

雷射增強接觸優化技術簡介

黃志仁 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，資深研究員

林峻平 / 工研院 綠能所 太陽光電技術組，研究員

太陽能電池金屬化技術一直是影響電池效率的關鍵製程，過去數十年來具有多次的材料、製程技術突破與顯著的效率增益，亦包含了降本與細線化的演進，可說是太陽能歷史發展中技術迭代的代表，也牽動了相關設備與材料商的分合競爭，是極為重要的關鍵製程。雷射增強接觸優化技術即是近年來又一重大的突破，可大幅提升開路電壓與降低接觸電阻，絕對效率增益超過 0.3%。本文就雷射增強接觸優化技術原理及相關的實施方法，提供一個概略而簡易的介紹。

一、前言

隨著全球市場對太陽能電池效率的愈發重視，儘管目前仍以鈍化射極與背面電池 (Passivated Emitter and Rear Cells, PERC) P 型電池為主流，但由於其轉化效率已達瓶頸，目前海內外企業多數已針對新型技術投入研發生產，具備高轉換率和低能源損耗優勢的 N 型電池無疑成為太陽能電池新一代主流產品。

在 N 型電池三大主流技術中，隨著穿隧氧化鈍化接觸 (Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon) 技術逐漸成熟以及轉換效率的提升，加上製程相對簡單、量產良率高，在成本與效率上具備高性價比，TOPCon 已明確成為繼 PERC 後的主流技術。TOPCon 相較於 PERC 電池，具有更高效率，雙面率高、衰減程度更低、弱光效應更好等的優勢，且 TOPCon 成本已近乎 PERC 產品，在國際間快速的技術迭代驅動下，台灣廠商

亦進行技術與產量上的升級。

為了因應 2024 年台灣電池廠商同時升級 TOPCon 技術所造成的高度同質性競爭，除了各家的量產良率與成本管控之外，能否因應 TOPCon 技術升級後隨之而來的技術迭代，及早布局設備/製程導入與測試，將大幅影響產品後續的差異化與模組封裝設計，太陽能電池金屬化技術即是影響電池效率極為重要的關鍵製程。

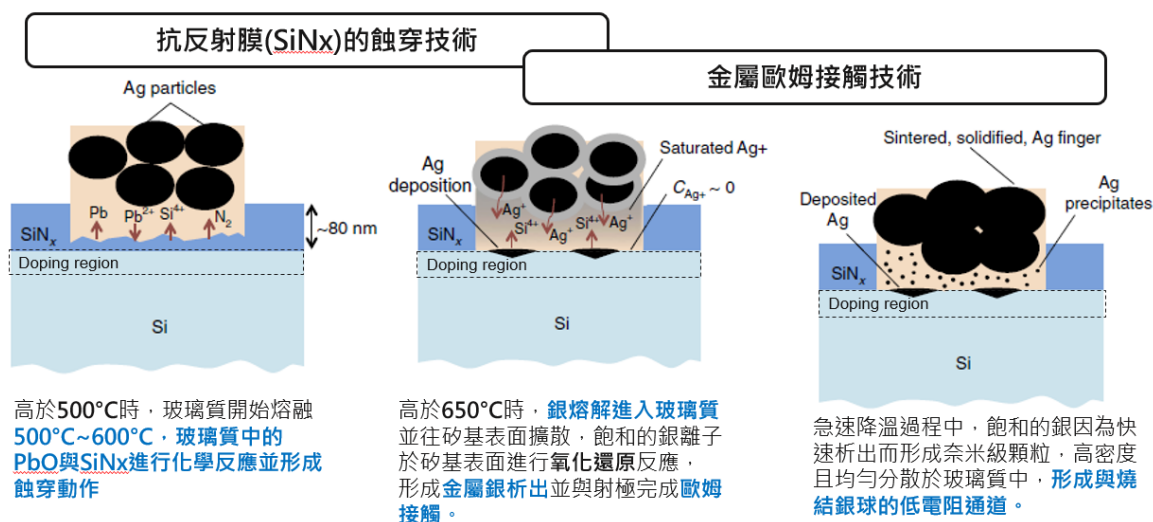
TOPCon 電池正面以硼擴散作為射極結構，接觸金屬需要以銀鋁漿作為良好的歐姆接觸材料，但銀鋁漿燒結後容易形成尖刺狀，造成過大的金屬誘發缺陷復合(Metal induced recombination, $J_{0,m}$)，限制了效率的提升，是以雷射增強接觸優化技術(Laser enhanced contact optimization, LECO)被提出並有效的降低金屬誘發缺陷復合議題，進一步的提高開路電壓與降低接觸電阻，達到絕對效率增益 0.3%以上的優異成果，快速引領了技術迭代。

