

堆疊太陽電池技術介紹及發展近況

The Development Status of Tandem Solar Cells

黃聖文 S. W. Huang

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 副研究員

摘要/Abstract

隨著全球再生能源需求持續提升，太陽光電技術的發展備受關注。然而，傳統單接面太陽電池受限於肖克利-奎伊瑟極限(Shockley-Queisser Limit)，其理論光電轉換效率最高約為33.7%，因此如何突破此物理限制成為太陽電池領域的重要研究課題。疊層太陽電池(Tandem Solar Cell)透過結合不同能隙的吸光材料，使高能量與低能量光子分別由不同子電池吸收，可有效降低熱化損失與穿透損失，進一步提升太陽光譜利用率與整體轉換效率。近年來，具備能隙可調、高吸收係數、長載子擴散長度及低成本製程等優勢的鈣鈦礦材料，已成為疊層太陽電池上電池的關鍵候選材料。其中，鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池兼具高效率與產業化潛力，實驗室效率已突破35%，被視為下一代主流太陽電池技術之一。本文首先介紹肖克利-奎伊瑟極限及其能量損失機制，並說明疊層太陽電池的基本原理與結構類型；接著探討鈣鈦礦材料的能隙調控機制，以及各類鈣鈦礦基疊層太陽電池的發展現況；最後整理近年國際政策推動、產業布局與商業化進展，並分析其面臨之穩定性、製程整合及量產挑戰，以作為未來高效率太陽光電技術發展之參考。

The growing demand for renewable energy has driven rapid advances in photovoltaic technologies. However, conventional single-junction solar cells are fundamentally limited by the Shockley-Queisser (S-Q) limit, which restricts the maximum power conversion efficiency of silicon-based devices to approximately 33.7% due to unavoidable thermalization and transmission losses. Overcoming this fundamental constraint has therefore become a central goal in photovoltaic research. Tandem solar cells have emerged as a promising strategy to surpass this limit by stacking absorber materials with different bandgaps, enabling more efficient utilization of the solar spectrum. In such architectures, high-energy photons are absorbed by wide-bandgap top cells, while lower-energy photons are harvested by narrow-bandgap bottom cells, thereby reducing energy losses and significantly enhancing overall efficiency. Among various candidate materials, metal halide perovskites have attracted significant attention due to their tunable bandgaps, excellent optoelectronic properties, and low-cost solution-processability. These advantages make perovskite solar cells ideal top-cell materials for tandem configurations. In particular, perovskite/silicon tandem solar cells have demonstrated rapid progress and are currently the most promising route toward commercialization, with reported efficiencies exceeding

35%. This article reviews the S-Q limit, the evolution of tandem concepts, and recent advances in perovskite-based tandem photovoltaic technologies.

關鍵字/Keywords

鈣鈦礦(Perovskite)、鈣鈦礦太陽電池(Perovskite Solar Cells; PSC)、疊層太陽電池(Tandem Solar Cell)

前言

肖克利-奎伊瑟極限(Shockley-Queisser Limit; S-Q Limit)，一直是限制傳統太陽電池光電轉換效率的一道物理天花板，該物理限制使得太陽電池難以越過33.7%的轉換效率，為了更有效利用太陽光電，如何打破這層物理限制一直是整個太陽能研究領域的基本方向。為了實現這個雄心勃勃的目標，疊層太陽電池(Tandem Solar Cell)的概念被提出，該策略提供了一條非常具有前景的方向，藉由結合不同能隙的材料，將太陽能光譜分配給不同的子電池，使得超越肖克利-奎伊瑟極限成為可能。鈣鈦礦太陽電池(Perovskite Solar Cell; PSC)由於可調節的能隙以及卓越的光電轉換效率，能夠適配各種不同種類的下電池，使其成為該架構之上電池材料的主要候選者。

本文會從肖克利-奎伊瑟極限開始，介紹太陽電池研究領域的發展方向如何由傳統單結太陽電池走向疊層太陽電池，何謂鈣鈦礦(Perovskite)以及當前鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池研究領域以及產業化的最新進展。

