



穿隧型異質接面太陽能電池以網印金屬化電極對鈍化接觸之探討

Passivated Contact Study on Screen-printed Metallization for Tunnel Heterojunction Solar Cells

龔柏誠 B. C. Kung¹、張瀚丞 H. C. Chang²、許世朋 S. P. Hsu³、
郭明村 M. T. Kuo⁴、黃崇傑 C. J. Huang⁵、羅俊傑 C. C. Lo²、
溫雅評 Y. P. Wen⁶、林福銘 F. M. Lin⁷

工研院(ITRI) 綠能與環境研究所 ¹工程師、²研究員、³資深工程師、⁴經理、
⁵正研究員/副組長、⁶副研究員、⁷正研究員/組長

摘要/Abstract

為了改善太陽能電池中載子在金屬及矽晶片接觸接面的復合問題，在兩者的介面處插入適當的鈍化材料可以提升太陽能電池的光電轉換效率。搭配穿隧氧化層與多晶矽所形成的新穎結構即為穿隧氧化鈍化接觸，穿隧氧化層可以提升元件的開路電壓，而多晶矽薄膜可提供優良接觸功能，且在高溫環境下有著更好的穩定性，適合搭配網印金屬燒結製程。在與網印金屬製程整合中，多晶矽扮演了相當重要的角色。我們利用低壓化學氣相沉積系統沉積高品質的多晶矽薄膜，並配合銀漿製作正/背面電極製程優化，最佳化條件可獲得平均轉換效率最佳達23.2%。

In order to reduce surface carrier recombination at the interface between metal and silicon, it is shown that utilizing suitable passivation layers can increase conversion efficiency of solar cells. The novel design of high efficiency solar cells is the stack structure of tunneling oxide combined with poly-crystalline silicon. Tunneling oxide layer has the advantage of increasing iV_{oc} , while poly-crystalline silicon layer provides excellent contact and temperature stability suitable for screen-printing metallization. The poly-Si film plays a significant role in screen-printing metallization. Using LPCVD system to deposit high quality poly-Si film, we have shown that 23.2% of high cell efficiency can be achieved with optimizing metallization of front and rear Ag pastes.

關鍵字/Keywords

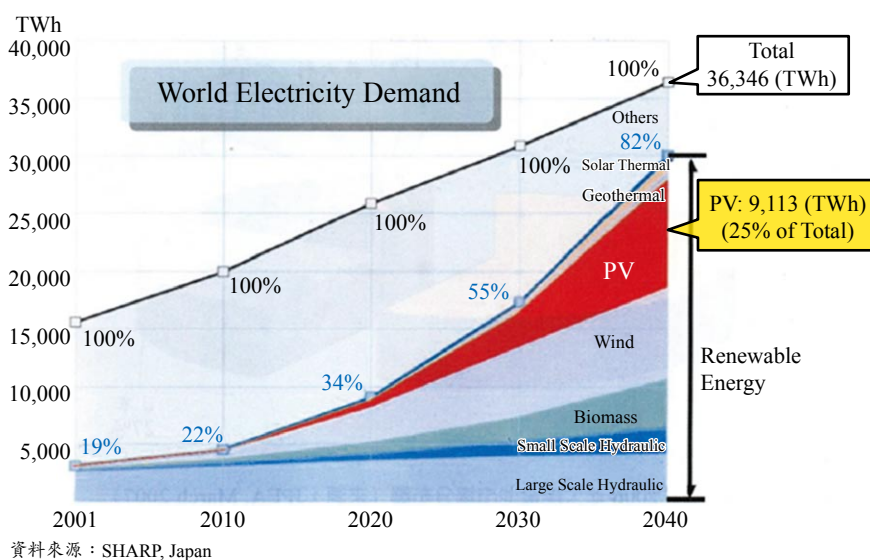
鈍化接觸(Passivating Contact)、穿隧氧化層(Tunnel Oxide)、多晶矽(poly-Si)、網印(Screen Printing)、金屬化(Metallization)

前言

人們對於能源的需求不斷增加，全球暖化的必然問題也有增無減，而能源的短缺是目前我們亟需解決的問題。在高度的經濟發展及社會進步過程中所附帶的能源消耗，是助長二氧化碳排放量增加的元兇，除非我們減低導致全球暖化的溫室氣體排放量，否則全球的平均氣溫在本世紀末將上升3~9°C。近幾年台灣的氣候愈發趨向於極端，亦是受到全球暖化的影響。因此，發展再生能源是全球各國的主軸，如圖一所示。以台灣來說，目前又以太陽光電的推廣度最佳。

