

矽晶太陽電池技術、成本與性能



摘要：

2011 年矽晶太陽電池產量在全球太陽光電的市場占有率約為 88%，預估未來至少 10 年也將持續領導太陽光電市場。美國在 2011 年 4 月提出 SunShot 倡議，要在 5 年內投資 US\$1.12 億元，支持發展先進的太陽光電模組製造技術，並且克服技術障礙，以利降低 PV 系統安裝成本。其目標是在 2020 年以前降低 PV 系統 75% 的價格——使得 PV 與傳統能源的平準化價格(LCOE)可以具有足夠的競爭力。如此即可以在美國大規模的應用太陽光電發電技術。預計在 2030 年時 PV 發電將占美國電力需求的 11%，到 2050 年時可以達到 19%。

關鍵字：

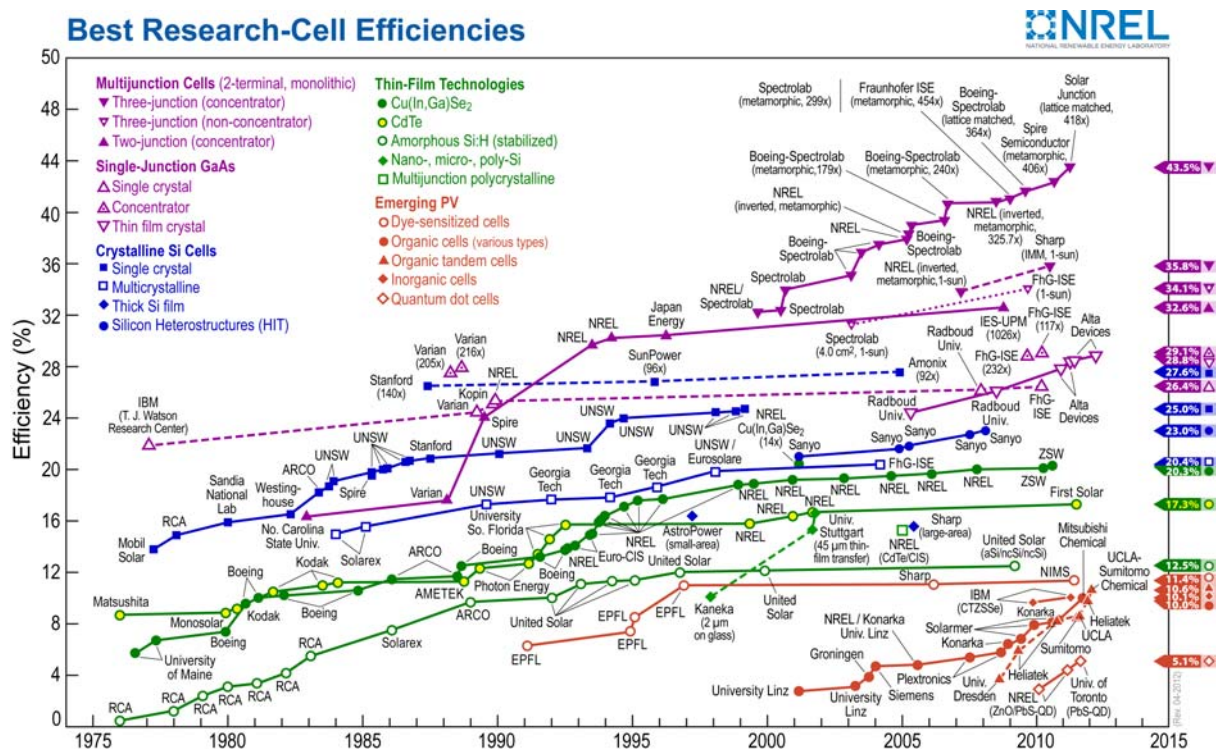
太陽光電(PV, Photovoltaic)、多晶矽(Polysilicon)、矽晶片(Wafer)、太陽電池(Solar Cells)、模組(PV Modules)、太陽光電系統 (PV Systems)、轉換效率(Conversion Efficiency)

