

行政院及所屬各機關出國報告

(出國類別：實習)

實習染料敏化太陽電池技術並參加 2006 年國際

太陽光電會議

服務機關：台灣電力公司

出國人職稱：化學師

姓名：邱善得

出國地區：美國

出國日期：95 年 10 月 17 日至 10 月 28 日

報告日期：95 年 12 月 27 日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：實習染料敏化太陽電池技術並參加 2006 年國際太陽光電會議

頁數 24 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台電人事處/陳德隆/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

邱善得/台灣電力公司/綜合研究所/化學師/ (02) 8078-2361

出國類別：1 考察2 進修3 研究 4 實習5 其他

出國期間：95 年 10 月 17 日至 10 月 28 日 出國地區：美國

報告日期：95 年 12 月 27 日

分類號/目

關鍵詞：染料敏化太陽電池，PN 接合 (PN junction)，釩還原電池 (VRB)，能隙

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司為我國最主要的電力供應者，依照全國能源會結論，遵循政府能源多元化政策指示，正積極推廣再生能源利用與努力增進能源多元化開發，是以台電綜研所於 96 年度規劃太陽光電等前瞻性研究計畫，期能擬定適切的太陽光電應用方案供決策參考。

本次出國主要任務是前往賓州大學 Harry R. Allcock 教授之研究室，實習敏化太陽電池 (DSSC) 之最新研發技術，就奈米結構 DSSC, 矽晶/DSSC 二重複合系統之想法、DSSC/電池複合設計方案和薄膜太陽電池等議題進行研討。除赴賓州大學研討外，參加 2006 太陽光電國際會議，該該會議係由世界各先進太陽能研發機構及知名製造廠等專家學者參與，藉此以了解太陽電池產業最新發展及其關鍵材料之研發趨勢。

建議針對 (1) 染料敏化太陽電池 (DSSC) 關鍵材料，(2) 矽晶/DSSC 二重複合系統、(3) 太電/釩還原電池 (VRB) 複合系統等關鍵技術，成立研究計畫，透過計畫執行，期能儘速掌握國際太電技術發展趨勢，建立台電特有之太陽光電核心技術，研提發展太電產業之具體方案，開發染料敏化太陽電池技術作為台電發展太陽能發電之基礎。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網

(<http://open.nat.gov.tw/OpenFront/RobtaFront/index.jsp>)

# 目 錄

出國報告書提要 .....	I
目錄 .....	II
表目錄 .....	III
圖目錄 .....	IV
一、出國行程及主要任務 .....	1
1.1 出國緣由 .....	1
1.2 出國目的 .....	1
1.3 出國行程 .....	1
二、實習染料敏化太陽電池 (DSSC) 技術 .....	2
2.1 DSSC 技術原理與最新產業現況 .....	2
2.2 訪問賓大研討 DSSC 技術 .....	5
2.3 訪問賓大研討薄膜太陽電池研究現況 .....	7
三、參加 2006 年國際太陽光電會議 .....	10
3.1 矽晶、薄膜與染敏等太電技術現況 .....	10
3.2 太電/鈦還原電池 (VRB) 複合系統之最新研究動態 ...	17
四、感想與建議 .....	22
4.1 感想.....	22
4.2 建議 .....	23
五、參考文獻 .....	24

## 表 目 錄

表 1 出國行程表 .....	1
表 2 目前實驗室所製造出太陽電池與商品太陽電池之轉換效率..	15

## 圖 目 錄

圖 1 染料敏化太陽電池工作原理示意圖.....	2
圖 2 DSSC 之基材具可撓性特色.....	3
圖 3 透過高敏度分光鏡先將太陽光分成不同波段的光束.....	5
圖 4 利用熱鏡再用將太陽光分之近紅外線部分反射，讓可見光部 份直接穿透.....	5
圖 5 穿透光利用不同能隙材料適合各波段的 DSSC，反射光經聚 焦後利用高效能矽晶太陽電池，組成高效率之二重複合太陽 光電系統.....	6
圖 6 聚焦系統太陽光電系統.....	6
圖 7 自組裝方式，形成二氧化鈦顆粒之有序排列.....	7
圖 8 垂直有序之二氧化鈦奈米管，可同時提高電子與離子傳輸速 度,可有效改善光能轉換效率.....	7
圖 9 矽晶圓上生長之太陽電池薄膜，可分成初生態矽晶區、微矽 單晶區與非晶-微晶混合區三個不同的相區.....	8
圖 10 成膜即時監控製程裝置示意圖.....	8
圖 11 使用理論數學模式配合實驗驗證，建立出太陽電池薄膜成 膜相圖.....	9
圖 12 太陽能電池的作用原理：半導體產生電子電洞對之 PN 接 合示意圖.....	10
圖 13 太陽電池的種類.....	11

圖 14 全球各種不同材質太陽電池之市場佔有率.....	11
圖 15 染料敏化奈米薄膜電池構造示意圖與產品外觀.....	13
圖 16 CIS 太陽電池構成示意圖.....	14
圖 17 CISG 太陽電池構成示意圖.....	14
圖 18 澳洲新南威爾斯大學 Martin Green 教授研製之 PERL 太陽電池，其效率接近 25%.....	15
圖 19 全球太陽光電池模組裝置容量與產值預測.....	16
圖 20 VRB 流動電池與再生能源整合運用或供變電所、輸配電系統、或是分散式電源之貯存或最佳化管理之應用示意圖...	17
圖 21 貯能系統可將尖峰需求轉移到離峰，同時產生更多更具效能之基載電力.....	18
圖 22 和傳統的鉛酸電池比較發現，太陽光電可利用 VRB 流動電池之新型貯電技術貯存形成一整合電力系統，是目前削平尖峰負載最理想之解決方案.....	18
圖 23 釩還原電池（VRB）是一種可逆電化學貯能電池.....	19
圖 24 Pacific Corp 裝設於 Moab 之 2MWh VRB 流動電池貯電系統.....	20
圖 25 美國加州 PG&G 公司安裝於 Alameda 郡 Santa Rita 能源中心大型太陽光電與燃料電池整合供電系統.....	20
圖 26 美國加州 PG&G 公司安裝於 Alameda 郡 Santa Rita 能源中心大型太陽光電與 VRB 電池整合供電系統之運轉數據....	21

# 一. 出國行程及主要任務

## 1.1 出國緣由

本公司為我國最主要的電力供應者，依照全國能源會結論，本公司遵循政府能源多元化政策指示，正積極推廣再生能源利用與努力增進能源多元化開發，是以綜研所於 96 年度規劃執行太陽光電等前瞻性研究計畫，期能擬定適切的太陽光電應用方案供決策參考。

## 1.2 出國目的

本次出國主要任務是前往賓州大學 Harry R. Allcock 教授之研究室，實習敏化太陽電池 (DSSC) 之最新研發技術，就奈米結構 DSSC, 矽晶/DSSC 二重複合系統之想法、DSSC/電池複合設計方案薄膜太陽電池等議題進行研討。除赴賓州大學研討外，出國期間正逢 2006 太陽光電國際會議在美國 San Jose 舉行，該會議係由世界各先進太陽能研發機構及知名製造廠等專家學者參與，故亦擬參加是項會議，藉此了解太陽電池產業最新發展及其關鍵材料之研發趨勢。

## 1.3 出國行程

本次出國自 95 年 10 月 17 日啟程至 95 年 10 月 28 日返國計 12 日，詳細訪問機構與工作內容如表一行程表所示。

表 1 出國行程表

項次	起始日	迄止日	詳細工作內容		
			機構名稱	國家城市名稱	
1	951017	951017		美國舊金山	往程(台北－舊金山)
2	951018	951020	2006 國際太陽光電會議	美國聖荷西	往程(舊金山－聖荷西) 參加 2006 國際太陽光電會議
3	951021	951022		美國費城	路程及資料整理(聖荷西－舊金山－費城)
4	951023	951024	賓州大學	美國學院城 (state college)	賓州大學 Harry R. Allcock 教授研究室之太陽能相關研究觀摩，研討敏化太陽電池 (DSSC) 等技術最新發展
5	951025	951025		美國費城	觀摩賓大太陽能電池研究設施及返程(學院城－費城)
6	951026	951028			返程(費城－舊金山－台北)

## 二、實習染料敏化太陽電池（DSSC）技術

10月23~24日在賓州大學會晤化學系 Harry R. Allcock、Thomas E Mallouk 教授和材料系 Craig A. Grimes 教授，觀摩其研究室之太陽能相關研究設施，並研討敏化太陽電池與奈米製程技術最新發展。10月25日會晤電機系微電子與裝置中心 Christopher R. Wronski 教授，就太陽電池薄膜製程技術進行交流研討，並觀摩其研究室太陽能電池研究設施。茲將觀摩研習心得敘述於下。

