

利用奈米技術發展 第三代太陽能電池

文・圖／何志浩

日本的福島核災又再次讓人們了解到，安全與便捷能源之急迫需求，因此發展再生能源不是口號，而是行動，且勢不可遏。再生能源當中，以臺灣地處熱帶到亞熱帶的環境，日照充足，且光電工程技術為全球領先群，發展太陽能產業挾天時、地利與人和之勢，假以時日必成國際領導地位。

材料上來說，凡經光照而能產生電能者，皆可為太陽能電池的材料，如常見的非晶矽、多晶矽、或稱三五族（如GaAs, GaN）、二六族（如CdTe, CdS）等半導體材料，目前太陽能發電的成本約為1-2 W/美金^[1]，離石油發電的成本0.5 W/美金雖有一步之遙，惟並非遙不可及。透過數十年來各領域科學家們的努力，現今透過整合不同製程，已大幅提升電池對光的反應和吸收，提升光電轉換效率，連帶的製程成本下降，包羅萬象的太陽能電池應用產品，已出現在我們日常生活中。以目前技術進步趨勢，15年內即有機會達到低於石油發電成本，並取代成為主流發電能源。

太陽能電池分類

第一代太陽能電池發展最長久，技術也最成熟，且已為商品化主流代表，市面上所販售的大都是此類，材料上以單晶矽與多晶矽為大宗。第二代薄膜太陽能電池以薄膜製程來降低電池的材料成本。第三代電池與前代電池最大的不同是可以利用元件結構之設計與新材料的引入，來提高效率與降低成本。例如，製程中導入有機物無機混成技術和奈米製造技術來提高電池效率，像是染料敏化太陽能電池、高分子無機混成太陽能電池等。

次波長結構的抗反射

當光進入元件會產生光線的反射，降低元件光電轉換效率，從物理機理來看，為抑制光線反射，空氣和表面材料之間的折射率應該逐漸減小。而奈米化的表面結構就如同在空氣之間存在一種漸變折射率的材料。理想情況下，進入元件的光不會反射，所以奈米化的表面結構可提升對光的吸收率，這就是次波長結構的抗反射原理。

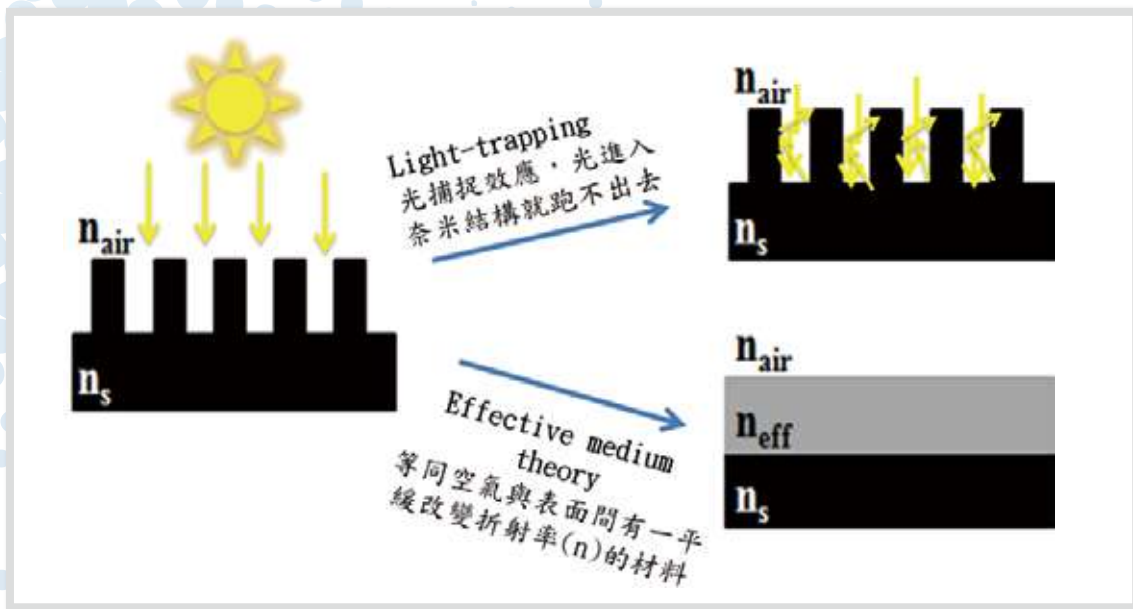


圖1：次波長（subwavelength）結構之光捕捉原理。

綠色光電實驗室

筆者於綠色電能研究中心主持綠色光電實驗室，利用奈米尺度下對光的行為之瞭解，進而應用於奈米結構之新式太陽能電池，尤其對利用氧化鋅奈米線與矽奈米線作為光捕捉層卓有研究，可調控週期、長度，以及直徑隨深度改變的奈米線，從不同極化方向的光入射來做探討，為奈米技術與第三代太陽能電池做了完美的結合。

