



面積大於 2 cm^2 鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽光電模組之發展現況

The Development Status of Perovskite-Silicon Tandem Solar Modules with Area Larger than 2 cm^2

吳世雄 S. H. Wu

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 研究員

摘要/Abstract

近日瑞士研發中心(CSEM)與洛桑聯邦理工學院(EPFL)的最新研究成果發表：鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池效率達31.3%，一舉突破單界面太陽電池理論效率極限。然而，目前鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池的研究成果，在面積與效率仍離商用階段有不小的距離。本文整理國際大尺寸鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池資料，陳述不同堆疊方式的面積與效率發展現況，同時推測發展商用模組的關鍵瓶頸，並提出可能的解決方法。

Recently, the latest research results of CSEM and EPFL were revealed that the champion efficiency of perovskite-silicon tandem solar cells reaches 31.25%, breaking the limit of theoretical efficiency of single junction solar cells. However, the research results of perovskite-silicon tandem solar cells are still far from the commercial stage in terms of area and efficiency. This article summarizes the international reports on large-area perovskite-silicon tandem solar cells, and illustrates the development status of the area and efficiency of different tandem structures. Furthermore, it also speculates about the key bottlenecks of commercialization, and proposes possible solutions.

關鍵字/Keywords

鈣鈦礦(Perovskite)、堆疊太陽電池(Tandem Solar Cells)、半穿透鈣鈦礦太陽電池(Semi-transparent Perovskite Solar Cells)、二端點堆疊太陽電池(Two-terminal Tandem Solar Cells)、四端點堆疊太陽電池(Four-terminal Tandem Solar Cells)



前言

大應全球淨零碳排策略，綠能被視為重點發展項目。為綠能產業之一的太陽光電，持續朝降低均化發電成本 (Levelized Cost of Energy; LCOE) 的目標前進，而提升太陽光電轉換效率是最直接的方法。隨著太陽電池廠商持續開發，目前矽晶電池轉換效率已經接近單界面效率理論極限29.8%⁽¹⁾。為了突破理論限制，達到30%以上的高效率，由不同材料搭配的堆疊太陽電池(Tandem Solar Cells)技術逐漸受到關注。堆疊太陽電池技術主要是利用不同能隙吸收層材料來吸收不同波段的太陽光譜，高能隙的材料作為上電池吸收太陽光譜中的短波長光子產生較高電壓的光電流，而較長波長的光子則穿過上電池抵達具有較低能隙吸收層的下電池而被吸收產生較低電壓的光電流，如此可有效吸收太陽光譜中更寬廣波長的光子，進而減少光電無效轉換所造成以熱形式的能量損耗，得以提升太陽電池轉換效率。

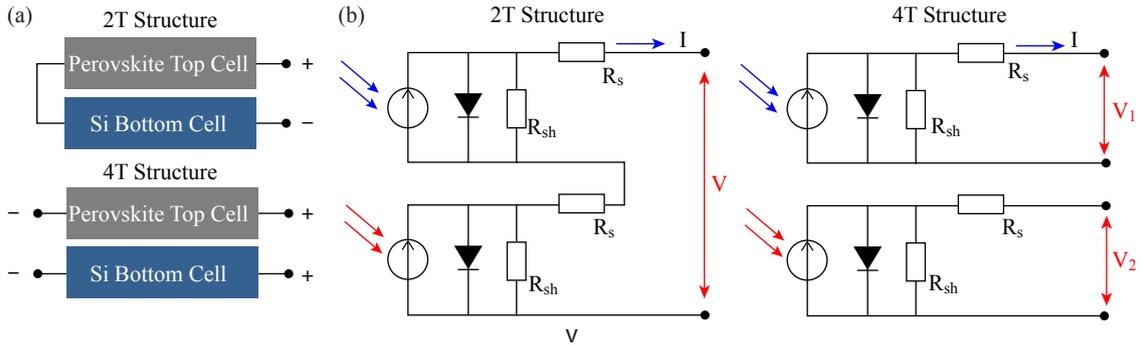
鈣鈦礦(Perovskite)材料具有高能隙、光吸收佳、材料便宜及優異的載子傳輸特性，同時具有可調整能隙的特性，是目前最熱門的堆疊太陽電池之上電池候選⁽²⁾；另外常見的下電池則有矽晶、銅銦鎵硒及鈣鈦礦等選擇。本文鎖定鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池為主題，原因除了在所有以鈣鈦礦為上電池的堆疊太陽電池中，鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池效率表現最好之外⁽³⁾，最重要的是矽晶太陽電池具有效率佳、技術成熟、特性穩定等特點，是目前主流產品，