一、前言

1953 年美國貝爾實驗室(Bell Laboratories)製作出第一個矽晶太陽電池，實現 4.5% 效率，然後在 1954 年達到效率 6%；到目前為止，實驗室研發的光電轉換效率提高到了 25%。自 1953 年到現在的 60 年時間，各種太陽能電池技術發展已經有了長足的進展，如圖一^[1]所示；單晶矽太陽電池的效率高達 25% (澳洲 UNSW)，多晶矽太陽電池的效率高達 20.4% (德國 Fraunhofer ISE)，而 HIT 太陽電池的效率高達 23.0% (日本三洋電機)。這些太陽光電都是由相當成功的研發而來的結果，但是仍舊屬於實驗室小批量試驗的成果，要達到大量製造必須面臨可製造性與經濟成本的嚴格挑戰。矽晶太陽電池在 2011 年的市場占有率達 87.9%，其使用壽命已超過 25 年以上，就此一技術的可靠度而言是不容置疑的。矽晶太陽電池在物理科學上已經被充分研究與瞭解，其材料存量也不虞匱乏，產品在市場應用上也是可行的，現在最大的挑戰在於如何降低成本，才有機會達到大量普及的高成長。

目前太陽光電技術在全世界的能源提供上，僅占非常小的比例，原因在於能源的供應主要是以石化燃料為主，而太陽光電發電的成本遠高於傳統能源。美國

在 1970-90 年代是太陽光電技術的領先者，然而在系統安裝容量上，確實是遠遠落後於德國、義大利和日本等國家。目前，美國是世界第四大太陽光電市場，居於首位德國和第三位中國之後。2011 年，中國太陽光電市場從第七上升至第三，並且從 500 MWp 增長至 2.5 GWp。而美國去年是從 900 MWp 增長至 2GWp。在未來五年內，美國大部份太陽能電價將比電網價格便宜。據專家預測，太陽光電模組與系統安裝成本不斷下降，而電力運輸成本卻在上漲。當太陽能發電達到與電網平價（Grid-Parity）時，將推動美國太陽光電市場的發展，猶如一個沉睡巨人醒來一樣，電網平價將推動美國太陽光電市場的覺醒。聯邦政府刺激太陽能產業的擴張，藉由國家級的獎勵，真正的為太陽光電在區域市場提供良好競爭力。在未來的五年中，美國大部分太陽光電發電將達到與電網平價，因此開創太陽光電行業擴張的機會來臨了。



資料來源：<http://www.nrel.gov/ncpv/>, Research Cell Efficiency Records, April 2012. [1]

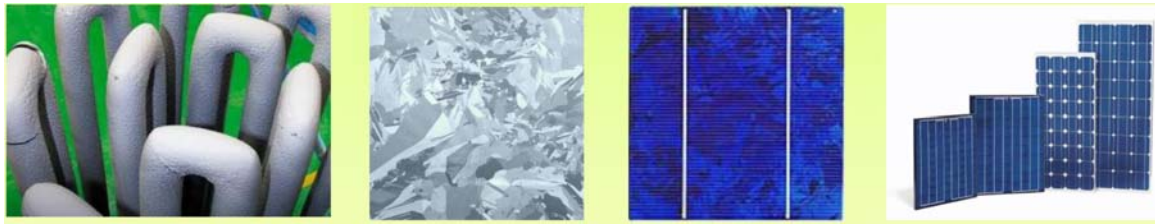
圖一、美國 NREL 更新各類太陽電池實驗室的轉換效率，2012 年 4 月

當然美國也深切瞭解再生能源的重要性，因此能源部(DOE)在 2011 年 4 月 5 日提出 SunShot 倡議 (Initiative)，計畫要在 5 年內投資 US\$1.12 億元，支持發展先進的太陽光電模組製造技術，並且克服技術障礙以利降低 PV 系統安裝成本。讓美國重返全球太陽光電市場領導角色地位，必且提供潔淨能源的工作機會。由

