



電荷引發電場鈍化應用於太陽能電池

Application of Charge Induced Electric Field Passivation Effect on Silicon Solar Cell

楊智程 C. C. Yang¹、柳水金 S. C. Liu²、陳松裕 S. Y. Chen³、
林昭正 C. C. Lin⁴、陳柏勳 P. H. Chen⁵、張鼎張 T. C. Chang⁶
國立中山大學(NSYSU) 材料與光電科學學系 ¹博士生
工研院綠能所(GEL/ITRI) ²研究員、³專案經理
國研院台灣半導體研究中心(TSRI/NARLabs) ⁴副研究員
中華民國海軍軍官學校(R.O.C. NAVAL ACADEMY) ⁵助理教授
國立中山大學(NSYSU) 物理系 ⁶講座教授

矽基太陽能電池為目前市場主流，相關研究單位也投注了相當多的研究，期望有更高的光電轉換效率，達到更好的性價比。為了提高光伏元件(Photovoltaic Device)的光電轉換效率，必須要降低光吸收介質的光電子復合率。本篇將著重於改良背表面鈍化太陽能電池結構(PERC)，並藉由電性模擬與可靠度分析引入適當的電荷儲存層，以電場控制使光電流能有效被汲取再利用，實現高光電轉換效率之太陽能電池。

The development of green energy industry points out that the current silicon-based solar cells are the mainstream in the market. The relevant research units have also invested a lot of resource, because it is expected to have higher photoelectric conversion efficiency, and achieve high performance and low cost application. In order to improve the conversion efficiency of the photovoltaic device, it is necessary to reduce the carrier recombination rate of the light absorbing medium. This work will focus on improving the back surface passivated solar cell structure (Passivated Emitter Rear Cell; PERC), and introduce appropriate charge storage layer by electrical simulation and reliability analysis, so that the photocurrent can be effectively retrieved and reused by electric field control. A solar cell that achieves high photoelectric conversion efficiency.

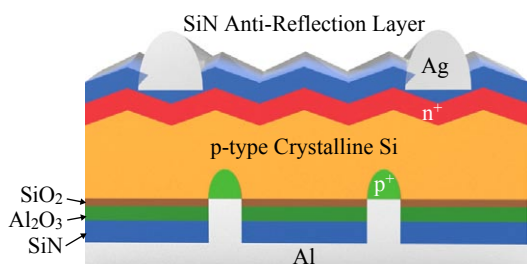
關鍵詞/Key Words

太陽能電池(Solar Cell)、電荷儲存層(Charge Storage)、背電場效應(Back Surface Field; BSF)

前言

近年來綠色能源產業快速發展，全世界皆投入大量資源研究，可望在未來取代傳統石化發電等高污染性能源。綠能

產業包括太陽能發電、風力發電、生質能源，其中太陽能發電技術扮演極為重要的角色。太陽能電池(Solar Cell)可分為：矽基板太陽能電池(Silicon Based)⁽¹⁻⁵⁾、銅銦鎵硒太陽能電池(CIGS)⁽⁶⁾、染料敏化太陽能電池



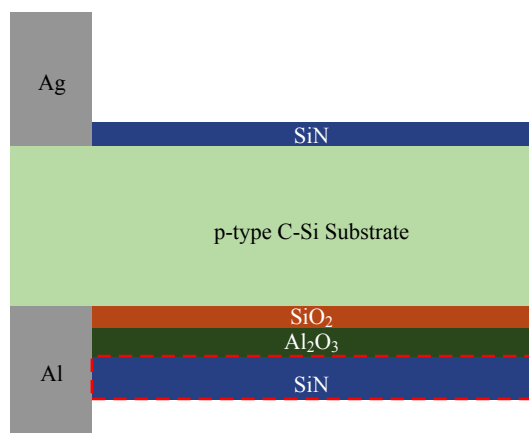
▲圖一 PERC太陽能電池結構

(Dye-sensitized Solar Cell)⁽⁷⁻⁸⁾、代串疊型電池(Tandem Cell)⁽⁹⁻¹⁰⁾。本篇將以矽基板太陽能電池中的鈍化射極與背接觸太陽能電池(Passivated Emitter Rear Cell; PERC)進行光電轉換效率相關研究。