什麼是肖克利-奎伊瑟極限？

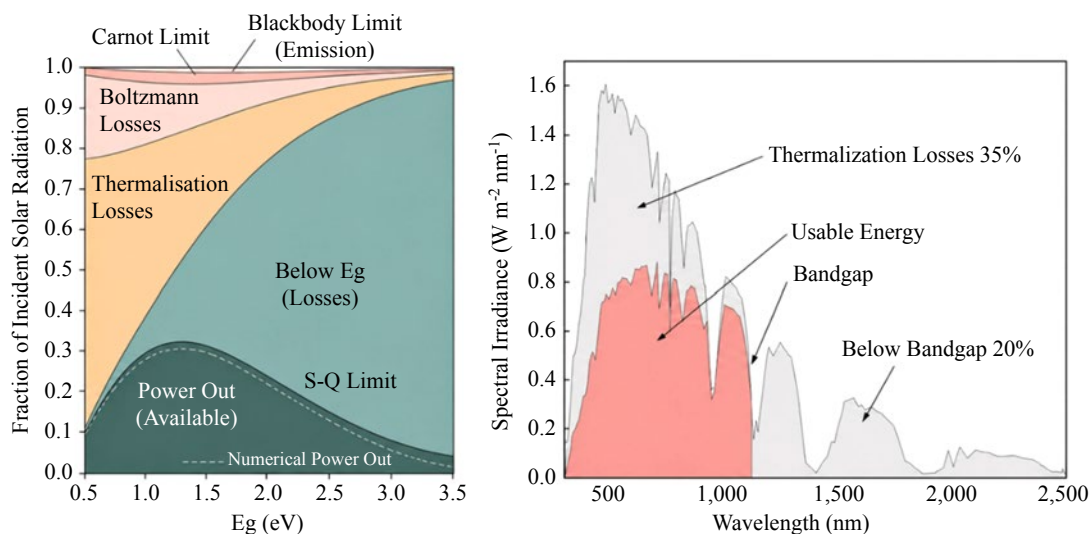
肖克利-奎伊瑟極限是由 William

Shockley與Hans-Joachim Queisser於1961年提出，該理論描述單一能隙半導體材料的太陽電池在標準太陽光譜下，可達到的最高光電轉換效率上限。太陽光譜包含了紫外光到紅外光各種不同波段的光線，這些光的能量各不相同，當這些光入射到材料中，過低能量的光（如紅外光）無法被材料吸收，而過強能量的光（如紫外光）被材料吸收後，除了變成需要的電流外，還會有一部份過剩的能量以熱的形式耗散，如圖一所示。這些損失導致在使用單一能隙的材料情況下，我們能獲得的極限光電轉換效率僅能達到33.7%（能隙1.34 eV的材料），意指有超過六成的太陽光能量是我們無法直接利用的。

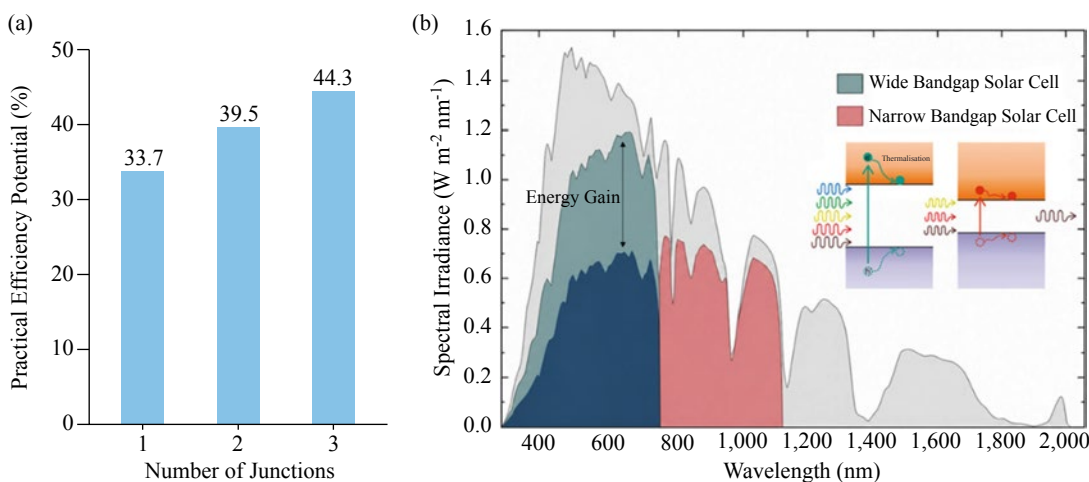
為了突破這個物理上的限制，疊層太陽電池、熱載流子太陽電池(Hot Carrier Solar Cell)、多激子太陽電池(Multi-exciton Solar Cells)、中間能帶太陽電池(Intermediate Band Solar Cell)等技術被提出，其中又以疊層太陽電池的發展最為迅速，為下一代太陽電池技術的重要發展方向。