矽是地球上最豐富的元素之一，並且其能帶隙(Band Gap)為1.12 eV，相當適合以光電效應(Photo Voltaic Effect)原理做太陽能發電，再加上純度高、少數載子壽命長、

晶界缺陷低，且容易控制電阻率，是當今主流的太陽能技術。但是傳統的背面表面電場(Back Surface Field; BSF)電池以及目前主流的鈍化射極背接觸(Passivated Emitter and Rear Contact; PERC)電池，其效率都會受到矽晶圓與金屬電極介面間常見的載子復合效應影響。為了提升太陽能電池的轉換效率，如何降低介面處所造成的復合效應是很重要的一個課題。目前太陽能電池下一個世代的趨勢，即是透過在晶體矽(c-Si)晶片的表面上沉積載子選擇性鈍化(Carrier Selective Passivation)材料。研究指出，在金屬層與矽晶圓間加入適當的鈍化層可以有效降低載子在介面處的復合效應，近幾年來世界各國的研究單位皆開始投入大量的心力去研究鈍化接觸(Passivating Contact)材料和相對應的電池結構。鈍化的主要目的是為了減少載子在表面(或是介面)處

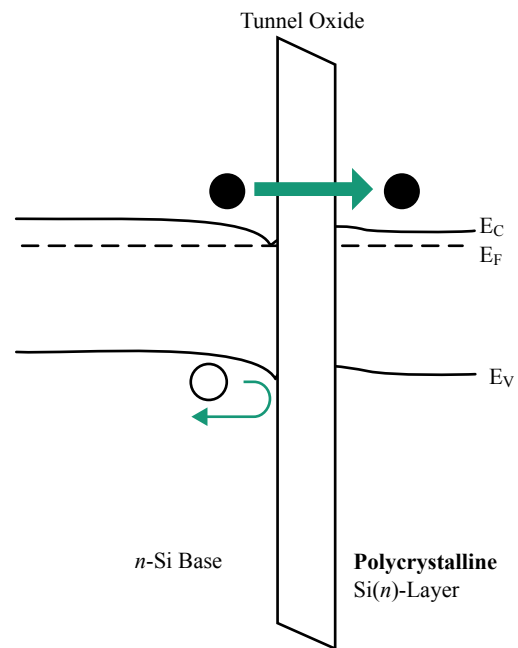


▲圖一 全球能源使用量及其組成展望圖



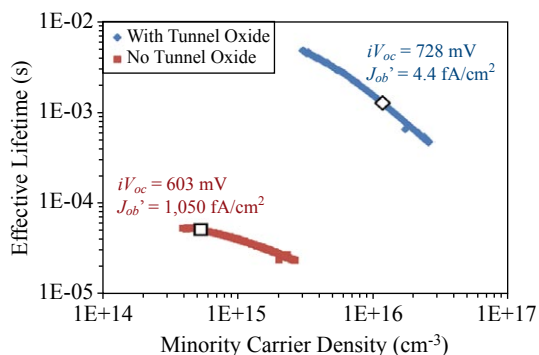
復合的速率，亦即提高少數載子(Minority Carrier)壽命。近十年來， Al_2O_3 以其利基特性被導入太陽能電池業界當作鈍化層， Al_2O_3 中鋁原子存在兩種配位方式：6個氧原子的八面體中心位置和4個氧原子的四面體中心位置，經過高溫熱處理過程，八面體結構會轉換為四面體結構，產生間隙態氧原子，間隙態氧原子奪取p型矽中的價態電子，形成固定負電荷，使 Al_2O_3 薄膜顯出負電性，在 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ 介面產生一個指向矽晶片內部的介面電場，使載子可迅速逃離介面，降低介面復合速率，提高少數載子的壽命。

TOPCon是Tunnel Oxide Passivated Contact (穿隧氧化層鈍化接觸)的縮寫，在高效率太陽能電池結構裡沉積載子選擇性鈍化材料，而此材料組合是由一非常薄的穿隧氧化層(Tunneling Oxide)，再搭配主要為接觸功能摻雜的多晶矽(Poly-crystalline Silicon)堆疊而成，而擁有此結構的太陽能電池屬於具有穿隧效應的新型異質界面太陽能電池。TOPCon太陽能電池大多是採用n型矽晶片來製作，其中穿隧氧化層非常薄，大約只有1奈米，它能允許電荷載子「穿隧」通過它，當穿隧氧化層的厚度增加時，因為載子所需穿隧的厚度增加，使得穿隧機率下降，導致太陽能電池的填充因子(Fill Factor; FF)下降。文獻中提到，當氧化層厚度大於1.5奈米時，填充因子會有嚴重的下降趨勢。隨後，在超薄的穿隧氧化物上再沉積薄的高摻雜之多晶矽，對於後續網印(Screen Printing)金屬電極所需的高溫製程，多晶矽薄膜相較於非晶矽薄膜在高溫環境



