

矽堆疊太陽能電池之中介層關鍵製程技術

矽堆疊太陽能電池在實現高效率方面越來越受到關注，其關鍵在於下電池吸收光譜的匹配。4T(4-terminal)串聯太陽能電池可通過簡單的機械堆疊製造，2T(2-terminal)串聯電池則需要更複雜的製造程序，但能更簡單地整合到太陽能電池系統中。4T配置儘管製造相對簡單，但可能導致系統設計更加複雜，進而增加整體成本。相比之下，2T配置僅需一個透明電極，即能減少光學損耗和降低成本，另外根據考文獻[1]，評估4T與2T兩種串聯太陽能電池配置的可持續製造能力（SMC, Sustainable Manufacturing Capabilities）差異，特別關注在製造過程中使用In（銦）材料的情況。根據評估，2T串聯電池中使用In的SMC範圍為29-177 GW/年，而4T配置中使用In的SMC範圍則僅為15-60 GW/年，顯示出兩者之間存在高達2.9倍的差異。這一結果表明，2T在銦材料的SMC使用方面具有明顯的優勢。（SMC評估公式為材料消耗量（ C_x ，以mg/W為單位）。在這裡，假設全世界總可用材料供應（ S_x ，以噸/年為單位）僅相當於根據美國地質調查局列出的每種關鍵材料的2020年全球主要材料供應的20%，將 S_x 除以 C_x 計算每個元件的可持續製造能力 SMC_x （以GW/年或TW/年為單位）

在製造疊層電池時，合理設計電池連接方法至關重要。矽電池因其相對較低的能隙和成熟的製造技術，是下電池的最佳候選者，與III-V族或鈣鈦礦電池組合可達到極高的效率。目前理論極限效率高達42%，得益於成熟的技術和研究。此外，鈣鈦礦/矽串聯電池也展示了巨大的商業化潛力，已達到34.6%的高功率轉換效率。

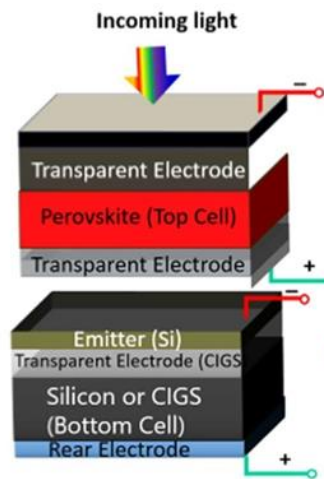


圖 1、4T 鈣鈦礦矽堆疊太陽能電池 [2]

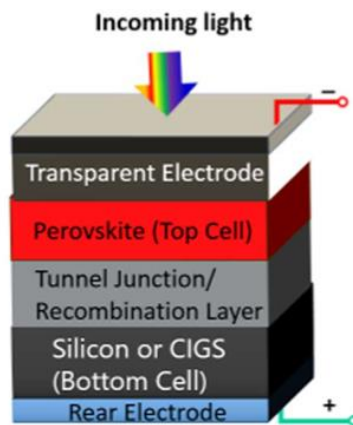


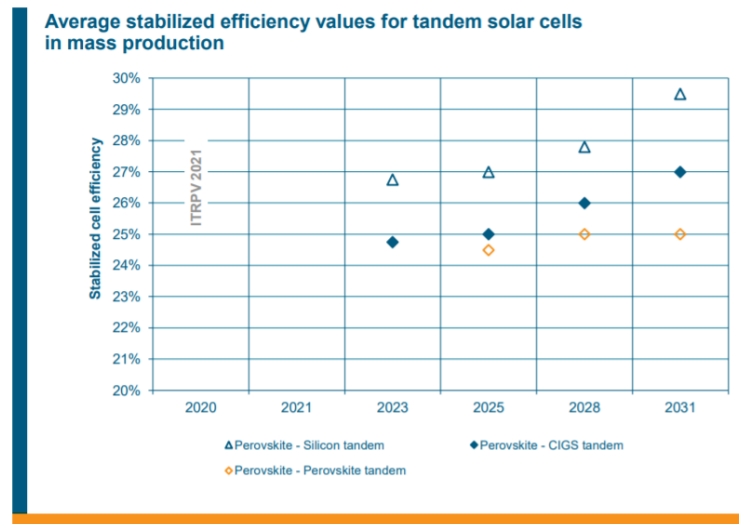
圖 2、2T 鈣鈦礦矽堆疊太陽能電池 [2]

因n-type的製造成本逐年下降至與p-type相近，性價比顯著提升。目前以n-type太陽能電池晶片為基板製作的指標性高效率電池其中之一即為穿隧氧化鈍化接觸太陽電池(TOPCon)，為世界主流太陽能電池結構，矽晶太陽能電池佔全球市場的95%以上，其餘5%來自三五族太陽能電池[3]。太陽能電池技術要達到商業化階段需要滿足以下條件(高效率、高穩定性和大面積製程且還要需要滿足社會與經濟之標準)。迄今為止，已經提出了各式各樣的概念，並進行深入的研究以符合上述標準，但這些技術中大多數還沒有達到量產商業化的門檻。近年來

