



可撓式太陽光電模組應用發展趨勢

Application and Development Trends of Flexible Photovoltaic Modules

張評款 P. K. Chang¹、劉漢章 H. C. Liu²、黃朝揚 C. Y. Huang³、
林福銘 F. M. Lin⁴

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹工程師、²資深研究員、³經理、⁴正研究員/組長

摘要/Abstract

隨著全球暖化與環保意識提升，再生能源的應用與發展逐漸成為能源議題的主流。其中，太陽能作為再生能源重要角色之一，太陽光電產業鏈包括上游的原材料生產、中游的太陽電池與模組封裝，以及下游的零組件與系統工程。在本文中，我們將聚焦於可撓式太陽光電技術，包括晶矽太陽能電池、化合物太陽能電池以及有機太陽能電池，因其可撓曲和輕便性，適用於各種形狀和材質的表面，其技術與運用情境，將為未來再生能源應用帶來突破。

As global warming and environmental awareness rise, the application and development of renewable energy are gradually becoming mainstream energy topics. Among them, solar energy plays a crucial role as a renewable energy source. The photovoltaic industry chain includes upstream raw material production, midstream solar cell and module packaging, and downstream components and system engineering. In this article, we will focus on flexible photovoltaic technology, including crystalline silicon solar cells, compound solar cells, and organic solar cells. Due to their flexibility and lightweight properties, they can be applied to surfaces of various shapes and materials. This technology and its application scenarios represent a significant breakthrough in the future application of renewable energy.

關鍵字/Keywords

可撓曲(Flexible)、輕量化模組(Light-weight Module)、晶矽太陽電池(Crystalline Silicon Solar Cells)、化合物太陽電池(Compound Solar Cells)、有機太陽電池(Organic Solar Cells)

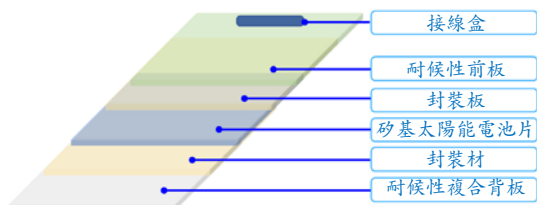


前言

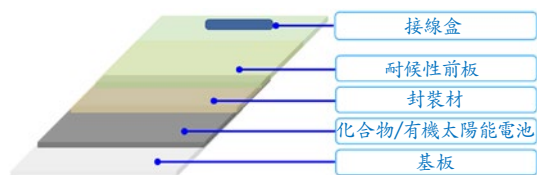
為了響應全球對於淨零碳排的追求，台灣也朝著「2050淨零排放」的目標前進。在2022年3月，我國正式發表了《台灣2050淨零排放路徑及策略總說明》，這份文件詳細列出了我國在2050年達到淨零排放的目標和行動路徑，其中包括了如何推動各項關鍵技術、研究與創新，如何引導產業轉型為綠色經濟，並且如何帶動整體經濟的成長。再生能源是淨零碳排中不可或缺的一環，而再生能源之中的太陽光電技術已成為全球科技發展的重點，有別於傳統石化能源，太陽能是一永續、潔淨的再生能源，被認為是實現能源轉型和減少二氧化碳排放的關鍵。政府規劃2050年淨零排放路徑，打造零碳能源系統最大化再生能源，目標2050年時再生能源發電占比超過60%，其中太陽光電短中期規劃於2025年設置目標量為20 GW。隨著能源需求的日益增長和環境問題的日益嚴重，可再生能源技術的重要性愈加凸顯。傳統前板為玻璃之太陽能模組，因其僵硬性和重量限制了應用範圍；而可撓式太陽光電模組可彎曲、輕薄和可應用於多種表面的特性，例如：便攜式電子設備、可穿戴設備、建築物表面、交通工具、可移動和野外裝置、軍事和救援用途等，展示了其在現代生活中的廣泛潛力及未來的發展方向。

