



太陽光電模組技術發展趨勢

劉漢章 博士 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組, 資深研究員

隨著太陽光電市場規模擴大，各種技術產品因應而生。自2019年起，電池片版型改變驅動模組端的技術發展多樣化，包含半片、雙面電池、雙面玻璃、多主柵、疊片、疊焊、拼片及大尺寸等多樣化技術疊加，使得最終模組產品的輸出功率相較於2018年增加5~10W。市場機制決定了模組技術的發展，標準化已成歷史，未來模組的發電性價比將被優先考量。高性價比、高可靠度的產品，享有更大的市場。

一、前言

太陽光電模組的降本提效一直是模組技術發展目標，目前提升效率一方面是通過優化結構來提高電池效率，進而提高模組效率，另一方面則是通過改善模組的製作技術來達到提高效率的目的。電池技術方面，從PERC (Passivated Emitter Rear Cell)到IBC (Interdigitated back contact)、HJT (hetero-junction)、TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)以及N型電池，各企業正不遺餘力的研發。相對於提升電池技術，不少企業投入對模組製造技術進行改善。雖然特別高效的電池價格偏高，但近兩年矽晶模組價格下降約20%，使得高效模組性能優勢愈發不明顯，價格差距的考量遠高於效率提升。這幾年國內外實際電站發實測歷史數據顯示，使用極端高效電池的度電成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)不如常規的矽晶。近日幾個位於不同光照地區太陽能發電站進行全生命週期的數據比較，結果顯示60片規格單晶PERC甚至要比60片常規多晶更便宜才能做到度電成本一致。所以在降低度電成本的前提下，不增加現有晶矽電池模組基礎的過多額外成本，但又能讓輸出功率升一個檔次的模組技術是最佳方案。本文中逐一介紹目前太陽光電模組技術發展趨勢，期望能提升我國模組技術，達成政府2025年太陽光電20GW設置量的目標。

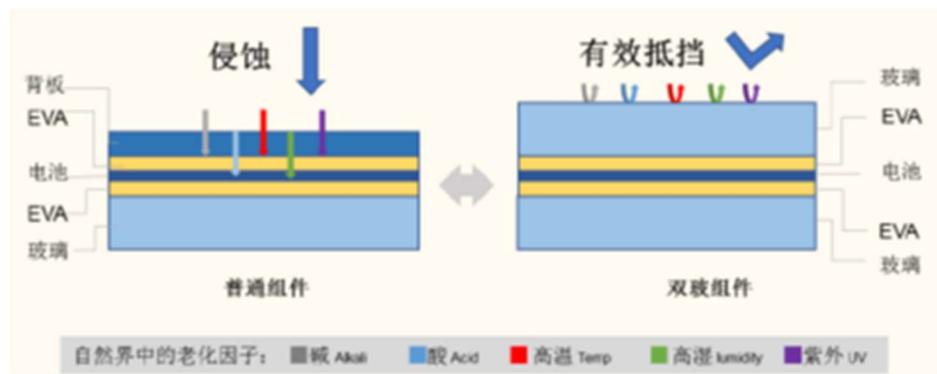
二、太陽光電模組技術介紹[1]

1. 雙玻(Dual glass)單面太陽光電模組

雙玻模組是由兩塊強化玻璃及膠膜和太陽電池串列經過層壓機高溫層壓組成複合層。由上至下依次為設置的強化玻璃層、封裝膠(聚乙烯醇縮丁醛 PVB (Polyvinyl Butyral)、聚烯烴 PO (polyolefin)、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 EVA (Ethylene Vinyl

Acetate, EVA))、單晶或多晶電池組層、封裝膠、強化玻璃層。各項性能優，適用範圍廣，分述如下：

- (1) 低水汽滲入：因模組採用雙面玻璃壓製而成，其耐候性、發電效率都優於傳統模組，圖1是普通與雙玻模組的耐候性比較。尤其是對於分布在濕度較高、酸雨或鹽霧較大地區的電站、農業大棚、大風沙地區電站，雙玻模組優勢更加顯著。相較於單玻模組背板材料是一種有機材料，水汽可以穿透，導致 EVA 樹脂快速降解。分解產物含醋酸，會腐蝕太陽電池上的銀柵線、匯流帶等，使模組的發電效率逐年下降。而玻璃的零透水率使模組的電量損耗減少，發電效率提升，衰減率下降約 0.2 %，壽命延長 5 年達到 30 年左右。