### 2.1 DSSC 技術原理與最新產業現況

瑞士科學家 Gratzel 在 1991 年提出，以奈米結構電極材料及染料組成光電效率超過 7% 的光電池，後來稱為「染料敏化太陽光電池」，才引起能源界積極熱烈地投入技術開發。以技術角度而論，這項太陽光電池技術成功以奈米結構電極與染料，結合出具有高轉換效率電子轉移介面技術，與過去無材料固態介面之設計有所不同，被統稱為第三代太陽光電池。以市場角度來看，已經有多家具指標性光電池的廠商陸續取得專利授權，包括 STI (Sustainable Technology International)、Toyota/IMRA。

此類光電池的基本架構是透明導電基片、多孔奈米晶體二氧化鈦薄膜、染料光敏化劑、電解質溶液(含超敏化劑)和透明對電極所組成。其工作原理如圖 1 所示，染料分子作為吸光的主要材料，被吸收之太陽光轉換至激發態後提升到至高能階層，再傳導至奈米二氧化鈦半導體的導電帶，但激發態是在一個不穩定狀態下，所以電子必須以最快的速度注入到緊鄰的  $\text{TiO}_2$  導電帶，使染料分子所失去電子能在第一時間從電解質中得到回饋作用，在  $\text{TiO}_2$  導電帶中的電子能夠併入導電膜中，最終經由電極引至外部迴路產生光電流作用。

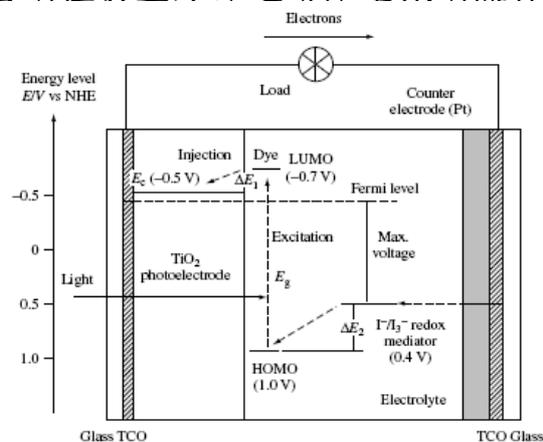


圖 1 染料敏化太陽電池工作原理示意圖

這幾年來 DSSC 光電池在實驗室及商業化用途持續發展，最大原因在於簡單製程，不用投入昂貴設備及無塵室廠房等設施，加上二氧化鈦、電解質等材料價格便宜是兩大關鍵要素。至於目前價格昂貴的鉑金屬觸媒，相信生產規模成長，成本也會下降。另外，在染料部份也有人提出以高能階差半導體，如：有機鈦金屬（N3）是目前公認最佳的染料之一，對於光穩定性較高，若以此類物質取代

Flexible low weight DSC module reflects the Australian sun.  
Manufactured at STI factory using STI patented continuous process for flexible DSC. All materials but substrates are manufactured at STI.

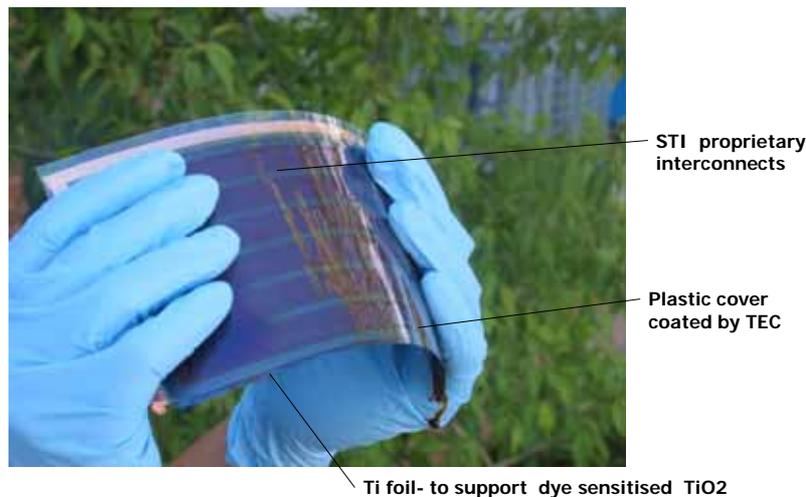


圖 2 DSSC 之基材具可撓性特色

二氧化鈦，在理論上應該能獲得較好的耐久性，關於這方面研究，有部分研究單位也積極投入。其次可使用具有可撓性基材(圖 2)，應用端可大幅擴張，與目前主流結晶矽光電池只適用於大型戶外、屋頂等少數應用場合有所差異。

不過，DSSC 想要在商業化市場中掙得一席之地，搶佔市場佔有率，還有部份的問題需時間來證明：(1) 光電池本身耐久問題；目前 DSSC 還缺少商品化之後，產品長期使用實際數據。(2) 整體電池模組基礎研究；為促進產品規格及品質確立，在光電池模組細部研究還需加強。(3) 大面積製程技術；目前廠商對於這方面研究的投入較少，尚停留在小型化商品應用，未來若要擴大市佔率，勢必要朝著大型化應用發展。

依據 John Walko 在([參考原文：Wales to host first Dye Sensitized Solar Cell plant](#))文中報導，一家最近剛成立的可更新能源公司 G24 Innovations，將在英國威爾斯的 Cardiff 建造第一座生產染料敏化太陽

能電池的工廠。這家生產所謂的“太陽能箔(solar foils)”的工廠，投資金額將在 6,000 萬到 7,500 萬歐元之間，將帶來 300 個工作機會。G24 Innovations 的總裁 Paul Turney 表示：「我們已經備妥該計畫第一階段的資金，將建造一條產量大約為 25 兆瓦(Megawatts)的生產線，並安裝一個塗層機。這一階段的投資大約為 2,000 萬歐元，將在明年初期完成。第二階段將擴大規模，產量達到 200 兆瓦，並將在 2008 年就位。」

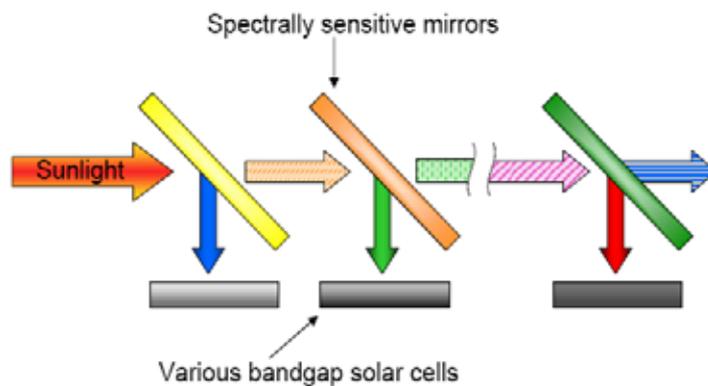
Turney 表示：「儘管此計畫獲得威爾斯議會和當地政府機關的“大力支援”，但我們並沒有獲得任何財務上的資助，或是可儘快推行這個計畫的特別許可；當然也沒有人會阻止我們的計畫。第一階段目前執行正常，並已經在試生產太陽能箔。」此一染料敏化太陽能電池的生產技術來自光電技術專業公司 Konarka Technologies，和瑞士洛桑聯邦高等產業學院(Ecole Polytechnique Federale de Lausanne，EPFL)的授權。DSSC 是由 EPFL 教授 Michael Graetzel，和他的研發團隊在 20 世紀 80 年代末期發明的，後來由 Konarka 的工程師進一步改良。

G24 Innovations 的主要支援者是 Renewable Capital，一家總部位於美國 Delaware 州，專門投資綠色能源計畫的公司，分別由 EPFL、Konarka Technologies 和 Solarcoating 持有部份股份。DSSC 的光譜比傳統的太陽能電池的光譜要寬，因此可以從所有可見光中產生能量，而所需的光強度等級也相對較低。光電材料經由「工廠裏的光合作用」的過程來產生能量。

DSSC 模組的製造原理是：將一層薄薄的二氧化鈦(titanium dioxide)塗在一層薄膜，然後透過奈米技術來進一步處理薄膜上的分子和原子，隨後產生電力。這個製程採用了“捲軸式(roll-to-roll)”設備，這種設備有點類似於用來製造紡織品和照相底片的設備，與傳統的太陽能電池製造設備相較，可大幅降低成本。Turney 表示：「和傳統的太陽能電池不同，我們不會使用矽或者重金屬，因此生產出來的材料可能只有普通太陽能電池的 1/50。在行動電子設備的使用風行全球的趨勢下，我們的這種突破性技術還有很大的發展潛力。」DSSC 的最初目標市場將包括手機充電器，尤其是用於發展中國家，並將作為 MP3 播放器、筆記型電腦，和掌上遊戲機等消費品的電源。除此之外，該公司還會將 DSSC 投入紡織品應用，並作為新型建築一體化產品的基礎，為建築的一部份提供能源。

## 2.2 訪問賓大研討 DSSC 技術

此次訪問賓州大學，會見 Harry R Allcock、Thomas E Mallouk、Craig A.Grimes 等教授，就該校在奈米結構 DSSC,矽晶/DSSC 二重複合太電系統之研究，就目前他們正在進行之研究進行討論，討論重點如下。矽晶/DSSC 二重複合太電系統是透過高敏度分光鏡，先將太陽光分成不同波段的光束（圖 3），或利用熱鏡再用將太陽光分之近紅外線部分反射，讓可見光部份直接穿透（圖 4）。圖 5 顯示太陽光經分光理後，穿透光利用不同能隙材料適合各波段的 DSSC，反射光利經聚焦後利用高效能矽晶太陽電池，可組成高效率之二重複合太陽光電系統。再加上自動追日與聚焦系統（圖 6），可得目前全世界最高之發電效率，這是各國先進實驗室所共同致力之主要研究方向與目標。



Spectrum splitting tandem cell by spectrally filtering with dielectric mirrors and directing onto differing energy bandgap materials.