從單結太陽電池走向 疊層（多結）太陽電池

疊層太陽電池的概念是藉由堆疊不同能隙材料的子電池，將不同波段的光分配



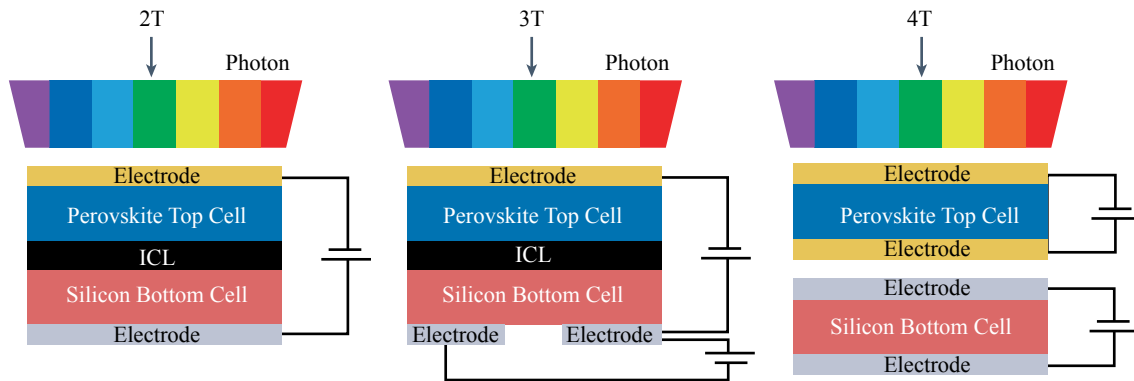
▲圖一 肖克利-奎伊瑟極限及單一能隙材料損失來源示意圖^(1,2)



▲圖二 (a)採用不同結數的太陽電池對光電轉換效率的影響；(b)採用不同能隙的材料對太陽光譜吸收之影響⁽³⁾

給不同的材料吸收，其原理是讓較高能量（短波長）的光子由上層子電池裡面能隙較寬的材料（如：鈣鈦礦）吸收，較低能量（長波長）的光子則穿透至下層子電池，由能隙較窄的材料（如：矽晶）吸收，從而減

少整體能量的浪費。根據理論計算，如圖二所示，當我們引入第二種材料時，整體光電轉換效率的極限可以達到39.5%，當引入第三種材料時，理論效率甚至可以突破40%，達到44.3%。



▲圖三 二端點(2T)、三端點(3T)以及四端點(4T)疊層電池結構示意⁽⁴⁾

除了材料的選用外，根據堆疊的方式及外接端點(Terminal)的數量，疊層電池的結構也可以被大致分為以下三類：二端點(Two-terminal; 2T)、三端點(3T)以及四端點(4T)疊層電池，如圖三所示。其中二端點以及四端點太陽電池，由於其下電池當前已有成熟的矽晶產業化技術可以採用，為目前發展的主流方向。

二端點疊層太陽電池(2T Tandem Solar Cell)是將上下子電池使用中間連接層(Interconnection Layer; ICL)直接連接，共用同一對電極輸出電流。其最大特色是結構簡潔、製程相對緊湊，與現有單結矽晶模組的製造流程相容性高，在商業化上具有較佳的成本優勢。此外，2T架構在模組封裝與系統整合上較容易，系統端不需額外配置即可輸出電力。然而，其關鍵限制在於「電流匹配(Current Matching)」，由於串聯電路中的電流必須相同，整體輸出會受限於電流較小的子電池，如同馬路上車流的流量取決於最窄的路段，若是沒有精細的調控上下子電池的能隙，使兩顆子電池所

產生的電流一致，便會導致最終疊層太陽電池的光電轉換效率損失。

四端點疊層太陽電池(4T Tandem Solar Cell)則是讓上下子電池各自獨立運作，擁有各自的電極與輸出端，彼此之間僅以光學的方式上下堆疊。其最大優點是完全避免電流匹配問題，每一層電池都可在自身最大功率點運行，並且因為上下子電池是完全分開製作的，開發成本較低，因此在實驗室中常能達到更高效率。然而由於引入了更多的空氣進入玻璃介面，因為這些介面所產生的反射損失使得四端點疊層太陽電池的極限光電轉換效率相較於二端點疊層太陽電池較低。此外，四端點疊層太陽電池在模組層級需要為上下電池分別配置外電路整合，增加了系統端的設計難度以及建造成本，技術比較整理見表一。

鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池： 從實驗室走向產業化

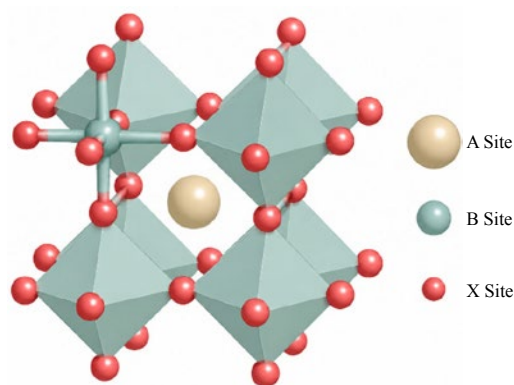
鈣鈦礦材料(Perovskite Material)是泛指一類具有 ABX_3 晶體結構的材料，該結構最

早由俄國礦物學家Gustav Rose在觀察鈦酸鈣(CaTiO_3)時所發現，並將該結構以俄文命名為Perovskit，此後具有與 CaTiO_3 相同類型晶體結構的材料，則被通稱為鈣鈦礦材料，如圖四所示。目前光電領域所稱的「鈣鈦礦」，多指有機無機混合鹵化物鈣鈦礦，如甲脒碘化鉛(Formamidinium Perovskite; FAPbI_3)。這類鈣鈦礦材料之所以受到高度關注，除了其優異的光電特性外，能夠調整材料的能隙使其非常適合作為與堆疊太陽電池的上電池使用。

透過改變 ABX_3 的組成，可以藉由離子大小、電負度、電子軌域分布的不同，

進一步調整鈣鈦礦材料的能隙，如圖五所示，可以注意到價帶最低處(Conduction Band Minimum; CBM)主要由B位p軌域貢獻，而價帶最高處(Valence Band Maximum; VBM)主要來自於B位s軌域及X位p軌域。

X位鹵素離子是目前調整鈣鈦礦能隙最主要的手段，當鹵素離子半徑變小時(使用氯或溴取代碘)，較深的X-p軌域使得參與X-p混成的VBM降低。此外，由於電負度差異增加，B-X鍵能增強，鍵長變短，B位離子對電子雲的掌控變弱，導致主要受B-p

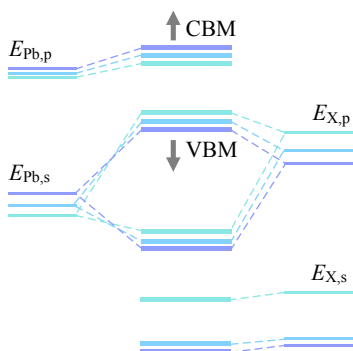


▲圖四 鈣鈦礦結構示意圖

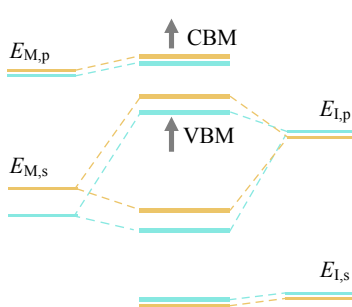
▼表一 二端點及四端點特色比較

	二端點 (Two Terminal)	四端點 (Four Terminal)
電路連接	串聯，共用端點電極	獨立電路
製程工藝	單片整合	機械堆疊
效率潛力	高	低
開發難度	高	低
光學損失	低	高
系統成本	低	高

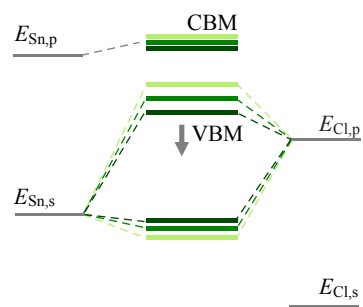
(a) CsPbI_3 vs CsPbBr_3 vs CsPbCl_3



(b) CsPbI_3 vs CsSnI_3



(c) CsSnCl_3 vs MASnCl_3 vs FASnCl_3



▲圖五 鈣鈦礦的能階示意圖⁽⁵⁾

軌域影響的CBM往上提升，最終得到材料能隙變大。除了鹵素外，B位離子也是調整鈣鈦礦能隙的方法之一，由於相對論效應(Relativistic Effect)及惰性電子對效應(Inert Pair Effect)，Pb的6s軌域被強烈穩定化而相較Sn的6s軌道有更低的能量，使得VBM上移，而在p軌域效應影響較小，因此CBM上移幅度較小，綜合影響結果導致了最終材料的能隙縮小。而A位離子雖然不直接參與能帶邊緣的改變，但離子的大小會影響BX₆八面體的傾斜(Octahedral Tilting)程度，改變Pb-X-Pb鍵，進而「間接」影響能隙。利用這些調控鈣鈦礦能隙的手段，我們便能夠根據下電池材料的能隙，「量身訂製」適合的上電池材料。

