



單接合太陽電池現況與堆疊型太陽電池 未來挑戰

Single Junction PV Present Status and Tandem PV Future Challenges

張佳文 C. W. Chang¹、林福銘 F. M. Lin²
工研院綠能所(GEL/ITRI) ¹資深研究員、²正研究員/組長

多年來太陽電池的技術發展，均朝向高效率開發，在此篇報告中，我們將介紹光電轉換效率 >20% 的各類太陽電池之研發現況，並報導堆疊型太陽電池的最新研究，道出太陽電池開發的現況與未來。

In this report, the author will introduce the development status of various types of solar cells with photovoltaic conversion efficiency >20% as well as the novel research on tandem solar cells.

關鍵詞/Key Words

單接合(Single Junction)、堆疊型(Tandem)、太陽電池(Photovoltaics; PV)

太陽電池(Photovoltaics, 簡稱PV)為一種永續性潔淨能源，直接將太陽能轉換為電能，可作為替代性能源，提供日益增加的全球能源需求。近年來，太陽電池系統價格大幅下降，使得光電發電成本達水平化，太陽光電發電價格甚至與許多國家的消費電價達到可部分競價，已經達到「市電平價」(Grid Parity)的時期⁽¹⁾。然而，需要更進一步降低成本，才能讓太陽光電在更多的電力市場上進行競爭，並進入兆瓦(Terawatt)等級。製造成本除太陽電池和模組之外，太陽光電發電成本(通常為50%)與其組件及安裝要求有關，如逆變器、電路配線、安裝結構、人力等。因此，太陽電池效率是降低太陽光電系統成

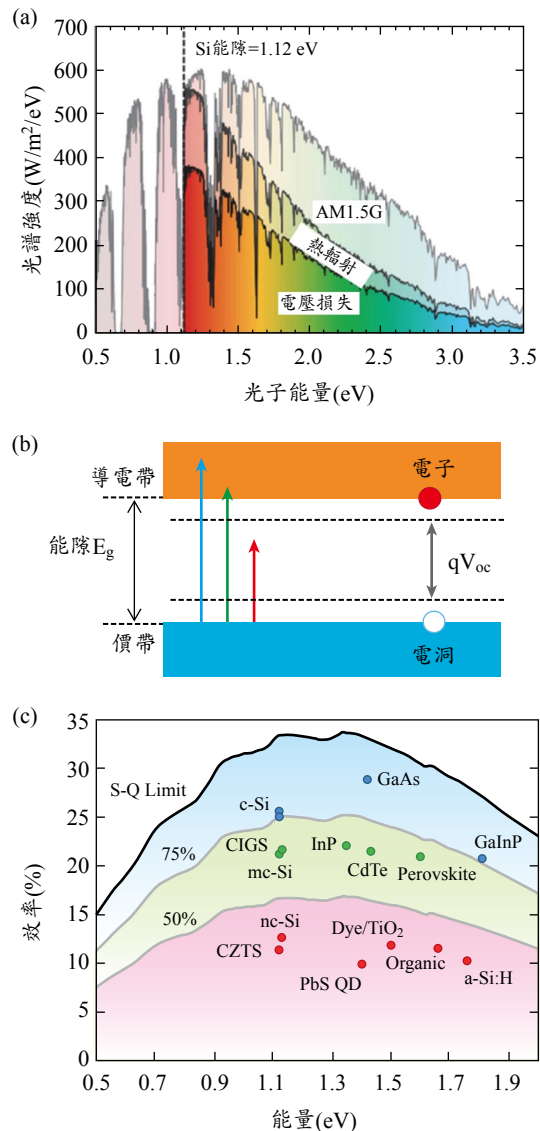
本的關鍵因素，對於額定的輸出功率，更高的電池效率可直接轉為面積更小或更便宜的光電系統，進而大幅降低電力成本。尤以在空間有限的都市環境中，單位面積的發電率較高，具有較佳的優勢。

太陽光電材料的發展正經歷巨大的轉變與突破，近五年來，太陽電池效率記錄不斷更新及成長。以下將逐一討論現有六種高效率太陽光電材料的研發現況。太陽電池為半導體材料，可吸收高於能隙的太陽光能量，光子(Photon)將其激發為電子-電洞對(Electron-hole Pair)，載子經由外部電路可將電導出。在廣域的太陽光譜中，太陽電池的基本效率極限由幾個因素決定，如圖一(a)。能量低於能隙的光子不會被吸