圖 3 透過高敏度分光鏡先將太陽光分成不同波段的光束

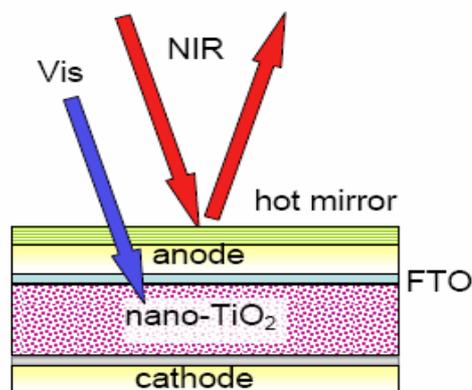


圖 4 利用熱鏡再用將太陽光分之近紅外線部分反射，讓可見光部份直接穿透

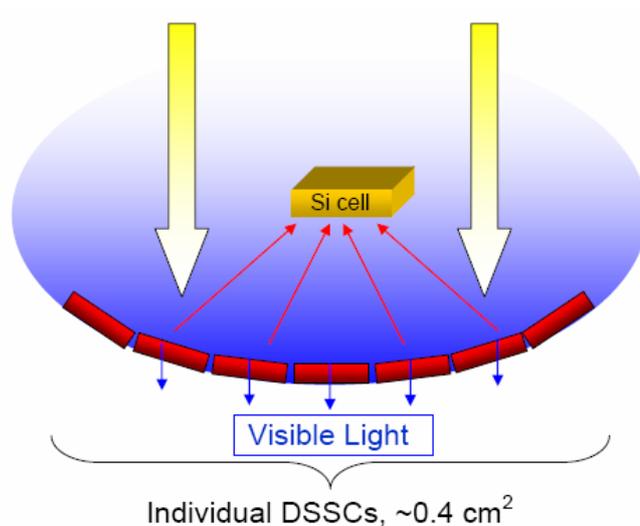


圖 5 穿透光利用不同能隙材料適合各波段的 DSSC，反射光經聚焦後利用高效能矽晶太陽電池，組成高效率之二重複合太陽光電系統

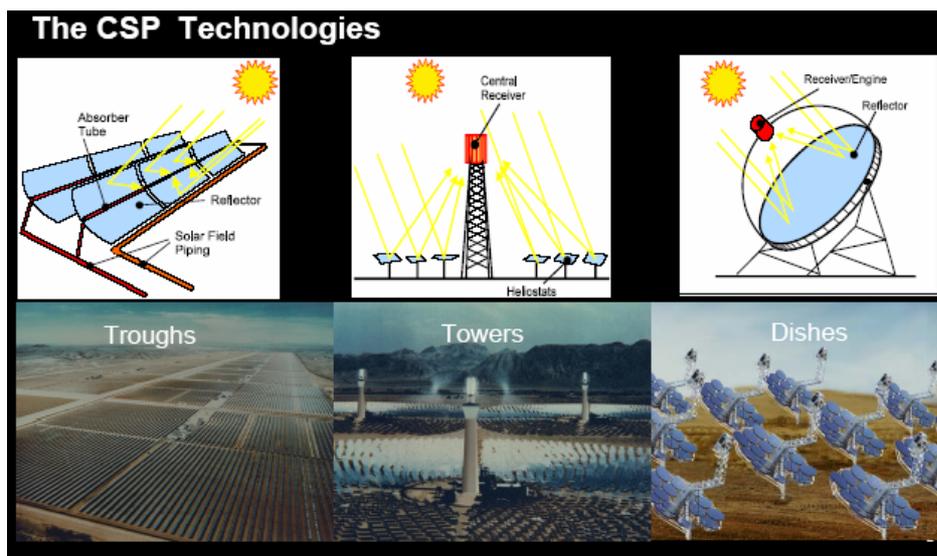


圖 6 聚焦系統太陽光電系統

此行會見 Craig A.Grimes 是賓州大學材料系教授，其專長在於 DSSC 奈米材料之研製與合成。圖 7 是 Grimes 教授以自組裝方式，合成二氧化鈦奈米顆粒之有序排列結構。此材料因產生之光波共振效應有助於擴展太陽光之吸收波長範圍，搭配二重複合太陽電池發電，可有效提高 DSSC 之發電效率。此外 Grimes 教授亦成功研發出垂直有序之二氧化鈦奈米管（圖 8），可同時提高電子與離子傳輸速度，亦可有效改善光能轉換效率。

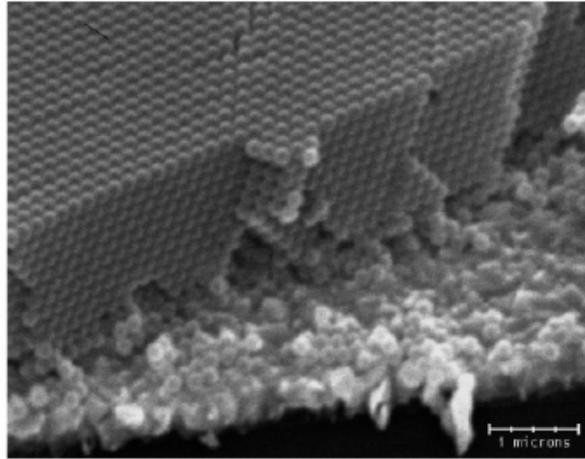


圖 7 自組裝方式，形成二氧化鈦顆粒之有序排列

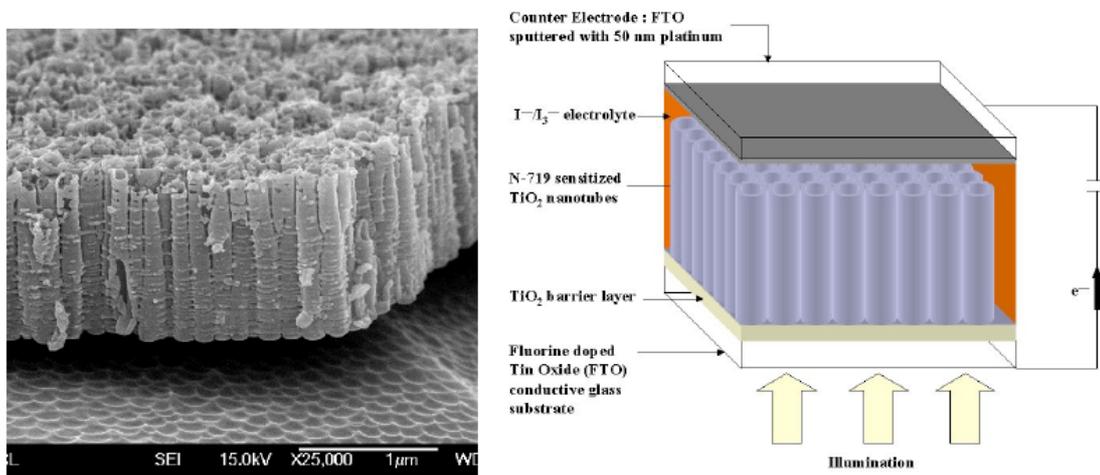


圖 8 垂直有序之二氧化鈦奈米管，可同時提高電子與離子傳輸速度，可有效改善光能轉換效率

### 2.3 訪問賓大研討薄膜太陽電池研究現況

10 月 25 日會晤電機系與薄膜裝置中心之 Christopher R. Wronski 教授，就太陽電池薄膜製程技術進行交流研討，並觀摩其研究室太陽能電池研究設施。Wronski 教授的專長為微電子材料與裝置 (Microelectronic Materials and Devices)，長期以來從事非晶形太陽電池薄膜製程研究，廣為人知之非晶形薄膜太陽電池初期效能衰退理論，即是由 Wronski 教授所提出的。圖 9 是一典型的薄膜太陽電池成膜機制示意圖，圖中可看出在矽晶圓上生長之太陽電池薄膜，可分成初生態矽晶區、微矽單晶區與非晶-微晶混合區三個不同的相區，