(圖片來源：國金證券[1])

圖1、普通與雙玻太陽光電模組的耐候性比較

- (2) 機械性能良好，發電穩定可靠：玻璃的耐磨性、絕緣性、防水性以及承載力都優於高分子背板，減少模組局部隱裂等問題，模組發電更穩定可靠。此外防火等級由傳統模組的 C 級提升到 A 級，雙玻模組的防火性能顯著提高。
- (3) 熱容量大，減少熱斑效應：雙玻模組自身熱容量較大，與普通模組相比，溫升速率較小，更不易受冷熱衝擊影響。且玻璃與背板的熱擴散係數相差7倍以上，雙玻模組可以有效解決模組散熱問題，減少熱斑損傷。
- (4) 無鋁框設計，有效解決電勢誘發衰減(Potential Induced Degradation, PID)：雙玻模組採用無框設計，沒有鋁框便無法建立導致 PID 發生的電場，大幅降低發生 PID 衰減的可能性。
- (5) 衰減低壽命長，發電量增幅超過20%：雙玻模組憑藉更低衰減率可使發電量增長 3%左右，但玻璃替代背板後透光量增加，帶來功率損失，因此雙玻模組綜合發電量增益約 1%。
 - (a) 增益面：雙玻模組衰減率比單玻模組降低約 0.2 個百分點，相同發電條件下，模組的發電量相較單玻模組提高 3%。

(b) 損失面：由於 EVA 或離子聚合物是透明的，沒有白色背板反射電池片間的漏光，使得實質光量降低，雙玻模組會有至少 2% 以上的功率損失。而使用白色 EVA 做後側的封裝材料會出現溢膠遮擋電池片的現象，無法解決功率損耗問題，因此可採用格子狀背板。此外雙玻模組的封邊方式會影響抗水汽的功能，失去鋁框保護後對風壓的耐受度也會受到一定影響，因此通常會保留鋁框以增加可靠度。

2. 雙玻雙面電池(Bifacial cell dual glass)太陽光電模組

雙面電池背面由全鋁層覆蓋改為局部鋁層，採用與正面類似的鋁漿印刷細柵格。背面的入射光可由未被鋁層遮擋的區域進入電池，實現雙面光電轉換功能，相當於增加電池受光面積，從而增加發電量。與單面雙玻太陽能模組類似，雙面發電太陽光電模組背面也採用玻璃或透明背板進行封裝，優化模組性能的同時亦增加背面透光量。與單面雙玻模組相比，雙面雙玻模組在零透水率、優良機械性能、少熱斑損傷、低 PID 機率等優勢的基礎上，更進一步加強其性能與適用性。

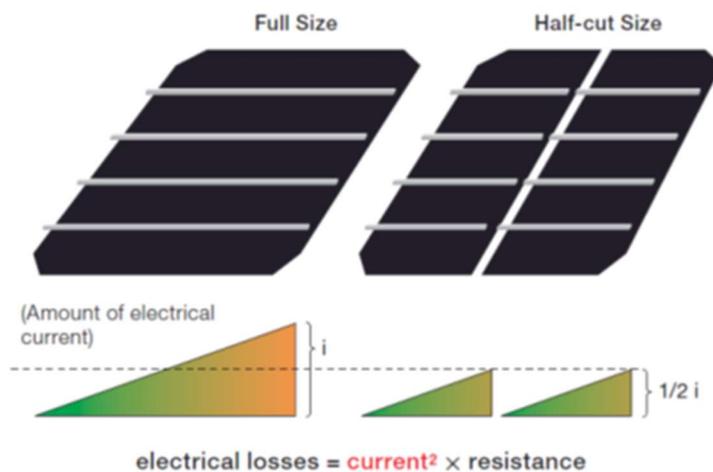
- (1) 工作溫度低，降低功率損失：溫度會對矽晶太陽電池的開路電壓、短路電流、峰值功率等參數產生影響。溫度升高 1°C，峰值功率損失 0.35% ~ 0.45%。雙面電池的背面是高透光的 SiN_x 材料，紅外光線可以穿透電池，不被電池吸收，正常工作下的溫度較常規太陽光電模組低 5~9°C，減少功率損失。
- (2) 可垂直安裝，適用範圍增廣：在理想的安裝傾角、距地高度以及地面反照率 (albedo) 或反射係數下，雙面發電模組能夠充分利用環境中的反射光和散射光。因此除了傳統傾角安裝方式外，雙面發電模組還可以垂直安裝，適用於圍欄、太陽光電幕牆、高速公路隔音牆、採光型農業大棚等場合。
- (3) 雙面發電之發電量增益 5%~30%：由系統層面來看，雙面電池系統的性能主要受系統設計及安裝環境的影響。在同等標稱峰值功率、安裝地點的情況下，雙面發電模組發電量增益可達 15%~20%，增加模組高度及地面反照率後增益可達 30%，使用斜單軸或追蹤設備後增益甚至可達 50%。由於雷射開孔點仍然需要柵格來疏導光生電流，故電池背面大部分區域仍覆蓋了鋁/銀漿，且鋁柵格導電性不如銀柵格，故鋁柵線較寬，背面覆蓋率高達 30%~40%，因此背面可吸收光線的區域有限，轉換效率僅 10%~15% 明顯低於正面有 20% 以上的效率。且由於背面由全鋁層改為局部覆蓋，透光量增加，電池正面效率可能會下降 0.2~0.5%。
- (4) 發電增益受反射背景、太陽光電模組朝向、安裝角度、離地高度的影響：雙面發電模組安裝角度可從 0° 到 90°，角度越大較常規模組發電量增益越多，配合跟蹤軸等追蹤設備後發電量增加顯著。背景顏色越淺，背景反射率越高，發電