可撓太陽光電模組技術介紹

可撓光電模組可分為矽晶材料、化合物材料與有機材料。矽晶材料結構如圖一，化合物材料與有機材料結構如圖二，而有



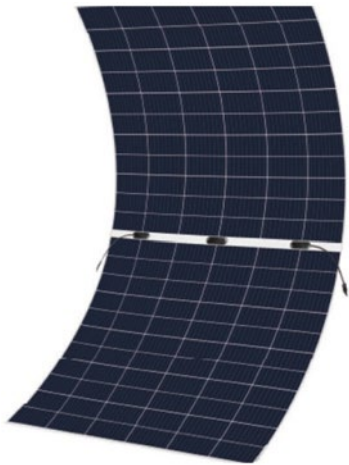
▲圖一 可撓矽基太陽能模組結構示意圖



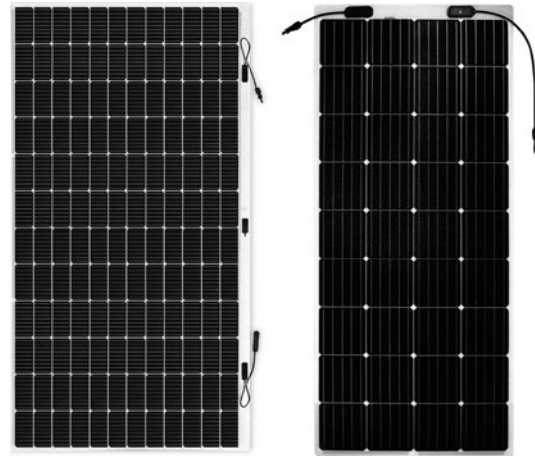
▲圖二 可撓化合物/有機材料太陽能模組結構示意圖

機材料太陽能電池又稱為新世代太陽能電池(Emerging Photovoltaics or New-generation Solar Cells)，包含的項目眾多⁽¹⁾，如：染料敏化(Dye-sensitized)、鈣鈦礦(Perovskite)與有機薄膜(Organic Thin-Film)⁽²⁻⁴⁾等。

對比以往太陽能技術如矽基、砷化鎵、碲化鎢等，新世代太陽能電池具以下六項差異⁽⁵⁾：①發展歷程較短，鈣鈦礦電池等研究發展時程至今僅10年。②主要吸光層材料厚度可薄至數十奈米到數十微米之間，利於節省材料。③材料的可調變性高，用以塗佈各層薄膜之溶液濃度、薄膜厚度與組合方式等細節，皆能輕易調整；絕大多數材料可以回收再用，兼具節省成本與環保之優點。④元件具可撓曲(Flexible)性。有別於傳統矽晶，為了保護電池元件，常選用玻璃或鋁板作為底板；而新世代太陽能電池能將各層材料依序塗佈於可彎曲的基板上，如塑膠、金屬薄片



▲圖三 中來N型TOPCon可撓式太陽光電模組



▲圖四 SunMan eArc可撓式太陽光電模組

等。⑤新世代太陽能電池以低溫製程為主，而傳統結晶矽基太陽能電池，則需 $1,400^{\circ}\text{C}$ 以上之高溫製程。⑥目前經過驗證的最佳效率介於 $13.0\%\sim 29.1\%$ ⁽⁶⁾。

可撓光電模組產品與應用

可撓式太陽能模組具備高度整合與安裝簡易等特性，其應用性廣泛且適用於平面或曲面場域，例如建築物或交通運輸工具等。因此，各家模組製造商鎖定可撓光電模組結構與封裝積極進行優化開發，本文針對可撓式模組產品與應用作整理及介紹。

1. 開發高透明有機無機雜化奈米合金材料前板技術及N型TOPCon電池

中來(Jolywood)開發可撓太陽光電模組(圖三)，具可彎曲、易於搬運與快速安裝等優勢，適合應用於特殊造型的建築場景。其模組使用增強型高透明有機無機雜化奈米合金材料前板和低水氣穿透金屬含

氟背板技術，在可靠度方面，模組可承受水氣與耐受高溫，並通過TC200與DH1000之標準⁽⁷⁾。

2. 利用自主研發的高分子聚合物複合材料取代玻璃

太陽能公司SunMan已研發出輕量化可撓式無玻璃太陽光電模組eArc，如圖四，可裝設在拱形的屋頂、車頂與牆壁外側。eArc太陽光電模組是一款無玻璃的創新產品，在多個國家和地區受專利保護(ZL201610927464.6、ZL201610927383.6與EP3534410)。它採用了高效晶矽太陽能電池技術和自主研發的高分子聚合物複合材料，實現了無玻璃、輕量化、薄片化的新型矽晶太陽電池元件。eArc太陽光電模組的重量可輕至 3.3 kg/m^2 ，只有傳統太陽光電模組的30%，厚度可減少到 2 mm 以下，形狀和尺寸可客製化設計和生產，且模組便於運輸，大幅降低運輸成本⁽⁸⁾。