以此既有矽晶太陽電池市場為基礎，是拓展堆疊太陽電池產業化的最快途徑。

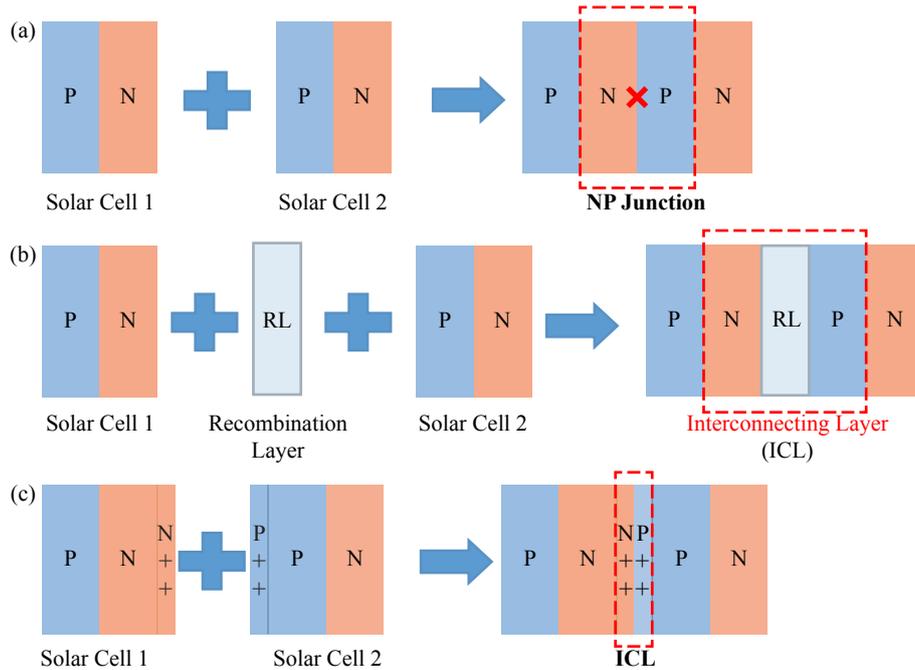
堆疊太陽電池依堆疊方式分類，可分為二端點堆疊太陽電池(Two-terminal Tandem Solar Cells)及四端點堆疊太陽電池(Four-terminal Tandem Solar Cells)，另外還有較少研究資料的三端點堆疊太陽電池(Three-terminal Tandem Solar Cells)。目前鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池不管是二端點或是四端點的效率均持續推升，其中二端點最高效率已達到31.3%的紀錄⁽⁴⁾。但尺寸放大，效率隨之下降的問題依舊沒有解決，使得國際預測的商業化模組面世時間一再遞延。本文整理國際大尺寸鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池資料(因面積不到2 cm²的研究結果離尺寸放大還很遙遠，故本文以尺寸在2 cm²以上的稱之為大尺寸)，說明不同堆疊方式的面積與效率發展現況，同時推測發展商用模組的關鍵瓶頸，提出可能的解決方法。

堆疊太陽電池的架構

如前述，堆疊太陽電池是透過不同材料對不同波長的光吸收最佳化組合設計(意即光學匹配)，來達到提升效率的目的。在堆疊太陽電池的堆疊方式及電性匹配可分為二端點及四端點(三端點的研究尚未成熟，這裡暫不論述)，**圖一(a)**為二端點及四端點堆疊太陽電池的連接示意圖⁽⁵⁾，二端點及四端點顧名思義就是端點的數量。一般而言一個太陽電池會有陽極跟陰極兩個端點，因此所謂的四端點堆疊太陽電池就是上、下兩個電池的端點是各自獨立的；從



▲圖一 (a)二端點及四端點堆疊太陽電池連接示意圖；(b)二端點及四端點堆疊太陽電池等效電路圖⁽⁵⁾



▲圖二 二端點堆疊太陽電池串聯方式，(a)直接連接；(b)透過復合層；(c)透過穿隧層⁽⁵⁾

圖一(b)等效電路圖來看⁽⁵⁾，可說明上、下兩個電池的電路運作沒有關聯，堆疊後並沒有電性匹配的問題，甚至連上、下兩個電池的製作也可分別進行，不互相影響。

二端點堆疊方式較為複雜，如圖一(a)所示，上、下兩個電池堆疊連接後，只有

兩個可以接到外部的端點，因此稱之為二端點堆疊太陽電池。從圖一(b)等效電路圖來看，二端點堆疊太陽電池的上、下兩個電池是透過串聯的方式連接，因此其電性特徵是開路電壓為上、下兩個電池的開路電壓總和；短路電流則是被限制在上、下