三相區間以二虛線隔開代表兩相間之固態界面。Wronski 教授設計精巧之成膜即時監控制程裝置（圖 10），可控制成膜之品質。

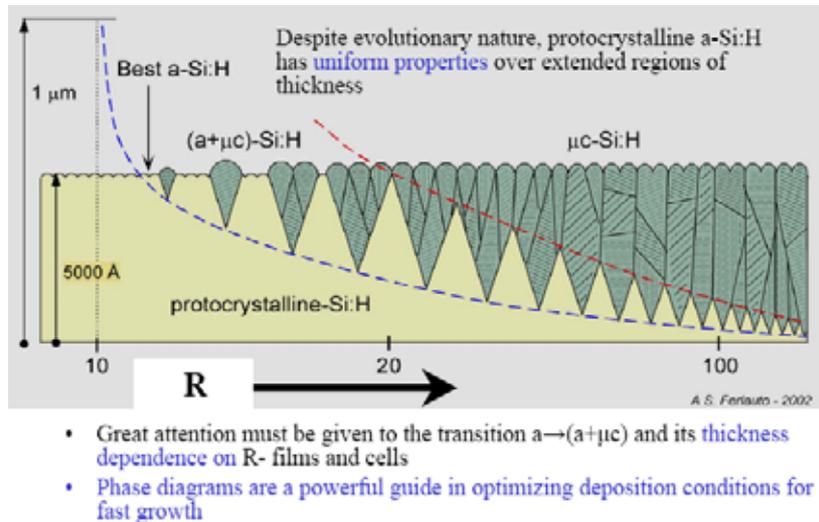


圖 9 矽晶圓上生長之太陽電池薄膜，可分成初生態矽晶區、微矽單晶區與非晶-微晶混合區三個不同的相區

實驗參數與膜之結構，以獲得最佳之光電效能。Wronski 教授並使用理論數學模式配合實驗驗證，建立太陽電池薄膜成膜相圖（圖 11），其完成之製程技術，透過製程參數之有效監控，對薄膜生產過程品質之提昇卓有貢獻。

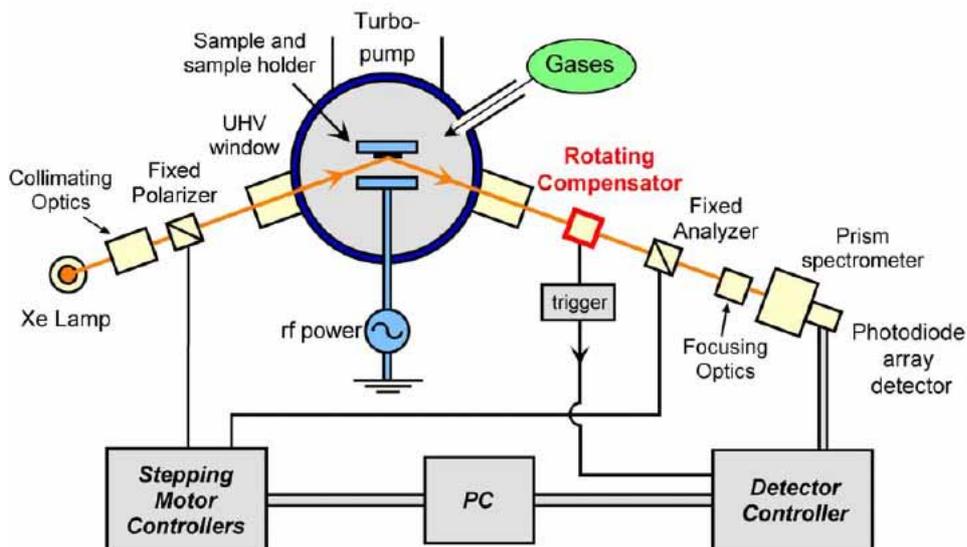


圖 10 成膜即時監控制程裝置示意圖

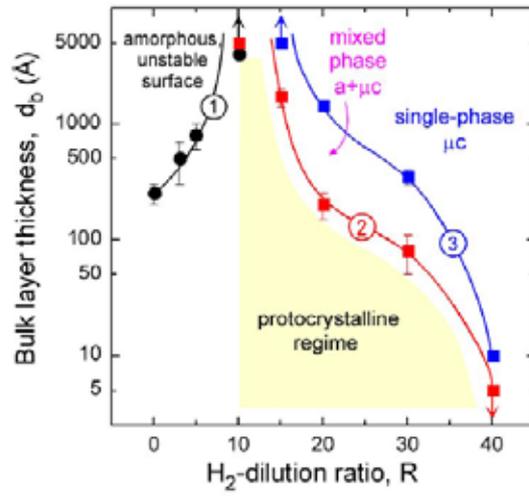


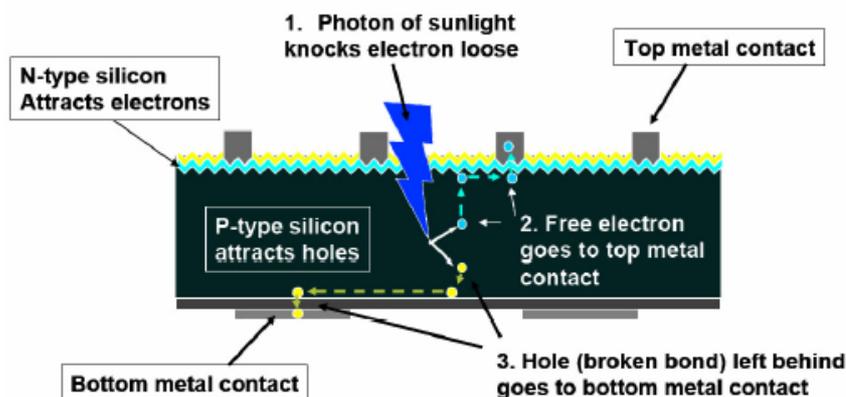
圖 11 使用理論數學模式配合實驗驗證，建立出太陽電池薄膜成膜相圖

### 三、參加 2006 年國際太陽光電會議

#### 3.1 矽晶、薄膜與染敏等太電技術現況

太陽能電池與一般的電池不同，太陽能電池是將太陽能轉換成電能的裝置，且不需要透過電解質來傳遞導電離子，而是改採半導體產生電子電洞對之 PN 接合 (PN junction) 來獲得電位。當半導體受到太陽光的照射時，大量的自由電子伴隨而生，而此電子的移動又產生了電流，也就是在 PN 接合處產生電位差 (圖 12)。因此，太陽能電池需要陽光才能運作，所以大多是將太陽能電池與蓄電池串聯，將有陽光時所產生的電能先行儲存，以供無陽光時放電使用。

光伏電池 (以下稱為光電池) 是利用光電效應，將光能轉變為電能的能源儲存技術與裝置。光電池最早的研究起自於 1950 年代，因應美國發展太空科技所需，受限於當時半導體技術尚處於早期階段，光電池並未進入民生產業應用。1990 年代初期，由於研發經費的持續投入、製程技術改良、材料研究的突破與能源需求的持續提升，光電池的研究與應用重新引起注意。經由不斷的技术突破，光電池也被認為能夠適時彌補能源需求的窗口，並為高油價時代帶來能源應用新機會。



Source: SunPower Corporation

圖 12 太陽能電池的作用原理：半導體產生電子電洞對之 PN 接合示意圖

根據市場分析公司 BCC, Inc 公布的最新研究報告，2004 年光電池模組全球出貨量為 973.1 MW，期間將以平均成長率 23.4% 成長，預估到 2009 年時將達 2,783.1 MW。在現有光電池技術中，半導體矽

晶元為主要製程技術，其應用比率為 90%，其中又可細分為多晶矽技術與單晶矽技術。根據 BCC 的估算，到 2009 年時，多晶矽出貨量為 1,778.0 MW，平均成長率為 24.8%，單晶矽為 830.8 MW，年平均成長率為 22.9%。從市場面來看太陽能電池產業：全球太陽光電產業市場蓬勃發展，近五年太陽電池年複合平均成長率達 35%，太陽光電系統裝置量的成長也達 30% 以上，94 年全球太陽能電池產值約為 112 億美元。

