

提升太陽電池效率 迎接市電同價



如何以低成本製造高效率的電池一直是電池廠所面臨的最大挑戰。電池效率的提升帶來的不僅是帳面上成本的降低，系統架設所需的零組件以及土地成本同時也會下降，這也就是為什麼三洋電機(Sanyo Electric) 與 SunPower 的電池較貴，市佔率仍相當高的原因。台達電轉投資的電池廠旺能去年在印度孟買的国际太陽能技術博覽會(Intersolar India) 上便展出多項高效能的太陽能電池與模組，單晶矽電池 D6E 與 D6G 可達 19%，而多晶矽電池 D6R 與 D6P 效率分別可以達到 17% 與 18%，其 60 片式的模組輸出功率可達 250 瓦。¹06 年成立的太陽光電能源，除了位於湖口的研發基地與工廠外，目前在中科后里園區的第二工廠已經動土，第一期將建置 180MG 的產能，明年合計產出達到 210MG，估計三到五年內達到十億瓦產能，去年業績為新台幣 15.8 億元，今年預計將大幅成長到 40 億元以上。能夠如此大幅成長的主要原因便是憑藉著一款名為 Combo-Cell-S 的高效率電池，電池的平均量產率達到 18.6%，實驗室的轉換率更逼近 19% 大關，其 60 片名為黑金剛的模組，輸出也超過 250 瓦，而多晶矽的電池也朝 16.7% 的目標努力。它們使用 6 吋 P 型單晶矽晶圓加上淺接面技術使載子之再結合(recombination)減少，以及特殊的鹼蝕刻液，生成高吸光的絨毛表面結構，同時搭配最佳化的導線佈陣，並將晶圓改成方形，擴大電池的吸光面積，增加模組之輸出。²

由馬汀 格林(Martin Green)教授領軍的澳洲新南威爾斯大學(University of New South Wales，簡稱 UNSW)團隊，早在 1997 年就將單晶矽的太陽電池達到 24% 的轉換效率，利用的便是射極鈍化以及背面局部擴散(passivated emitter and rear locally diffused，簡稱 PERL)的結構，PERL 可說是晶矽太陽能電池結構的經典，考慮了所有可能的損失，利用半導體的黃光製程製作出規則性的倒金字塔結構，將表面的反射降至 1% 以下，電極與矽晶的接觸所產生的串聯電阻必須盡量減少，透過重摻雜降低接觸電阻減少電性的損失，而背面則是利用氧化物減少與電極的接觸並鈍化背面，減少晶界、懸浮鍵與差排等電活性中心的影響，讓分離的電子與電洞不要再結合，搭配局部擴散形成背面場域 (Back Surface Field，簡稱 BSF)來增加載子的收集，雖然達到了最高的轉換效率，但短期內仍無法量產，或是說不具量產的價值，但其結構設計卻是高效率電池參考的典範。由於空氣的介質為 1 而矽則為 4，當太陽光由空氣進入矽晶圓時，將會產生大約 36% 的反射，

透過表面結構化和被覆氮化矽(silicon nitride, 化學式為 SiN_x)作為抗反射層(anti-reflection, 簡稱 AR), 可以有效將反射降至 5% 以下, 而氮化矽又可有效鈍化矽晶圓, 降低載子再結合的機會, 電池背面則是在電極燒結成型時, 讓鋁擴散至晶圓形成載子濃度較高的背面場域,³ 經由上述的方式, 大部分廠商單晶矽的電池效率都可以超過 17.5%, 而多晶矽電池因晶圓本身具有較多的晶界與缺陷等問題, 所以轉換效率較低, 但也有 16.5% 左右的效率, 不過部分廠商已經將平均量產效率提升 1%, 增加產品的毛利並提高自身的競爭力, 後續將針對幾個高效率的電池結構來分析其量產的可行性。