基於鈣鈦礦堆疊的太陽電池技術近年發展非常快速，包含鈣鈦礦/鈣鈦礦堆疊太陽電池、鈣鈦礦/矽晶堆疊太陽電池、鈣鈦礦/銅銦銻碲堆疊太陽電池，及鈣鈦礦/有機堆疊太陽電池等。依發展進度說明如下。

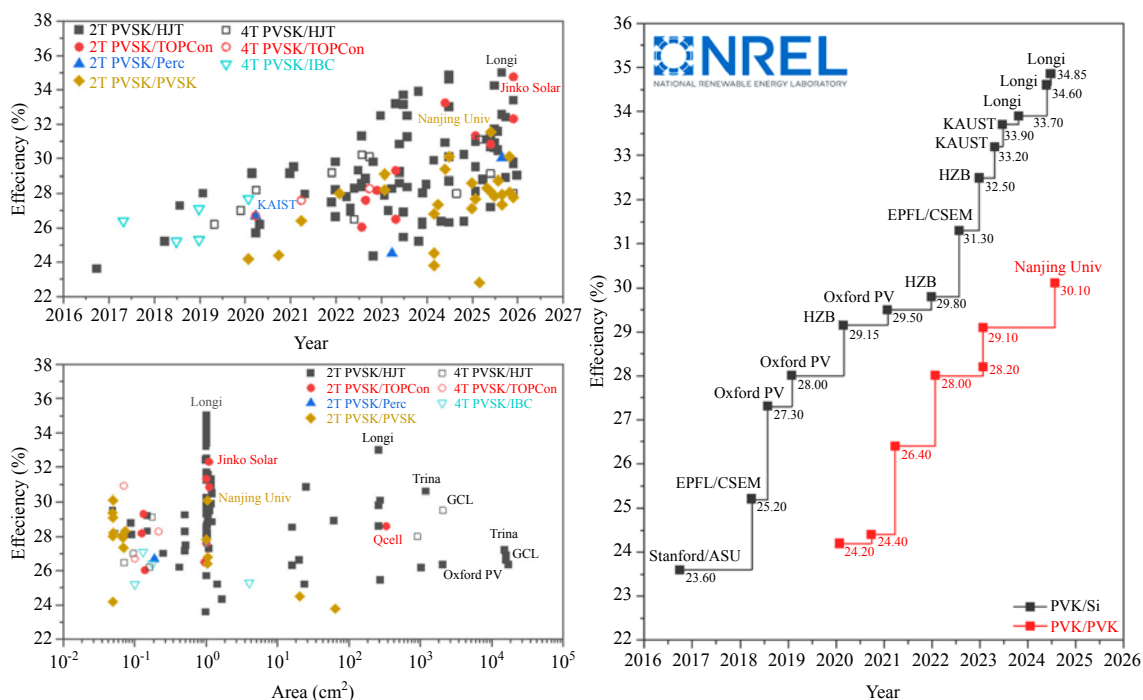
鈣鈦礦/鈣鈦礦(All-Perovskite Tandem)堆疊太陽電池由於上下電池的能隙都可以調整，因此具有最高的理論效率。此結構之上電池通常為1.75~1.85 eV寬能隙的鈣鈦礦，並搭配1.2~1.3 eV窄能隙鉛錫(Pb-Sn)混合鈣鈦礦作為下電池，可實現全溶液製程與輕量化模組設計，理論效率可超過40%。然而目前最大的問題是窄能隙鈣鈦礦中Sn²⁺易被氧化為Sn⁴⁺，下電池的穩定性備受考驗。儘管如此，其實驗室效率也已突破30%⁽⁶⁾，被視為未來柔性與超高效率太陽電池技術的重要方向。

鈣鈦礦/銅銦銻碲(Perovskite/CIGS)堆

疊太陽電池是高效率堆疊電池的另外一條發展路徑，當前效率也已經突破30%⁽⁷⁾。CIGS是一種成熟的薄膜太陽能材料，具有高吸收係數、可撓曲及輕量化等特性。當寬能隙鈣鈦礦與約1.0~1.2 eV能隙的CIGS結合時，可兼顧高效率與柔性應用需求，適合建築整合太陽電池(BIPV)、車載太陽電池及太空應用。然而CIGS較高的製造成本阻礙了其深入日常應用。

