多晶矽中氫的鈍化作用	272
7.5	鑄造多晶矽中的金屬雜質和吸雜	273
7.5.1	鑄造多晶矽中的金屬雜質	273
7.5.2	鑄造多晶矽中的金屬沉澱	276
7.5.3	鑄造多晶矽的吸雜	277
7.6	鑄造多晶矽中的晶界	284
7.6.1	鑄造多晶矽的晶界	284
7.6.2	鑄造多晶矽晶界上的金屬沉澱	288

7.6.3	鑄造多晶矽晶界的氫鈍化	291
7.7	鑄造多晶矽中的差排	293
7.7.1	鑄造多晶矽的差排	293
7.7.2	鑄造多晶矽的差排對電學性能的影響	295
	參考文獻	297
第八章	帶矽材料	299
8.1	帶矽材料的製備	301
8.1.1	邊緣限制薄膜帶矽生長技術	301
8.1.2	線牽引帶矽生長技術	304
8.1.3	枝網帶矽技術	305
8.1.4	基板上的帶矽生長技術	306
8.1.5	技術粉末帶矽生長技術	308
8.2	帶矽生長的基本問題	309
8.2.1	邊緣穩定性	310
8.2.2	應力控制	310
8.2.3	產率	311
8.3	帶矽材料的缺陷和雜質	313
8.3.1	帶矽材料的晶界	313
8.3.2	帶矽材料的差排	313
8.3.3	帶矽材料的雜質	315
8.4	帶矽材料的氫鈍化和吸雜	316

8.4.1	帶矽材料的氫鈍化	316
8.4.2	帶矽材料的吸雜	318
參考文獻		319
第九章	非晶矽薄膜	321
9.1	非晶矽薄膜的基本性質	325
9.1.1	非晶矽的原子結構特徵	325
9.1.2	非晶矽的能帶結構	326
9.1.3	非晶矽的基本特性	330
9.2	電漿化學氣相沉積製備非晶矽薄膜	331
9.2.1	輝光放電的基本原理	332
9.2.2	電漿輔助化學氣相沉積製備非晶矽薄膜	334
9.2.3	非晶矽薄膜的生長	336
9.2.4	非晶矽薄膜的生長機制	338
9.3	非晶矽薄膜的摻雜	343
9.3.1	非晶矽的摻雜	343
9.3.2	非晶矽薄膜中的雜質	345
9.4	非晶矽薄膜中的氫	347
9.4.1	矽氫鍵	348
9.4.2	非晶矽中氫的態密度	349
9.5	非晶矽薄膜中的光致衰減	351
9.5.1	非晶矽薄膜的光致衰減效應	352

9.5.2	非晶矽薄膜光致衰減效應的影響因素	354
9.5.3	非晶矽薄膜光致衰減效應的減少和消除	356
9.6	非晶矽合金薄膜	359
9.6.1	非晶矽碳合金薄膜	360
9.6.2	非晶矽鍺合金薄膜	361
	參考文獻	363
第十章	多晶矽薄膜	365
10.1	多晶矽薄膜的基本性質	347
10.1.1	多晶矽薄膜的特點	347
10.1.2	多晶矽薄膜的製備技術	348
10.1.3	多晶矽薄膜的晶界和缺陷	372
10.1.4	多晶矽薄膜的雜質	375
10.2	化學氣相沉積製備多晶矽薄膜	376
10.2.1	電漿輔助化學氣相沉積製備多晶矽薄膜	376
10.2.2	低壓化學氣相沉積製備多晶矽薄膜	380
10.2.3	熱絲化學氣相沉積製備多晶矽薄膜	381
10.3	非晶矽晶化製備多晶矽薄膜	386
10.3.1	固化晶化製備多晶矽薄膜	387
10.3.2	金屬誘導固化晶化製備多晶矽薄膜	389
10.3.3	快速熱處理晶化製備多晶矽薄膜	392