▲圖二 穿隧氧化層能帶結構示意圖⁽¹⁾

下有著更好的穩定性。這兩者結合之鈍化接觸結構中多數載子(以n型而言為電子)可以輕易穿透這鈍化層，而少數載子(以n型而言為電洞)則因為相對較高的能障而被阻擋，所以造成載子選擇性效應，此進一步減少電子-電洞在矽晶圓表面的異質界面處復合問題，使得產生的光電流以幾乎為零損耗的情況流出電池，如圖二所示。為了達到更高電池轉換效率(>24%)，抑制正面以及背面晶體矽(c-Si)表面的電子-電洞復合，以及將電池開路電壓(Open Circuit Voltage; V_{oc})提升到700 mV，使用多晶矽(poly-Si)的鈍化接觸為一種有效的方式，因為將多晶矽鈍化接觸引入大規模太陽能電池製造需要進行網印回火燒結處理，鈍化接觸經處理熱後仍是穩定的。



▲圖三 有/無穿隧氧化層結構試片的有效載子壽命及少數載子密度對應圖⁽²⁾

晶與多晶矽膜介面的復合電流密度(Recombination Current Density, J_{ob})，試片結構為①有穿隧氧化層： $\text{Si}(n^+)/\text{SiO}_x/\text{c-Si}(n)/\text{SiO}_x/\text{Si}(n^+)$ ；②無穿隧氧化層： $\text{Si}(n^+)/\text{c-Si}(n)/\text{Si}(n^+)$ 。由圖三中我們可以發現，有穿隧氧化層的試片所量得的 iV_{oc} 為728 mV， J_{ob} 為4.4 fA/cm²；無穿隧氧化層的試片所量得的 iV_{oc} 則為603 mV， J_{ob} 為1,050 fA/cm²。這告訴我們，無穿隧氧化層的試片 J_0 很大，顯示載子復合電流損失嚴重；反觀，穿隧氧化層提供了良好的鈍化效果。

鈍化效果與介面處接觸阻抗

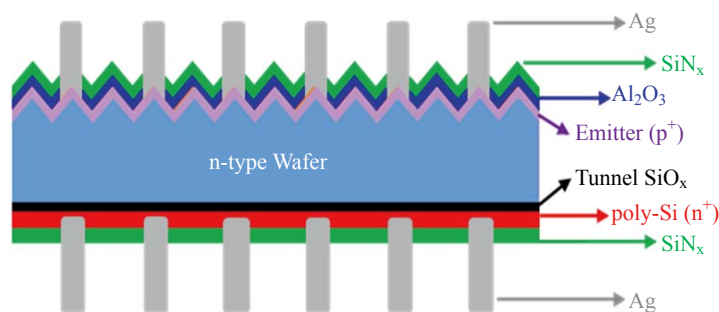
1. 鈍化效果

穿隧式異質界面太陽能電池成為新型高效率太陽能電池的焦點，主要是它的結構簡單，並結合了異質界面太陽能電池的優點，擁有傑出的表面鈍化能力以及載子選擇性，與多晶矽薄膜的結合，具有對高溫的穩定性，且多晶矽與非晶矽相較對於寄生吸收(Parasitic Absorption; PA)的效應來得小，PA並不能貢獻任何的光電流反而導致發熱，進而造成光能轉換損失。穿隧式異質界面太陽能電池屬一鈍化接觸的結構，優點除了可大幅減少金屬與矽表面接觸所形成的載子復合現象，在製程上與現今的PERC產線具有高度的整合性，只需增加薄膜沉積設備，即可輕易地與目前量產產線相容，便於產線升級。