在本文中，我們針對雷射增強接觸優化技術原理及實施方法做說明，提早布局金屬化關鍵製程與相關膠料的掌握，提供技術差異化與更高的 TOPCon 電池轉換效率，強化電池與模組產品的整體競爭力。

二、雷射增強接觸優化技術

目前金屬化技術一般使用網版印刷技術搭配金屬漿料，透過高溫燒結製程形成銀矽或鋁矽合金，降低接觸電阻以達到最佳的填充因子(FF%)。燒結的過程中需要以漿料中的玻璃質作為抗反射膜的蝕穿與金屬歐姆接觸技術的介質，當溫度高於 500°C 時，玻璃質開始熔融，500°C ~600°C 時玻璃質中的 PbO 與 SiNx 進行化學反應並形成蝕穿動作，溫度高於 650°C 時，銀融解進入玻璃質並往矽基表面擴散，飽和的銀離子

於矽基表面進行氧化還原反應，形成金屬銀析出並與射極形成銀矽共晶歐姆接觸點，急速降溫過程中，飽和的銀因為快速析出而形成奈米級顆粒，以高密度且均勻分散於玻璃質中，形成與燒結銀球的低電阻通道。



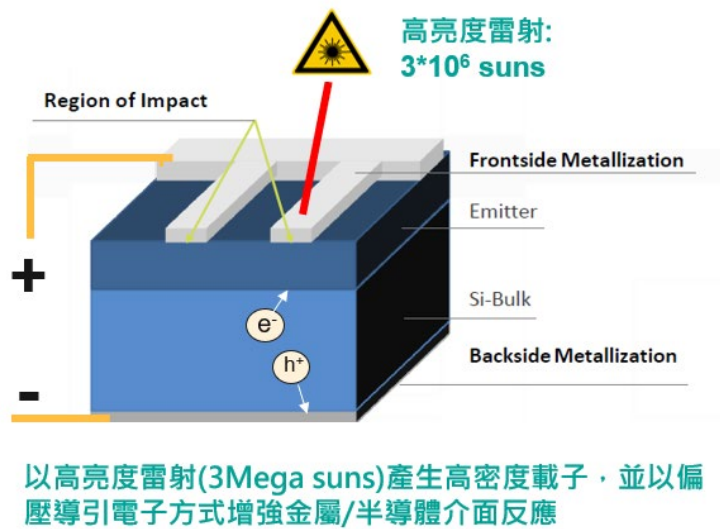
圖一，金屬漿料高溫反應示意圖

簡略的化學反應與歐姆接觸機制如圖一所示，但實際上包含銀粉的選擇，形貌，尺寸比例，微量添加物與玻璃系統的選擇，有機與無機系統的調整搭配等，都是影響電池效率提升的關鍵。其中仍待突破的關鍵點在於玻璃質的蝕刻與蝕刻所造成金屬誘發缺陷復合是一體兩面而無法兼顧的狀況，較高的玻璃質蝕刻結果可以達到極佳的銀矽接觸面，形成更好的共晶組成與歐姆接觸，但相對所引起的金屬誘發缺陷損失就隨之升高，進而降低電池開路電壓(Voc)。相反的，如降低燒結溫度可減少玻璃質的蝕刻作用(得到較差的銀矽接觸與歐姆電阻)，但金屬誘發缺陷損失因此降低，開路電壓也因而提高，是以漿料的選擇只能以客製化的配比達到客戶電池設計所需要的目的(如高開路電壓或者高填充因子)，無法同時兼顧高開路電壓與高填充因子的狀況。

為了解決這個議題，雷射增強接觸優化技術被積極的測試並開始廣泛的應用於金屬化製程。相較於雷射切割、雷射絕緣、雷射燒結接觸，以及雷射選擇性摻雜等技

術，雷射增強接觸優化技術是採用高亮度雷射進行低損傷的載子增生，驅動效應是局部高密度電流的注入(非一般雷射熱能)，在逆向偏壓的限制條件下強迫電流通過尚未形成良好歐姆接觸的導電通路，因短時間內高電流的通過產生瞬間高溫，溫度可高達 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 以上，可以讓矽原子擴散至銀漿區域形成銀矽共晶，產生良好的共晶介面接觸，進而最大幅度的降低接觸電阻。這樣的技術原本被應用於補救未燒結良好的電池，重新提高填充因子與效率，但隨著漿料的改質與配比改善，搭配雷射增強接觸優化技術的 LECO 漿料可以進一步提升電池開路電壓，兼顧了降低接觸電阻與降低金屬誘發缺陷損失效應，大幅度的提升電池效率，是近期太陽能金屬化技術的重大突破。