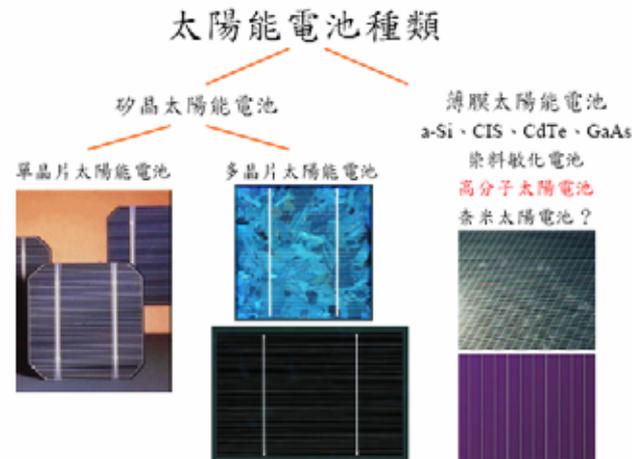


圖 13 太陽電池的種類

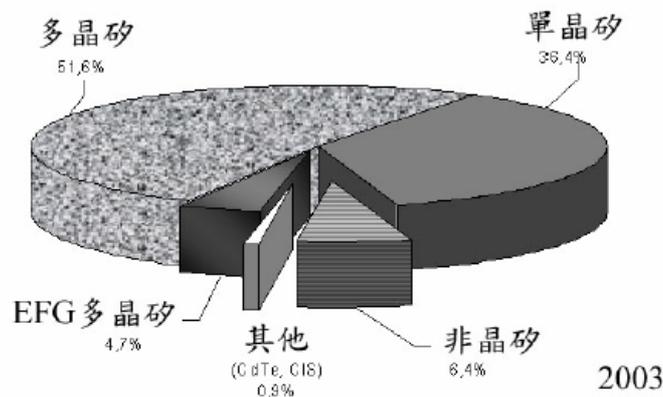


圖 14 全球各種不同材質太陽電池之市場佔有率

太陽能電池的種類如圖 13，可其構成材料不同可分成矽晶和薄膜兩大類，矽晶可再細成單晶和多晶兩種，而薄膜也衍生出染料敏化等。2003 年全球各種不同材質太陽電池之市場佔有率如圖 14 示。依發展之順序太陽電池又可分成三代，茲細說如下。

## 第一代太陽電池：矽晶太陽電池

太陽輻射之光譜，主要是以可見光為中心，其分佈範圍從 0.3 微米 ( $\mu\text{m}$ )之紫外光到數微米之紅外光為主，若換算成光子的能量，則約在 0.4 eV(電子伏特)到 4eV 之間，當光子的能量小於半導體的能隙 (energy bandgap)，則光子不被半導體吸收，此時半導體對光子而言是透明的。當光子的能量大於半導體的能隙，則相當於半導體能隙的能量將被半導體吸收，產生電子-電洞對，而其餘的能量則以熱的形式消耗掉。因此製作太陽電池材料的能隙，必須要仔細地選擇，才能有效地產生電子-電洞對。一般來說，理想的太陽電池材料必須具備有下列特性：(1) 能隙在 1.1 到 1.7eV 之間。(2) 直接能隙半導體。(3) 組成的材料無毒性。(4) 可利用薄膜沉積的技術，並可大面積製造。(5) 有良好的光電轉換效率。(6) 具有長時期的穩定性。

我們知道矽的能隙為 1.12eV，且矽為間接能隙半導體，它對光的吸收性不好，所以矽在這方面並非是最理想的材料，但是在另一方面，矽乃地球上蘊含量第二豐富的元素，且矽本身無毒性，它的氧化物穩定又不具水溶性，因此矽在半導體工業的發展，已具有深厚的基礎，目前太陽電池仍舊以矽為主要材料。矽原子依據不同的結晶方式，可區分成單晶矽、多晶矽及非晶矽。單晶矽的組成原子均按照一定的規則，週期性的排列，它的製作方法是把矽金屬（純度為 99.999999999%，11 個 9）熔融於石英坩堝中，然後把晶種(seed)插入液面，以每分鐘轉 2~20 圈的速率旋轉，同時以每分鐘 0.3~10 毫米(mm)的速度緩慢的往上拉引，如此即可形成一直徑 4~8 吋單晶矽錠 (ingot)，此製作方法稱為柴氏長晶法(Czochralski Method)。用單晶矽製成的太陽電池，效率高且性能穩定，目前已廣泛應用於太空及陸地上。

多晶矽的矽原子堆積方式不只一種，它是由多種不同排列方向的單晶所組成。多晶矽是以熔融的矽鑄造固化製成，因其製程簡單，所以成本較低。目前由多晶矽所製作出的太陽電池產量，已經逐漸超越單晶矽的太陽電池。

## 第二代太陽電池：薄膜矽晶太陽電池

非晶矽乃是指矽原子的排列非常紊亂，沒有規則可循。一般非晶矽是以電漿式化學氣相沈積法(Plasma Enhanced Chemical Vapor

Deposition，簡稱 PECVD)，在玻璃等基板上成長厚度約 1 微米( $\mu\text{m}$ )左右的非晶矽薄膜，因為非晶矽對光的吸收性比矽強約 500 倍，所以對非晶矽而言只需要薄薄的一層就可以把光子的能量有效的吸收。而且不需要使用價格昂貴的結晶矽基板，改採用價格較便宜的玻璃、陶瓷或是金屬等基板，如此不僅可以節省大量的材料成本，也使得製作大面積的太陽電池成為可能(結晶矽太陽電池的面積受限於矽晶圓的尺寸)。

當非晶矽太陽電池剛被發明時，由於具有低成本、製作簡易且可大面積製造等優點，有學者預言將有可能取代結晶矽太陽電池，因此曾經引起廠商的興趣投入生產，從 1985 年到 1990 年初期非晶矽太陽電池的比例曾經到達全世界太陽電池總量的三分之一。但是近幾年非晶矽太陽電池的生產比例有逐漸下滑的趨勢，影響非晶矽太陽電池發展的主要因素就是穩定度的問題。由於非晶矽材料在強烈的光線照射下，將會產生缺陷而導致電流下降(即所謂的 Staebler-Wronski 效應)，發生供電不穩定的問題。雖然目前有人採用雙重接面(a-Si/a-SiGe)電池來提升它的穩定度，但是仍有值得努力發展的空間。

### 第三代太陽電池：染敏電池與化合物半導體太陽電池

1991 年，瑞士 M.Graetzel 教授利用大自然光合作用原理，採用奈米多孔二氧化鈦半導體膜和實驗室合成的染料，發明了一種染料敏化奈米薄膜電池(圖 15，小面積(0.2 平方厘米)電池光電轉換效率超過 10%。由於這種電池成本低廉，製程相對簡單，能耗低，性能穩定，保護環境，顯示出強大的商業應用價值，已成為研究和發展太陽電池的熱門選擇。但實用化的大面積電池研製則一直處於“瓶頸”狀態，目前各國研發的大面積染料敏化電池的光電轉換效率尚未能超過 5%。

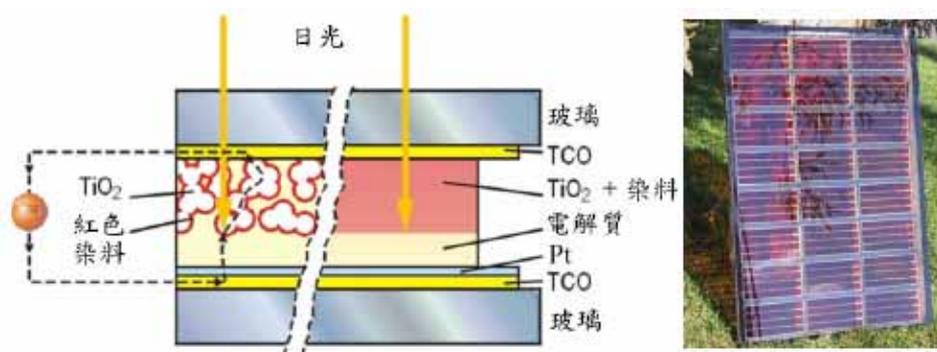
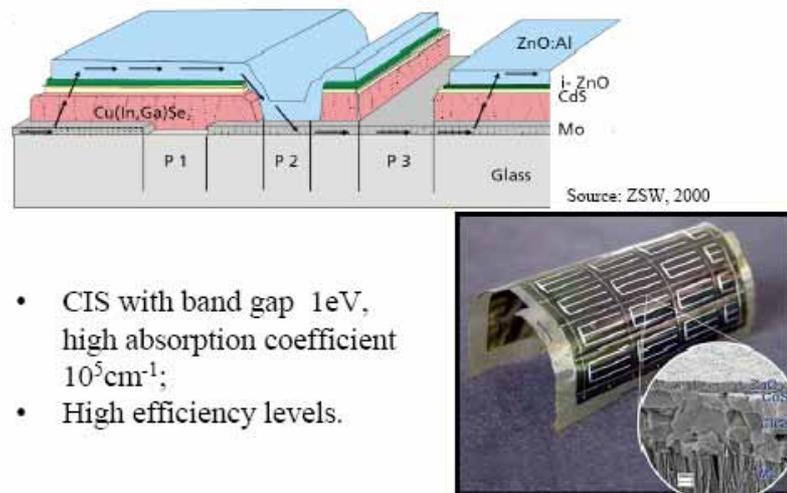


