

第二章 文獻探討

根據日本研究單位的調查，2005 年全球太陽能電池市場比 2004 年增加了 44.6%，達到了 1,728MW。其中，日本市場增加了 38.5% 達到 833MW，歐洲市場則是成長了 43.8% 為 452MW，而美國市場也增加了 11.0%，總市場規模為 154MW，此外包括中國等其他地區更是增加了 106.3% 來到了 289MW。

這一年之間的全球總發電量增加 1,000MW，與過去 15 年之間的總成長發電量相當，在 2003 年以後的 2 年間，成長速度急劇達到 2,000MW。伴隨著這樣的市場快速擴大，太陽能電池的主原料的多結晶矽的供給不足越來越嚴重。多結晶矽的買賣價格比 2005 年上升 30%，這也成為了太陽能電池模組價格上升的原因。另外，矽晶圓供應業者也因為要確保半導體的供應，以及對於太陽能電池市場還是處在觀望的態度，所以相當擔心會出現供給過剩，對大幅增產的計劃還是很謹慎的。從新加入多結晶矽製造的業者的增加來看，應該可以在 2008 年以後就可以解決這個問題，但是在這之前，相信太陽能電池業者會不斷的為矽的供應不足而頭疼。

由於矽晶圓的供給並沒有跟上太陽能電池市場的急劇擴大。有一部分太陽能電池業者，開始朝向開發能夠大幅度減少矽使用量的薄膜技術，除此之外，也有業者開始發展球型矽的新一代生產技術。在單結晶／多結晶類型的生產上，從 Ingot 和晶圓的製造，來繼續努力重新考慮製程的革新，製造設備業者也開始進行設備的改良。或許原料不足是個嚴重的問題，但是如果從另一個角度來觀察，或許也是帶來技術革新的推動力。以下有一些技術上的革新方向的參考點

壹、製造法的鑽研、薄膜的對策

為了因應矽缺乏狀況，太陽能電池業者已經開始計畫改變傳統的製造生產方法，或者是朝向生產能大幅減少矽使用量的薄膜類型的產品。更令人注目的趨勢是，出現了一些業者開始開發球型矽¹的生產技術，而在過去，這樣的技術從來沒有被開發過。例如，在世界市場上佔有率第一的夏普，就不斷的試圖減低Cell的厚度，在 1997 年夏普所產出太陽能電池模組Cell的厚度約為 380 μm ，而到了 2004 年便已經降低到 200 μm 左右，2005 年就能將Cell的厚度減少到 180 μm ，在不久的將來夏普期望降低到 100 μm 。

¹球型矽材料的形成是將矽材料融化後，利用惰性氣體加壓，讓矽材料以點滴的方式落下，在落下的同時因為表面張力的影響，使矽形成球狀後快速凝固，接著再利用鋁等的合金作為基板，就能夠形成Cell。如果所形成的Cell直徑較小（約 400 微米）時，可將反光的透明樹脂材料填滿球型矽材料之間的空隙，增加太陽光的利用率，而Cell形成的直徑較大時（超過 400 微米），就可在每個Cell之間置入反射板來蒐集更多的太陽光線，提高利用效率。另一方面，這樣的製程結構，由於不需要在Ingot之後進行切割矽基板，又可以減少掉切割這一部份製程的時間與成本。但是，為了得到優良品質的結晶，特有的技術就必須予以開發，如降落管內部的空氣製造，結晶回收的手法等等。

這樣的技術進步，背後所代表的意義就是，能夠在同樣輸出功率和轉換效率的條件下，減少了約 40% 左右的矽材料，而再進一步也就意味著太陽能電池模組的成本能夠得以下降。所以預估，從同樣數量昂貴的材料中，獲得更大產量是可以被期待的，根據計算，如果技術依照這樣的速度發展，相信在 2010 年，利用同樣數量的矽材料，所生產出來的 Cell 數量將會是 1997 年的兩倍之多。

目前計畫以薄膜為技術核心尋求發展的有 KANEKA、三菱重工業、富士電機等等，在 CIS/CIGS 的化合物材料的方面，昭和 SHELL 石油和本田正積極的進行開發，此外在最受注目的球型矽技術方面，Kyocera 和 Fujipream/Clean Venture 21 也計劃投入研發。以下是提出各國相關改良措施的研究。

一、發展球型矽技術

球型矽類型能夠高效的發電，就是因為它同一般的 WAFER 類型不同，能夠廣角吸收太陽光。Kyocera 為了吸收全方位的光，改良了美國 Texas Instruments 開發的舊結構。在舊結構中，是依靠電極用的鋁片遮斷從旁側來的入射光，但是透過把正負極安置在球面的兩端，就可以吸收更多的光。