矽基太陽能電池的原理為透過太陽光照射元件提供能量並產生電子-電洞對，進而產生電流。然而，太陽能電池效能可能受到元件表面反射程度、半導體界面缺陷、元件整體電阻等三大因素影響，使光電轉換效率降低。為了降低太陽光照射表面產生的反射光損失，會利用氫氧化鉀溶液對平坦的矽晶表面進行蝕刻處理，製作出金字塔結構，使表面粗糙化，藉以降低表面光反射率至10%。除了降低光反射率，降低半導體界面缺陷造成的載子復合損失亦是相當重要。

改良PERC太陽能電池(圖一)被認為是目前最具發展潛力的太陽能電池。增加目前PERC太陽能電池效率的方法，主要有兩種：①增加光吸收效率；②減少載子復合率。為了減少載子的光電復合率，使用背向表面內建電位(Back Surface Field; BSF)結構是一項有效的方法。

改變背向表面內建電位，將能使與塊材極性相反的載子改變行徑方向，降低電



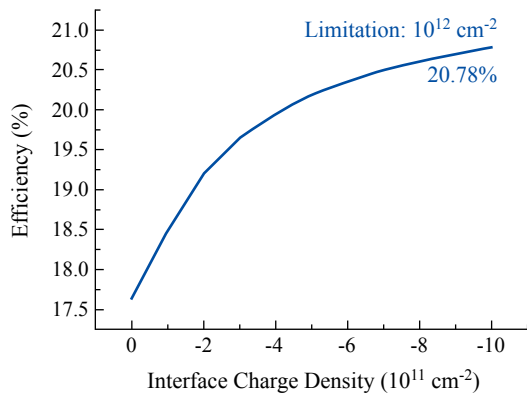
▲圖二 TCAD模擬元件之SiN層存入電子

子電洞復合之機率。在多數的研究中，大多使用寬能隙材料或是異質界面結構來形成BSF，但在本篇中，我們創新使用電荷儲存層(Charge Storage)來達成BSF的效果。該電荷儲存技術在記憶體元件(Memory Device)有廣泛的研究基礎，包括Nano Dot、SONOS，對電荷寫入與儲存，以及儲存後的揮發性、可靠度也研究甚深。本篇提出適當的電荷儲存層結構，使其在電池背向鈍化面儲存電荷，讓光產生之少數載子能夠被引導至極性相同的塊材，不被多數載子復合，使發光效率能夠提升。

PERC太陽能電池之基本結構與模擬結果

1. 基本結構

圖二為我們使用TCAD模擬PERC太陽能電池效率的基本結構。在本結構中，由於照光產生的電子-電洞對會形成於單晶矽中，我們希望電子可以往銀電極的方向移動，避免被下方p型半導體的多數載子-電洞