跨越太陽光電產業鏈多家公司的參與，設計對美國 PV 產業有較大影響力的計畫。篩選的研發計畫將協調產出太陽光電產業所需的共通性技術。SunShot 倡議主旨在 2020 年以前降低 PV 系統 75% 的價格—使得 PV 與傳統能源的平準化價格(LCOE)可以具有足夠的競爭力。如此即可以在美國大規模的應用太陽光電發電技術。預計在 2030 年時 PV 發電將占美國電力需求的 11%，到 2050 年時可以達到 19%。過去幾十年來太陽光電製造成本與價格已經大幅降低，這些部份來自研究、發展與驗證(RD&D)，另一部份則來自市場的刺激方案。2010 年底工業級規模太陽光電系統最佳的安裝價格約 US\$ 3.0/Wp (Watt_{peak})，而平均價格約 US\$ 3.8/Wp。之後其價格則隨著的性能的改善提昇而一直滑落。至於如何能將太陽光電系統的安裝價格降低至 SunShot 的設定，則需要一連串革命性與衍生性的技術突破、實質的市場與大量製造。一致性的 RD&D 努力必須有突破性的技術與製程可以降低模組、電力電子(Power Electronics)與系統周邊(BOS, Balance of System) 的成本，當然也需要與民營企業密切的合作，以確保技術可以實際有效益地應用到大量生產上。美國若要達到 SunShot 訂定的計畫價格目標，絕對不能以漸近式的技術改善來進行，必須以革命性的步伐向前才能奏效。其中關鍵的材料與量產的技術與規模，確實需要快速的提昇，否則將影響目標的達成。

二、太陽光電技術

矽(Si, Silicon)為地球中僅次於氧含量第二多之元素，因此以矽做為材料之太陽電池先天上具有難以取代的優勢。因為矽晶太陽電池擁有光電轉換效率高、電池長期效能穩定、製程與設備等產業技術相對成熟等優點，預估到 2020 年時矽晶太陽電池仍將是市場主流。矽晶太陽電池主要可分成單晶矽太陽電池以及多晶矽太陽電池兩大類，2007 年全球的市場佔有率矽晶太陽電池仍高達 90%。矽晶太陽電池產業鏈—由上游至下游為多晶矽、矽晶片、太陽電池、模組、再到系統的安裝，如圖二所示。而矽晶片可分為單晶(Single Crystalline)與多晶(Multicrystalline)兩大類。單晶矽太陽電池的效率高於多晶矽。將多片的矽晶太陽電池經過串、並聯的焊接後，再以封裝材料加以固定、保護，即形成所謂的模組(Modules)。目前大多數的廠家生產的模組轉換效率約為 14 – 16%；而一些非標準或特殊的太陽電池結構，例如背接式電極太陽電池，必須使用高品質的單晶矽晶片，與特別的製程技術，因為可以提高轉換效率，模組轉換效率約為 17%–21%，因此逐漸受到重視。目前全世界在太陽電池領域的重要課題與發展方向，都聚焦在如何在保有高電池效率的前提下降低成本。除了設法降低多晶矽原物料的成本外，提昇電池效率也是降低成本的一個有效且重要的手段。



圖二、矽晶太陽電池產業鏈-由左至右為多晶矽、矽晶片、太陽電池、模組

三、矽晶太陽電池性能與價格

近幾年由於市場急遽成長，全世界在市場需求的推動下，帶動了各種新技術的開發，世界主要研發機構均積極從事次世代高效能矽晶太陽電池研發。研究人員不斷導入各種低成本，但是可以降低晶片雜質與晶界的影響、增加電流彙集效率、提升表面鈍化效果、降低表面反射率、降低表面導線電阻與遮蔽效應的新製程與新結構技術，甚至用新材料來克服傳統材料對太陽電池效能的限制。這些新概念與新技術不斷被提出或者是驗證。然而是否具有量產可行性與價格競爭力，是各種技術評價的主要指標。所以提高光電轉換效率，同時有效降低成本，是目前與可預見未來之太陽光電發展的重點方向。模組的價格亦自 1976 年(US\$60/Wp) 到 2010 年(US\$2/Wp)，每增加累計產量一倍時，價格即可下降約 20%。模組的價格已經大幅降低 95%。但是模組的製造價格與生產者及使用的技術、材料、設備、生產地點等等有明顯的不同。例如中國的價位偏低者如天合太陽能多晶矽模組在 2010 年的售價為 US\$1.10/Wp，但是其他一般的行情價格則為 US\$1.5-2.0/Wp。而 2011 年上半年時的模組價格，在激烈的競爭壓力下，許多不同太陽光電技術生產的模組價格大多降低至 US\$1.5/Wp；2012 年時更低至 US\$0.80/Wp 或更低。因此許多德國、美國的太陽光電業者已經無法再支撐下去，紛紛宣告破產。模組低價位的時代來臨了，但品質是否可以獲得保證？想必還需時間去驗證。