1. 矽基奈米結構電池

矽基太陽能電池，是目前生產最多且最普及的太陽能電池，但由於材料製程過程複雜，所以成本仍居高不下，因此如何利用低成本的方式提高其效率，成了大量普及的關鍵。我們利用改變蝕刻溶液之溫度與濃度，使矽奈米柱與基板介面產生微米起伏，以及矽奈米線的雙重次波長奈米結構，不需增加任何新材料，使元件達到最佳的光捕捉效率，提高其光電轉換效率。奈米化後的電池之電流密度由17.6 mA/cm²提升至32.7 mA/cm²，提高幅度達85.8%，其成果已領先世界研究團隊，部分結果也在頂尖期刊*Energy Environ. Sci.*發表並刊登封底^[2]。

2. 利用氧化鋅奈米結構提升砷化鎵電池效率

砷化鎵電池有較高的飽和電子速率及電子移動率，光電轉換效率優於矽基電池，但成本也高，普及不易，在此利用特殊針尖狀的氧化鋅自組裝奈米結構，結構特殊的光學特性可



圖2：(a)矽電池表面微米起伏及矽奈米線與(b)表面單奈米線光進入元件分布模擬比較圖。(c)不同實驗條件之矽電池電流與電壓表現圖。

有效地作為其抗反射層，提高光電轉換效率，由14.5 %提升至19.1 %，效率提高達32 %之多，加上低製程成本的優點，可為商業應用利基。此一水熱法奈米自組裝技術具有大量製造、低溫製程及大面積特性之水熱法，還可廣泛應用在銅銦鎵銨太陽能電池等可撓式基板材料上。成果已發表於頂尖期刊*Advanced Energy Material*並獲刊該期插畫 (frontispiece) [3]。

3.氮化物量子井電池

氮化物半導體的直接能隙 (direct bandgap) 與寬廣的能隙範圍，讓它成為太陽能電池的理想材料之一。氮化物在光伏特元件上的應用潛力，吸引許多科學家競相投入資源開發，但受制於晶格缺陷過高，現階段氮化物太陽能電池的轉換效率還不到商業應用的水準[4]。我們設計出最佳化的量子井與利用奈米線的次波長特徵，使其表面的抗反射層，在可見光的波長範圍內，達到最高的穿透能力，光電轉換效率由0.44 % 提高至0.60 %，幅度達36.36 % 之多，對氮化物太陽能電池的全頻譜吸收提供一個可能的方向[5]。