▲圖三 表面電荷對PERC太陽能電池效率影響模擬圖

復合，於是我們使電荷注入SiN層，使得該太陽能電池的背面產生表面的內建電位，形成一個反向的電場，藉此減少流向下方電極的電子數量，便可以提高該太陽能電池的效率。

2. 模擬結果

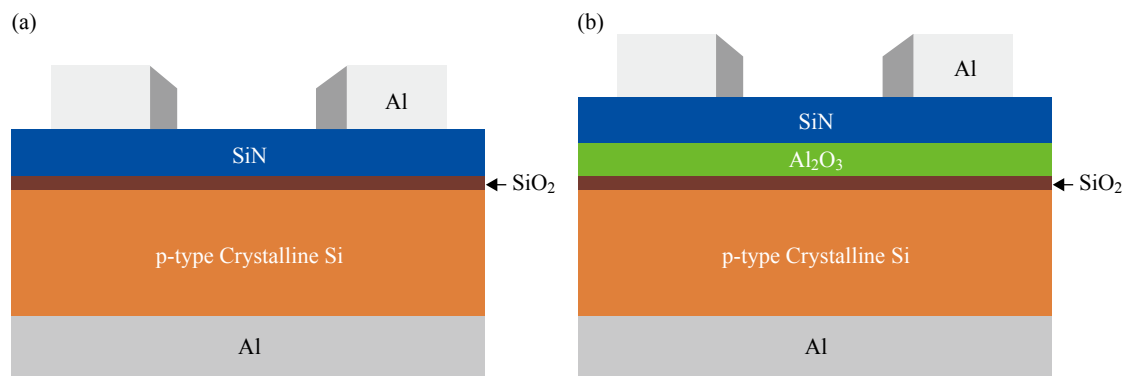
在確立該電荷儲存層確實可以儲存電荷後，接著使用TCAD模擬軟體進行模擬。在模擬過程中，加入不同數量的電荷至電荷儲存層中，接著觀察電荷數目對太陽能

電池效率的影響。模擬結果顯示，在有表面電荷的情況下（圖三），PERC太陽能電池的效率可以被提升至20.8%，是因在電荷儲存層中的電子產生有效的背向表面內建電位，使照光產生的電子更容易往上電極移動，並增加效率。