另外，全球太陽光電市場瞬息萬變，歐洲市場衰退之後，全球廠商轉移陣地到新興國家及亞洲各國。加上 2011 年大地震及核災問題影響，再度興起綠色能源熱潮，歐、美、中、台、韓乃成百家爭鳴的局面。

日本在太陽光電系統的引進上，大約到 1970 年才有正式的發展，成本從一間房子需一億日圓的水準(數千萬日圓/kW)，到 2011 年已降到數十萬日圓/kW。從 1994 年到 2003 年的十年間，設置成本減少一半以上。但在 2005 年，補助宣告中止，日本國內的出貨數量開始減少，降價的情況也停止了。直到 2008、2009 年再次展開補助計劃，日本國內的出貨量上升，價格才繼續往下降。

以 2011 年日本國內的太陽光電安裝價格來說，住宅系統平均約 57 萬日圓/kWp，產業系統約 65 萬日圓/kWp，連大型家電賣場或電視購物都在賣，日本產品也曾出現 40 萬日圓/kWp 以下的價格，還有廠商推出 10 年以內回本的商品。進口產品方面有 30 萬日圓/kWp 的狀況，甚至出現以利率 3%、分 20 年期付款降到 20 萬日圓/kWp 以下的案例。

2011 年，日本決定擴大 FIT 制度，非住宅用的大型發電設備也可適用，加上國內外廠商的價格戰，價格可望持續下降，預估到 2015 年售價可能只有 2010 年的一半。

以矽晶型太陽電池來說，日本本土的廠商有 Sharp、京瓷及 Panasonic 等三大廠。Sharp 的「BLACK SOLAR」係單晶型模組，最高轉換效率為 19.0%。京瓷的多晶太陽電池模組「Gyna」雖然轉換效率不及單晶，但價格上佔有優勢，最高轉換效率為 17.8%。Panasonic 的「HIT」則是單晶混成型模組，最高轉換效率為 18.7%。主打「高品質」而取得日本國內第二市佔率的京瓷高層表示，雖然該公司目前為止成功避開了價格戰，但在低價的風潮下收益恐怕惡化。首位的 Sharp 更是從黑轉紅，今年三月財報顯示出 240 億日幣的虧損，為避免匯率造成影響，正積極計畫將產品轉往海外生產。合併三洋電機的 Panasonic 也同樣選擇出走海外，耗資 450 億日幣在馬來西亞興建新的太陽電池工廠。除了憂心價格之外，日本廠商更怕品質差異會造成日後消費者對於太陽電池的信心大減，形成「太陽電池的壽命很短」的認知，影響往後的購買意願。

PV 系統的安裝價格包含了模組、電力電子、系統周遭三大項的價格，以 2010 年的 PV 系統的安裝價格為指標；住宅系統因規模僅 3-5kWp，安裝價格最高為 US\$6/Wp，商用系統的價格約為 US\$5/Wp，比住宅型便宜近 20%。公用事業則約在 US\$4/Wp，因為大量規模所以系統安裝業者都以工程採購建置(EPC, Engineering, Procurement, Construction)方式處理，因此可以在供應商得到比較低的價格。太陽光電系統的價格與其轉換效率是相反的關係，所以提高系統的轉換效率，亦可直接降低系統安裝價格。2020 年 SunShot 計畫的住宅、商用與公用事業太陽光電系統安裝價格預估如圖三所示，SunShot 計畫在 2020 年以前，能夠將 PV 系統安裝的價格大幅降低為：