收，無法產生電子-電洞對。而能量高於能隙的光子，大於能隙的能量會因熱輻射而不能完全轉換為電能，如圖一(b)。以上兩個因素造成只剩~45%的入射光譜存在於1.1~1.4 eV的能隙的半導體。電池最大功率為能隙能量所對應的電壓，即具有高於能隙能量的所有光子完全捕獲，然後所有生成的載子被完全收集。但即使在理想的情況下，開路電壓(V_{oc})總是低於能隙能量，其因來自於熱力學的限制。載子的復合(Recombination)產生暗電流(Dark Current)，使得 V_{oc} 遠低於能隙電壓 V_g ，如圖一(c)。此外，在最大功率操作下(最大 $J \times V$)，電壓 V_{mp} 低於 V_{oc} ，電流密度 J_{mp} 低於最大短路電流密度(J_{sc})，如圖二(a)。在1961年首先由Shockley和Queisser(S-Q)考慮到這些因素所產生的效率極限⁽³⁾。

圖一(c)表示在「一個太陽(1 Sun)」的照射下(無聚光的條件)，以標準AM1.5太陽光譜照射，單接合(Single Junction)太陽電池的理論效率與能隙之關係。對於能隙為1.34 eV的半導體而言，最大效率約為33.7%。在實際的太陽電池中，並非所有的入射光都被作用層吸收，也並非所有生成的載子全被收集，由於歐傑復合(Auger Recombination)、能帶尾復合(Band Tail Recombination)、體復合、界面復合、表面缺陷(Surface Defects)等⁽³⁻⁶⁾現象，因此當達到能隙 E_g 時，造成 J_{sc} 低於最大值，而 V_{oc} 也在S-Q值以下。此外，電阻和接觸損耗，以及其他非線性因素，減低了填充因子(Fill Factor; FF)，其公式為 $FF = (J_{mp} V_{mp}) / (V_{oc} J_{sc})$ 。綜合來看，這些因素導致實際效率通常比給定能隙的S-Q極限低得多。以下依太陽電池理想和實驗記錄效率的比較，區分三類



▲圖一 太陽電池理論效率限制。(a)AM1.5太陽光譜，太陽光的能量由於地球大氣中的分子吸收，使得入射光能量因而降低。能量低於能隙的光子(小於矽的能隙，例如虛線)不被吸收，而高於能隙的能量的光子，載子因熱輻射而未完全轉換為電能。電池所產生的最大功率輸出，即受到相對於能隙電壓的損耗所限制；(b)電子能帶結構由準費米能級分開，而決定開路電壓為 V_{oc} ；(c)理論Shockley-Queisser為能隙(黑線)所定義的極限效率，75%和50%的極限(灰線)，以不同材料相對應於能隙所繪製的實際效率⁽²⁾(彩圖請見材料世界網<https://www.materialsnet.com.tw>)