▼表一 二端點堆疊太陽電池及四端點堆疊太陽電池特性比較表

	二端點	四端點
光學匹配	需要考慮	需要考慮
電性匹配	上電池與下電池串聯	不需要考慮
結構	上電池直接製作在下電池頂部	上電池與下電池各自獨立製作
優點	1. 製程步驟較少 2. 不需要上、下電池間隔絕緣透光材料 3. 模組工藝與傳統矽晶模組製程較相近	1. 不需考慮上、下電池的電性匹配 2. 上、下電池獨立，可分別維修或更換
缺點	1. 上、下電池的匹配技術挑戰性高 2. 製作上電池時要避免使用會破壞到下電池的製程 3. 上、下電池電性輸出衰退率不一致，影響日後匹配及整體效能	1. 上、下電池分別製作，總製程步驟多 2. 上電池的基板對穿透光的吸收會影響下電池效率 3. 因上電池基板及間隔絕緣透光材料導致堆疊電池及其模組重量較重 4. 成本較高

兩個電池中較小的短路電流。如此一來，上、下兩個電池的電流匹配就非常重要，應避免短路電流表現較差的一方成為電流通瓶頸而影響到二端點堆疊太陽電池特性。在製程方面，由於二端點堆疊方式的上電池是直接製作在下電池的頂部，必須注意避免使用會破壞到下電池的製程及材料。在結構方面，雖然是上、下兩個電池串聯，但直接相接是不可行的，如圖二(a)⁽⁵⁾，若直接相接會在接合處形成新p-n接面，將進而影響整體堆疊電池電性表現，因此二端點堆疊太陽電池常見導入一個導電層當作連接層(Interconnecting Layer; ICL)來串聯上、下電池，此連接層可以視為載子復合層(Recombination Layer; RL)的功能，使上、下電池產生相反方向流動的電子及電洞在此層復合，達到電荷中和，如圖二(b)。另外，該連接層也可以是由N型及P型端同極性的重摻雜組成，所形成極薄的N⁺⁺/P⁺⁺的介面有助於少數載子快速穿隧至

另外一端，如圖二(c)。

綜合以上二端點堆疊太陽電池及四端點堆疊太陽電池特性整理成表一，但此部分只說明小尺寸堆疊太陽電池狀況，尚未考慮尺寸放大的議題。

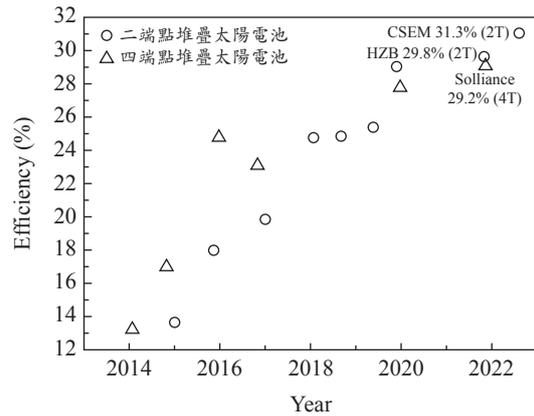
國際小面積鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池現況

圖三是面積不超過2 cm²的二端點堆疊太陽電池及四端點堆疊太陽電池最高效率世界紀錄圖⁽⁴⁻⁷⁾，可以看出不論是二端點或是四端點效率皆提升迅速，尤其是CSEM的二端點堆疊太陽電池效率首先突破30%，甚至達到31.3%⁽⁴⁾。能夠有如此長足進展，顯示已掌握小面積堆疊太陽電池技術關鍵。從上、下電池對整體堆疊太陽電池的效率貢獻比較圖，如圖四⁽⁷⁻²²⁾，可以看出吸收長波長的矽晶下電池僅典型效率的四到五成，也就是說，要提高鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池的效率，最關鍵之處就是提升鈣鈦