鈣鈦礦/有機(Perovskite/Organic)堆疊太陽電池結合了鈣鈦礦太陽電池與有機太陽電池(Organic Solar Cell; OSC)各自的材料優勢。有機太陽電池具有材料設計自由度高、可調能隙範圍廣、機械可撓性佳以及可採用低溫印刷製程等特性，特別適合作為吸收近紅外光的下電池，與吸收可見光的寬能隙鈣鈦礦上電池形成良好的光譜互補，目前實驗室轉換效率已經突破28%⁽⁸⁾。此類堆疊結構在超輕量、半透明與可撓式應用上展現獨特優勢，適合應用於智慧窗戶、可穿戴裝置與物聯網感測器等新興場域。然而，有機材料的大規模商業化應用仍需克服成本、可靠性與壽命方面的挑戰。

當前發展最成熟的是鈣鈦礦/矽晶(Perovskite/Silicon)堆疊太陽電池。矽晶太陽電池為目前市場主流，具有成熟的製造技術，長期穩定性也已通過驗證。而寬能隙鈣鈦礦(約1.6~1.7 eV)則適合作為上電池，吸收紫外光與可見光，高效率矽晶電池作為下電池吸收近紅外光。此組合兼具高效率與產業化潛力，目前實驗室效率已超過35%⁽⁹⁾，已經接近單接面矽晶電池理論極限的1.3倍以上，相關發展情況如圖六所示。



▲圖六 鈣鈦礦疊層太陽電池的發展近況

近年來隨著鈣鈦礦/矽晶堆疊太陽電池的實驗室光電轉換效率突破當前的矽晶太陽電池，中國、日本、韓國、歐盟、美國等地的政府或企業也開始陸續加重投資力道，鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池正在朝著產業化的道路快速發展。

在國家層級的政策推廣方面，表二為目前各國關於相關技術的政策。中、美、日、韓四國在政策方面處於領頭，其中又以中國最為積極，在國家級政策扶植下，鈣鈦礦上下游的產業鏈已然成形，而日本也在2025年將鈣鈦礦太陽電池視為國策級能源技術，致力於2040年達成20 GW的導入目標。計畫重點在於2025至2030年間，實現轉換效率>30%並降低發電成本至12日圓

/kWh。韓國方面也於2025年將鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池列為國家級領導項目，目標在2030年成功商業化。美國能源部自2023年起也推行了一系列先進薄膜太陽電池的R&D計畫，顯示出各國對這個技術的重視性。

在這些政策的扶植下，全球已有多家企業在效率紀錄、商業化進度與產能規劃上取得顯著成果，詳細整理見表三。其中，Oxford PV是全球首家真正商業化鈣鈦礦/矽晶疊層模組的企業。2024年，其位於德國Brandenburg的工廠正式量產，模組光電轉換效率約29.5%，並開始出貨，這代表該公司技術已跨越實驗室門檻，正式邁入市場應用階段⁽¹⁰⁾。韓國Hanwha Qcells是傳統大廠中最積極投入疊層量產的企業。

▼表二 各國政策整理

國家	時間	政策	頒布單位	主要內容
中國	2024/03/15	加快推動建築領域工作方案	國家發展改革委、住房城鄉建設部	支持鈣鈦礦、碲化鎘等薄膜電池技術在建築應用，推動可靠工藝及設備整合。
	2023/09/27	可再生能源發展試點示範通知	國家能源局	支持高效太陽電池、鈣鈦礦及疊層電池、新型柔性電池；先推進高效太陽電池應用，促進技術進步與產業升級。
	2023/01/17	推動能源電子產業發展的指導意見	工業和信息化部等六部門	推動大型高效電池、柔性薄膜電池、鈣鈦礦及疊層電池研發應用，推升規模化生產能力。
	2022/08/29	電力裝備綠色低碳創新發展行動計畫	工信部、財政部、商業部等六部門	鼓勵重點技術及產品推廣，涵蓋TOPCon、HJT、IBC等高效電池研發製造，研究新型高效低成本太陽電池技術。
美國	2023/09/12	美國薄膜太陽電池推進計畫	美國能源部	目標是推動美國本土薄膜太陽能製造、提升效率、可靠性與量產能力，聚焦鈣鈦礦疊層與CdTe技術，並加速未來商業化。
	2022/08/16	通貨膨脹減法案	美國國會	鈣鈦礦及疊層組件生產稅收抵免(\$0.04/Wp)，安裝抵免(\$0.07/Wp)、設備投資抵免30%，低於中國PERC組件水平。
日本	2025/02/24	第七次戰略能源計畫	日本內閣	到FY2040可再生能源占比40~50%，電力中可再生能源占比50%；重點發展高效太陽能電池，推動鈣鈦礦疊層產業化。
韓國	2025/11/26	鈣鈦礦/矽疊層R&D國家計畫	韓國經濟財政部	由韓國經濟財政部(Ministry of Economy and Finance)正式公布，將鈣鈦礦-矽疊層列為國家級領導項目，目標2030商業化。
	2024/12/18	第五次能源技術發展規劃	韓國國家科學技術諮詢會議	2033年前實現鈣鈦礦電池商業化，五年路線圖支持鈣鈦礦及疊層研發與產業化(效率>25%，成本效益)，提升可再生能源發電占比。