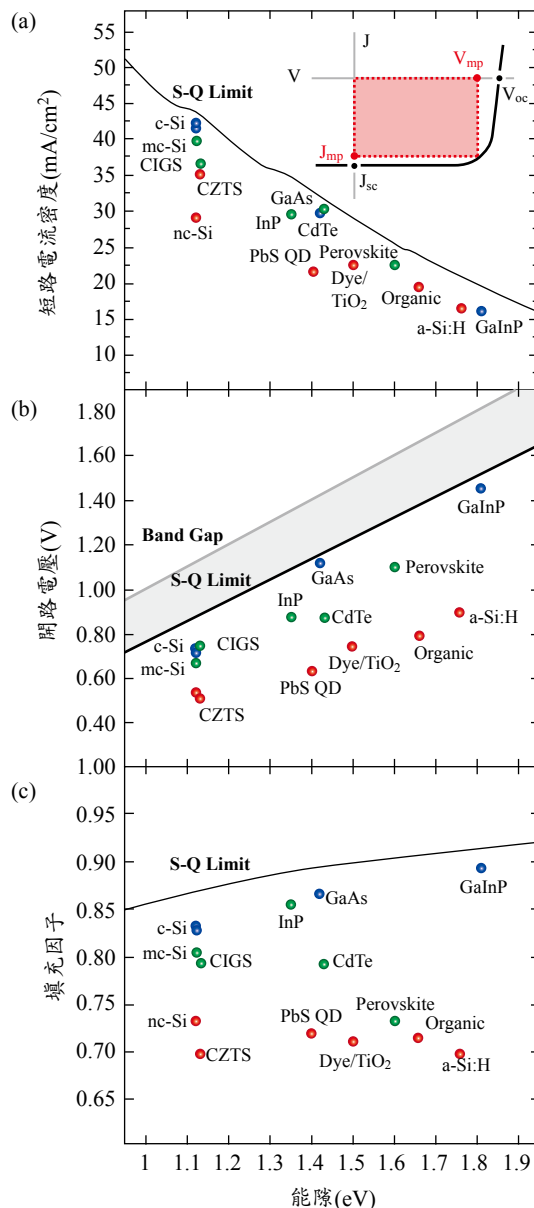
太陽光電材料：①超高效率單晶材料，其相對能隙的S-Q極限效率>75%：Si（同質接合和異質接合）、GaAs和GaInP；②高效率多晶材料（S-Q理論效率約50%~75%）：Si、Cu(In,Ga)(Se,S)₂（簡稱CIGS）、CdTe、甲基銨鹵化鉛鈣鈦礦[CH₃NH₃Pd(I,Cl,Br)₃]和InP；③低效率材料（S-Q理論效率約<50%）：微晶、奈米晶、非晶矽、Cu(Zn,Sn)(Se,S)₂（簡稱CZTS）、染料敏化TiO₂、有機、聚合物材料、量子點材料等。

這些材料的記錄效率如圖一(c)。對於每種材料的太陽電池最高效率的J_{sc}、V_{oc}、FF的實驗值如圖二(a)~(c)所述，以及使用S-Q模型計算的極限值⁽²⁾。J_{sc}的實驗值通常遵循S-Q理論限制的趨勢，其中一些材料非常接近該極限值。V_{oc}和FF的值則較為分歧，只有少數材料接近S-Q極限。為了分析這些趨勢，評估了每種材料的兩個特徵參數①電流比(j) = J_{sc}/J_{SQ}，其表示電池的吸收層中光耦合、吸收、捕獲的程度，也取決於載子的收集效率；②電壓比(v) = V_{oc}/V_{SQ}，其主要與體積、表面、界面中載子的復合程度有關。電壓比(v)和填充因子比(f) = FF/FF_{SQ}表示電池的總電性理論限制⁽⁷⁾。所有評估材料的j對v × f的關係如圖三，顯示光學管理或載子管理對電池效率的影響。

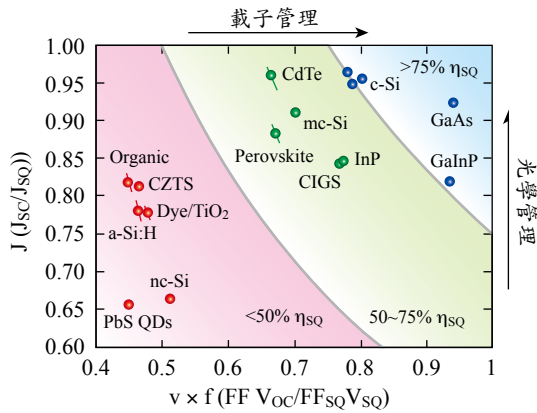
單接合太陽電池

以下，我們將描述所有材料的單接合太陽電池之最高效率與研發現況。

①矽(Si)，最高效率為25.0%~26.7%：矽具有近乎理想的能隙(E_g = 1.12 eV)可達到高效率(圖一)。同質接合矽晶電池，主要於矽晶片上形成P-N接合。接觸復合(Contact Recombination)是損失的主要來源，



▲圖二 太陽電池最高效率與效率理論極限相較圖。根據Shockley-Queisser極限（實線）和太陽電池的最高效率實驗值，與單接合太陽電池之能隙關係。(a)短路電流J_{sc}。插圖：具有V_{oc}、J_{sc}、V_{mp}、J_{mp}的典型電流-電壓J(V)曲線。電流和電壓的乘積在最大功率點(J_{mp}V_{mp})為最高；(b)開路電壓V_{oc}。能隙與電壓的相對關係，其中灰色陰影區域為電壓差異，顯示為V_g-V_{SQ}；(c)填充因子FF = (J_{mp}V_{mp})/(V_{oc}J_{sc})。所有數據均為標準AM1.5環境以1,000 W/m²照明⁽²⁾