因為當照射到全方位的光時，轉換效率可以比傳統技術提高約 3 倍。而且，因為能夠不受光的入射角的影響吸收光線，所以從日出到日落，可以維持穩定的效率，這也是特點之一。目前 Kyosemi 已經利用這一製程生產太陽能發電系統材料，Kyocera 預計在 2007 年第一季量產，而 FujiPream 計劃在 2007 年上半年投產球型矽材料太陽能發電系統。根據業者的預測，屆時利用球型矽材料所開發的太陽能發電系統轉換效率將有機會達到 15% 左右，與目前結晶矽系統相當。

二、薄膜矽減少 2 位數矽的使用量

薄膜矽太陽能電池的特徵是，與多結晶矽太陽能電池相比，矽的使用量能減少 2 位數。多結晶矽太陽能的矽基板的厚度是 200~300 μm ，薄膜矽的厚度是 2~3 μm 。在膠片基板上形成薄膜矽，因此太陽能電池的柔軟化也成為可能。課題就是轉換效率的提高²。在大面積基板上實現多結晶矽太陽能電池所需的轉換效率，把多結晶矽的置換作為目標。

²轉換效率上升的原因是因為導入了非晶質矽薄膜和微結晶矽薄膜層壓而成的新構造。過去的薄膜矽太陽能電池，是把非晶質矽薄膜當作光電變換材料使用。但是，非晶質矽薄膜與結晶矽相比，因為移動性很低，很難把產生的電子和正孔高效率的運到電極處。除此之外，太陽光的吸收波長區域很狹窄，這也是轉換效率很低的原因之一。具體的就是，只能吸收 300~700nm 的短波長的太陽光。現在實現了吸收波長區域的擴大，就是非晶質矽薄膜和結晶矽薄膜層壓而成的新構造的薄膜矽太陽能電池。從來的非晶質矽膜裡層積了微結晶矽，形成了兩層構造，因此變得能夠大幅度的吸收太陽光。微結晶矽能高效的吸收 600nm

薄膜矽太陽能電池和多結晶矽型不同，讓矽成膜需要昂貴的電漿離子 CVD 設備。因此，為了在和多結晶矽太陽能電池的競爭中處於優勢，設備折舊費用的降低也是很重要的。例如，KANEKA 就是希望能夠把年產 1MW 的 2 億日元的設備投資額降低到 1 億日元一台。不過，使用薄膜化合物的太陽能電池的致命弱點，就是使用了鈾這樣稀少金屬，或許會出現將來會有產生供給不足的問題的隱患。所以，本田開始研發如何減少鈾的使用量的，雖然本田在原料取得上，在未來 20 年裡都沒問題，但是為了將來考慮，還是開始進行相關技術的研發。

目前雖然包括單結晶矽和多結晶矽太陽能電池約占市場總額的 90%，但是在未來，使用多結晶矽的太陽能電池時代應該是逐漸會被新技術取代，這些新技術包括，薄膜矽、球狀矽等等新材料或技術的太陽能電池，能使用這樣的新材料，就不會再受多結晶矽原料的供給不足的困擾，可以實現增加太陽能電池生產業者，而達到大幅度的降低生產成本。

在 2010 年之前，多結晶矽將會是太陽能電池的最主要原料。但是做為原材料-矽的供給，並沒有隨著太陽能電池市場的擴大而增加產出，因此面對矽晶圓材料的供給不足，相關業者除了積極與上游矽晶圓供應商展開緊密合作，以確保未來矽晶圓材料供應不虞匱乏之外，相對的也加緊開發減少矽晶圓材料用量的相關技術。不過就現實上，隨著半導體的產能大幅增加的情況下，太陽能產業期望矽晶圓材料供應的問題，能夠在短時間之內獲得解決的話，也不是一件相當容易的事情。

根據目前的統計，台灣太陽能業者所需的矽晶圓材料有 98% 必須仰賴進口，因此也希望藉由各項計劃的推動與政策，來提高太陽能產業用矽材料自給度。根據經濟部的規劃，希望能夠在 2010 年矽材料的自給度能夠達到 100MW 的產能需求，這些方案包括了，引進傳統製程技術、改良西門子製程技術、引進俄羅斯技術、吸引 SolMic 公司退休專業團隊，以及繼續精進工研院的火法（高溫）冶金純化技術。就目前而言，似乎輸入國外退休專業相關團隊，以及繼續精進工研院的火法冶金純化技術這兩方面，是較傾向被採用與推動，輸入國外退休專業相關團隊的部分，預計將投入 10 億元，最快 2007 年開始試產、2008 年產出達 300 公噸、2010 年增至 1000 公噸。而工研院的部分，預計投資金額為 5 億元，希望能夠在 2010 年量產 500 公噸。（涂志豪，工商時報 20070325）