▼表三 各國企業技術路線及發展進程^(6,8,12-16)

公司	國家	技術路線	最新效率/成果	進展/商業化
LONGi (隆基)	中國	2T PVK/Si	35.2% (電池)	全球最高效率紀錄且接近量產
JinkoSolar (晶科)	中國	2T PVK/TOPCon	約34.7% (電池)	逼近世界紀錄效率
Trina Solar (天合)	中國	2T PVK/Si	32.6% (G12 Half Cut)	強化量產與專利布局
GCL (協鑫)	中國	2T PVK/Si 2T PVK/PVK	未公開	推進GW級產線建設
通威股份	中國	2T PVK/HJT	34.94% (小面積) / 31% (大面積)	MW級試產線與量產推進
捷泰科技	中國	2T PVK/TOPCon	31.0% (認證)	已完成工業尺寸電池生產
纖納光電	中國	鈣鈦礦 (延伸疊層)	未公開	已量產鈣鈦礦模組
Oxford PV	英國/德國	2T PVK/Si	24.5~26.9% (模組)	2024年開始商用出貨
Hanwha Qcells	韓國/德國	2T PVK/TOPCon	28.6% (大面積電池)	聚焦量產尺寸與穩定性
Caelux	美國	Hybrid Tandem	約28% (目標30%+)	已商用出貨並建立產能合作
Solliance	歐洲	4T PVK/Si	約28.7~29.2%	研發聯盟主導
Panasonic	日本	4T PVK/Si (合作)	約29%	技術合作與元件供應

當前實驗室光電轉換效率已達28~29%，並計劃在2026年啟動量產，搭配該公司既有自研矽晶技術(Q.ANTUM Technology)導入鈣鈦礦層，以降低轉型成本⁽¹¹⁾，並預定於2025年10月於鎮川建立40 MW鈣鈦礦串聯電池中試線⁽¹²⁾。隆基則是當前矽晶/鈣鈦礦疊層太陽電池之世界紀錄效率保持者(約35.2%)⁽¹³⁾，並持續推進大面積與量產技術。產業報告指出，隆基已將技術重點逐漸轉向穩定性與製造整合，積極布局量產路線，是最有機會將高效率轉化為GW級產能的企業之一。Caelux則是採用鈣鈦礦鍍層玻璃的「Active Glass」技術，可直接整合現有矽模組生產線，直接取代矽晶模組中的前玻璃，避開二端點太陽電池所需要投入的研發成本⁽¹⁴⁾。纖納光電則是已經建立了複數個鈣鈦礦模組驗證場域⁽¹⁵⁾，並且該公司之疊層組件已成功通過國際電工委員會所制定的地面太陽電池模組設計鑑定與定型標準認證(IEC 61215 & IEC 61730)⁽¹⁶⁾。

總 結

過去十年間，鈣鈦礦透過其優異的能隙可調性與光電特性，使疊層太陽電池成功突破單結矽晶太陽電池之肖克利-奎伊瑟極限，隨著各界的努力，鈣鈦礦/矽晶疊層太陽電池已從「實驗室效率競賽」正式邁入「產業化與場域驗證」階段，當前已有數家企業投入，儘管前景明確，仍需正視以下幾項挑戰。

鈣鈦礦材料對濕氣、熱與紫外光敏感，長期穩定性與模組壽命目前無法與當今矽晶太陽電池比較，仍需透過封裝與材

料工程持續改善來改進這個問題，另外，二端點疊層太陽電池的電流匹配與介面損失問題，對製程控制提出高度要求，以及大面積均勻塗佈及高良率製造技術仍處於優化階段，這些因素都將直接影響最終模組級太陽電池的成本與產能擴展速度。■