穿隧氧化層對於鈍化效果的重要性，可由以下的探討得知。為了比較有無穿隧氧化層的試片，實驗設計量測 iV_{oc} 及基材矽

2. 接觸阻抗

現今PERC電池與穿隧式異質界面太陽能電池的電極製作是採用網印製程，不同於數十年前早期電池的電極是利用傳統半導體製程製作，免不了有黃光微影、薄膜沉積等多項步驟，造成占地面積大、設備與製程成本高、製程複雜等缺點。黃光微影製程在成形技術上有一定的速度限制，再加上許多鍍膜技術都需要在真空的環境中才能進行，因此除了特殊類型太陽能電池，近二十年來產業主流的太陽能電池其電極製作均採用低成本網版印刷技術。網印技術具有直接印刷以定義圖案的功能，即可達到快速製造與大面積化的優點。網版印刷是藉由金屬漿料以直接印刷製程將圖案印於基板，再經加熱固化成形，故能省去許多製程步驟，同時大幅下降製程成本。在TOPCon電池結構中，電極漿料會與多晶矽層接觸，因此多晶矽薄膜的品質會直接影響電極漿料與其接觸後所得的電池轉換效率，以下我們討論多晶矽與網印整



▲圖四 TOPCon太陽能電池元件結構示意圖

合的接觸阻抗(Contact Resistance)。

降低電極與多晶矽層間的接觸阻抗可減少元件的串聯電阻(R_{series})，可提高元件的填充因子以及效率。接觸阻抗量測我們採用TLM (傳輸線模型, Transmission Line Method或Transfer Length Measurement)，經由電極形成製程參數的最佳化，接觸阻抗可得到 $2 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 的水準。以網印金屬漿料燒結製作電池的電極會有金屬誘導復合(Metal-induced Recombination)現象，再則使用傳統電極漿料在網印之後的燒穿(Fire-through)製程，如果多晶矽與網印燒結製程整合沒有最佳化，金屬會輕易滲透穿過這poly-Si薄層及穿隧氧化矽超薄層，進而接觸到矽晶圓表面，此會嚴重破壞原本良好的鈍化及接觸效果，其所量得的金屬與矽介面的復合電流密度 $J_{0,metal}$ 會相當高。在製程最佳化之後，透過 $J_{0,metal}$ 的分析可達到 50 fA/cm^2 以下，TOPCon元件製作的目標是金屬電極與poly-Si接觸，這樣才有良好鈍化的效果。因此在多晶矽與網印燒結的製程整合中，必須要使介面間的接觸阻抗及 $J_{0,metal}$ 愈低愈好，這樣才能維持良好的鈍化效果，

並使元件效率有向上提升的空間^(3~6)。

TOPCon電池製作

工研院成功利用LPCVD系統沉積出高品質的多晶矽薄膜， iV_{oc} 為 720 mV 、 J_0 為 10 fA/cm^2 ，並將其整合於元件之中。在製作元件正/背面的電極前，我們先模擬計算獲得Finger最佳數量設計，再採用不同的銀漿來進行網印製程，之後再配合最佳化的燒結條件實驗及電池效率量測。電池結構如圖四，使用M2 (244.3 cm^2) n-type單晶矽晶片製作成雙面(Bi-facial) TOPCon太陽能電池。

實驗設計為了解燒結溫度對電池填充因子(FF)及轉換效率等特性之影響，故分為7組測試如表一，結果獲得電池最佳平均轉換效率達23.2%。茲將表一數據分析於下。

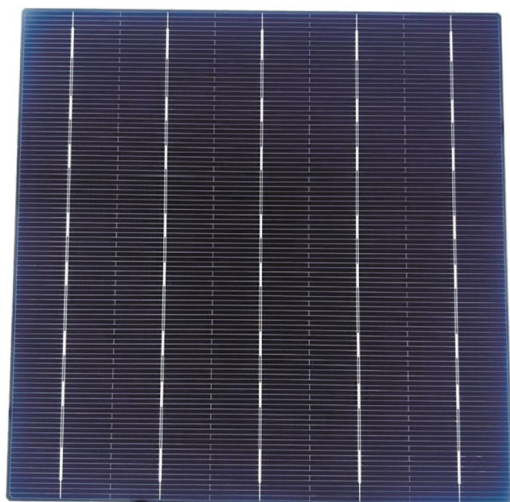
①第1和5組設計目的在比較燒結爐傳輸帶速效應，第5組是帶速較快者可顯著提升 V_{oc} 及FF，進而提升電池轉換效率。