量提升越多。離地高度越高，太陽光電模組與地面之間的空間越大，則模組背面可接收的周圍反射面越大，發電量越多。

3. 半片(Half cut cell)電池太陽光電模組

通過主柵線的電流降低到整片的1/2，功率損耗就降低為原來的1/4。目前大部分單、多晶電池的太陽光電模組額定工作電流較高，其平均值在8A~9A 左右，大電流流經模組內部的焊帶時會產生功率損耗，這部分損耗主要轉化為焦耳熱($P_{loss}=I^2R$)存在於模組內部。因此隨着電流的增大，這部分的損失也就越大。

(1)電流減半降低工作溫度，特殊串並結構減少遮擋損失：使用雷射切割沿着垂直於電池主柵線的方向將標準規格的電池片(如156mmx156mm)切成尺寸相同的兩個半片電池片(如尺寸156x78mm)。由於電池片的電流和電池片面積有關，如此就可把通過主柵線的電流降低到整片的1/2。當半片電池串聯以後，正負迴路上電阻不變，這樣功率損耗就降低為原來的1/4 ($P_{loss}=1/4 \times I^2R$)，從而降低模組功率損失，提高封裝效率和填充因子。圖2為半片電池的原理，一般半片電池模組輸出比同版型模組提升5~10瓦(2%~4%)，甚至更高。半片電池模組內部結構設計，包括串聯結構、串聯-並聯結構、並聯-串聯結構等三種方式，常規模組通常採用串聯結構，由於半片電池劃片後電流減半，電壓不變，所以如果使用串聯結構進行設計，模組電壓將是常規模組的一倍，會增加系統的成本。同時模組電壓增倍後也存在一定的安全風險，所以為了保證和常規模組的整體輸出電壓、電流一致，半片電池模組一般會採用串聯-並聯結構設計，相當於兩塊小太陽光電模組並聯在一起。



(圖片來源：Mitsubishi electric[2])

圖2、半片電池的原理

(2)兼顧支架與土地利用，減少遮擋造成發電量損失：常規模組安裝在太陽能電

站上進行模組陣列排列時，通常有縱向排列與橫向排列兩種方式。縱向排列模組的優點是安裝方便、支架利用率高、占地面積較小，缺點是在早晚陰影、灰塵、水漬、積雪等造成遮擋時，縱向排列的模組發電量損失比橫向模組更多。半片電池模組憑藉其特殊的並串結構，可以使太陽光電換效率有所提升，比同版型 120 片模組功率提升 5~10W(+2%~4%)，甚至更高。

- (3)工作溫度低，減少溫升帶來的功率損耗：半片電池模組戶外工作溫度比常規模組低 1.6°C左右，按照模組功率溫度係數-0.42%/°C計算，同等條件下半片電池模組比整片電池模組功率輸出高 0.672% (按普通280W 模組功率估算，功率提高 1.88W)。