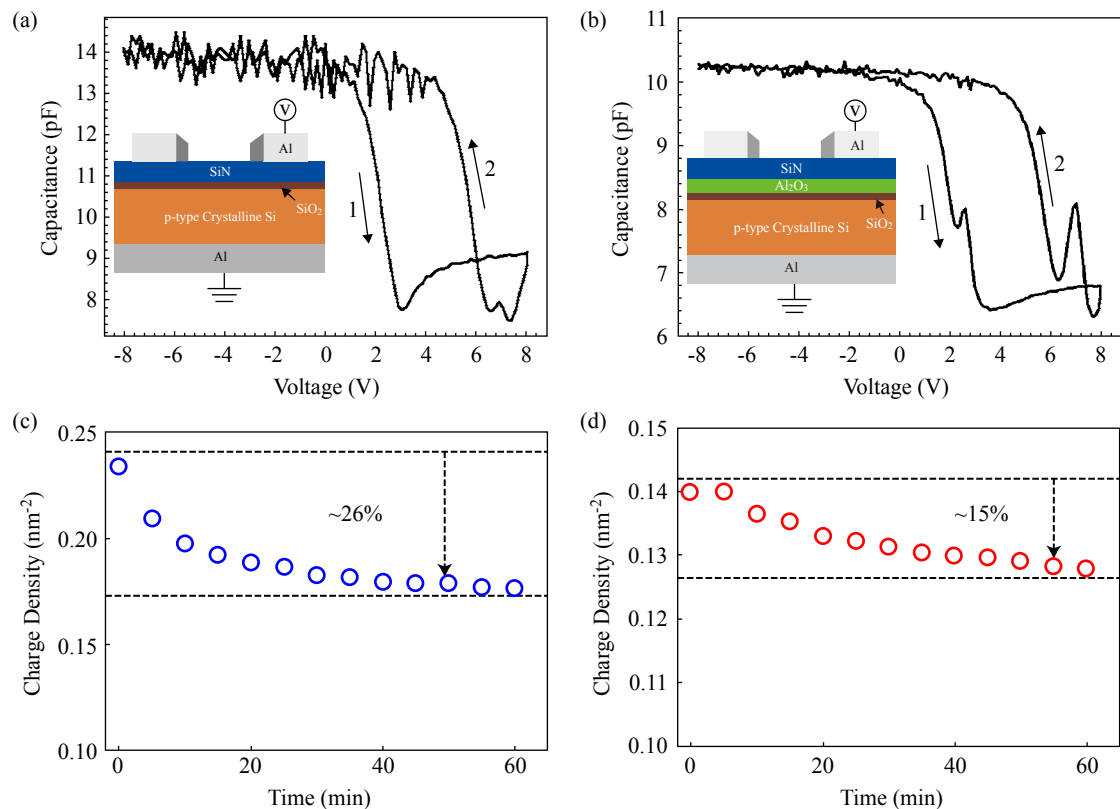
電荷儲存能力測試、元件整合及電性量測

1. 電荷儲存能力測試

根據上述模擬結果可知，元件加入電荷儲存層後可提升光電轉換效率，且隨著電荷儲存能力增加，轉換效率也會隨之上升。因此，我們將電荷儲存層整合進入元件當中，預期能提升效率。為了分析在整合至元件之前電荷儲存層儲存電荷之能力，故製作出金屬-氧化物-半導體(Metal-Oxide-Semiconductor)之MOS電容量測元件，如圖四。使用此MOS結構的另一個好處是該結構匹配原本PERC太陽能電池的製程，因此不需要增加任何製程步驟即可完成該電荷儲存結構。除了SiN/SiO₂結構外（圖四(a)），為了增加SiN保存電荷的能



▲圖四 (a)雙層(SiN/SiO₂)；(b)三層(SiN/Al₂O₃/SiO₂)電荷儲存樣品結構



▲圖五 雙層(SiN/SiO₂)結構之(a)電容-電壓圖；(c)電荷儲存耐久度。三層(SiN/Al₂O₃/SiO₂)結構之(b)電容-電壓圖；(d)電荷儲存耐久度

力，在SiN薄膜下方加入一層氧化鋁薄膜，預期能降低電荷的流失（圖四(b)）。製程步驟上，我們在基板上利用熱氧化的方式沉積1 nm的氧化矽(SiO₂)，接著將其中一部分樣品用原子層氣相沉積系統(Atomic Layer Chemical Vapor Deposition; ALCVD)沉積10 nm的氧化鋁(Al₂O₃)，最後再一起使用電漿輔助化學氣相沉積系統(Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition; PECVD)沉積100 nm的氮化矽薄膜，最後再使用電子束蒸鍍系統(E-Beam)沉積100 nm的Al作為電極。

圖五為雙層(SiN/SiO₂)及三層(SiN/Al₂O₃/SiO₂)電荷儲存樣品在電壓來回掃描

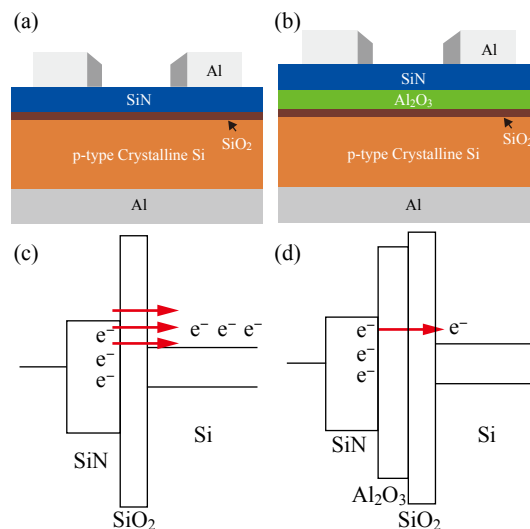
下的電容與電壓圖，以及電荷儲存耐久度測試。我們以上電極施加偏壓，下電極接地的方式，先由-8 V電壓掃描至8 V後，再施加反向偏壓，由8 V反向掃回-8 V進行量測，並分析電荷儲存層儲存電荷的能力。從圖五(a)及(b)可以清楚看到，當電壓回掃時，電容曲線呈現一個遲滯現象。該遲滯現象顯示出薄膜內部有電子的注入，隨著電壓的增加，電子被強制注入在SiN儲存層內，所以造成相同電壓下電容增加的情形。而電子注入的情況可以藉由計算兩條曲線中間的遲滯面積得到，在雙層結構中可以得到儲存的電荷量為每平方公分約有