②第2和4組設計目的在比較燒結爐第5區溫度效應，第2組是燒結爐第5區溫度較低者可顯著提升 J_{sc} 及FF，進而提升電池轉



▼表一 以不同燒結條件組合所試作的電池平均IV電性

Group	Temp. Zone 4/5/6	Speed	Avg. J_{sc} (mA/cm ²)	Avg. V_{oc} (mV)	Avg. FF (%)	Avg. Eff. (%)	Avg. R_s (mΩ)
1	低/高/高	慢	40.58	700.38	80.22	22.80	4.4
2	低/高/最高	快	40.62	698.43	80.77	22.91	4.1
3	高/高/高	快	40.79	702.25	81.10	23.23	4.2
4	低/最高/最高	快	40.44	697.06	80.19	22.60	4.2
5	低/高/高	快	40.54	701.63	81.27	23.12	4.3
6	低/中/中	快	40.50	703.63	79.20	22.57	5.0
7	低/低/低	快	40.58	704.05	65.67	18.74	10.9



▲圖五 採用TOPCon技術之新型異質界面太陽能電池片

換效率。

③第3和5組設計目的在比較燒結爐第4區溫度效應，第3組是燒結爐第4區溫度較高者可顯著提升 J_{sc} ，進而提升電池轉換效率。

④第4~7組設計目的在比較燒結溫度峰值，第4組燒結溫度峰值最高，隨組次號碼遞增而降低溫度峰值直到第7組溫度最低。

觀察到電池轉換效率隨溫度升高而提升，第4組過高峰值使 R_{sh} 變差而影響電池轉換效率。

在政府積極推動綠能建設及經濟部能源局支持下，工研院與茂迪公司共同投入TOPCon新型異質界面太陽能電池開發技術，利用工研院綠能所太陽光電實驗室及南科茂迪產線兩個平台的技術整合、交互測試，新型異質界面太陽能電池技術已展現卓越成果(圖五)。目前試量產電池轉換效率平均已達23.2%，模組功率達360 W。此成果顯示台灣累積的技術能力相當扎實，下個世代的太陽光電產業著重在技術開發，而非與中國比拚「製造」。面對後疫情時代，全球相關產業已重新布局洗牌，各產業不再依賴中國製造，再加上歐洲發布「歐洲綠色協議」，目標於2050年達成歐洲成為首個零碳大洲，在能源轉型的需求增強下，台灣有機會以高值化創新技術與國際鏈結，再創太陽光電新契機⁽⁷⁾。

結 論

TOPCon技術只需要增加矽薄膜沉積設



備，便可輕易地以目前主流PERC量產線升級。掌握關鍵摻雜多晶矽層良好的鈍化特性以及背面金屬接觸結構具有進一步提升轉換效率的空間，本單位在新型異質界面太陽能電池技術已展現卓越成果，TOPCon電池平均轉換效率最佳達到23.2%。未來如進一步突破TOPCon量產製程的技術門檻，將可藉由高效率及低成本，協助太陽光電產業轉型再出發，以優質技術突破價格戰困境。☒

誌謝

本研究承蒙經濟部能源局（計畫109-D0901）支持及茂迪股份有限公司合作，謹此致謝。

參考文獻

1. 31st European Photovoltaic Solar Energy Confer-

ence and Exhibition.

2. Tao, Y.; Upadhyaya, V.; Jones, K.; Rohatgi, A. AIMS Materials Science 2016, 3(1), 180-189
3. P Padhamnath, A Khanna, N Nandakumar, N Nampalli, V Shanmugam, A G. Aberle and S Duttagupta, "Development of thin polysilicon layers for application in monoPoly cells with screen-printed and fired metallization," Solar Energy Materials & Solar Cells 207 (2020) 110358
4. S. Glunz, et al., Passivating and carrier-selective contacts-Basic requirements and implementation, in: 44th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, PVSC), 2017.
5. F. Feldmann, M. Bivour, C. Reichel, M. Hermle, S.W. Glunz, Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics, Sol. Energy Mater. Sol. Cells 120 (2014/01) 270-274.
6. F. Feldmann, et al., Evaluation of TOPCon technology on large area solar cells, in: 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 2017.
7. 工商時報(2020/07/13)，<https://www.chinatimes.com/newspapers/20200713000328-260204?chdtv>

太陽光電系統/電廠第三方檢測評估服務

Third-party Photovoltaic Systems Testing and Assessment Services

工研院綠能所 太陽光電技術組

☀ PV系統生命週期第三方認證服務

PV系統規劃、設計、施工階段之文件審查與評估
PV系統施工現場檢查與測試
PV系統現場竣工檢查與測試

☀ 已完工系統定期檢測評估服務

PV系統相關文件審查
PV系統現場檢查與測試

☀ 系統檢測服務實績

合計國內超過50MW、海外50MW之系統檢測服務實績
提供系統/電廠保險、驗收、買賣或定期性能確認參考