圖 15 染料敏化奈米薄膜電池構造示意圖與產品外觀

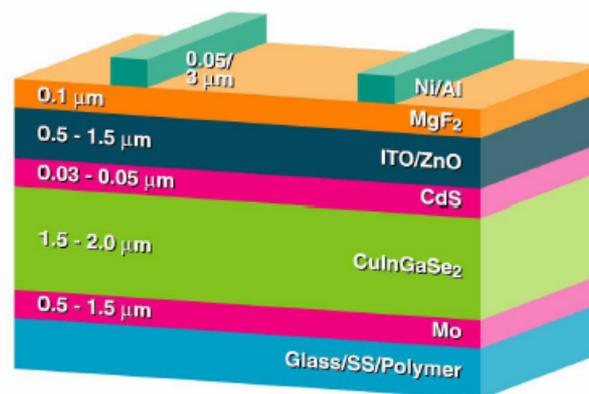
除了上述以矽為主的太陽電池材料外，還有各種不同的化合物半導體材料陸續被研發出來。主要的材料有：GaAs、GaInP、InGaAs、CdTe、CuInSe (CIS) (圖 16)、CuInGaSe (CIGS) 等 (圖 17)。這些材料所製作出的太陽電池都有很高的效率，但是因為製程的成本較高，所以只有應用在特殊用途。



- CIS with band gap 1eV, high absorption coefficient  $10^5\text{cm}^{-1}$ ;
- High efficiency levels.

圖 16 CIS 太陽電池構成示意圖

### Copper-Indium-Gallium-Diselenide Cell



- NREL has obtained an efficiency of 19.5% in the lab.  
Source: D. Carlson, PB Solar

圖 17 CIGS 太陽電池構成示意圖

表二列出 2003 年實驗室所製造出的太陽電池與商品太陽電池之轉換效率目前實驗室所製造出的太陽電池之轉換效率。有許多幾乎可以達到最佳的水準，只可惜他們的製造過程多半過於複雜，而且價格昂貴並未大量生產 (圖 18)。根據文獻的記載，目前各種太陽電池

的最高效率為：（1）單晶矽：24.7%（2）多晶矽：19.8%（3）非晶矽：14.5%（4）GaAs：25.7%（5）CIGS：18.8%（6）多接面串疊型（InGaP/GaAs//InGaAs, multijunction tandem cell）：33.3%。

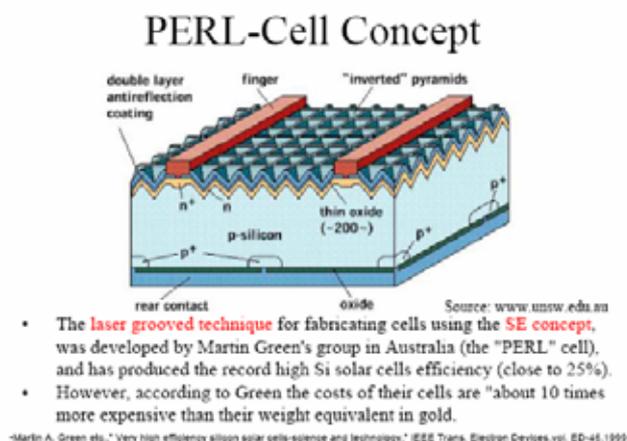


圖 18 澳洲新南威爾斯大學 Martin Green 教授研製之 PERL 太陽電池，其效率接近 25%

由於材料特性上的限制，對於結晶矽太陽電池的效率，幾乎已經達到最佳的水準，要再進一步提升的空間有限，目前比較具有成長潛力的應屬多接面的串疊型太陽電池，根據美國能源部的研究人員預測，到達 2005 年時，多接面的串疊型太陽電池效率將可達到 40% 以上。

表 2 目前實驗室所製造出的太陽電池與商品太陽電池之轉換效率

	<u>Modules</u>	<u>Lab</u>
➤ Dye-sensitized solar cells	3 - 5%	11%
➤ Amorphous silicon (multijunction)	6 - 8%	13.2%
➤ Cadmium Telluride (CdTe) thin film	8 - 10%	16.5%
➤ Copper-Indium-Gallium-Selenium (CIGS)	9 - 11%	19.5%
➤ Multicrystalline or polycrystalline silicon	12 - 15%	20.3%
➤ Monocrystalline silicon	14 - 16%	21.6%
➤ High performance monocrystalline silicon	16 - 18%	24.7%
➤ Triple-junction (GaInP/GaAs/Ge) cell (236 suns)	-	39.0%

除了上述矽晶元技術外，另一種較低成本的技术為薄膜式技術（thin films）。若以出貨量論，2004 年薄膜式光電池模組出貨量為 87.6 MW，預估到 2009 年將達 154.6 MW（年平均成長率為 13.4%）。

此外，BCC 預估新興奈米技術，例如染料敏化太陽電池（dye-sensitized solar cells）已在 2005 年出現商用產品，並成為矽晶技術與薄膜技術外的另一個選擇。雖然 2005 年染料敏化太陽電池僅有 6.5 MW，但是平均成長率高達 30.1%，也就是說到 2009 年可達 19.7 MW。需要注意的是，染料敏化太陽電池因具有可饒性與低成本特性，預計未來十年其影響力將會持續增加，值得更進一步的追蹤與觀察。

以產值估算（圖 19），2004 年全球太陽電池產值為 47 億美金，2009 年時為 82 億美金，年平均成長率為 11.7%。若進一步區分模組（元件）產值與材料產值，模組產值約為材料等級產值的 1.6 倍，也就是說 2009 年光電池材料產值將達 51 億美金。

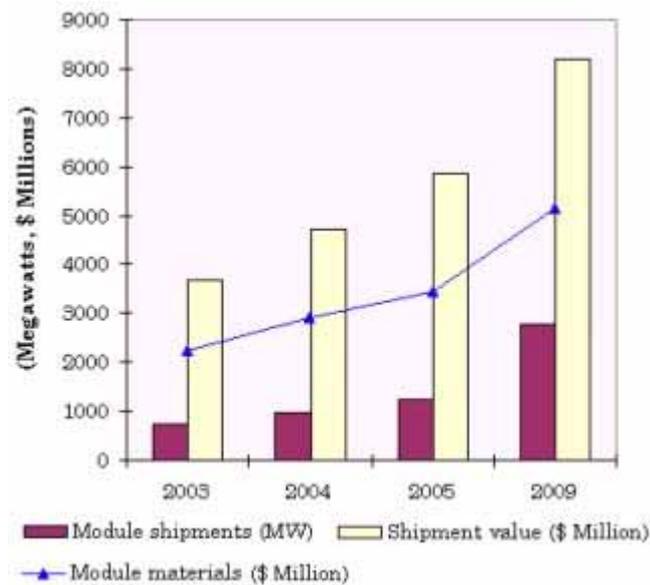


圖 19 全球太陽光電池模組裝置容量與產值預測  
 (Source: BCC Inc, 2005 年 2 月)

國內太陽電池的發展，早在 1980 年即已開始，早期是以 2”晶圓製作矽單晶太陽電池及矽多晶太陽電池，當時的效率可達 11。1980 年代末期，產業界技轉美國 Chronar 公司的非晶矽技術，成立國內第一座太陽電池的生產工廠，光華開發公司。到了 2000 年茂迪公司成立太陽光電事業部，正式投入太陽能電池領域，營運與銷售太陽能電池。2002 年益通光能公司成立，以生產結晶矽太陽電池為主，並於 2003 年後半年開始量產。現在國內已有茂迪、益通光能、旺能公司、中美矽晶、綠能科技及合晶等公司投入生產太陽電池相關產品。

近年來由於原油價格高漲不下，再加上「京都議定書」對溫室氣體排放之全球性管制，促使世界各國重視各種新能源與替代性能源，亦造成太陽能工業的蓬勃發展，近五年來全球太陽電池年複合平均成長率達 35%，因此國內廠商在太陽能電池工業尚有很大的成長空間，本公司作為國內最大電力供應者，也應配合時勢發展與其它能源產業夥伴們攜手努力，一起朝開創台灣太陽能電池新產業方向邁進。

### 3.2 太電/鈳還原電池（VRB）複合系統之最新研究動態

Janice Lin 在會議中以「Reliable Peak Load Reduction by Integrating Onsite PV and Flow Battery Technology」為題，發表其研究論文，吸引很多與會電業從業者之注意，茲摘錄其重點於后。