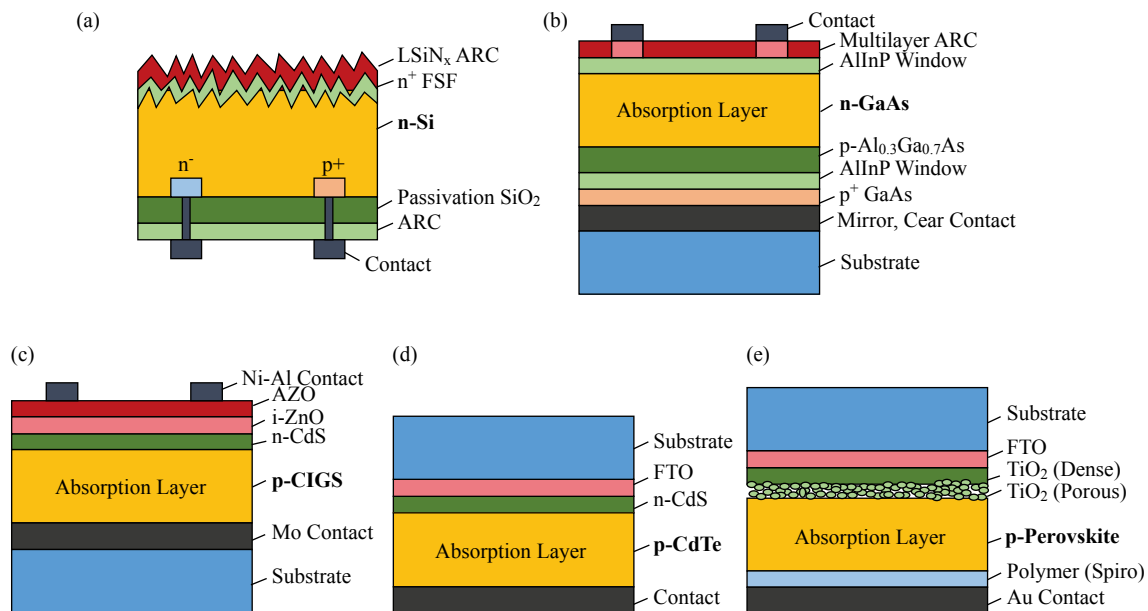
▲圖三 Shockley-Queisser對太陽電池實際的電壓和電流。對於所有太陽電池的評估材料的記錄效率單元，電流比 $j = J_{sc}/J_{sq}$ 與電壓和填充因子乘積($v \times f = FF V_{oc}/FF_{sq} V_{sq}$)的關係。頂部和右側軸上的箭頭表示改進的光學管理和載子收集可提高電池效率。 η_{SQ} 為根據S-Q理論可實現效率之最大值⁽²⁾

因此最佳的方法是使接觸面積最小化，如透過局部重摻雜或金屬沉積，形成鈍化接觸，一般鈍化層為 Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 SiO_2 。單晶矽最高記錄效率可達25.1%⁽⁸⁾。另一種較不同的設計為P-N接合和電極位於電池的底部，這種交叉反向接觸(Interdigitated Back Contact; IBC)設計，具有交替的P型和N型接觸區，如圖四(a)。IBC設計消除了前端入光面電極形成的遮蔽光所造成的陰影損失，並降低了串聯電阻，在背面使用更多的金屬來收集和運輸載子，這種設計具有較多的花費也更具挑戰，在表面附近產生的載子必須在後面收集，以IBC結構，結合矽晶異質界面設計，其載子收集率高於同質界面設計⁽⁹⁻¹⁰⁾，效率高達26.7%，為目前矽晶太陽電池達最高效率的結構。根據S-Q理論，矽晶太陽電池的極限效率約33.3%，若考慮載子的歐傑復合，未摻雜單晶矽之厚度達110 μm 時，理論極限效率約為29.4%。

②砷化鎵(GaAs)，最高效率為28.8%：
GaAs單接合太陽電池，以n-GaAs/p- $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 接合結構如圖四(b)，最高效率已達28.8%^(9,11)。該材料具有直接能隙約1.42 eV (圖一)。由於GaAs的高吸收係數，電池厚度僅~2 μm ，即可收集到接近能隙的入射光能量，理論效率約32%⁽¹²⁾。