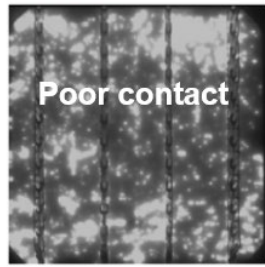
雷射增強接觸優化這項新製程是由德國 Cell Engineering GmbH 提出，並於 2019 年取得國際專利，取代了 TOPCon 電池常用的高溫燒結技術，其工作原理簡述如下:首先給與太陽能電池高逆向偏壓的條件(圖二)，以 PERC 電池為例，正面射極為 N 型，背面汲極為 P 型，N 型電極處施予正偏壓以形成 PN 結逆向偏壓的條件，但不能超過崩潰電壓以至於電池損毀。在逆偏壓如 $10\sim 20\text{V}$ 的狀況下，電池僅能產生 $0.1\sim 0.2\text{A}$ 的電流量，此時為了提高電池局部區域(如金屬接觸位置)的電流量，刻意以高亮度的雷射光源 ($>3\text{Mega suns}$)作為局部高濃度電子電洞對產生的機制，產生的局部電子電洞因為偏壓的導引，電子往入光面金屬電極流動，此時電池的金屬接觸是處於高阻質非歐姆接觸的狀況，所以電子僅流通金屬接觸區最低電阻的區塊，因為短時間($<1\text{ms}$)高電流的通過產生局部瞬間高溫，溫度依模擬計算可高達 $800\sim 900^{\circ}\text{C}$ 以上，足夠讓矽原子擴散至銀漿區域並形成銀矽共晶(共晶溫度 840°C)，重新產生良好的金屬共晶接觸介面，進而大幅降低接觸電阻。



圖二、雷射增強接觸優化技術示意圖[1,2]

越高的偏壓，越高的電流量可以實現更低的接觸電阻(如圖三)所示，但過大的雷射能量也會額外造成電池表面的熱損傷，所以必須優化雷射的掃描速度，若掃描速度過慢，雷射熱損傷反而破壞了電池效率，表面即呈現霧白的熔融現象。另外雷射的波長也影響很大，為了產生局部高濃度電子電洞對，尤其是金屬接觸區域，需要以穿透度更高，傷害性也較低的雷射處理，這樣光源才能透過金屬漿料抵達下方的PN結產生電子電洞，也不傷及金屬區域的結構。是以光源，波長的選擇，雷射能量與掃描方式，速度等條件必須與逆偏壓進行整合搭配，局部熔融共晶的現象才能有效呈現(如圖四)。錯誤的製程條件常常導致無效甚至負面的效果，若再搭配不同漿料的測試，效果不佳的判讀將更難釐清，容易導致不如預期的結果，技術的呈現將大打折扣，甚至有誤導的可能。