10^{12} 個電子，而在三層結構中也可以依照這種方法得到實驗結果。三層電荷儲存層的實驗結果顯示，儲存電荷量與雙層結果相比之下稍微下降，不過差異整體而言還是不大，皆為同一個數量級。

在確定電荷確實可以藉由電壓注入儲存層後，接著要關注的是該電荷的儲存時間，如果儲存的電荷流失太快，便會使BSF的效果大大降低，也會影響到太陽能電池效率的改善情形。如圖五(c)及(d)所示，在儲存時間(Retention)的測試中，無論是雙層或是三層結構的儲存層都能保有一個小時以上的電荷儲存能力。值得一提的是，在三層結構的結果中，電荷的衰減幅度約為15%，而雙層結構衰減幅度約為26%，顯示三層結構的電荷儲存可靠度較雙層結構佳，推測原因應該為 Al_2O_3 提供一個能障，使得電子更不容易因為穿隧效應脫離儲存層SiN，但也因此，三層結構在相同電壓下能注入的電子數也比雙層結構還要低。

因此，我們將為雙層(SiN/SiO₂)及三層(SiN/ Al_2O_3 /SiO₂)電容結構畫成能帶圖(如圖六)，並以能帶圖說明雙層及三層電荷儲存樣品在電荷儲存能力及耐久度上的差異。由圖六(a)及(c)可清楚得知，若以SiN作為電荷儲存層，雖具有儲存電荷的能力，但在缺少 Al_2O_3 薄膜的情況下，電子易由SiO₂層穿隧使電荷流失，降低電荷儲存耐久度。若在SiN及SiO₂薄膜間加入一層 Al_2O_3 層(圖六(b)及(d))，由於氧化鋁薄膜厚度較厚，且材料能隙較SiN大，故可透過氧化鋁阻擋SiN層的電子流失，並增加電荷儲存的耐久能力。因此我們會在後續實驗將三層(SiN/ Al_2O_3 /SiO₂)電荷儲存結構整合至PERC太陽能電池中，並預期提升光電轉換特性。



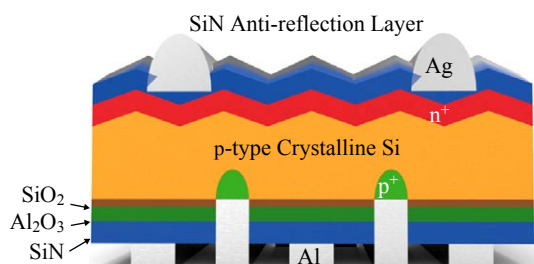
▲圖六 雙層(SiN/SiO₂)及三層(SiN/ Al_2O_3 /SiO₂)結構能帶示意圖

2. 元件整合

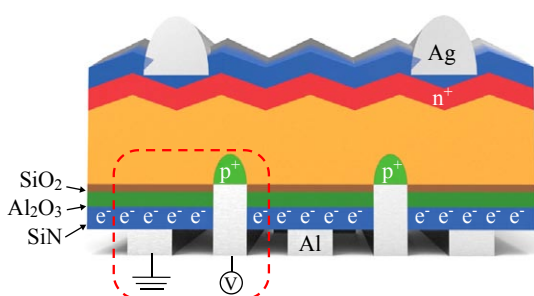
由上述實驗可知，三層(SiN/ Al_2O_3 /SiO₂)結構之電荷儲存能力及耐久度最佳。為了將電荷儲存結構整合至PERC太陽能電池中，我們須將此結構整合至元件下方保護層，且重新定義元件下電極圖樣。圖七為電荷儲存層整合PERC太陽能電池結構圖，為了使電荷存入儲存層中，下電極圖樣由原先大面積網印方式取代成條紋狀設計，並透過下電極施加電壓的方式將電荷注入儲存層中，達到儲存電荷的效果，並預期提升元件光電轉換效率。