致 謝

本研究工作承蒙經濟部能源署研究計畫(契約編號：115-S0102)及工業技術研究院綠能所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. C. A. Nelson, N. R. Monahan, and X.-Y. Zhu, "Exceeding the Shockley-Queisser limit in solar energy conversion," *Energy Environ. Sci.*, vol. 6, no. 12, pp. 3508–3519, Nov. 2013, doi: 10.1039/C3EE42098A.
2. M. Peters et al., "Spectrally-Selective Photonic Structures for PV Applications," *Energies*, vol. 3, no. 2, pp. 171–193, Jan. 2010, doi: 10.3390/en3020171.
3. M. Anaya, G. Lozano, M. E. Calvo, and H. Míguez, "ABX3 Perovskites for Tandem Solar Cells," *Joule*, vol. 1, no. 4, pp. 769–793, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.joule.2017.09.017.
4. "Towards efficient, scalable and stable perovskite/silicon tandem solar cells | Nature Photonics." Available: <https://www.nature.com/articles/s41566-025-01732-y>
5. "Absolute energy level positions in tin- and lead-based halide perovskites | Nature Communications." Available: https://www.nature.com/articles/s41467-019-10468-7?utm_source=researchgate.net&utm_medium=article
6. "SolaEon reaches 31.38% efficiency of all-perovskite tandem cell | Perovskite-Info." Available: https://www.perovskite-info.com/solaen-reaches-3138-efficiency-all-perovskite-tandem-cell?utm_source=chatgpt.com
7. W. Li et al., "Efficient perovskite/Cu(In,Ga)Se2

- tandem solar cells with a composite intermediate recombination layer,” *Nat Commun*, vol. 17, no. 1, p. 711, Dec. 2025, doi: 10.1038/s41467-025-67350-y.
8. H. He et al., “Narrow-bandgap acceptors with suppressed exciton thermalization loss for highly efficient perovskite-organic tandem solar cells,” *Nat. Photon.*, pp. 1–8, Apr. 2026, doi: 10.1038/s41566-026-01906-2.
 9. “LONGi is a BloombergNEF Tier 1 Manufacturer Q2 2026,” Longi. Available: <https://www.longi.com/us/news/longi-tier-1-manufacturer-q2-2026//>
 10. “How Solar Changed In 2025 (And What’s Next).” Available: <https://buildreview.org/how-solar-changed-in-2025/>
 11. “Qcells says technology breakthrough could reduce space needed for solar panels,” *Reuters*, Dec. 18, 2024. Available: <https://www.reuters.com/business/energy/qcells-says-technology-breakthrough-could-reduce-space-needed-solar-panels-2024-12-18/>
 12. J. Min-hee, “Hanwha Q CELLS Shifts Focus to Rapid Commercialization of Tandem Solar Cells,” *Businesskorea*. Available: <https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=223227>
 13. “34.85%! LONGi Breaks World Record for Crystalline Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell Efficiency Again,” Longi. Available: <https://www.longi.com/en/news/silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency//>
 14. “Products,” Caelux. Available: <https://caelux.com/products/>
 15. “Microquanta ships perovskite modules for demo plant | Perovskite-Info.” Available: <https://www.perovskite-info.com/microquanta-ships-perovskite-modules-demo-plant>
 16. MicroQuanta, a C. perovskite solar specialist, and has commissioned a 8 2 M. P. facility based on its 90 W. perovskite panels in eastern C. V. Shaw, “Chinese developer switches on world’s largest perovskite-based PV plant,” *pv magazine International*. Available: <https://www.pv-magazine.com/2024/12/09/chinese-developer-switches-on-worlds-largest-perovskite-based-pv-plant/>
 17. “Oxford PV announces the first commercial deployment of a perovskite tandem solar panel | Perovskite-Info.” Available: <https://www.perovskite-info.com/oxford-pv-announces-first-commercial-deployment-perovskite-tandem-solar-panel>
 18. “Perovskite Solar Cells: 2026 Commercialization Update.” Available: <https://www.thesmartere.in/news/perovskite-tandem-solar-cells>
 19. T. S. says new certified results in perovskite-crystalline silicon tandem cells and modules demonstrate progress toward industrial-scale next-generation P. V. Shaw, “Trina Solar posts new milestones for tandem efficiency, module power,” *pv magazine International*. Available: <https://www.pv-magazine.com/2025/12/24/trina-solar-posts-milestones-for-tandem-efficiency-module-power/>
 20. “GCL Optoelectronics wins commercial perovskite-silicon tandem PV module order | Perovskite-Info.” Available: <https://www.perovskite-info.com/gcl-optoelectronics-wins-commercial-perovskite-silicon-tandem-pv-module-order>