讓電極下方的 N 型半導體層具有較高摻雜濃度的選擇性射極(selective emitter)電池結構, 可說是目前最多廠商用來提升效率的電池結構之一, 因各家實際製程參數的不同, 而有不同之轉換效率, 但普遍皆可達到增加 0.5% 以上的表現。選擇性射極電池可說是 PERL 的簡化版, 早在 1997 年已被提出, 重摻雜的射極可以降低與電極之間的接面電阻, 但過高濃度的摻雜會增加載子再結合的機率, 所以選擇性的只在電極下方形成 N⁺層, 同時改善淺接合造成串聯電阻增加的問題, 因此這樣的電池結構可以獲得較佳的開路電壓, 而短波段的量子效率(quantum yield)提升, 使短路電流變大, 最後得到較高的轉換效率。可以透過下列四種製程方式; 非電極表面的回蝕技術(etch back)、阻障層開口式(barrier mask open)一次或二次擴散、雷射摻雜(laser doping selective emitter, 簡稱 LDSE)與網印(screen printing)或噴墨(ink jet printing)磷膠方式來完成。⁴LDSE 是由 UNSW 所提出, 不需更改製程設備, 只需在抗反射層與背電極形成之間加入雷射製程即可, 使用雷射雖增加了些許的設備成本, 但控制精準度高、摻雜均勻並且快速, 極具量產的優勢, 後期將背電極改用電鍍的方式同時也將材料由鋁換成鎳銅錫, 目前已知大陸宜興的國電晶德(Guodian Jintech)也打算投入此領域的電池生產, 而雲南天達光伏科技更認為此結構將有助於使單晶矽的電池量產轉換效率提升至 18.5%, 多晶矽可達 17.5%, 而台灣的旭泓全球光電使用此電池結構後效率也由 17.7% 提升至 18.8%, 其他諸如大陸的中電(China sunergy)、阿特斯陽光電力(Canadian solar)以及林洋新能源(Solarfun power)都積極投入選擇性射極的研發與量產。

除了雷射摻雜的方式, 益通也積極投入網印與噴墨磷膠方式, 希望能提高電池效率, 並降低製程的成本。設備商也感受到電池廠對選擇性射極電池的需求, 紛紛推出相關的整廠輸出。德國的 Centrotherm 便利用氧化阻障層輔以雷射加工

剝離電極，再次擴散形成重摻雜區，最後再網印完成電極，同為德國的設備商 Schmid，也是全球第四大太陽光電的設備製造商，則宣稱可提升電池轉換效率 0.5% 以上，另一家以製造電漿輔助化學氣相沈積(plasma enhanced chemical vapor deposition，簡稱 PECVD)聞名的 Roth & Rau 則是使用發展 LDSE 所需的設備，而瑞士 SYNOVA 的雷射微水刀 (laser micro jet) 技術則是將磷酸加入水中，在鑽孔的同時完成選擇性射極的製程，稱為 Laser chemical doping 技術，目前與德國 Fraunhofer ISE 研究所合作，實驗室電池已具有 20.4% 的轉換效率，不過這些僅是設備商發表的數據，當這些較貴的新設備導入電池廠的生產流程後，所衍生的銜接與良率等問題，將直接影響毛利提升與否，各家電池廠製程人員的素質將是關鍵。

正面電極佔矽晶圓約為 5~7%，若可以減少電極的面積增加表面的受光區域而不增加串聯電阻也是提升效率的方式，新南威爾斯大學的冥王星(Pluto)電池結構就是以 PERL 技術為基礎，把電極細線化以增加其受光的面積，同時降低了電池表面的光反射，而且在陽光不直接照射的時段亦能集光，使短路電流就獲得提升，去年世界第一大電池製造商無錫尚德便是採用此電池結構，搭配選擇性射極後，單晶矽效率由原本的 16.5% 提升至 19.0%，而多晶矽則由 15.5% 提高至 17.2%，雖然尚德日前發佈暫緩冥王星電池的出貨，將原本規劃 10 年底 450MG 的產量減為 150~180MG，但首席技術長也是新南威爾斯大學高級光伏技術和光子學卓越科學研究中心主任的 Stuart Wenham 仍是相當看好此電池結構。⁵ 日本的京瓷(Kyocera)也將電極線寬減小，並且將匯流排 (busbar) 從 2 根增加至 3 根，以降低電阻使轉換效率增加，但如果可以將電極做在電池的背面，正面可以完全接受太陽光，因此背接觸式電極的概念早在 1975 年就被提出，85 年成立總部位於美國加州聖荷西(San Jose)的 SunPower 於 90 年代初期，製造出雙面指叉背接觸(Bifacial interdigitated back-contact)的太陽電池，並應用於 NASA 的太陽飛機計畫，當時的製造成本高達 \$200/W，不過其目前使用指叉背接觸(interdigitated back-contact，簡稱 IBC)的單晶矽產 A300 則具有 22.4% 的轉換效率。