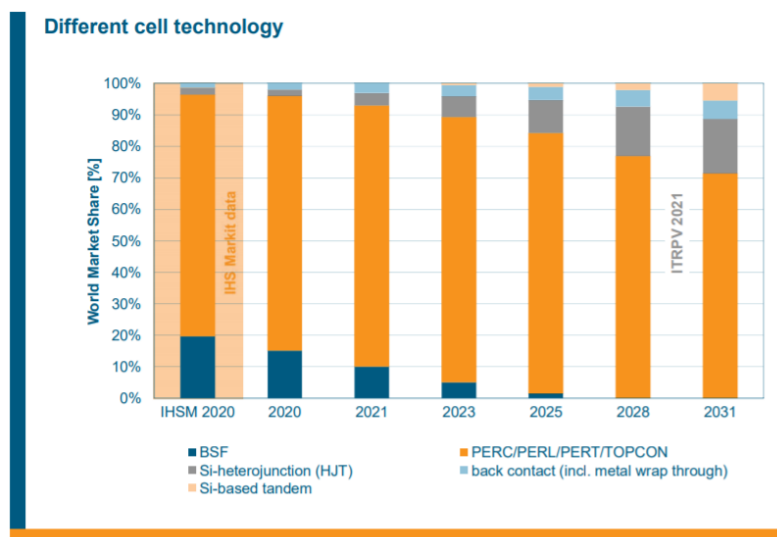
已經深入研究通過堆疊各種低成本太陽能電池來實現各種結構的太陽能電池，其中最具代表性的異質堆疊太陽能電池如下：(染料敏化太陽能電池/矽堆疊太陽能電池、有機堆疊太陽能電池與Perovskite(PVK)/CIGS 堆疊太陽能電池等等...)，而在這些各種異質堆疊太陽能電池技術中，鈣鈦礦矽堆疊太陽能電池被認為是具有高效率以及價格競爭方面的具有較高的吸引力。

鈣鈦礦矽堆疊太陽能電池的工作原理是利用不同的能隙吸收不同的太陽光光譜，提高電池的轉化效率。將鈣鈦礦電池與矽電池按能隙從大到小的順序由外向內疊合起來，讓短波長的光被最外側的寬能隙鈣鈦礦太陽能電池吸收，波長較長的光能夠透射進去讓窄能隙的矽太陽能電池吸收，這就有可能最大限度地將光能變成電能，大大地提高了太陽光譜的利用率、電池的效能和穩定性。當鈣鈦礦的能隙為1.55 eV時，可吸收波長小於800 nm 的光子，而能隙為1.12 eV 的矽電池可吸收波長小於1100 nm 的光子。當兩者堆疊成電池時，二者吸收光譜互補，不僅可提高太陽光譜的利用率，而且降低了製備成本，鈣鈦礦矽堆疊太陽能電池效率可望超過35%，所以必須搭配合適的中介層薄膜，使波長高於800nm的光子在無損耗與無反射的狀態下，進入至矽太陽能電池內使其吸收轉換為電能，提高轉換效率。

近幾年來金屬鹵化物鈣鈦礦太陽電池的光電轉換效率快速增加，吸引了相當多研究團隊的關注與投入，鈣鈦礦材料應用於堆疊型太陽能電池之最大優勢為可透過不同元素組合來調整其能隙。圖3(a)目前為鈣鈦礦堆疊型太陽電池使用矽基板轉換效率最高，預估2031年量產鈣鈦礦/矽堆疊型太陽電池元件之轉換效率為30%。



(a)



(b)

圖 3、(a)鈣鈦礦堆疊型太陽能電池轉換效率趨勢與(b)太陽能電池結構市占率圖 [4]

[1] Wang, L., Zhang, Y., Kim, M., Wright, M., Underwood, R., Bonilla, R. S., & Hallam, B. (2023). Sustainability evaluations on material consumption for terawatt-scale manufacturing of silicon-based tandem solar cells. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31(12),

1442-1454.

[2] Bai, S., Amirruddin, A. K., Pandey, A. K., Samykano, M., Ahmad, M. S., Sharma, K., & Tyagi, V. V. (2021). Advancements in the development of various types of dye-sensitized solar cells: A comparative review. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering*, 118(4), 737-759.

[3] Fraunhofer, I. S. E. (2020). Photovoltaics Report. Fraunhofer Institute of Solar Energy Systems, ISE.

[4] Ghosh, D.K.; Bose, S.; Das, G.; Acharyya, S.; Nandi, A.; Mukhopadhyay, S.; Sengupta, A. Fundamentals, present status and future perspective of TOPCon solar cells: A comprehensive review. *Surf. Interfaces* 2022, 30, 101917.