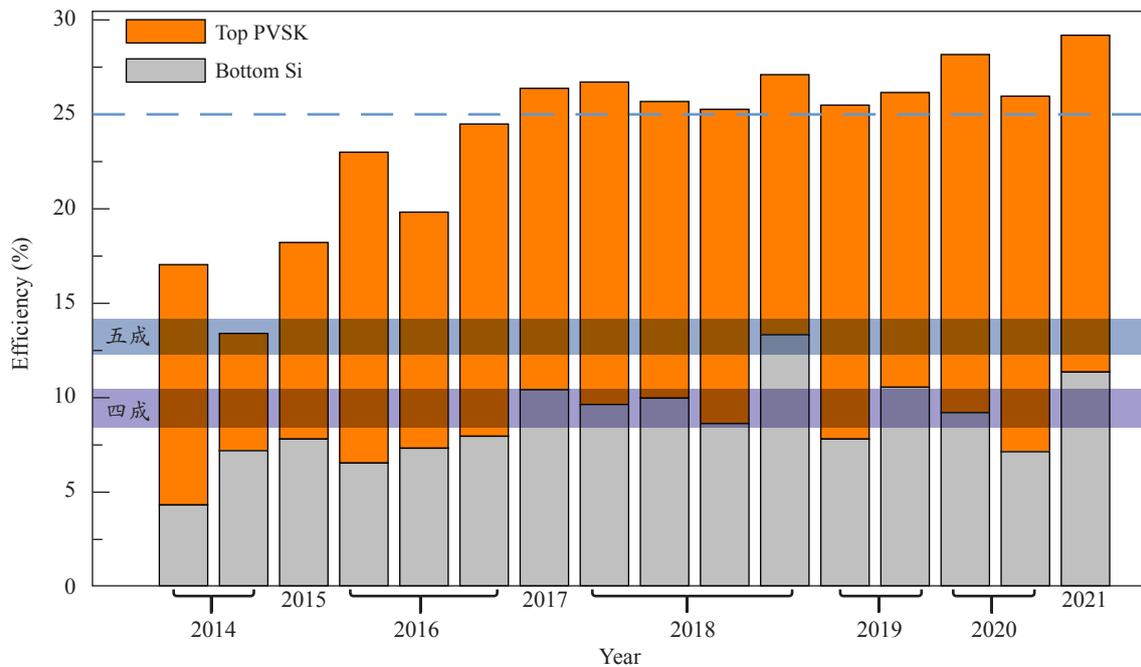
礦上電池效率。

作為堆疊太陽電池的鈣鈦礦上電池，與一般單界面鈣鈦礦太陽電池最大的不同

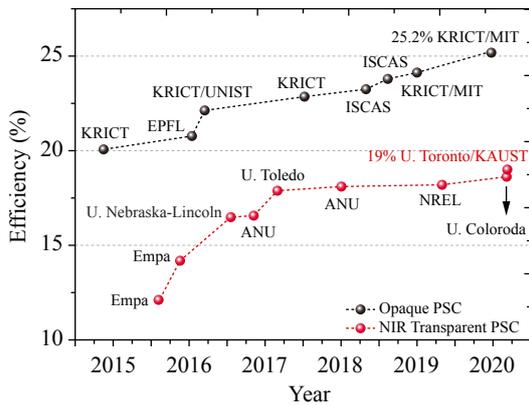


▲圖三 面積不超過2 cm²的二端點堆疊太陽電池及四端點堆疊太陽電池最高效率世界紀錄圖

就是金屬背電極改為透明且兼具導電的材料，前者稱之為半穿透鈣鈦礦太陽電池 (Semi-transparent Perovskite Solar Cells)，後者則是非穿透鈣鈦礦太陽電池。從文獻的數據統計，前者的效率低於後者大約是6%，如圖五⁽²³⁾。造成此差異的主因有兩個：①金屬背電極可反射入射光，使得入射光相當於在太陽電池內部行進兩次，提高光的吸收，進而提升效率。但半穿透鈣鈦礦太陽電池目的是要讓長波長的光可以穿透至下電池，故沒有比非穿透鈣鈦礦太陽電池效率高。②由於半穿透鈣鈦礦太陽電池的透明導電背電極是最後製作，須避免高溫或酸鹼製程破壞底層的鈣鈦礦吸收層、電子傳輸層或電洞傳輸層，因此在製程搭配上妥協所製作的透明導電膜品質較