去年六月，由 IEEE 所舉辦的光伏專家會議(Photovoltaic Specialists Conference，簡稱 PVSC)中，SunPower 發表了標準尺寸的單晶矽太陽能電池，同時具有 24.2% 的高轉換效率，直逼目前實驗室的世界紀錄，電池是由菲律賓的生產線作出來的，並經過美國能源部再生能源實驗室(Department of Energy's National Renewable Energy Laboratory，簡稱 NREL)的認證。副總裁 Bill Mulligan

提到，此紀錄將使 SunPower 繼續維持世界最高電池效率的量產，同時高效率的電池將可降低材料與其他包括模組與系統的製造費用，土地與維護的成本也一併下降，當然每瓦的發電成本也就下降。公司名譽總裁 Richard Swanson 博士也在成立 25 周年大會上提到，SunPower 的研發與工程團隊在過去 5 年內，將電池效率整整提升了 4 個百分比，同時降低了生產的成本。因為電池具有高於同業的轉換效率，因此 SunPower 的電池模組一直維持較高的價格，在 25 屆的歐洲光電太陽能研討會暨展覽上，更宣布將開始生產第三代轉換效率超過 23% 的電池，為了抑制塊材載子再結合的發生，生產線將使用品質較佳的晶圓，使少數載子 (minor carrier) 的擴散長度 (diffusion length) 可以增長，同時將晶圓厚度由 160 微米降至 145 微米，降低材料成本。⁶ 而友達也在去年 5 月決議將與 SunPower 合作投入 7 億美元，於馬來西亞共同投資太陽能電池廠，雙方各持股 50%。SunPower 使用高品質的 N 型 FZ 晶圓作為基材搭配傳統的焊接技術，而日本夏普 (Sharp) 卻是使用等級較低的 CZ 晶圓搭配獨家的表面黏著技術 (Surface mount technology, 簡稱 SMT) 切入 IBC 電池的生產，曾為電池最大製造商的夏普雖已退出前 3 名，但對高效率電池的開發仍是不遺餘力，從 07 年宣示跨入此領域後，位於日本大阪堺市 (Sakai) 的工廠已在今年 3 月開出產能了，在日本 PV EXPO 2011 的展覽上展出 6 吋單晶的 IBC 電池，轉換效率可達 20%，而它們的表面黏著技術將有助於加快後續模組的封裝速度。⁷

既然 IBC 可以提高電池效率並增加模組的美觀性，但其複雜的生產流程，使其製造成本居高不下，因此許多變形結構便油然而生，金屬穿透式 (Metal Wrap Through, 簡稱 MWT)、射極穿透式 (Emitter Wrap Through, 簡稱 EWT)、金屬繞邊式 (Metallization wrap around, 簡稱 MWA) 以及單一蒸發的背指叉射極穿透式 (Rear Interdigitated Single Evaporation- Emitter Wrap Through, 簡稱 RISE-EWT) 背接觸太陽電池，皆可降低指叉背接觸生產的難度。位於德國 Emmerthal 的研究機構 Institute for Solar Energy Research Hameln, 簡稱 ISEH 便提出 RISE-EWT 的電池結構，以 P 型矽晶圓，利用雷射脫落製程 (Laser ablation process) 完成通孔，並在表面與通孔形成高濃度硼之選擇性射極，使同時用氧化矽來鈍化背面，電池效率可以達到 21.4%，其製程簡單、快速、不需要黃光製程或光罩就可完成電池的製作。EWT 與 MWT 則是目前最受矚目的技術，相較之下，MWA 便顯得乏人問津，其中 Advent solar 曾經在 07 試著將 EWT 電池量產，不過仍有量產問題無法解決，推測應是 EWT 的孔洞非常密，每單位平方公分可以達到 100 個，衍生出的破片問題，Advent solar 也在 09 年被 Applied Materials 收購，德國 Fraunhofer ISE