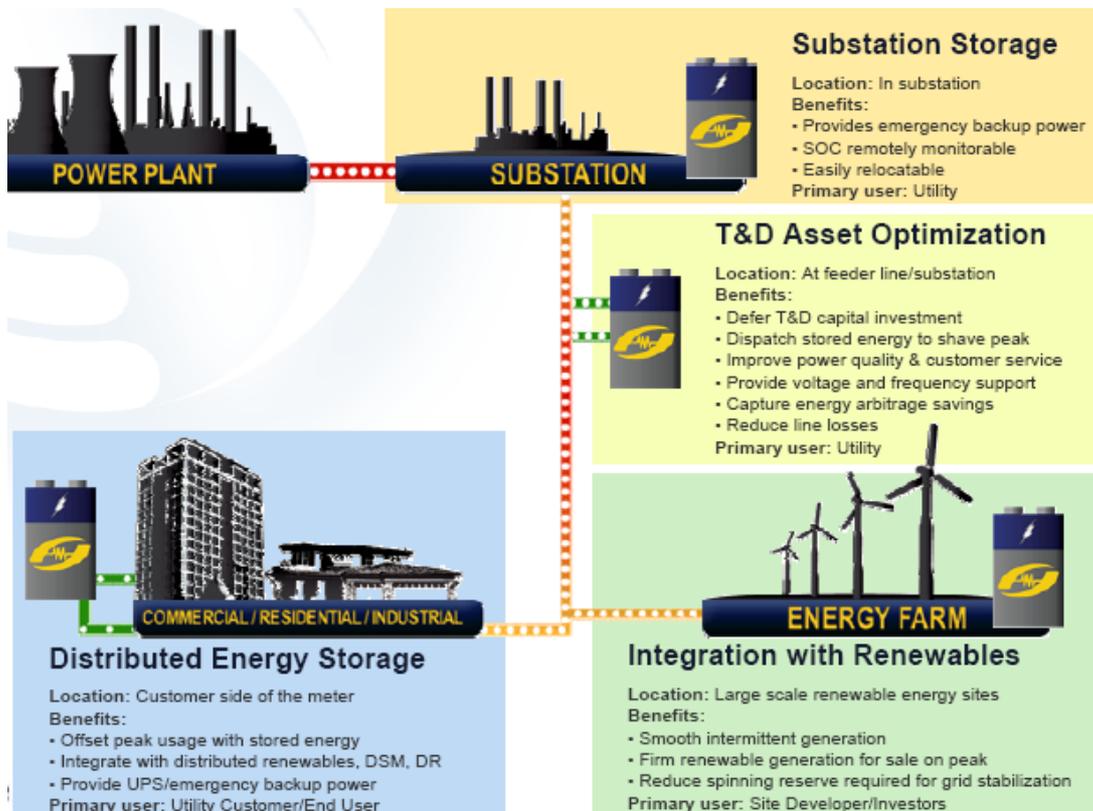


圖 20 VRB 流動電池與再生能源整合運用或供變電所、輸配電系統、或是分散式電源之貯存或最佳化管理之應用示意圖

圖 20 中顯示，VRB 流動電池除可與太陽光電塔配外，也可以與風力發電等再生能源整合或供能變電所、輸配電系統、或是分散式電源提供貯存或最佳化管理之應用。

圖 21 顯示太陽光電系統搭配一高容量之 VRB 貯電形成之供電系統，可將尖峰需求轉移到離峰，同時產生更多更具效能之基載電力。

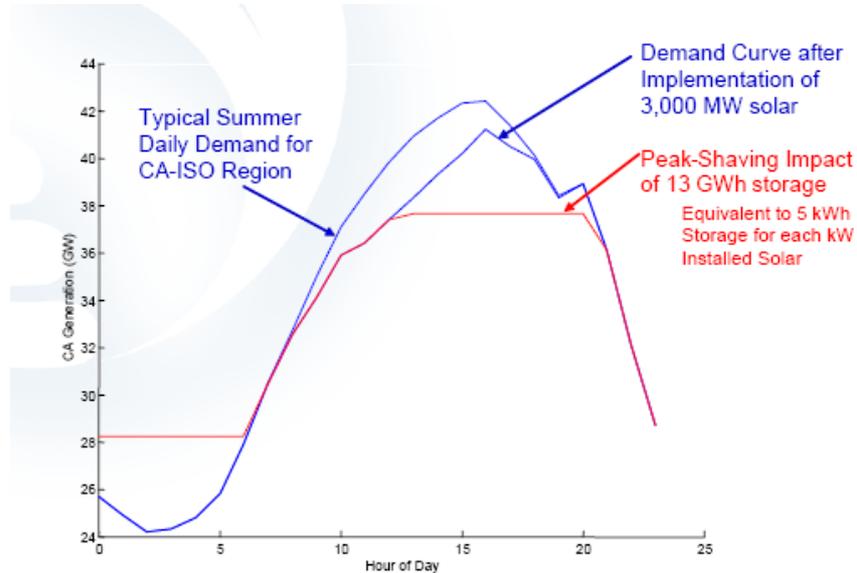


圖 21 貯能系統可將尖峰需求轉移到離峰，同時產生更多更具效能之基載電力

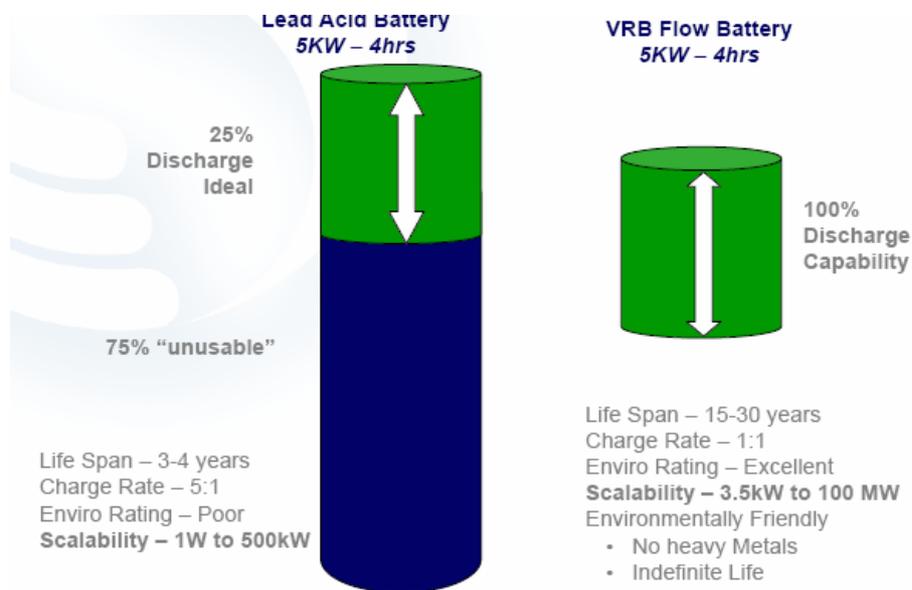


圖 22 和傳統的鉛酸電池比較發現，太陽光電可利用 VRB 流動電池之新型貯電技術貯存形成一整合電力系統，是目前削平尖峰負載最理想之解決方案

圖 22 顯示太陽光電可利用 VRB 流動電池之新型貯電技術貯存形成一整合電力系統，是目前削平尖峰負載最理想之解決方案。和傳統的鉛酸電池比較發現，其系統壽命可由 3~4 年提高至 15~30 年。系統貯電容量可由 1~500kW 放大至 3.5kW ~100 MW。

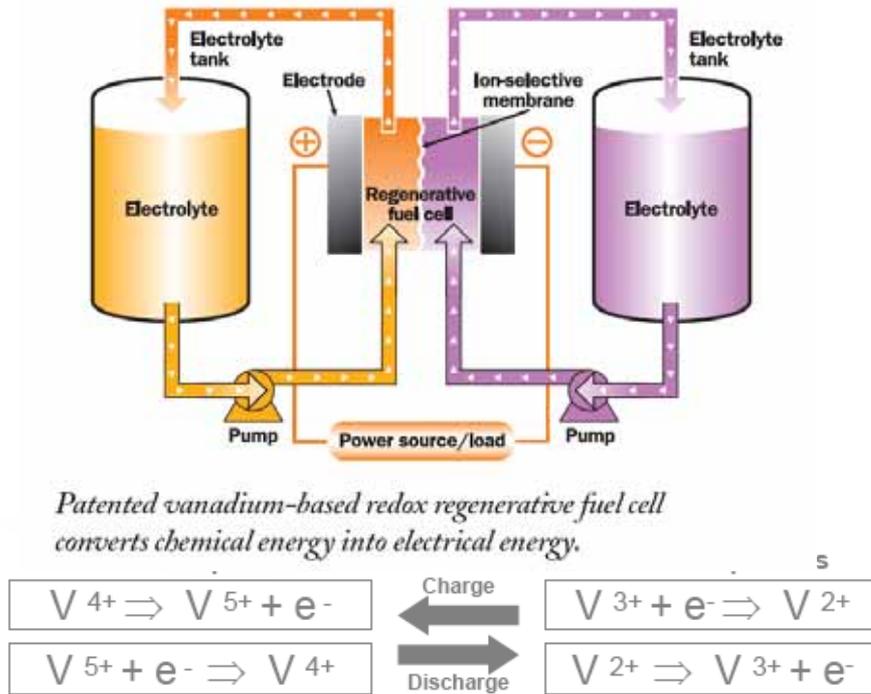


圖 23 鈦還原電池（VRB）是一種可逆電化學貯能電池

圖 23 所示鈦還原電池（VRB）是一種可逆電化學貯能電池，其特點是液態電解質可以和電極分離，電解質貯槽大小不受限制，因此可跳脫傳統電池之貯電容量限制。另一特點是，如圖中所示，僅利用單一元素鈦之可逆氧化與還原，是一種很特殊的可逆電化學貯能電池。此外該電池可於小於 1 ms 之極短時間內完成能量回復動作，是一種機動性甚佳之緊急供電裝置。目前每一 VRB 電池組之標準容量介於 5~50kW，全世界今之 VRB 裝置容量至今累計已達 12~15MW。