聯電 2007 年 3 月與日本真空技術集團(Ulvac)共同宣佈，由聯電旗下轉投資公司晶能科技，透過日真提供給聯電集團有關薄膜非晶矽太陽能電池完整的技術輸出交易 (Package deal)³，包含了生產設備與技術。日真同時收到許多公司的訂單需求(薄膜技術)，而聯電是日真在太陽能生產製造套裝交易(Turn Key)的第一個合作對象，日真正籌建一條試驗生產線，採用 1.1x1.4 公尺的基板，預計 2007 年 7 月完工，將可作為支

以上的長波的太陽光。

³完整的技術輸出交易 (package deal)；

援聯電集團實際生產認證，未來也提供其他日本客戶使用，晶能預計第一階段將投資新台幣 15 億元，2008 年第一季投入量產，初期年產能為 12.5MW，三年內則要擴充產能至 100MW。以聯電在台灣、日本、新加坡眾多的 8 吋及 12 吋廠，再加上大陸友好企業蘇州和艦，每個月光是生產剩餘的晶圓廢料，可能就足以支援聯電的太陽能新事業所需。(黃昭勇，經濟日報 20070325)

而台塑集團擬進軍上游多晶矽料源市場！據 96 年 6 月 29 日台塑高層證實，已與挪威 REC 公司、美國 MEMC 公司及日本德山化學 (Tokuyama) 等全球 3 大廠接觸，希望從 3 擇 1 成立合資公司，搶食 1 年近 40 億美元 (約 1320 億元台幣) 的市場大餅，一旦合資案成功，將寫下塑化業成立多晶矽廠首例。

台塑轉投資的台勝科 (3532) 是國內 8 吋矽晶圓三大供應商之一，更是唯一的 12 吋矽晶圓供應商，台塑若成功跨入最上游的太陽能材料——多晶矽領域，等於從上到下，從台塑、台勝科、華亞科、南亞科及福懋科，將建置完成上下游垂直整合鏈。

多晶矽廠的投資金額並不高，1 座月產 150 噸的工廠，投資額約 100 億元，以台塑集團財力並非難事，重要的是必須要有足夠、成熟技術支援。台塑跨入多晶矽料源市場有 2 項重大意義，首先是為台灣在多晶矽產業破冰，台灣雖是半導體製造大國，但上游材料卻相當弱勢，生產 8、12 吋矽晶圓的中德、台勝科都得靠外商當技術來源，多晶矽領域更是付之闕如。若台塑可以擴建產能，將有效解決目前多晶矽大缺貨的窘境。由於太陽能與半導體同樣是矽晶圓應用一環，加上近 2 年太陽能產業蓬勃發展，在產能排擠效應下，未來 5 年全球都有多晶矽嚴重短缺問題，使得太陽能業者及半導體業者，都必須向上整合與矽材料供應商策略聯盟。台塑基於發電事業的經驗及優勢，具有跨入多晶矽領域的條件，只是傳統西門子 (SIEMENS) 製程⁴量產多晶矽，不但投資金額過大、又耗電耗能，台塑並不感興趣。

「反倒是現在研發利用流體床 (Fluidized-Bed-Reactor) 技術⁵來生產多晶矽，技術若能突破，生產成本將降低 4 成，一旦開發成功，台塑集團高層證實將有意和上游料源業者合作。」，目前美國 MEMC 公司、挪威 REC 公司及日本德山化學都有在研發這新技術，只是仍未純熟。這 3 家公司都是台勝科的矽材料供應商，與台塑有良好合作關係，已分別接觸過，現在待技術突破，從中擇一合資成立新公司。現今太陽能電池廠為確保材料來源無虞，「都要捧著錢去找上游供應商談合作，出資讓他們蓋廠。」甚至談長期供貨保障合約，像日前多晶矽大廠日本小松 (Komatsu) 旗下的多晶矽供應商 Advanced Silicon Materials (AsiMi)，已與挪威太陽電池製造廠 REC 簽定供貨合約，AsiMi 表示明年起不再出貨給半導體裸晶圓生產廠商，全力支持 REC 所需的多晶矽材料。目前全球矽材料主要由美、日、歐廠寡佔逾 9 成市場，供應半導體產業與太陽光電產業用，去年多晶矽市場規模約 33 億美元 (約 1000 億元台幣)，龍頭廠則是美國 Hemlock