與 Q-cells 也持續投入此電池結構之研究，相信應可很快解決上述的問題。而荷蘭能源研究院(Energy research Centre of the Netherlands，簡稱 ECN)，則是致力於 MWT 電池與模組的發展，不過日前其多晶矽模組效率(17.0%)的世界紀錄卻被日本的京瓷(17.3%)所打破，可以肯定的就是 MWT 的背接觸模組結構，因為電池效率提升，加上可以降低其封裝損失並增加美觀，將是高輸出模組的首選，未來只要解決量產的問題，將會被多數的電池與模組廠所採用。大陸的阿特斯便與 ECN 簽訂聯合技術發展與轉讓協議，將 MWT 技術應用於生產，並與荷蘭設備製造商 Eurotron 共同開發滿足這種技術所需的特殊模組組裝設備，進行模組的生產，除此之外，英利綠色能源(Yingli solar)與晶澳太陽能(Jasolar)也投入此一技術之開發。⁸

提到高效率太陽電池，便不能忽略三洋電機在 1990 年首次提出，命名為薄本質層異質接面(Heterojunction with Intrinsic Thin layer)的電池結構，在 N 型晶圓的表面沉積很薄的非晶矽形成異質接面，97 年初期效率僅有 17.3%，到 02 年時效率已可達到 18.4%，03 年因縮小電極增加有效發電面積與降低電池表面缺陷區域，效率一舉躍升至 19.5%，之後導入背面場效的設計，在晶圓的兩面形成非晶矽(一面為 i/p，另一面為 i/n)，把電池效率提高到 22.3%，之後藉由降低表面電極的面積、改善非晶矽膜層的品質來減少載子再結合的發生以及電阻的損失，最佳化後之電池效率已達 23%，其量產的產品在減少載子再結合、優化電極的佈線以及減少入射光的損失後，也在去年年底達到 21.6%的水準，這款型號 HIT-N240SE10 的電池搭配抗反射層技術玻璃(anti reflection coated glass)與新設計後，模組的效率可以達到 19.0%。⁹ 目前已知的異質材料有氮化鎵(Gallium nitride，化學式為 GaN)、氮化銦鎵(indium gallium nitride，化學式為 InGaN)以及非晶矽，矽是地殼中第二豐富的元素，占總質量的 25.7%，僅次於氧 49.4%，從純化、製程、設備到元件，整個產業與技術可說是相當成熟，而三洋電機執行董事兼強化業務推進兼研究開發兼環境推進本部長津田信哉就表示：非晶矽的選用，從材料含量、製程技術與溫度，是比較令人放心的，而結晶矽與非晶矽的結合，某方面而言，就是一種堆疊型太陽電池(Tandem solar cell)，利用不同材料分別來吸收太陽光的長波長與短波長，而結晶矽的能隙為 1.1eV，非晶矽的能隙則為 1.7eV，¹⁰ 因此 HIT 電池具有較大的開路電壓，較大的開路電壓的另一個原因就是非晶矽可以鈍化結晶矽的表面，同時具有較低的界面能位密度(Interface state density)減少載子在界面的損耗，也因此當界面產生磊晶矽時電池效率反而下降。¹¹

三洋電機執行董事兼太陽能業務部長前田哲宏在電池業務說明會上表示，三洋很難在製造成本方面超過中國廠商及美國的 First Solar，今後打算憑藉高轉換效率來取勝，將在 12 年以後推出轉換效率為 23% 以上的電池，將以松下 (Panasonic) 位在兵庫縣尼崎 (Amagasaki) 的工廠作為首選生產基地，¹² 但是 HIT 的設備投資相對其他的晶矽電池來說是較高的，主要來自於非晶矽的製造必須在真空的情況下完成，加上 SunPower 即將開始量產 23% 的電池，迫使三洋取消原有的擴產規劃，縱使如此，大陸的國電晶德與英利綠色能源仍是看好此電池結構，並開始生產線的規劃。

其實我們可以發現，IBC 與 HIT 這類高效率電池都是使用 N 型晶圓，主要是 N 型晶圓具有較長的擴散長度與可容忍較高的製程溫度，同時不需擔心光衰的問題，因此具有較高的轉換效率。ECN 除了 MWT 電池與模組的發展外，在此領域的研發也是不遺餘力，而大陸的英利綠色能源與中電以及台灣的益通都有投入生產的打算。德國的 Fraunhofer ISE 日前便發表在 2 公分見方的 N 型晶圓上，將常用的鈍化材料二氧化矽 (silicon oxide, 化學式為 SiO_2) 與氮化矽改為氧化鋁 (aluminum oxide, 化學式為 Al_2O_3) 後，電池效率可以達到 23.4%，而 5 吋的電池則有 18.2% 的效率，並用網印製程來完成射極，隨後將射極的摻雜由原本的鋁改為硼，效率將可接近 20%。計劃主持人 Christian Schmiga 提到，在晶圓表面網印鋁膠並經由短時間高溫燒結形成射極的電池轉換效率為 19.3%，而使用硼擴散形成射極與使用 P 型晶圓搭配磷擴散形成界面，並經由 Laser Fired Contact，簡稱 LFC 處理的電池，同樣具有 19.6% 的轉換效率，重要的是，這些電池並不需要任何複雜的電池結構，因此未來將可以很快將量產的效率超過 20%。¹³