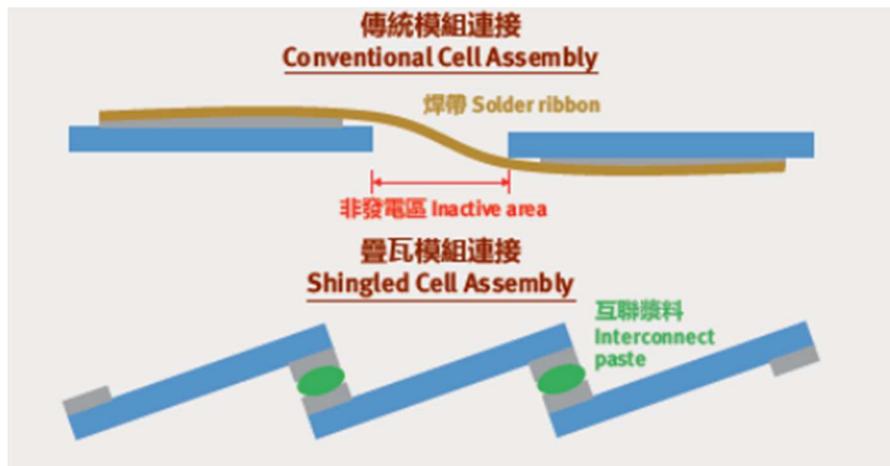
4.多主柵(Multi busbar)電池太陽光電模組

- (1)技術逐漸成熟，模組可靠性提升：從金屬電極遮擋減少有效受光面積以及柵線材料銀價格較高的角度考慮，柵線應越細越好。然而，柵線越細、導電橫截面積越小、電阻損失越大。此外模組內電池片之間由焊帶與主柵相連，改動柵線還涉及焊接工藝變化，因此柵線設計需要在遮光、導電性、成本間取得平衡。近年來，隨著矽片尺寸變大、網印技術改進、矽片成本下降導致正極銀漿成本占比增加，多主柵技術難度越來越小，而性價比日漸提升。多主柵甚至無主柵電池的市占率逐步提升，2017 年起部分大廠開始推出多主柵電池片，預計未來將逐步成為主流。由於柵線密度增大，間隔小，即使電池片出現隱裂、碎片，多主柵電池功損率也會減少，仍能繼續保持較好的發電表現。同時焊接後焊帶在電池片上的分布更為均勻，分散了電池片封裝應力，從而提升了電池片的機械性能。
- (2)降低電極電阻與遮擋，模組功率提升 5-10W：多主柵電池片大多採用9~12條柵線設計，增加了柵線對電流的收集能力。同時有效地降低模組工作溫度，提高長期發電性能，模組效率可提高2.5%，功率可提升5~10W。
- (3)電池內柵線密化，電阻損耗降低：雖然電極變細使串聯電阻提高，但多主柵技術通過增加柵線的數量，將柵線密化，減小了發射區橫向電阻。通過增加柵線橫截面積(減小柵線寬度，增加柵線高度)，減小導線電阻。每條主柵線承載的電流變少，電流在細柵上的路徑變短，功率損耗得到有效降低。
- (4)有效受光面積增大：更細更窄的主柵設計有效地減少了遮光面積，增大有效受光面積。多主柵電池與 5BB 電池相比，遮光面積大約減少 3%。
- (5)圓形焊帶二次光反射效應增加電池光的吸收利用率：使用傳統扁平/方型焊帶時，焊帶上方的入射光基本被反射損失掉，而圓形焊帶上方的入射光經過玻璃二次反射可被電池片有效吸收利用，從而提高光生載流子的收集率。

5. 疊片(Shingled cell)太陽光電模組

工研院研綠能所研發團隊開發出相對應的新型疊片模組專利，在保留原有焊帶下加入緩衝層達到疊片模組功效，初步驗證功率可達330W。

- (1)採用無主柵設計，電池交疊互聯無焊帶：疊片模組技術係將電池片切割為4~5份小片，再將電池正反表面的邊緣區域製備成主柵，使得前一片電池的前表面邊緣與下一片電池的背表面邊緣互聯。這樣的設計使得電池片以更加緊密的方式互相連接，電池間縫隙降到最低，邊緣甚至稍微重疊。圖3為傳統模組與疊片(瓦)模組連接差異的說明，疊片模組技術採用整體無主柵設計，通過一種類似導電膠的方式將電池以串並聯結構緊密排布，省去焊帶焊接。疊片技術用無主柵設計，降低內耗提高功率，大幅度降低反向電流對模組產生熱斑效應的影響，提高模組的機械性能。