▲圖五 PowerWatt可撓式太陽光電模組

3. 採用ETFE膜取代玻璃及SunPower IBC專利電池技術

PowerWatt公司新發布ET (Elastic Technology)彈性科技系列高效太陽光電模組，如圖五⁽⁹⁾。PowerWatt可撓性太陽光電模組的特點如下：①輕量：50 W僅為1.05 kg，100 W僅為1.85 kg。②可撓：最大30°彎曲。③高轉換效率IBC (Integrated Back Contact) 電池片。④ETFE多層薄膜：高透光、易清洗、自潔、耐腐蝕和抗老化，透過蜂窩紋路設計增加聚光與光電轉換率，並且耐磨。

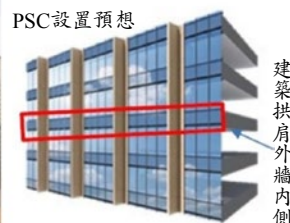
製程中使用最新的耐高溫特殊彈性保護材料，將電池片真空封裝在裡面，既最大程度保護了電池片，也使得整片太陽能模組具有一定的柔性和彈性。採用的太陽能電池為美國SunPower公司全球獨家專利技術的高科技IBC高效能電池片，可以在許多傳統太陽光電模組無法使用的環境下使用，擁有更廣泛的應用範圍。

內幸町一丁目街區南地區
第一種市街地再開發事業
完成預想



薄膜型鈣鈦礦
太陽能電池(PSC)

PSC設置預想



▲圖六 1 MW鈣鈦礦太陽能電池應用於建築牆壁之項目

4. 鈣鈦礦太陽能電池

鈣鈦礦太陽能電池(Perovskite Solar Cell; PSC)是一種新型的太陽能轉換技術，與傳統矽基太陽能電池相比，其擁有可大面積生產、低成本、製程簡易、輕薄、可撓等多重優勢，使其在太陽能領域備受期待。隆基公司於2024年發表Silicon-Perovskite Tandem Solar Cell，轉換效率高達34.6%⁽¹⁰⁾，再次展示了晶矽-鈣鈦礦堆疊電池作為一種新型電池技術的顯著效率優勢。然而，電池的耐久性、產品壽命和轉換效率穩定性，則是能否順利進入產業應用最大的關鍵及考驗。日本「下一代太陽能電池開發」計畫著重於提升這些電池的效率、耐用性和量產技術。值得關注的是，日本已啟動鈣鈦礦太陽能電池的大規模導入計畫，特別是在「內幸町一丁目街區南地區第一種市街地再開發事業」中的應用，該計畫預計將薄膜型鈣鈦礦太陽能電池引入高層建築的牆壁上，如圖六所示⁽¹¹⁾，這是全球首個規模超



過1 MW的鈣鈦礦太陽能電池應用項目，標誌著日本在綠色能源轉型方面邁出重要一步。台灣鈣鈦礦科技公司於2022年宣布組建「TPSC水星一號線」—A4尺寸鈣鈦礦太陽能電池試產線，並於2023年展示國內第一片軟性鈣鈦礦太陽能電池（如圖七），期能拓展嶄新應用技術與不同產業之應用⁽¹²⁾。