③磷化銦(InP)，最高效率22.1%；磷化鎵銦(GaInP)，最高效率20.8%：此兩種為III-V族化合物半導體。InP的能隙約1.35 eV，最高效率為22.1%^(9,13)，InP電池在過去十年中的發展較少。GaInP具有相對高的能隙約1.81 eV，其S-Q理論效率為25.2%，最高效率為20.8%^(9,14)。

④銅銦鎵硒(Cu(In,Ga)(Se,S)₂)，簡稱CIGS)，最高效率22.3%：CIGS薄膜太陽電池的效率在過去20年穩定的成長，最高記錄為22.3%^(9,15)，為目前薄膜太陽電池效率最高之化合物材料。CIGS具有黃銅礦(Chalcopyrite)晶體結構，其可藉由改變In/Ga和Se/S比例，將能隙調整在~1.0和2.4 eV之間，但較低能隙組成具有較佳的電池效率。CIGS薄膜使用濺射或蒸鍍製程，將其構成元素沉積在含鈉(Na)的鹼玻璃(Soda Lime)基板的金屬導電鉬(Mo)膜。一般的吸收層厚度約為2~3 μm ，CIGS以自體銅空缺(Cu-poor)形成P-type。Na由鹼玻璃基板擴散到CIGS膜層中，具有鈍化缺陷的功效，而近期最高效率的CIGS太陽電池也添入鉀(K)。CIGS以化學水浴法(Chemical-bath Deposition; CBD)沉積硫化鎘(CdS)為N-type，通常稱為緩衝層(Buffer Layer)，形成異質接合，再鍍上i-ZnO(中性氧化鋅)及ZnO:Al(鋁摻雜氧化鋅)及鎳(Ni)及鋁(Al)為導電層，並以 MgF_2 當作抗反射層(ARC)，如圖



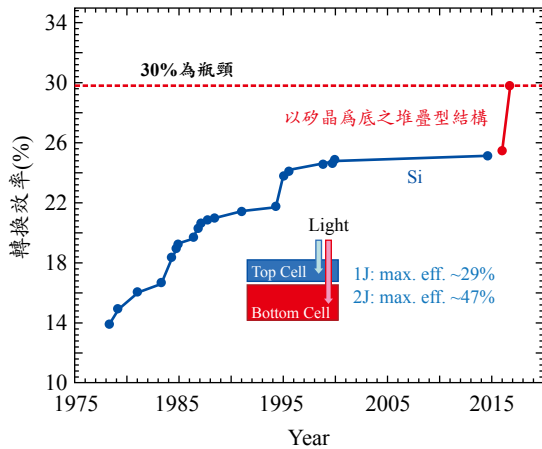
▲圖四 太陽電池的各層和電極配置幾何，記錄效率高於20%之設計。(a)矽晶IBC結構(SunPower)；(b)GaAs薄膜(Alta Devices)；(c)CIGS薄膜(ZSW斯圖加特)；(d)CdTe薄膜(First Solar)；(e)鈣鈦礦薄膜(KRICT)。對於量產電池，確切的電池配置幾何形狀是不公開的

四(c)。由於鎘的毒性問題，最近有多篇研究將CdS層取代為更透明的寬能隙 ZnO_xS_{1-x} 或 $ZnMgO$ 。由於銦(In)是稀土元素，蘊含量較少，為掌握CIGS模組擴增到兆瓦級的關鍵。目前最高效率CIGS太陽電池能隙約1.13 eV，電壓非常高，可達0.84 V，相等於最佳化的單晶矽太陽電池。

⑤銻化鎘(CdTe)，最高效率為21.5%：CdTe為立方晶體閃鋅礦(Zincblende)晶體結構，能隙為1.43 eV之二元化合物半導體。可使用CdTe粉末在較低的溫度蒸發。CdTe太陽電池鍍於覆有FTO($SnO_2:F$)的玻璃基板，其上再以CBD鍍上CdS，再以蒸發方式鍍上CdTe(厚度約為2~3 μm)。金屬背接觸如鋁(Al)或鈦(Ti)，某些情況下，金屬和CdTe之間具有銻化銅鋅($CuZnTe$)中間界面層如圖四(d)。CdTe的最高效率為