3. 電性量測

在量測太陽能電池前須將電荷存入儲存層中，由圖八可知電荷儲存層的操作模式。我們將下電極圖樣區分為連接SiN端及連接p⁺端，以SiN端接地，p⁺端施加負偏壓



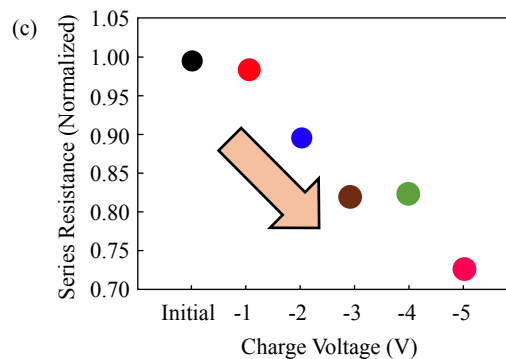
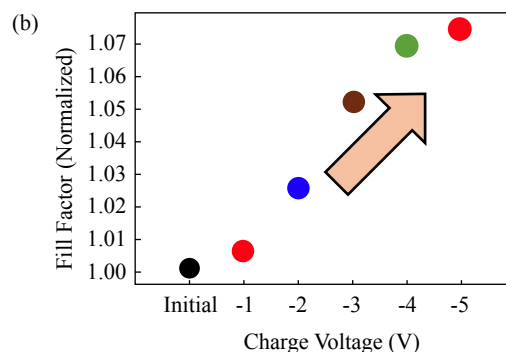
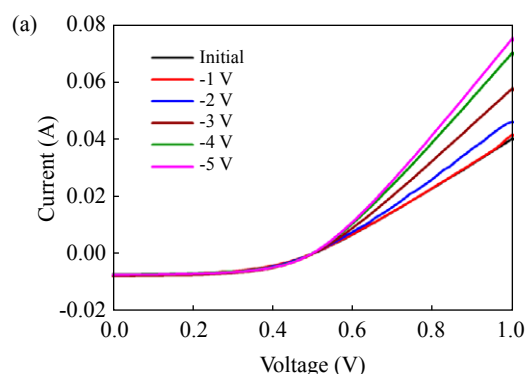
▲圖七 電荷儲存層整合PERC太陽能電池結構圖