▲圖四 上、下電池對整體堆疊太陽電池的效率貢獻比較圖

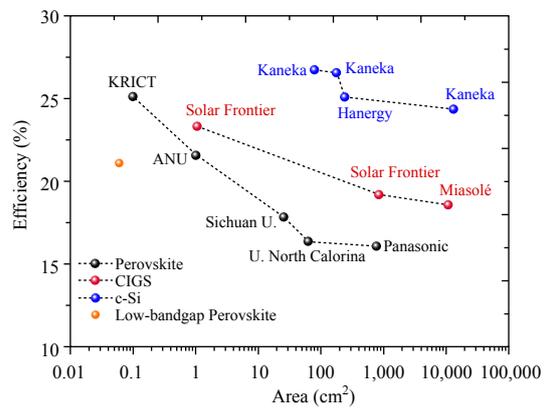


▲圖五 半穿透(NIR穿透)與非穿透鈣鈦礦太陽電池效率趨勢⁽²³⁾

差，導致較高的串聯電阻，造成轉換效率不佳，在尺寸放大時，此問題的影響程度也會隨之放大。

大尺寸非穿透鈣鈦礦太陽光電模組

一般太陽電池在尺寸放大時，均勻性及缺陷等諸多問題影響電池效率隨之顯著，尤其是串聯電阻引起的損耗特別嚴重，此可透過電池面積區域化來減少影響。對於大尺寸非穿透鈣鈦礦太陽電池，導電性比金屬差的透明導電前電極造成的電阻損耗更是影響電池串聯電阻的主因，普遍的解決方法是使用一體化(Monolithic)三階段(P1、P2、P3)圖案化製程，常見為在同一基板上將大尺寸鈣鈦礦太陽電池分成數個較小面積電池進行串聯，透過發電面積劃分減少電流，再經串聯提高整體電壓，間接改善串聯阻抗損耗。目前大尺寸非穿透鈣鈦礦太陽光電模組水準已接近其



▲圖六 大尺寸非穿透鈣鈦礦太陽光電模組之面積與效率統計圖⁽²³⁾

他商品化薄膜型(如：CIGS、CdTe)太陽光電模組，如圖六⁽²³⁾，其中又以Panasonic的802 cm²非穿透鈣鈦礦太陽光電模組效率達16.1%，為大面積化翹楚。文獻⁽²³⁾藉由圖六曲線歸納出非穿透鈣鈦礦太陽光電模組的學習曲線(Learning Curve)，揭露非穿透鈣鈦礦光電模組面積每提升10倍，效率就下降2.4%。若以此觀察套用到半穿透鈣鈦礦太陽電池，其效率還比非穿透鈣鈦礦太陽電池低約6%，不難想像大尺寸半穿透鈣鈦礦光電模組效率會更低。

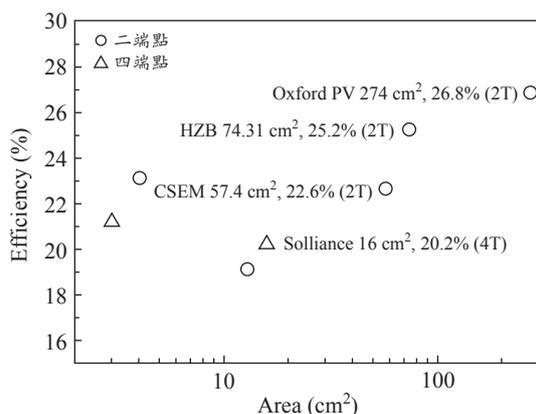
大尺寸半穿透鈣鈦礦太陽光電模組

如前面所述，由於透明導電背電極的沉積條件有諸多限制，所以品質比透明導電前電極更差，單以三階段圖案化製程(P1、P2、P3)，仍然效果不彰。目前大於2 cm²半穿透鈣鈦礦太陽電池最好結果僅有Solliance的16 cm²半穿透鈣鈦礦太陽光電小



▼表二 大尺寸二端點堆疊太陽電池及四端點堆疊太陽電池比較表

	二端點	四端點
大尺寸技術成熟度	高(最佳紀錄274 cm ² , 效率26.8%)	低(最佳紀錄16 cm ² , 效率20.2%)
大尺寸製程優勢	可透過柵狀電極來收集大尺寸鈣鈦礦上電池的電流	因上、下電池分開製作, 大尺寸鈣鈦礦上電池製程選擇性高
大尺寸製程劣勢	在矽晶下電池的表面粗糙結構上製作鈣鈦礦上電池難度高	必須克服上電池的背透明導電電極片電阻過高的問題
大尺寸模組優點	鈣鈦礦上電池無需玻璃基板, 整體重量減輕	因上、下電池各自獨立運作, 當其中一方失效, 另一方仍可持續發電
大尺寸模組缺點	因上、下電池串聯, 當其中一方失效, 將導致整體堆疊太陽電池故障	1. 鈣鈦礦上電池需要玻璃基板, 整體重量重 2. 因上、下電池各自獨立運作, 所以後端系統組件也需要分別準備