5. 染料敏化太陽電池

染料敏化太陽電池(Dye Sensitized Solar Cell; DSSC)製程簡單、成本低且不受日照角度的影響，加上吸收光線時間長，在



▲圖七 台灣鈣鈦礦科技公司第一片軟性鈣鈦礦太陽能電池

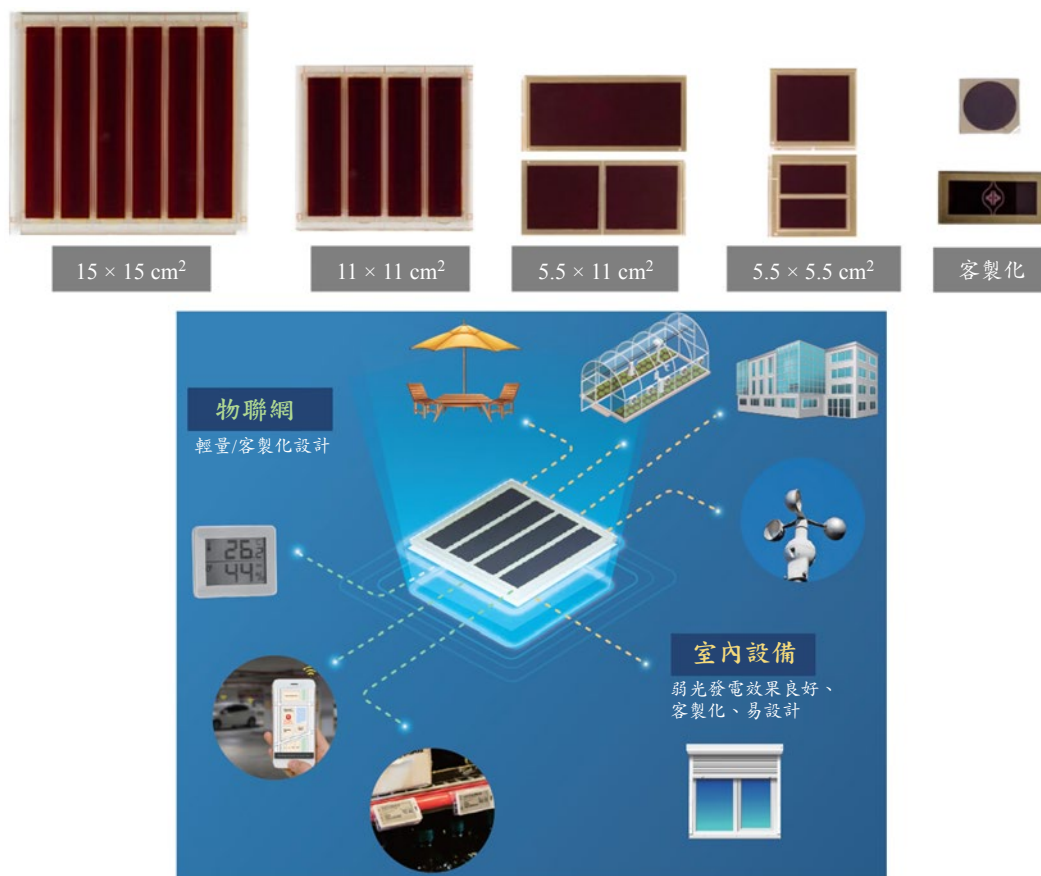
相同時間的發電量甚至優於矽晶太陽能電池。染敏電池主要應用於室內弱光、半戶外，在室內弱光的條件之下，染敏電池的光電轉換效率可以高達30%。染敏電池結構可分為三種模組型式（如圖八）：玻璃基板型(Glass-Glass)、薄型電池(Glass-Ti Foil)與可撓式電池(Plastic-Ti Foil)⁽¹³⁾。塑膠基板染敏電池具輕薄、可撓與低照度發電等特性，未來將應用於消費性電子產品、穿戴式裝置、室內各項電子產品及居住建築等方面。台塑公司研發之染敏太陽能電池技術為國際領先之一，於2018年完成台灣第一條染敏太陽能電池試量產線，年產量可達10萬片，良率超過9成，公司已開發多種尺寸之染敏模組並與合作廠商結合能量採集技術，整合應用於電子紙顯示、貨架、IoT無線感測器、電動窗簾等，如圖九，其開發之應用技術獲頒全球百大科技研發獎(R&D 100 Awards)。