21.5%^(8,16)。CdTe電池中的電流收集較好，遠高於任何其他薄膜技術，相等於最高效率的單晶矽太陽電池。CdTe電池的高電壓損耗較大(約0.75 V)，這是由於晶粒和多晶材料界面的復合損耗。CdTe太陽電池已由特定幾家公司商業化量產，在目前的薄膜技術中具有最大的市場占比，由於Cd為有毒元素，加上Te為稀土元素，所以生產廠商也建立了商業化CdTe模組的回收系統。

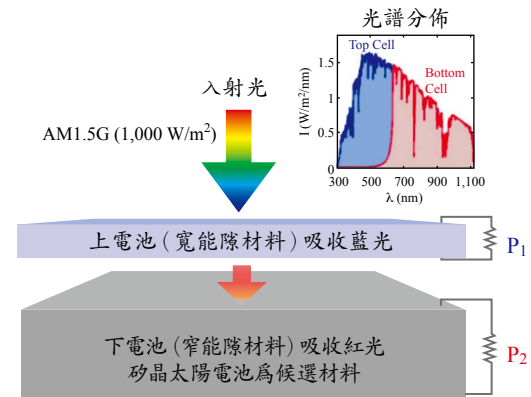
⑥甲基銨鹵化鉛鈣鈦礦(Methyl Ammonium Lead Halide Perovskite; Perovskite)，效率22.1%：混合有機-無機的鈣鈦礦太陽電池，近年來已受多方關注，短短5年中效率已達20%以上。這些材料常寫成通式 ABX_3 ，其中A為有機陽離子(通常是甲基銨 CH_3NH_3)，B是無機陽離子(通常是Pb)，X是鹵化物，通常為碘(I)，或是少量



資料來源：NREL (2016); Research Cell Efficiency Records Replotted by GEL/ITRI (2016)

▲圖五 單接合矽晶太陽電池與矽晶為底之堆疊型太陽電池的效率演進。圖中虛線顯示單接合矽晶太陽電池之理論效率為29%，因此30%為其瓶頸，唯有堆疊型太陽電池才有機會將效率提升至30%。插圖表示上電池為寬能隙之材料，可吸收藍光，下電池為窄能隙之材料，可吸收紅光

的氯(Cl)或溴(Br)，其組成為 $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{Pb}(\text{I}, \text{Cl}, \text{Br})_3$ 。能隙可由鹵化物添加調控在1.6 eV (純I) ~3.2 eV (純Cl)，通常較小能隙，具有較佳的太陽電池效率⁽¹⁷⁾。鈣鈦礦鹽類以各種極性溶劑 (通常是二甲基甲醯胺(Dimethylformamide; DMF)或二甲基亞砜(Dimethyl Sulfoxide; DMSO))，在室溫或接近室溫可析出鈣鈦礦結構的多晶薄膜。鈣鈦礦太陽電池在覆有FTO的玻璃基板上，以電子選擇性導電層(Electron-selective Contact)或稱電子傳輸層，通常為 TiO_2 ，在其上再以旋轉塗佈法(Spin-coating)將可溶性前驅物如甲基碘化銨(Methyl Ammonium Iodide)和碘化鉛(Lead Iodide)、溴化物(Bromide)或氯化物(Chloride)，或將含鈣鈦礦之組成粉末蒸發後沉積至基板上。低溫退火製程(<150°C)可改善晶粒結晶性、膜層表層結構