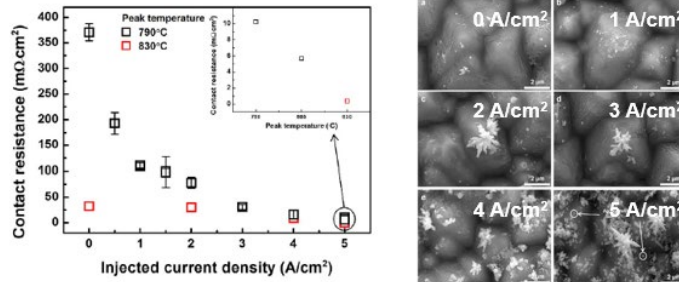
雷射輔助燒結前



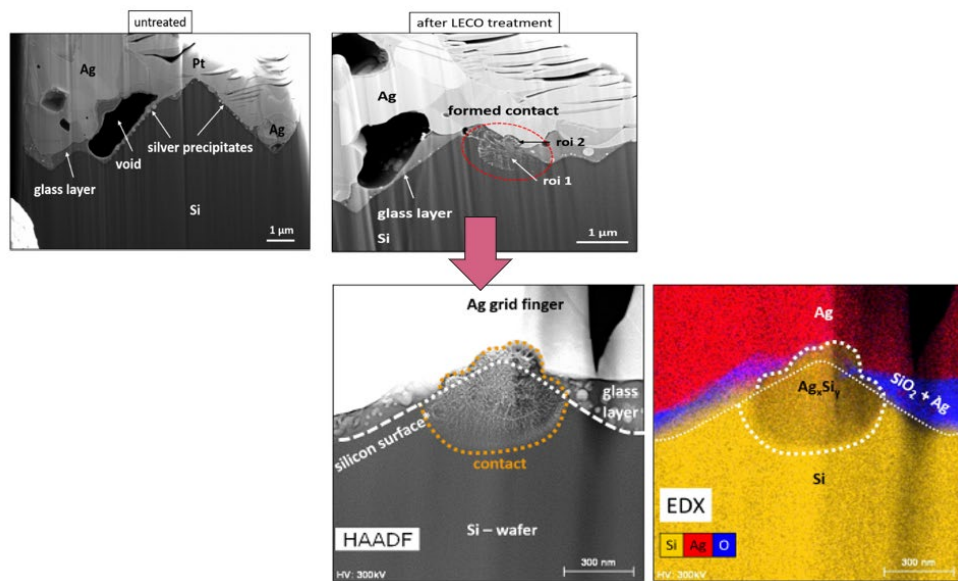
雷射輔助燒結後



隨著偏壓增大，接觸點阻明顯降低(更多 Ag dendrite析出)



圖三、電流與接觸電阻對應關係



圖四、雷射增強接觸優化技術造成共金現象剖面觀察[3]

雷射增強接觸優化技術實施方法如下：

- 選擇低損傷雷射源(避免傷害表層結構)
- 雷射光亮度>3Mega suns
- 逆向偏壓選擇在 10~25V

- 可局部區域或全面積掃描
- 製程燒結溫度低於標準條件 20~60°C

經由雷射增強接觸優化技術處理後的射極接觸阻質可以小於 $3\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ，開路電壓提高 4~5mV，整體電池絕對效率提升大於 0.3% [4]，是相當優異的提效成果，同時在漿料的選擇與應用上有更大的調整空間，能應用於各類型的電池結構，如 PERC，TOPCon，BC 背接觸電池等，皆具有相當大的效率改善，是近期極具代表性的技術迭代，也提供了更大的技術整合空間。

三、 結論

因為雷射增強接觸優化技術，玻璃質蝕刻與金屬歐姆接觸作用可以被更細的拆出來分別控制，舉例而言，以低溫燒結的條件製造高開路電壓的電池(低填充因子)，後續輔以雷射增強接觸優化技術，最大限度的降低接觸電阻，完成開路電壓與填充因子同時提高的結果，在 PERC 電池的驗證中絕對效率可以提升 0.38% [6] 以上，而在 TOPCon 電池的驗證其絕對效率可以提升 0.50% [7] 以上，具有相當大的改善與成本效益，是金屬化與漿料技術上重要的焦點與開發項目。

雷射增強接觸優化技術改進現有的電池概念，其技術允許了

- 更大的燒結溫度製程區間 [5]
- 超低摻雜射極的接觸設計 [7]
- 更薄的多晶矽層鈍化層設計 [7]
- 使用蝕刻性較小的漿料玻璃質 [4]
- 實現低電阻接觸，同時不損壞表面鈍化 [1,2,5,7]

雷射增強接觸優化技術將為未來的電池概念開闢新的應用與更高的效率突破，同時引領材料與模組結構的不同設計，已成為高效電池不可或缺的關鍵技術。

四、參考資料

1. R. Mayberry, K. Myers, V. Chandrasekaran, A. Henning, H. Zhao, E. Hofmüller, Laser Enhanced Contact Optimization (LECO) and LECO-specific pastes – a novel technology for improved cell efficiency, in 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2019).
2. E. Krassowski, S. Großer, M. Turek, H. Höffler, Laser enhanced contact optimization – a novel technology for metal-semiconductor contact optimization for crystalline silicon solar cells, in 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (2020).
3. S. Großer, E. Krassowski, S. Swatek, H. Zhao, C. Hagendorf, Microscale contact formation by laser enhanced contact optimization, IEEE J. Photovolt. 12, 26 (2022).
4. H. Höffler, T. Fellmeth, J. Greulich, E. Krassowski, A. Henning, Enlarged firing window and efficiency boost of PERC solar cells by laser enhanced contact optimization (LECO), in Proceedings of Silicon PV Conference (2021).
5. E. Krassowski, B. Jaeckel, U. Zeller, M. Pander, P. Schenk, E. Hofmueller, H. Hanifi, Reliability evaluation of photovoltaic modules fabricated from treated solar cells by laser-enhanced contact optimization process, Sol. RRL 6, 2100537 (2021).
6. Krassowski E, Großer S, Turek M, Henning A, Zhao H. Investigation of monocrystalline p-type PERC cells featuring the laser enhanced contact optimization process and new LECO paste. In: Proceedings of the 9th Workshop on Metallization and Interconnection for Crystalline Silicon Solar Cells: AIP Publishing (2021)
7. T. Fellmeth, H. Höffler, S. Mack, E. Krassowski, K. Krieg, B. Kafle, J. Greulich, Laser enhanced contact optimization on iTOPCon solar cells, Progr. Photovolt. Res. Appl. 30, 1393 (2022).