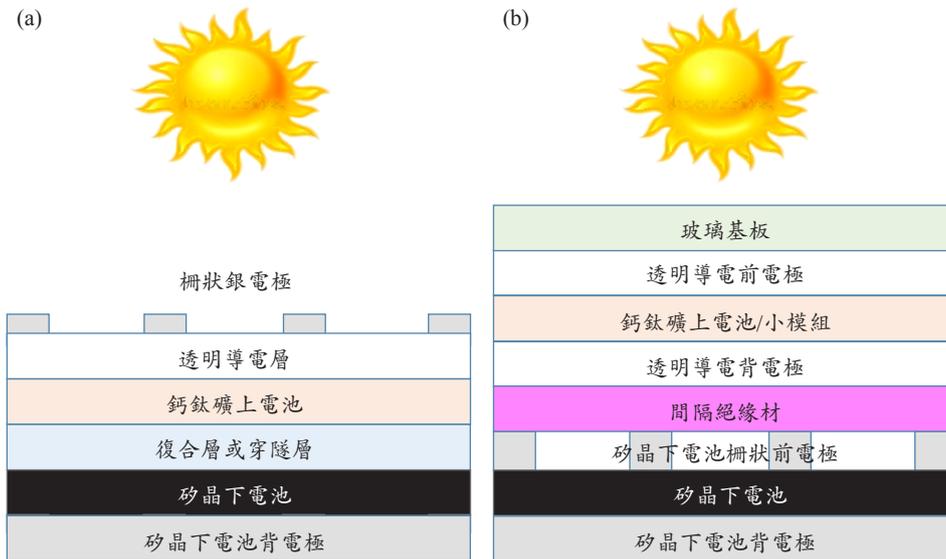
▲圖七 大尺寸鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池之面積與效率統計圖

模組(Mini Module), 效率達12%⁽²⁴⁾, 此與學習曲線吻合。對於大尺寸四端點堆疊太陽光電模組而言, 大面積與高效率的關鍵在於上半部, 也就是半穿透鈣鈦礦太陽光電模組, 因此導致大尺寸四端點堆疊太陽光電模組效率很低, 最佳紀錄只有Solliance的16 cm²四端點鈣鈦礦-矽晶太陽光電模組效率20.2%⁽²⁴⁾, 如圖七^(3,24-29)。但為何二端點堆疊太陽電池可以有不錯的表現? 分析

二端點堆疊太陽電池結構及國際技術可知⁽²⁵⁾, 由於半穿透鈣鈦礦上電池與矽晶下電池的連接介面是電性縱向傳導薄層(複合層或穿隧層), 堆疊電池電壓是上、下電池加成而串聯損耗小, 因此也不須使用三階段圖案化(P1、P2、P3)製程。在透明導電前電極部分, 則可透過傳統矽晶太陽電池的網印柵狀銀電極來幫助電流收集而減少損耗, 所以在大尺寸的發展進度可以遠超四端點堆疊太陽光電模組。如Oxford PV採用商規M6尺寸矽晶太陽電池片所製作的274 cm²二端點鈣鈦礦-矽晶堆疊太陽電池, 效率達26.8%⁽³⁾, 雖良率及穩定性仍具挑戰, 但此堆疊太陽電池尺寸是目前最接近商品化矽晶太陽光電模組所用電池片之尺寸。綜合以上二端點與四端點在大尺寸發展的優劣, 整理成表二, 並將目前兩者的大尺寸結構示意如圖八。

總結與未來展望

以往討論二端點堆疊太陽電池與四端點堆疊太陽電池時, 多從小面積研發技術



▲圖八 大尺寸(a)二端點堆疊太陽電池；(b)四端點堆疊太陽電池結構示意圖

探討，在此範疇，兩者並無顯著差異。本文從「大尺寸」角度比較兩者技術的成熟度，發現四端點堆疊太陽光電模組遠遠落後二端點堆疊太陽電池，即便四端點擁有上、下電池在製程、電性彼此互相獨立的優勢，但面積跟效率若無法突破，恐將面對市場接受度之嚴重挑戰。因此在四端點堆疊太陽光電模組方面，首先要解決的就是透明導電背電極問題，本文推測兩個可能方向：①借鏡二端點堆疊太陽電池，在透明導電前電極及背電極都使用柵狀網印金屬電極來幫助電流收集，但前提是必須克服在前電極的柵狀金屬所造成的樣品表面厚度及親水性不一致問題，避免影響後續鈣鈦礦吸收層及傳輸層的沉積；②持續改善透明導電背電極的品質，在維持高穿透的前提下提升導電性，以期三階段圖案化