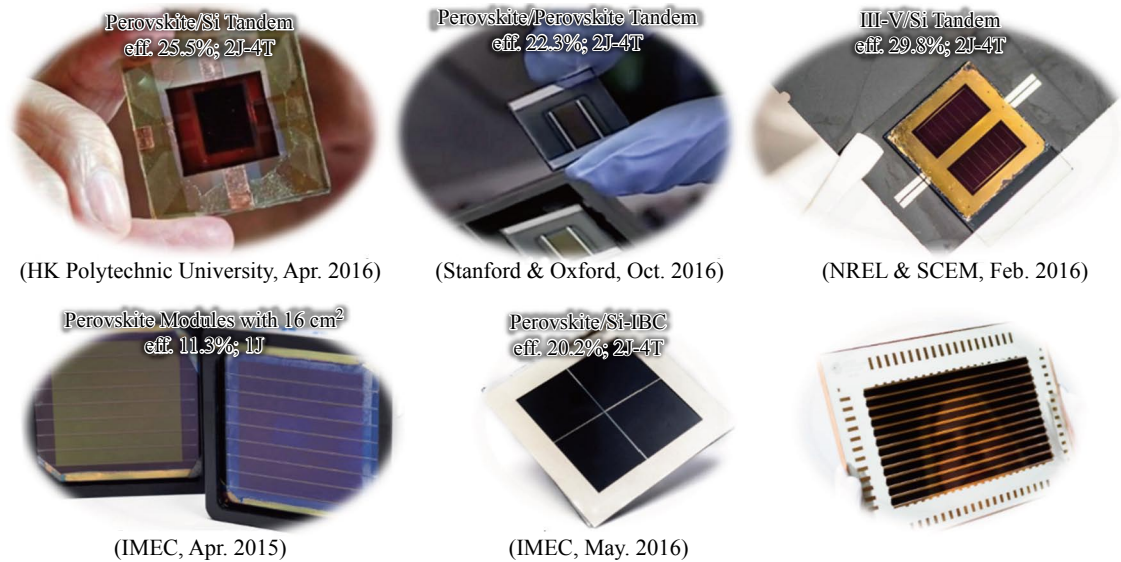
▲圖六 堆疊型太陽電池之概念。上電池為寬能隙之材料，可吸收藍光；下電池為窄能隙之材料，可吸收紅光，上/下電池疊合後，可吸收廣域光譜 (彩圖請見材料世界網<https://www.materialsnet.com.tw>)

及元件特性。鈣鈦礦吸收層之上再鍍以電洞選擇性導電層(Hole-selective Contact)或稱電洞傳輸層，通常為以旋轉塗佈法鍍上Spiro-OMeTAD($\text{C}_{81}\text{H}_{68}\text{N}_4\text{O}_8$)，其結構如圖四(e)。目前鈣鈦礦太陽電池之最高效率為22.1%^(9,17)。

堆疊型太陽電池

由以上介紹可知單接合太陽電池的效率始終受限S-Q極限理論，尤其矽晶電池近年來雖持續緩幅成長，但始終無法突破29%的極限。自2014年開始，有諸多團隊投入研發堆疊型(Tandem)太陽電池之研究，成為新興的技術，如圖五所示，2015年之後，已有堆疊型太陽電池效率可接近30%。以矽晶為例，單接合矽晶太陽電池極限理論效率為29% (Single Junction，簡稱1J)，而堆疊型太陽電池之極限理論效率可高達47% (Tandem Junction，簡稱2J)。

若以窄能隙(Narrow Bandgap)之矽晶太



▲圖七 堆疊型太陽電池/模組之實品與效率現況

電池/模組之實驗室研發實品與效率現況。目前以二接合-四接點 (2 Junction-4 Terminal; 簡稱2J-4T) 的技術應用較為廣泛, 將上/下電池分別製作後, 再以機械方式將上/下電池貼合。香港Polytechnic大學以鈣鈦礦/矽晶電池貼合, 效率可達25.5%。NREL與SCEM以III-V族/矽晶電池貼合, 效率可達29.8%。小型堆疊型太陽電池模組以IMEC開發為主, 面積約16 cm², 效率達20.2%。由於堆疊型太陽電池將面積放大後, 上/下電池的膜層均勻性、電極對位等問題, 使得效率隨著面積增加而大幅降低, 此為未來量產大面積化的另一挑戰。

結 論

傳統單接合太陽電池極限效率約29%, 目前有6大種類太陽電池之轉換效率可達20%, 但始終無法突破30%, 堆疊型太陽電池被視為下一代可結合矽晶太陽

電池之最佳結構設計, 理論極限效率可達47%, 國內外已有諸多團隊投入研究, 實驗室研發階段之堆疊型太陽電池已可達將近30%的轉換效率, 為目前最受矚目之新興技術。☒

誌 謝

本研究工作感謝經濟部技術處資助, 謹此致謝。

參考文獻

1. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy (2014 Edition) (International Energy Agency, Paris, 2014).
2. A. Polman, M. Knight, E.C. Garnett, B. Ehrler, W.C. Sinke, Photovoltaic materials: Present efficiencies and future challenges. *Science* 352 (2016) aad 4424, doi: 10.1126/science.aad4424
3. W. Shockley, H. J. Queisser, Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells. *J. Appl. Phys.* 32, 510-519 (1961). doi: 10.1063/1.1736034.
4. T. Tiedje, Band tail recombination limit to the output