▲圖八 元件儲存電荷方式示意圖

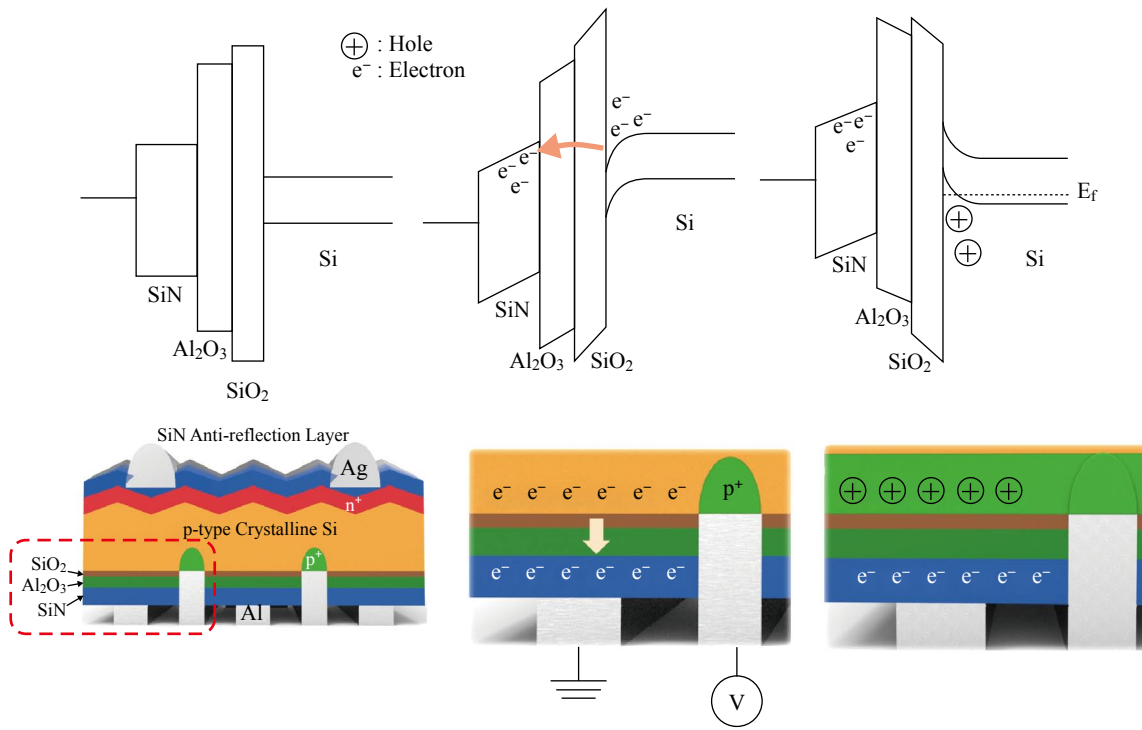
的方式使電荷存入SiN薄膜中，達到電荷儲存的效果。

為了分析電荷存入PERC太陽能電池後帶來的特性變化，我們對元件進行光性量測分析。我們分別在未加偏壓(Initial)下，以及施加不同儲存電荷偏壓下，分別為-1 V、-2 V、-3 V、-4 V及-5 V的情況下進行電性量測。透過圖九(a)可看出，在未施加偏壓的情況下，元件量測到的電性曲線較為倒塌；而當儲存偏壓施加至-1 V時，電性曲線與Initial幾乎重疊，並沒有明顯提升；而將電壓提升至-2 V時，電性曲線明顯往上提升，證實電荷的儲存確實能有效提升元件特性；隨著儲存偏壓由-3 V升高至-5 V，電性曲線也隨之上升，這也證實隨著儲存的電荷量增加，元件特性也隨之上升。我們



▲圖九 施加不同儲存電壓下之電性量測圖(彩圖請見材料世界網<https://www.materialsnet.com.tw>)

更進一步分析填充因子(圖九(b))及串聯電阻(圖九(c))，隨著儲存電荷的偏壓增加，填充因子也隨之增加，且串聯電阻也隨之降低。由於串聯電阻的降低，我們推測電荷的儲存亦會使原先p-type層變為p⁺層，並降低整體元件電阻。



▲圖十 電荷儲存層對應於太陽能電池能帶圖

接著，透過能帶圖來說明電荷儲存層如何提升PERC太陽能電池光電轉換特性。圖十為電荷儲存層SiN/Al₂O₃/SiO₂/Si能帶圖，透過於p⁺端施加負偏壓的方式，將電荷穿透過Al₂O₃及SiO₂薄膜存入SiN內，達到電荷儲存的效果，並且可利用Al₂O₃及SiO₂薄膜阻擋電荷流失，進而增加電荷耐久度。由於負電荷存於SiN層內，會使整體能帶往上抬升，進而使p-Si端聚積電洞。而電洞的聚積除了能使整體電阻降低之外，同時也在下電極形成整層背向表面內建電位，增加整體表面電位的面積，表面電位面積的增加也改變載子行徑的方向，並降低載子復合機率，使太陽能電池光電特性提升。我們也由電性量測曲線得到相同的結果，且從串聯電阻結果也可得到驗證。