(P1、P2、P3)製程可以一次解決前電極與背電極的串聯電阻問題。

雖然二端點鈣鈦礦-矽晶太陽電池在面積及效率上已有重大突破，但因二端點有上、下電池電性匹配問題，只要其中一方電池劣化，堆疊太陽電池就會嚴重衰退甚至失效。因此必須解決上、下電池穩定性差異大的問題，避免整體效率及壽命被鈣鈦礦上電池拖累，在那之前離商業化模組似乎仍有一段距離。

誌謝

本研究工作承蒙111年度經濟部能源局「高效率、智慧型太陽光電產品開發計畫(1/3)」(契約編號：111-S0102)經費支持，特此致謝。



參考文獻

1. T. Tiedje, E. Yablonovitch, D.G. CODY, B.G. Brooks, *IEEE on electron devices*, 31, 5.(1984)
2. N. Pellet, P. Gao, G. Gregori, T. Y. Yang, M. K Nazeeruddin, J. Maier, M. Grätzel, *Angew. Chem. Int. Ed.*, 53, 3151-3157. (2014)
3. M. A. Green, E. D. Dunlop, J. H. Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, K. Bothe, D. Hinken, M. Rauer, X. Hao, *Prog Photovolt Res Appl.*, 30: 687-701. (2022)
4. <https://www.pv-magazine.com/2022/07/07/csem-epfl-achieve-31-25-efficiency-for-tandem-perovskite-silicon-solar-cell/>
5. Y. Cheng, L. Ding, *SusMat.*, 1: 324-344. (2021)
6. <https://www.pv-magazine.com/2021/11/22/helmholtz-center-achieves-29-80-efficiency-for-perovskite-silicon-tandem-solar-cell/>
7. <https://www.pv-magazine.com/2021/11/01/sol-liance-hits-29-2-efficiency-on-perovskite-silicon-tandem-solar-cell/>
8. P. Löper, S. J. Moon, S. Martín De Nicolas, B. Niesen, M. Ledinsky, S. Nicolay, J. Bailat, J. H. Yum, S. De Wolf, C. Ballif, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17, 1619. (2015)
9. C. D. Bailie, M. G. Christoforo, J. P. Mailoa, A. R. Bowering, E. L. Unger, W. H. Nguyen, J. Burschka, N. Pellet, J. Z. Lee, M. Grätzel, R. Noufi, T. Buonassisi, A. Salleo, M. D. McGehee, *Energy Environ. Sci.*, 8, 956. (2015)
10. J. Werner, G. Dubuis, A. Walter, P. Löper, S. J. Moon, S. Nicolay, M. Morales-Masis, S. De Wolf, B. Niesen, C. Ballif, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 141, 407. (2015)
11. T. Duong, N. Lal, D. Grant, D. Jacobs, P. Zheng, S. Rahman, H. Shen, M. Stocks, A. Blakers, K. Weber, T. P. White, K. R. Catchpole, *IEEE J. Photovoltaics*, 6, 679. (2016)
12. B. Chen, Y. Bai, Z. Yu, T. Li, X. Zheng, Q. Dong, L. Shen, M. Boccard, A. Gruverman, Z. Holman, J. Huang, *Adv. Energy Mater.*, 6, 1601128. (2016)
13. J. Peng, T. Duong, X. Zhou, H. Shen, Y. Wu, H. K. Mulmudi, Y. Wan, D. Zhong, J. Li, T. Tsuzuki, K. J. Weber, K. R. Catchpole, T. P. White, *Adv. Energy Mater.*, 7, 1601768. (2017)
14. T. Duong, Y. L. Wu, H. Shen, J. Peng, X. Fu, D. Jacobs, E. C. Wang, T. C. Kho, K. C. Fong, M. Stocks, E. Franklin, A. Blakers, N. Zin, K. McIntosh, W. Li, Y. B. Cheng, T. P. White, K. Weber, K. Catchpole, *Adv. Energy Mater.*, 7, 1. (2017)
15. M. Jaysankar, M. Filipič, B. Zielinski, R. Schmagger, W. Song, W. Qiu, U. W. Paetzold, T. Aernouts, M. Debucquoy, R. Gehlhaar, J. Poortmans, *Energy Environ. Sci.*, 11, 1489. (2018)
16. D. Zhang, M. Najafi, V. Zardetto, M. Dörenkämper, X. Zhou, S. Veenstra, L. J. Geerligs, T. Aernouts, R. Andriessen, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 188, 1. (2018)
17. C. O. Ramírez Quiroz, Y. Shen, M. Salvador, K. Forberich, N. Schrenker, G. D. Spyropoulos, T. Heumüller, B. Wilkinson, T. Kirchartz, E. Spiecker, P. J. Verlinden, X. Zhang, M. A. Green, A. Ho-Baillie, C. J. Brabec, *J. Mater. Chem. A*, 6, 3583. (2018)
18. M. Jaysankar, B. A. L. Raul, J. Bastos, C. Burgess, C. Weijtens, M. Creatore, T. Aernouts, Y. Kuang, R. Gehlhaar, A. Hadipour, J. Poortmans, *ACS Energy Lett.*, 4, 259. (2019)
19. J. Tong, Z. Song, D. H. Kim, X. Chen, C. Chen, A. F. Palmstrom, P. F. Ndione, M. O. Reese, S. P. Dunfield, O. G. Reid, J. Liu, F. Zhang, S. P. Harvey, Z. Li, S. T. Christensen, G. Teeter, D. Zhao, M. M. Al-Jassim, M. F. A. M. Van Hest, M. C. Beard, S. E. Shaheen, J. J. Berry, Y. Yan, K. Zhu, *Science*, 364, 475. (2019)
20. E. Aydin, M. De Bastiani, X. Yang, M. Sajjad, F. Aljamaan, Y. Smirnov, M. N. Hedhili, W. Liu, T. G. Allen, L. Xu, E. Van Kerschaver, M. Morales-Masis, U. Schwingenschlögl, S. De Wolf, *Adv. Funct. Mater.*, 29, 1901741. (2019)
21. B. Chen, S.-W. Baek, Y. Hou, E. Aydin, M. De Bastiani, B. Scheffel, A. Proppe, Z. Huang, M. Wei, Y.-K. Wang, E.-H. Jung, T. G. Allen, E. Van Kerschaver, F. P. García de Arquer, M. I. Saidaminov, S. Hoogland, S. De Wolf, E. H. Sargent, *Nat. Commun.*, 11, 1257. (2020)
22. H. H. Park, J. Kim, G. Kim, H. Jung, S. Kim, C. S. Moon, S. J. Lee, S. S. Shin, X. Hao, J. S. Yun, M. A. Green, A. W. Y. Ho-Baillie, N. J. Jeon, T. Y. Yang, J. Seo, *Small Methods*, 4, 2000074. (2020)
23. R. K. Kothandaraman, Y. Jiang, T. Feurer, A. N. Tiwari, F. Fu, *Small Methods*, 4, 2000395 (2020)