6. 有機太陽能電池

有機太陽能電池(Organic Solar Cell, Organic Photovoltaics; OPV)因具有可撓性、



▲圖八 染敏電池模組的三種型式



資料來源：台塑公司染敏產品型錄

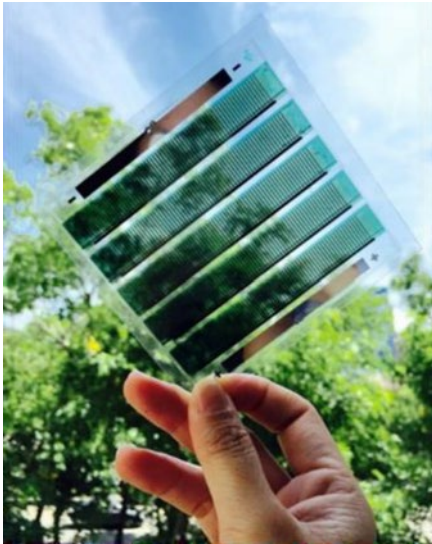
▲圖九 台塑染敏模組與整合應用情境

半透明性、重量輕、低成本且於室內光源情境下可正常運作等優點，可應用於可攜式及消費性電子、物聯網等產品。OPV材料可分類為利用有機分子或有機聚合物材料作為光吸收層和電荷傳輸層，使用的有機材料無毒且製造過程中產生的廢棄物與二氧化碳排放少，減少對環境的負擔，實為最環保之下世代綠色能源。天光材料科技公司開發P-type高分子半導體材料，以全液態式狹縫塗佈和網印(Screen Printing)於PET軟性基板並製作出半透明可撓性OPV

模組，如圖十所示。此外，BELECTRIC公司亦使用天光材料所開發之P-type高分子半導體材料於PET軟性基板，以Roll-to-Roll製程完成半透明軟性光電模組，其產品如圖十一所示⁽¹⁴⁾。

結 論

可撓式光電模組包括晶矽、化合物和有機太陽能電池，其模組具可撓、輕、薄、易運輸與安裝等優點，可適用於廣泛的場域，從傳統的太陽能農場到創新建材



▲圖十 天光公司開發之可撓性OPV模組



▲圖十一 BELECTRIC公司開發之Roll-to-Roll可撓性OPV模組

的整合、可穿戴技術以及便攜式電源等解決方案，太陽能裝置再也不局限於屋頂與地面型。隨著技術的不斷進步，可撓式光電模組將持續在能源轉型中扮演越來越重要的角色，期待人人都可以自發自用，為實現永續發展和綠色能源作出重要貢獻。☒

誌謝

本研究工作承蒙經濟部能源署研究計畫（契約編號 113-S0304）及工業技術研究院綠能與環境研究所支持，謹此致謝。

參考文獻

1. 此分類依據美國國家可再生能源實驗室(National Renewable Energy Laboratory; NREL)。
<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
2. A. Fakharuddin et al., "A perspective on the production of dye-sensitized solar modules", *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 3952-3981.
3. P. Zhu et al., "Toward the Commercialization of Perovskite Solar Modules", *Adv. Mater.* 2024, 36, 2307357.
4. H. Lee et al., "Ultra-flexible semitransparent organic photovoltaics", *npj Flexible Electronics*, 2023, 27, 1-9.
5. 新世代太陽能電池。<https://smctw.tw/4450/>
6. Best Research-Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
7. 中來N型可撓光電模組。
https://www.sohu.com/a/412259109_714652
8. 上邁新能源輕量eArc模組。
<https://cn.sunman-energy.com/eArc-lightweight-solar-product/details/15/>
9. PowerWatt可撓性太陽能電池板介紹。
https://www.solar-kintat.com.hk/upload/PDF/Powerwatt_softPanel.pdf
10. 隆基鈣鈦礦疊層電池效率世界紀錄。
<https://www.longi.com/en/news/2024-snec-silicon-perovskite-tandem-solar-cells-new-world-efficiency/>
11. 日本鈣鈦礦太陽能電池的大規模導入計畫。
https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/231213/news066_4.html
12. 台灣鈣鈦礦科技首發茄苳ZERO零碳廠房。
<https://money.udn.com/money/story/5722/7511765>
13. Y. L. Tung et al., "In-depth Study of Dye-sensitized Cells and Industrialization Technology", 工業材料雜誌396期, 2019。
14. 下世代綠色環保能源技術—有機薄膜太陽能電池。
<https://epti.ftis.org.tw/thesiscontent.aspx?id=1179>