- voltage of amorphous silicon solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 40, 627-629 (1982). doi: 10.1063/1.93168
5. U. Rau, J. H. Werner, Radiative efficiency limits of solar cells with lateral band-gap fluctuations. *Appl. Phys. Lett.* 84, 3735-3737 (2004). doi: 10.1063/1.1737071
 6. U. Rau, U. W. Paetzold, T. Kirchartz, Thermodynamics of light management in photovoltaic devices. *Phys. Rev. B* 90, 035211 (2014). doi: 10.1103/PhysRevB.90.035211.
 7. M. Topic, R. M. Geishardt, J. R. Sites, Performance limits and status of single-junction solar cells with emphasis on CIGS. *IEEE J. Photovolt.* 5, 360-365 (2015). doi: 10.1109/JPHOTOV.2014.2359135.
 8. S. W. Glunz et al., The irresistible charm of a simple current flow pattern – 25% with a solar cell featuring a full-area back contact. In *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 259-263 (2015). doi: 10.4229/EUPVSEC20152015-2BP.1.1.
 9. M. A. Green, Y. Hishikawa, W. Warta, E. D. Dunlop, D. H. Levi, Solar cell efficiency tables (version 50). *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 23, 1-9 (2015). *Prog Photovolt. Res. Appl.* 25, 668-676 (2017). doi. org/10.1002/pip.2909
 10. K. Yoshikawa, H. Kawasaki, W. Yoshida, Silicon heterojunction solarcell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nature Energy.* 2, 17032 (2017). doi:10.1038/nenergy.2017.32
 11. B. M. Kayes et al., 27.6% conversion efficiency, a new record for single-junction solar cells under 1 sun illumination. In *Proceedings of the 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 4-8 (2011). doi: 10.1109/PVSC.2011.6185831
 12. E. D. Kosten, J. H. Atwater, J. Parsons, A. Polman, H. A. Atwater, Highly efficient GaAs solar cells by limiting light emission angle. *Light Sci. Appl.* 2, e45 (2013). doi: 10.1038/lsa.2013.1
 13. C. J. Keavney, V. E. Haven, S. M. Vernon, Emitter structures in MOCVD InP solar cells. In *Conference Record of the 21st IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) 1*, 141-144 (1990).
 14. J. F. Geisz, M. A. Steiner, I. Garcia, S. R. Kurtz, D. J. Friedman, Enhanced external radiative efficiency for 20.8% efficient single-junction GaInP solar cells. *Appl. Phys. Lett.* 103, 041118 (2013). doi: 10.1063/1.4816837
 15. First Solar press release: “Solar Frontier hits 22.3% on CIGS cell” (8 December 2015); https://www.pv-magazine.com/2015/12/08/solar-frontier-hits-22-3-on-cigs-cell_100022342/
 16. First Solar press release: “First Solar achieves efficiency, durability milestones” (5 February 2015); <http://investor.firstsolar.com/releasedetail.cfm?ReleaseID=895118>.
 17. Seong Sik Shin et al, Colloidally prepared La-doped BaSnO₃ electrodes for efficient, photostable perovskite solar cells, *Science* (2017). DOI: 10.1126/science.aam6620
 18. N. J. Jeon, J.H. Noh, W.S. Yang, Y.C. Kim, S. Ryu, J. Seo, S. Seok, Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells. *Nature* 517 (2015) 476-480. doi:10.1038/nature14133
 19. *Appl. Phys. Lett.* 106, 121105 (2015)
 20. *PV magazine* (2015/10)
 21. *Opt. Express* 23 (7), A263 (2015).
 22. Synergy (Nano-Tera.ch, SFOE), PV2050 (SNF)
 23. *Adv.Sci.*2016, 1500324
 24. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2015, 6 (14), pp 2745-2750
 25. *Progress in Polymer Science*, Volume 38, Issue 12, December 2013, Pages 1909-1928
 26. <http://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=36745.php>
 27. Stion powerpoint
 28. http://www.semiconductor-today.com/news_items/2014/MAY/YALE_210514.shtml
 29. *Appl. Phys. Express*, vol2, p122202, 2009
 30. *Japanese Journal of Applied Physics*, Volume 54, Number 8S1 (2015)