結 論

使用電荷儲存的方式是一種斬新且能有效提升PERC太陽能電池效率的方法，該儲存技術不僅在其他領域已發展相當成熟，更能匹配目前PERC太陽能電池的製程，在不需額外增加太多成本的情況下，就能將效率提升。該電荷儲存在實驗結果中具有良好的儲存特性以及儲存時間，相信該技術成熟後，能使PERC太陽能電池邁向一個新的里程碑，並為潔淨且環保的綠色能源注入斬新的希望。

誌 謝

本研究承蒙經濟部能源局計畫(108-D0104)及工研院綠能所支持，謹此致謝。



參考文獻

1. C. C. Yang, H. C. Chiang, P. H. Chen, Y. T. Su, W. C. Su, C. C. Lin, S. P. Huang, H. X. Zheng, H. C. Huang, S. Y. Chen, C. C. Lin, J. W. Huang, T. M. Tsai, and T. C. Chang, "Integrating a Charge Trapping Layer in Passivated Emitter Rear Contact Cell to Enhance Efficiency," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 39, no. 7, pp. 983-986, Jul. 2018.
2. Jerry G Fossum, "Physical operation of back-surface-field silicon solar cells," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 24, no. 4, pp. 322-325, 1977.
3. Shreesh Narasimha, Ajeet Rohatgi, and AW Weeber, "An optimized rapid aluminum back surface field technique for silicon solar cells," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 46, no. 7, pp. 1363-1370, Jul. 1999.
4. H. L. Chen, P. H. Chen, T. C. Chang, T. F. Young, M. C. Wang, C. F. Ai, T. M. Tsai, K. C. Chang, M. C. Chen, Y. T. Su, C. C. Yang, and C. C. Lin, "Super Critical Fluid Technique to Enhance Current Output on Amorphous Silicon-Based Photovoltaic," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 38, no. 10, pp. 1401-1404, Oct. 2017.
5. M. C. Wang, T. C. Chang, S. W. Tsao, Y. Z. Chen, S. C. Tseng, T. C. Hsu, D. J. Jan, C. F. Ai, and J. R. Chen, "n(+)-Doped-layer free amorphous silicon thin film solar cells fabricated with the CuMg alloy as back contact metal," *Solid-State Electronics*, vol. 57, no. 1, pp. 73-75, Mar. 2011.
6. M Kaelin, D Rudmann, and AN Tiwari, "Low cost processing of CIGS thin film solar cells," *Solar Energy*, vol. 77, no. 6, pp. 749-756, 2004.
7. Anders Hagfeldt, Gerrit Boschloo, Licheng Sun, Lars Kloo, and Henrik Pettersson, "Dye-sensitized solar cells," *Chemical reviews*, vol. 110, no. 11, pp. 6595-6663, 2010.
8. Matt Law, Lori E Greene, Justin C Johnson, Richard Saykally, and Peidong Yang, "Nanowire dye-sensitized solar cells," *Nature materials*, vol. 4, no. 6, p. 455, 2005.
9. Jianjun He, H Lindstrom, Anders Hagfeldt, and S-E Lindquist, "Dye-sensitized nanostructured tandem cell-first demonstrated cell with a dye-sensitized photocathode," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 62, no. ARTICLE, pp. 265-273, 2000.
10. Jin Young Kim, Kwanghee Lee, Nelson E Coates, Daniel Moses, Thuc-Quyen Nguyen, Mark Dante, and Alan J Heeger, "Efficient tandem polymer solar cells fabricated by all-solution processing," *Science*, vol. 317, no. 5835, pp. 222-225, 2007.



工研院建設之「沙崙綠能科技示範場域」

針對創能（太陽光電）、節能、儲能、系統整合四大技術領域，打造我國首座完整綠能應用的測試與驗證場域，帶動綠能產業發展及建立在地化產業聚落

連絡窗口 梁蜀昀

TEL: (06) 3032050 #530 / E-mail: marisa515@itri.org.tw