圖 24 所示之 VRB 流動電池貯電系統係 Pacific Corp 裝設於 Moab 之 2MWh VRB 貯電系統。



圖 24 Pacific Corp 裝設於 Moab 之 2MWh VRB 流動電池貯電系統



圖 25 美國加州 PG&G 公司安裝於 Alameda 郡 Santa Rita 能源中心大型太陽光電與燃料電池整合供電系統

最近美國加州 PG&G 公司有一典型的系統，安裝於 Alameda 郡 Santa Rita 能源中心（圖 25），目的是用來和當地既有之大型太陽光電系統整合，以降低尖峰負載之需求。如圖所示該地原已有大型太陽電池，並與一 1MW 之燃料電池組成一供電系統。因為想要降低尖峰負載之需求，且該地尚有足夠之空間可供裝設 VRB 流動電池，因此研究人員在該地加裝設一組 1MW 之 VRB 流動電池，與原系統搭配建構成一可提供 MW 級電力貯存之新供電系統。

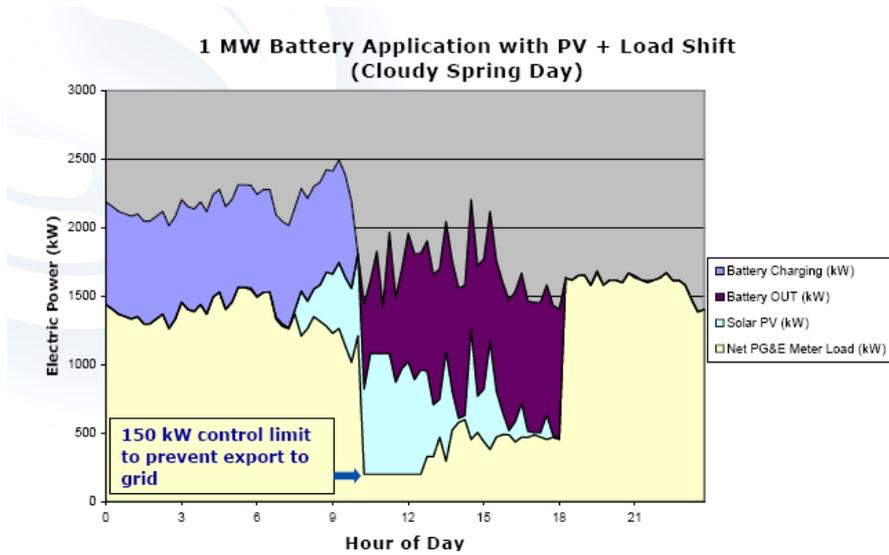


圖 26 美國加州 PG&G 公司安裝於 Alameda 郡 Santa Rita 能源中心大型太陽光電與 VRB 電池整合供電系統之運轉數據

圖 26 是 Santa Rita 能源中心大型太陽光電與 VRB 電池整合供電系統之實際運轉數據。圖中可看到前半段電池充電和中間時段電池供電，以及中間時段太陽光電供電之實際情況。此一 1MW VRB 流動電池之 round trip 效率證實可達到 75%。

## 四、感想與建議

### 4.1 感想

國內太陽能電池工業尚有很大的成長空間，台電公司作為國內最大電力供應者，除了繼續致力於新電源開發應用外，在太陽能電池產業方面，亦可配合時勢發展與其它新能源產業夥伴們攜手努力，一起朝開創台灣太陽能電池新產業方向邁進。

台電綜研所目前已開始規劃進行太陽光電前瞻性研究計畫，可進一步詳細規劃台電公司太陽光電技術發展時程，期能儘速建立適切的太陽光電關鍵技術，以掌握太電技術發展趨勢，提出具體適切之應用方案，供台電公司因應未來發展新能源產業之決策參考。

太陽能光電為一具競爭力之環保再生能源，目前之矽晶系統雖已漸趨成熟，但改進上亦遭遇瓶頸，半導體奈米薄膜科技可在材料用量與晶體結構方面提供突破點，染料敏化為一低成本之新光電技術，預期可在大規模量產運用上嶄露頭角，尖端科學研發之實用化將有助於人類文明之永續發展。

本次出國赴賓州大學太電中心拜訪Harry R. Allcock等5位教授，觀摩實習DSSC製程、DSSC之奈米結構、矽晶/DSSC二重複合系統、非晶薄膜太電製程等技術，對擬定台電公司太電研發方向提供重要資訊。

賓州大學太陽能中心所研究之DSSC屬最新之第三代太陽電池，製程比前兩代太電簡易而便宜，是各國競相研究的方向。本次返國後除建議與賓大繼續保持連繫外，綜研所可考慮針對DSSC關鍵材料，矽晶/DSSC二重複合系統、太電鈇還原電池（VRB）複合系統等進一步評估研究其發展之實用性。

本次出國參加2006太陽光電國際會議，與世界各先進太陽能研發機構及知名製造廠等專家學者進行交流，攜回資訊對擬定「太電關鍵材料」，乃至「先進太電VRB電池複合系統」等研發計畫甚有助益。

## 4.2 建議

### 4.2.1 建議之主題

成立研發計畫，開發染敏太陽電池技術作為台電公司發展太陽能發電基礎。

### 4.2.3 建議之背景說明

台電公司為我國最主要電力供應者，依照能源會結論，遵循政府能源多元化政策指示，正積極推廣再生能源利用與增進能源多元化開發。是以台電綜研所於 96 年度起開始進行太陽光電前瞻研究計畫。

### 4.2.4 建議之實施方法

建議進一步針對 (1) 染料敏化太陽電池 (DSSC) 關鍵材料，(2) 矽晶/DSSC 二重複合系統、(3) 太電/鈦還原電池 (VRB) 複合系統等關鍵技術，成立研究計畫，透過計畫執行，期能儘速掌握國際太電技術發展趨勢，建立台電公司特有太陽光電關鍵技術，以研擬發展太電產業具體方案。

### 4.2.4 建議之效益

有形效益：因應未來能源多元化與電源供應分散化之國際能源發展趨勢，本建議之執行，可使台電公司在相關能源產業立於技術與產業發展制高點，擬定前瞻性技術研發與投資策略，確保台電公司在電業自由化後電力供應產業中之優勢競爭地位。

無形效益：太陽能是解決傳統石化燃料造成二氧化碳污染之潔淨新能源技術，本項技術與事業體之籌設、規劃與推展，對我國舒解國際對二氧化碳排放要求日益嚴格的壓力，預期可以產生有很大的效益。本建議之執行亦可積極主動完成，台電公司在整體國家能源政策下之分工與任務。

## 五、参考文献

- (1) Neal M. Abrams, Pennsylvania State University, "Efficiency Enhancement in Dye-Sensitized Solar Cells" Doctor of Philosophy (December 2005)
- (2) C.R. Wronski, R.W. Collins, Solar Energy, "Phase engineering of a-Si:H solar cells for optimized performance" Vol.77, p.877-885(2004)
- (3) A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, "15 Dye-sensitized Solar Cells" p.663-700(2003)
- (4) Lara I. Halaoui, Neal M. Abrams, Thomas E. Mallouk, Journal of Phys. Chem. B, "Increasing the Conversion Efficiency of Dye-Sensitized TiO<sub>2</sub> Photoelectrochemical Cells by Coupling to Photonic Crystals" Vol.109, p.6334-6342(2005)
- (5) Suzushi Nishimura, Neal Abrams, Bradley A. Lewis, Lara I. Halaoui, Thomas E. Mallouk, Kurt D. Benkstein, Jao van de Lagemaat, Arthur J. Frank, Journal of AM. CHEM. SOC., "Standing Wave Enhancement of Red Absorbance and Photocurrent in Dye-Sensitized Titanium Dioxide Photoelectrodes Coupled to Photonic Crystals" Vol.125, p.6306-6310(2003)