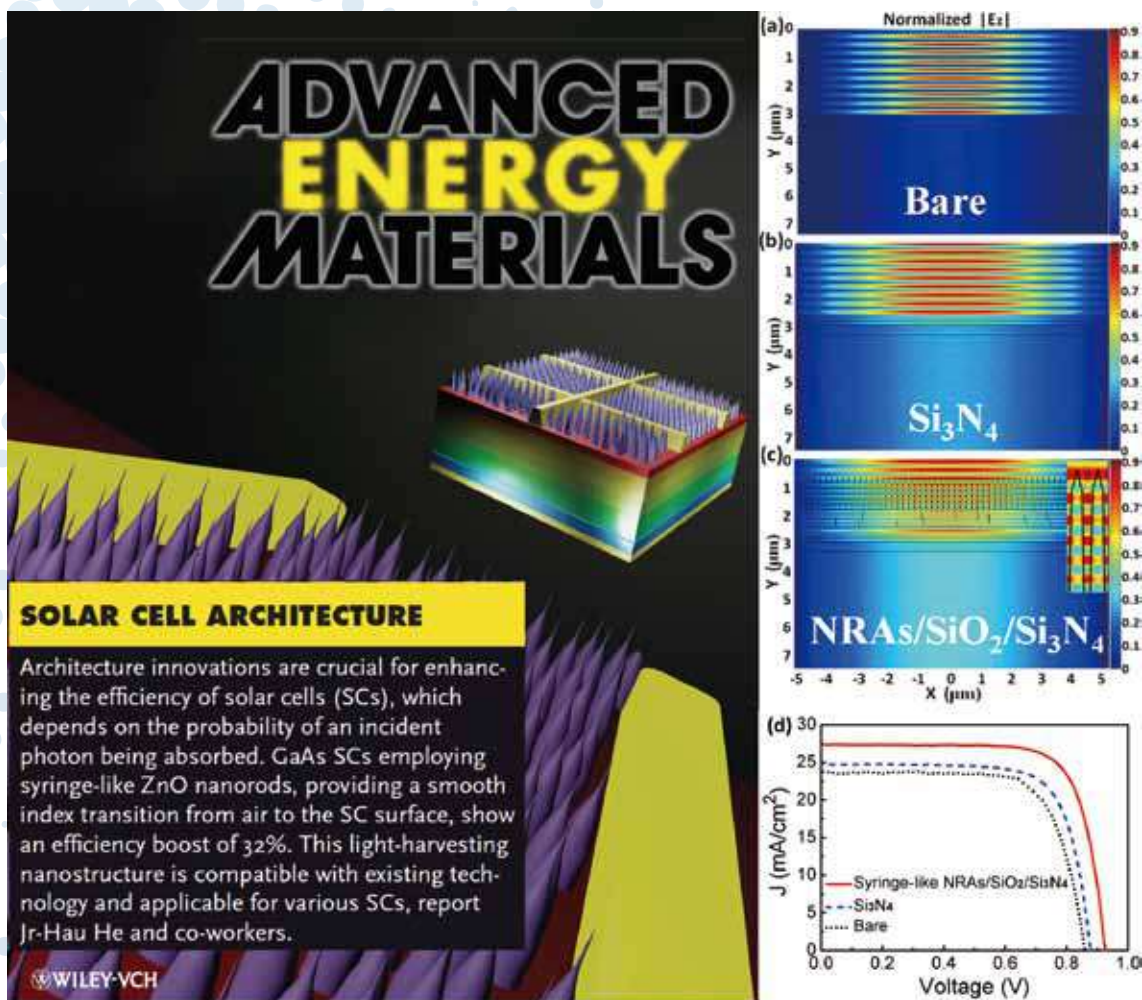


圖3：(a-c) 光進入抗反射層結構之分布模擬比較圖。(d) 不同抗反射層結構砷化鎵電池之電流與電壓表現圖。

4.新式有機無機混成電池

有機無機混成太陽能電池具有低成本、低溫製程、可撓、製程大面積等優點。結構上大多以施體 (donor) 3-己基吩 (P3HT) 和受體 (acceptor) 富勒烯衍生物PCBM混合組成光電轉換的主動層，此介面照光產生電。然而受限於施體和受體材料互相交錯不易，有機分子的載子傳輸率低等因素，此類電池之光電轉換效率低。因此我們結合單晶矽奈米線與有機材料，利用單晶之矽奈米線陣列結合P3HT形成核殼 (core-shell) 奈米線去製作混成太陽能電池，而其表面特殊奈米結構除提供大反應面積外，亦能增強光捕捉功能，光電轉換效

率從0.75 %增加到0.97 %，提升幅度達29.3 %，此結構異質介面之創新光捕捉理念可為各種新式太陽能電池所應用。

太陽光電研發為先

臺灣已有30年以上在半導體、顯示器等產業之經驗，相關之高優質人力資源累積將是能源產業的最佳基石。然而，在投資門檻不高、有現成生產線（turnkey）可買、中國政府大規模補助下，臺灣要立足太陽光電產業必須重視研發，以解決“提升效率”與“降低成本”的問題。■（本專題策畫／臺大綠色電能研究中心陳德玉主任）

參考文獻：

- [1] 《科學人雜誌》 <http://sa.ylib.com/read/readshow.asp?FDocNo=1146>
- [2] H.C. Chang, K.Y. Lai, Y.A. Dai, H.H. Wang, C.A. Lin, and J.H. He,* “Nanowire Arrays with Controlled Structure Profiles for Maximizing Optical Collection Efficiency”, Energy Environ. Sci. 4, 2863-2869 (2011)
- [3] L. K. Yeh, K. Y. Lai, G. J. Lin, P. H. Fu, H.-C. Chang, C. A. Lin, and J. H. He,* , “Giant Efficiency Enhancement of GaAs Solar Cells with Graded Antireflection Layers Based on Syringelike ZnO Nanorod Arrays,” Adv. Energy Mater., 1, 506-510 (2011)
- [4] K. Y. Lai, G. J. Lin, Y.-L. Lai, Y. F. Chen, and J. H. He,* “Effect of Indium Fluctuation on the Photovoltaic Characteristics of InGaN/GaN Multiple Quantum Well Solar Cells,” Appl. Phys. Lett. 96, 081103 (2010)
- [5] G. J. Lin, K. Y. Lai, C. A. Lin, Y.-L. Lai, and J. H. He,* “Efficiency enhancement of InGaN-based multiple quantum well solar cells employing antireflective ZnO nanorod arrays,” IEEE Electron Dev. Letts. 32, 1104-1106 (2011)



何志浩小檔案

2005年清華大學博士。2005至2007年，在清華大學與喬治亞理工學院，擔任博士後研究員。2007年2月，進入臺灣大學光電所與電機系任教。

以利用奈米科技為基礎之第三代太陽能與電阻式記憶體研究之主題，爭取到包括國科會、工研院、產業界計畫。也積極參與國際性學術活動，如擔任國際期刊的Editorial board member與Guest editor，並將其研究成果與國際同儕交流，受邀於許多國際會議演講、擔任國際會議的Organizer、Section chair、Committee等等，於國內外發表研究成果之餘，也積極向國高中師生作推廣。

已有4篇論文獲選為國際期刊封面，獲得26次國際報導，5篇文章獲得美國物理學會（AIP）精選至Virtual Journal of Nanoscale Science & Technology，1篇論文獲得皇家化學學會（RSC）精選至CrystEngSelects (a selection of articles of interest to crystal engineers from across the RSC journals)、3篇論文為物理學會（IOP）選為Most-accessed papers（>250 times/ quarter）。發表的論文至今被引用超過750次，H-factor為14。研究團隊與指導學生得到甚多獎項之肯定。