⁴ 傳統西門子 (SIEMENS) 製程乃為一種冶金級矽純化技術，為半導體製程所需矽的提煉技術。

⁵ 未來太陽能產業專屬多晶矽製造的技術之一

市佔 23%，其次是德國Wacker公司、挪威REC公司、日本德山化學及日本勝高集團、還有德國Ersol Solar EnergyAGa等 6(姚惠珍等，960629 蘋果日報)

三、提高矽晶圓材料利用效率

就對策上來說，提高矽晶圓材料是有其一定必要性。但是，與其等待計劃的實現，不如從現有的方法上，再予以精進來重新檢討部分的製程技術，例如重新評估 INGOT 的技術流程，目前似乎是較快速的方法，包括研究捨棄傳統的 CZ 與 FZ 長晶方式，改用鑄造矽晶棒 (Silicon Ingot Casting) 的技術，就重量的部分，目前已經可以產出 400 公斤的 INGOT。

太陽能電池矽晶圓材料中，二氧化矽的純度達到 97% 以上。經過開採矽礦石之後，矽材料供應業者多是利用鎔爐來提煉還原成冶金級的矽，並且經過鹽酸氯化，以及蒸餾純化等等的製程之後，產出多晶矽材料，因此最終的產品無論是多晶矽晶圓，或者是單結晶矽晶圓，均是以多晶矽為基礎材料，再利用柴式長晶法來拉出單晶矽晶棒，經過研磨、拋光、切片等等的程序之後，完成半導體或太陽能電池下游客戶所需要的矽晶圓片。就純度以及規格要求上，半導體業者所要求的條件，都比太陽能業者所使用的矽晶圓片來的高要求高。

為了提高原料的使用效率，相關業者就必須從各個角度來進行考量，包括如何從一定長度的 INGOT (矽晶棒)，切割出多少的矽晶圓、怎麼降低切損 (Kerf Loss)、改用線鋸的方式來切割等等都是需要研發的方向，同時為了解決這些問題點，相關的製造設備也需要同時強化其能力。

四、矽材料降低損耗

在晶圓的切割方面，如果不使用輪盤鋸切割，而改用線鋸切割技術的話，就必須強化線鋸切割相關設備，線鋸切割晶圓技術是在 90 年代開始發展，採用線鋸切割的晶圓厚度可以達到 150 μm 以下，並且所產生的切損只有 122 μm ，目前太陽能用矽晶圓也開始朝向利用線鋸切割技術來生產，這樣的生產技術對於半導體用矽晶圓來說，已經是主流的切割技術，到目前為止所使用的線鋸，在開發技術已經可以生產出直徑 120~170 μm ，長度 100~500km、砥粒直徑 8~20 μm 的線鋸。

日本 Toyo Advanced Technologies 為開發出適合使用在切割太陽能用薄型晶圓線鋸，也投入了相當大的研發資源，開發出適用於線鋸切割的技術與相關設備。Toyo Advanced Technologies 的方法是，首先直接檢測線鋸的 Wire Tension，立即把 Feedback 結果輸入驅動馬達系統，這樣的用意是，能夠在最短時間內，讓系統來反映出當出現切斷時的張力變化。另外，為了減少在 Wire 線所經之路上的彎曲部分，不讓 Wire 出現勉

強受力的現象，Toyo Advanced Technologies 的做法是，切斷裂斷強度很低的細線。而且，由於設備機構提高了機械剛性，所以 Toyo Advanced Technologies 也在主滾筒上增加纏繞 Wire 的數量，並且將 Wire 間的距離所短，來提高設備的製程使用負荷能力。

此外，為了防止漿狀液體 (Slurry) 的黏度受到熱效應而產稱變化，因而降低 Wire 的銳利度，Toyo Advanced Technologies 也同時開發了專用的漿狀液體噴嘴，利用大容量的熱交換器來控制漿狀液體溫度，使漿狀液體平均分布在 Wire 上。就整體的特色而言，是利用溫度調節能力，和被強化的設備機械剛性，來因應生產時的負荷和熱效應問題。根據實際應用，目前這樣的設備能夠同時切斷 4 根 155x500mm 的單結晶／多結晶 INGOT，而所切割下來晶圓的厚度也可以達到業者所需的 150 μm 。未來 Toyo Advanced Technologies 進一步的發展方向是，為了滿足太陽能業者的要求，將研發能夠切割更薄晶圓的生產設備和技術。