(圖片來源：杜邦[3])

圖3、傳統模組與疊片(瓦)模組連接差異

- (2)解決熱斑問題，抗裂能力增強：由於疊片模組獨特的排列方式，降低焊帶電阻對模組功率的影響，確保模組封裝過程中的最小功率損失，降低反向電流對於模組產生熱斑效應的影響。疊片模組特有的柔性連接，可以最大程度地減少由於模組運輸與現場安裝可能帶來的電池片隱裂。
- (3)適用於高緯度及土地面積有限地區：與其他常規模組比，疊片模組在部分遮光條件下損耗功率更低，因此更適合於高緯度地區、土地集約項目以及分布式項目等。
- (4)可放電池片數量增加13%，模組功率可提升15~20W：疊片技術通過交疊電池小片，實現無電池片間距，在同樣面積下可以放置更多的電池片，從而有效擴大電池片受光面積，發電增益可達18.5%，模組效率可提升到18.81%，遠高於

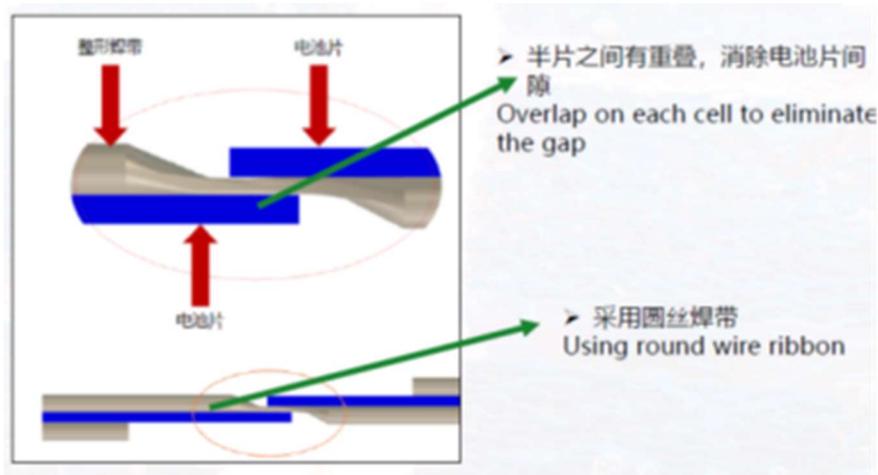
半片、多主柵等模組技術。2017年主流的疊片版型是將1片常規尺寸的電池片(156mm 邊長)切成5小片，34小片串聯成為一串，2串串聯後再並聯形成一個模組。一個模組中電池片總面積相當於68片156mm×156mm 電池，模組面積相當於60片156mm×156mm 電池的版型，其尺寸為1,623mm×1,048mm×40mm，即同版型模組中電池片數量增加13.3%。

(5)採用無主柵設計，減少金屬柵線遮光面積：疊片電池的無主柵設計減少了金屬柵線遮光面積，提高模組輸出功率。

(6)串並結構減少內阻，降低遮光影響：疊片模組特殊的串並結構降低模組內阻與內部功耗。並聯電路設計使疊片模組功率下降與陰影遮蔽面積呈線性關係，與其它常規模組相比，在部分遮光的條件下表現更好。

6.疊焊(Tiling ribbon)太陽光電模組

圖4為疊焊技術說明，是整合半切電池技術的無縫焊接，保留焊帶。電池片切半能有效減少陰影遮擋帶來的電流損耗與多柵線設計，使用9條主柵縮短主柵間細柵長度，減少電流在細柵的傳輸距離，降低損耗，無縫焊接採用圓絲焊帶半片之間有重疊，可消除電池片間隙。相比常規模組的9柵，疊焊模組產品採用屈服更低，直徑更小的焊帶，且在重疊區域採用平滑壓扁設計確保其可靠性。相比常規5柵扁平焊帶，其疊焊模組產品的圓形焊帶，部分光線的內部二次反射，增加有效入射光線，提升發電量。實際發電過程，早晚光線斜入射時，實現約7W 的發電增益。