- 住宅系統安裝價格由 US\$6/Wp 降低至 US\$1.50/Wp
- 商用系統安裝價格由 US\$5/Wp 降低至 US\$1.25/Wp
- 公用事業系統安裝價格由 US\$4/Wp 降低至 US\$1.00/Wp



資料來源：A. Goodrich, T. James, M. Woodhouse, *Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost Reduction Opportunities*. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2012.
^[3]

圖三、至 2020 年 SunShot 計畫的住宅、商用與公用事業太陽光電系統安裝價格預估

四、太陽光電發展藍圖需突破

太陽光電的未來規劃必須要有突破性的做法，才能有效加速此一產業的正常發展，矽晶太陽電池的發展已經有許多的研發投資，但是美國以國家的力量大聲疾呼的公開宣示，要使美國的太陽光電產業重振以往雄風，除了實質的再生能源電力是必然的趨勢外，減碳的行動也是環保團體的重大訴求，核能電廠也無法保證不再發生災變，順應此潮流，以其國家的力量結合國家實驗室與私人大型企業的力量，美國非常有可能在 3-5 年內在太陽光電的創新技術上領先全球，尤其是材料上與特殊製程上的智慧財產權與專利權。

台灣不能一直追求製造的規模與產值多寡，來論斷國家是否該投入資源研發，尤其是 99% 資源完全依賴進口的我們，更需要跳脫過去以大量製造為核心價值的迷思，否則以現在太陽光電產業的水準與規模而言，台灣根本無法與中國大陸競爭，對於虎視眈眈的韓國直起急迫的壓力，我們將要何去何從？一切要從基礎做起實在是太慢了，而且也不切實際。我們在台灣的人才與資源也都有限，應該集中資源研發產業可以很快銜接起來的技術與產品，例如矽晶太陽電池的產業

鏈部份，以過去國家或私人企業累積的技術經驗，轉嫁於太陽光電的技術研究發展上，應可望在比較短的期間見到成效，當然長期的基礎性研究由大學與研究單位配合，才有足夠的力道去突圍超前。我們更需要政府單位如國科會與經濟部等的帶領，繪製屬於台灣 PV 的技術發展藍圖。我們應該借鏡美國、歐盟、日本或中國的技術發展藍圖，但一定要有為自己量身訂作的策略與作法，否則以民營企業賺錢為目的的宗旨，我們之前的努力成果，很可能會很快消失殆盡。

五、結語

美國能源部的 SunShot 倡議要在 5 年內投資 US\$1.12 億元，支持發展先進的太陽光電模組製造技術，並且克服技術障礙，以利降低 PV 系統安裝成本。其目標是在 2020 年以前降低 PV 系統 75% 的價格—使得 PV 與傳統能源的平準化價格(LCOE)可以具有足夠的競爭力。太陽光電發電的成本降低，達到歐盟設定 2030 年全世界有 10% 的電力是來自太陽光電的願景。我們應該借鏡美國、歐盟、日本或中國的技術發展藍圖，但一定要有屬於為自己量身訂作的太陽光電策略與作法。

參考資料

1. National Renewable Energy Laboratory, NREL. (2012). “Best Research-Cell Efficiencies.” Golden, CO: NREL. http://www.nrel.gov/ncpv/images/efficiency_chart.jpg. Accessed April 2012.
2. SunShot Vision Study, DOE, February 2012.
3. A. Goodrich, T. James, M. Woodhouse, Residential, Commercial, and Utility-Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost Reduction Opportunities. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2012.
4. <http://www.solar.nef.or.jp/josei/kakakusuii.htm>
5. <http://www.jpea.gr.jp/04doc01.html>
6. http://kaden.watch.impress.co.jp/docs/column/solar/20110829_473699.html
7. http://unit.aist.go.jp/rcpvt/ci/about_pv/economics/cost.html
8. http://www.nedo.go.jp/library/pv2030_index.html

TPVIA