24. M. Jaysankar, S. Paetel, E. Ahlswede, U. W. Paetzold, T. Aernouts, R. Gehlhaar, J. Poortmans, *Prog Photovolt Res Appl.*, 1-6. (2019)
25. B. A. Kamino, B. P. Salomon, S. J. Moon, N. Badel, J. Levrat, G. Christmann, A. Walter, A. Faes, L. Ding, J. J. D. Leon, A. Paracchino, M. Despeisse, C. Ballif, S. Nicolay, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2, 3815. (2019)
26. L. Mazzarella, Y.H. Lin, S. Kirner, A.B. M. Vilches, L. Korte, S. Albrecht, E. Crossland, B. Stanowski, C. Case, H.J. Snaith, *Adv. Energy Mater.* 9, 1803241. (2019)
27. S.-W. Lee, S. Bae, K. Cho, S. Kim, J.-K. Hwang, W. Lee, S. Lee, J.Y. Hyun, S. Lee, S. B. Choi, H. Chun, W.M. Kim, Y. Kang, H.-S. Lee, D. Kim, *ACS Appl. Energy Mater.*, 2, 6263-6268. (2019)
28. F. Sahli, B. A. Kamino, J. Werner, M. Bräuninger, B. P. Salomon, L. Barraud, R. Monnard, J. P. Seif, A. Tomasi, Q. Jeangros, A. H. Wyser, S. De Wolf, M. Despeisse, S. Nicolay, B. Niesen, C. Ballif, *Adv. Energy Mater.*, 8, 17016091. (2018)
29. J. Zheng, H. Mehrvarz, C. Liao, J. Bing, X. Cui, Y. Li, V. R. Gonçales, C. F. J. Lau, D. S. Lee, Y. Li, M. Zhang, J. Kim, Y. Cho, L. G. Caro, S. Tang, C. Chen, S. Huang, A. W. Y. Ho-Baillie, *ACS Energy Lett.*, 4, 2623. (2019)