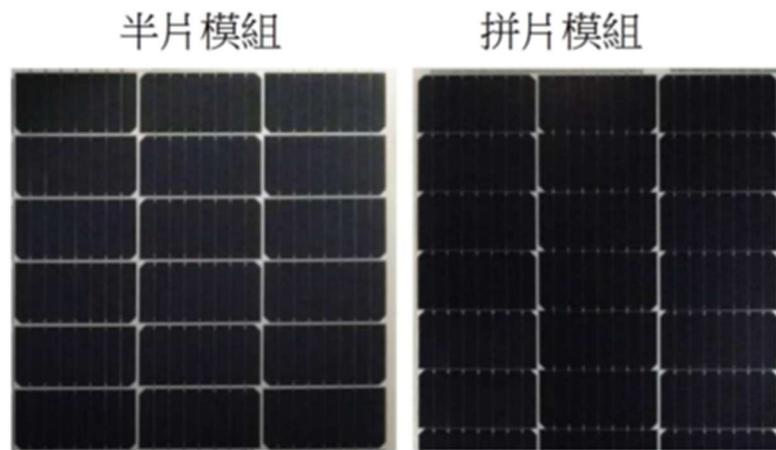
(圖片來源：晶科能源[4])

圖4、疊焊技術說明

7.拼片(Paving)太陽光電模組

拼片技術係指在模組封裝時將電池片進行無縫拼接，通過減少電池片間距，提升模組封裝效率的技術。拼片主要是為了規避疊片專利而研發，封裝形式介於半片與疊

片之間，圖4為半片模組與拼片模組的差異說明。拼片模組採用獨有的“三角焊帶+柔性扁焊帶”設計，在電池片的正面採用光線利用率較高的三角焊帶，背面採用柔性扁平焊帶，兩種焊帶通過柔性無縫互聯技術實現電池片的無縫拼接。在傳統模組封裝技術基礎上，僅通過更換串焊機方式，實現片間距大幅縮小和三角焊帶焊接，達到最終等同疊片模組的封裝密度。此外拼片技術有更高的良率，當下可量產的拼片模組效率甚至要高於疊片模組。應用22.1%量產效率的 PERC 電池，拼片模組效率可輕鬆突破20.2%。



(圖片來源：杭州矚日能源科技[5])

圖5、半片模組與拼片模組差異

8.大尺寸(Larger wafer)太陽光電模組

太陽光電行業已逐漸形成共識，可通過增大電池尺寸或增加電池數量來大幅度增加單個模組的發電功率，明顯降低電站的系統發電成本 (Balance of System, BOS 成本)，這比提高電池效率做起來更容易、效果也更明顯。從2018年開始，隆基公司率先推出 M6電池片 (長度166.75mm)，比主流 M2電池片 (長度156.75mm) 的單片面積大了13%左右，也就意味著同樣電池片數量的模組發電功率提高了13%左右。但是中環公司於2019年8月召開新產品發布會，革命性地推出了 M12電池片 (長度210mm)，比主流 M2電池片 (長度156.75mm) 的單片面積大了80%左右。隨著中環公司 M12電池片，天合光能公司推出如圖5的582~600W 超高功率雙面雙玻太陽光電模組，可以大幅度降低電站的 BOS 成本而引起市場的高度關注。面對 M12電池模組的高功率挑戰，國內外大型模組廠已經計劃採取增加單個模組電池數量的方式來應對，高功率大尺寸太陽光電模組的競爭格局已經逐步顯現。



(圖片來源：天合光能[6])

圖6、天合光能的582~600W 超高功率太陽光電模組

三、結論

本文介紹了目前的太陽光電模組技術發展趨勢，可以看出降本提效為最終方向。未來那一種模組技術有望破繭成蝶，則有待市場驗證。但是技術成熟、可規模化生產，能確保長期的可靠性將是技術勝出主要因素，可做為後續太陽光電模組技術發展之參考依據。

四、參考資料

- [1] 價廉物美的高效組件技術將迎來快速普及-光伏平價上網系列報告之二，國金證券，2018年九月。
- [2] Mitsubishi electric, "A New Premium Generation" Revised Publication, Jul. 2011.
- [3] 杜邦光伏材料：<https://www.dupont.cn>
- [4] 杭州矽日能源：<http://www.hzjet.com.cn/index.php>
- [5] 晶科能源：<https://www.jinkosolar.com/site/welding>
- [6] 天合光能：<https://www.trinasolar.com/cn/our-company>