五、開發新一代的晶圓生產技術

當然為了降低晶圓的生產損耗，並非只能朝向改善切割方式一種發法。因此也有其他業者開發出了另一種技術趨勢，就是重新設計了原來從 INGOT 製造，到晶圓切片 (Wafer Slice) 的製程。德國 Schott Solar 採用了 Edge-defined Film-fed Growth (EFG) 製程技術，利用這個技術可以降低多結晶矽的使用量。EFG 的製程是，把中空構造的 Tube，從溶解的矽之中提出來，然後再進行表面切除。再傳統製程中，如果要把 INGOT 拉提上來之後，再進行晶圓切割的方式，這樣會浪費掉約 50% 的矽材料，但是，如果採用 EFG 製程的話，所浪費的矽材料可以控制在 10% 左右。所以 Schott Solar 的策略是，有效利用所有的矽原料，來提高 a-Si 的產率。除了這樣的技術之外，美國 Evergreen Solar 也發明了另一種技術 String Ribbon technology，這個技術是從溶解在鍋爐裡的多結晶矽的下到上牽引出兩條線，利用裡面的表面張力來生產出矽薄膜，不過目前還正在進行研究，以達到更成熟的應用。String Ribbon technology 這種技術除了可以防止在切薄晶圓時，發生的切損引起材料的損失之外，還有不需要進行清洗製程的優點。

此外，為了降低生產時的矽材料使用量，SolarWorld 也和 ECN 共同開發 Ribbon 成長 (RGS) 技術。經過各式各樣的技術開發，以及各方面的努力，預計在 2010 年時，結晶矽太陽電池模組平均轉換效率將會高達 16%，而且 INGOT 的重量也可以達到 937 公斤，矽晶圓的厚度為 150 μm ，在切損的方面也可以減少到 122 μm 左右。

六、矽晶圓生產技術革新

雖然有一部分太陽能電池業者，將製程技術改變成為能夠大幅度減少矽材料使用量的薄膜，以及球型技術上，但是就產量而言，與傳統的單結晶矽／多結晶矽相較，還是相當的少，所以已經有相當多業者開始重新思考，如何開發新一代矽晶圓的製程技術，因此雖然矽原材料不足，對於太陽能產業來說是一個嚴重的問題，但是如果能夠換一個角度來改變看法，或許這也是推動矽晶圓生產技術革新的新力量。

對台系太陽能電池業者來說，產出轉換效率普遍可維持在市場要求的水準之上，特別是老字號品牌廠如茂迪、益通、旺能等，而新加入者則因為全自動化的生產設備外加設備業者技術轉移時保證轉換效率，也多數可以維持一定的水準，平均來說，台系太陽能電池廠，單晶太陽能電池轉換效率約在16~17%，多晶則為15~16%。

七、矽品質好壞決定利潤高低

比較值得注意的是，對多晶矽或矽晶圓的料源掌控度也關係產出的良率，若與知名料源廠簽定長期供貨合約，料源掌控度相對較佳，產品的轉換效率也可保持，若料源掌控度不佳，或透過不明管道取得品質不一的料源，所生產的太陽能電池的轉換效率變異性就高。(黃女瑛, 電子時報 20070330)

轉換效率可以區隔市場，其實從業者的動態也可以看出端倪，益通2007年2月分與澳大利亞新南威爾斯大學(University of New South Wales in Australia; NUSW)簽定共同研發契約，共同研發超高效率太陽能電池技術，預估在此契約的推動下，2007年其單晶太陽能效率將從目前的17%提升至18~19%，而多晶太陽能電池由16%提升至17%以上，就是最好的例證。

對矽晶圓廠來說，矽晶圓無法測出轉換效率，必須經由太陽能電池業者量產後，測出電池的轉換效率再反推矽晶圓的品質好壞，當然，太陽能電池業者本身的量產技術也須納入考量。

一般來說，太陽能電池業者多數以矽晶圓廠在市場上的品牌定位，作為判斷矽晶圓品質的依據，長期出貨品質佳者有口皆碑，產品多數搶手，反之，若是來路不明或品質受質疑的品牌，目前來說，太陽能電池業者在購買時也會考慮再三，因為很多案例發現，來路不明的料源最後連上生產線的機會都沒有。

貳、小結

本章的文獻探討主要是因為太陽電池矽原料缺少，找出目前製造法的對策、薄膜技術的因應、發展球型矽技術、提高矽晶圓材料利用效率也就是矽材料降低損耗、開發新一代的晶圓生產技術、矽純度的好壞問題與矽晶圓生產技術革新，藉由目前的改良技術能引領我們一窺太陽電池產業的技術白熱化。