目前 P 型晶圓仍是市場的主流，而在不需大幅更改機台與製程的前提下，大家看好的是結合背鈍化與點接觸的電池結構，而上述幾個電池結構也有部份廠商開始進行生產線的設置，未來將會陸續出現轉換效率超過 21% 的電池，加上高品質且低於每公斤 30 元的多晶矽之後，市電同價便會在全球各地達到，當市場規模擴大後，將有利廠商加速成本的降低，民眾也將慢慢習慣太陽能發電，傳統高污染的發電模式才會被取代，台灣雖然短時間不易達到，但是能源缺乏以及暖化帶來的氣候異變等問題，讓太陽能的發展與推廣刻不容緩。政府應該從公共工程、政府機關或是學校建築開始，大量採用太陽能發電裝置，政策面除了優惠回購電價制度，甚至排汙總量管制交易的建立，以及加速智慧電網的建立等都可改變人民的用電習慣，而電池廠商更應該致力於電池效率的提升，商業之間的合縱

連橫，雖然可以加強本身的優勢，因應產業快速的變化，但是只有電池效率的提升才是提升競爭力的根本，拉開與競爭者之間的距離，也許從國外的研究機構獲得授權或是設備商的整廠輸出是最快的方式，但畢竟不是獨家，帶來的效益有限，找出適合自己生產且獨特的高效率電池結構才是王道。分析影響效率的主要問題，可以發現晶矽的能階為 1.1eV，而太陽光的能量則涵蓋 0.3~4.1eV (包含紅外光、可見光與紫外光)，因此小於晶矽能階的太陽光是無法激發材料產生電子-電洞對(約佔 23%)，而大於晶矽能階的部份則因 thermalization 損失將近 33%，若能將多種材料製成堆疊型電池將太陽光完整利用，將是下一階段實現高效率電池的方法之一。

參考文獻

1. http://www.digitimes.com.tw/tw/dt/n/shwnws.asp?CnIID=1&Cat=90&Cat1=&id=0000211924_YLLLBLHY1HRCHQ5NZU2WT&query=%A4%D3%B6%A7%AF%E0
2. http://www.berich.com.tw/AG/Cnyes/cmpinfo/Cmpinfo_nw.asp?cmpname=%A4%D3%B6%A7%A5%FA%B9q%AF%E0%B7%BD%AC%EC%A7%DE
3. 葉昱昕，從技術課題觀看晶矽電池效率之提升
4. 龍健華，選擇性射極矽晶太陽電池技術介紹，*工業材料雜誌*，**2010**，*281*，106.
5. <http://www.greentechmedia.com/articles/read/suntech-stumbles-with-pluto/>
6. <http://us.sunpowercorp.com/about/newsroom/press-releases/?relID=482133>
7. http://www.finchannel.com/Main_News/Tech/84385_Sharp_to_Begin_Mass_Production_of_New_Single_Crystalline_Solar_Cells_with_High_Conversion_Efficiency/
8. 林福銘，背接觸式太陽電池模組封裝技術與國際現況，*工業材料雜誌*，**2010**，*281*，131.
9. <http://www.funddj.com/KMDJ/News/NewsViewer.aspx?a=9386faea-b10a-4577-a01b-3887a317079d>
10. <http://big5.nikkeibp.com.cn/news/econ/52443-20100721.html>
11. 蕭睿中，高效率異質介面矽基太陽電池技術介紹，*工業材料雜誌*，**2010**，*281*，112.
12. <http://big5.nikkeibp.com.cn/news/econ/51954-20100617.html>
13. http://www.pv-tech.org/news/fraunhofer_ise_researchers_claim_that_silicon_solar_cells_are_nearing_20_ef