

出國報告（出國類別：其他）

2013 中國國際光伏技術大會暨美商 Sunprime 工廠參訪之出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：趙建昌 副研發師

派赴國家：大陸

出國期間：102年3月19日~102年3月24日

報告日期：102年4月12日

摘要

參加於大陸上海舉辦之「2013 中國國際光伏技術大會」，收集最新矽晶太陽電池研發資訊，並參訪低成本冶金級矽太陽電池製造廠 Sunprime，討論技術研發合作。3 月 20 日至 3 月 22 日在會議上收集資料，23 日至 Sunprime 工廠參訪交流。

近幾年來電池模組的成本下降速度遠高於 BOS(Balance of System)的成本下降速度，所以採用稍貴一點點的高效率電池來建立太陽能發電系統反而是有利的，可以降低 LCOE (Levelized Cost of Electricity) 而達到與市電同價的目標。實驗室中的高效率電池(>24%)尚採用許多昂貴半導體製程完成，無法進行量產，目前仍需克服的問題是如何將這些實驗室等級之矽太陽電池結構以及技術落實到產業界可以大量且低成本地生產，於是相關的簡化以及替代技術將被討論，這些方式目前在實際製作上仍趨複雜，但有一定的潛能可導入業界的標準生產流程。製作高效率矽太陽電池的方法多是圍繞著大家熟知的 IBC (Interdigitated Back Contact)、MWT (Metal Wrap Through)、HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin film)等結構進行討論，如何用最少最簡易的步驟來製作，其中的 MWT 由於可直接從目前的標準製程升級來製作，只需額外購入雷射機台以及多一雷射製程步驟，即可製作出背接觸式電極的太陽電池，方便封裝以及可以有效降低 CtM (Cell to Module) 的衰減，對於業界相當具有吸引力。除了電池結構之外，矽基板本身的品質也是生產高效率矽太陽電池的重要因素，矽晶高效率電池未來以 N 型基板的發展性最高(>21%)，N 型基板有高的 MCLT (Minority Carrier Lifetime 少數載子生命週期)、受金屬雜質影響較不明顯以及沒有 LID (Light-Induced Degradation) 效應等優點。但是目前無法大量生產的重要因素是 N 型矽基板的價格還太高，為了克服這項問題 CCZ (Continuous Czochralski)技術被研究，CCZ 簡單來說就是在拉晶的過程中加入適當份量的矽原料來維持矽熔化物的摻雜濃度，以此達到整個晶柱在生長過程中的摻雜濃度可以維持幾乎是固定的狀態，產量可大幅提升，降低製作成本。

在個別的技术發展方面可以發覺到使用雷射加工的製作方式常常被提出來討論，包括雷射開孔、雷射轉移電極、雷射熔融及雷射摻雜等技術，主要應用在電極與射極接面的製作上面，使用在電極製作上通常會配合電鍍製程來增加電極厚度，下降線電阻。改變電極的材料是另外的重點之一，由於銀漿現在約佔矽電池製作成本的 17%，減少銀漿的使用或以鋁、銅、錫等便宜的金屬來取代將可以大幅的降低成本。

最後行程是參訪 Sunprime 公司的生產工廠，這間工廠在 2011 年 9 月才定案動工建廠，2012 年 3 月就可以開始量產，這間公司生產類似 HIT 的矽太陽能電池，主要差異點在於使用了非常低純度的原料來製作矽晶片，採用大量的薄膜製程機台，製作過程溫度不超過 200 度，轉換效率可以達 17%。廠房內從購入的多晶矽原料開始，進行熔融鑄造矽晶錠，切除前後品質較差處後進行切片，接著是雙面的 HIT 結構製作，有 10nm 厚的非晶矽層作為鈍化層，最上下層則是 TCO 薄膜，根據前後的功函數需求不同，要使用不同的 TCO 材料，例如 ITO 與 GZO。參觀後進行研究技術的交流，Sunprime 為了降低製作開發成本，要使用電鍍銅的製程來取代銀漿印刷製程，根據他們的研究顯示關鍵在於金屬與 TCO 層之間的附著性不佳，如果能找出適合的方式或中間層可以解決這問題，將是一大突破。

目 次

摘 要

(頁碼)

一、目 的	1
二、過 程	1
三、心 得	26
四、建 議 事 項	27

一、目的

參加於大陸上海舉辦之「2013 中國國際光伏技術大會」，收集最新矽晶太陽電池研發資訊，並參訪低成本冶金級矽太陽電池製造廠 Sunprime，討論技術研發合作。

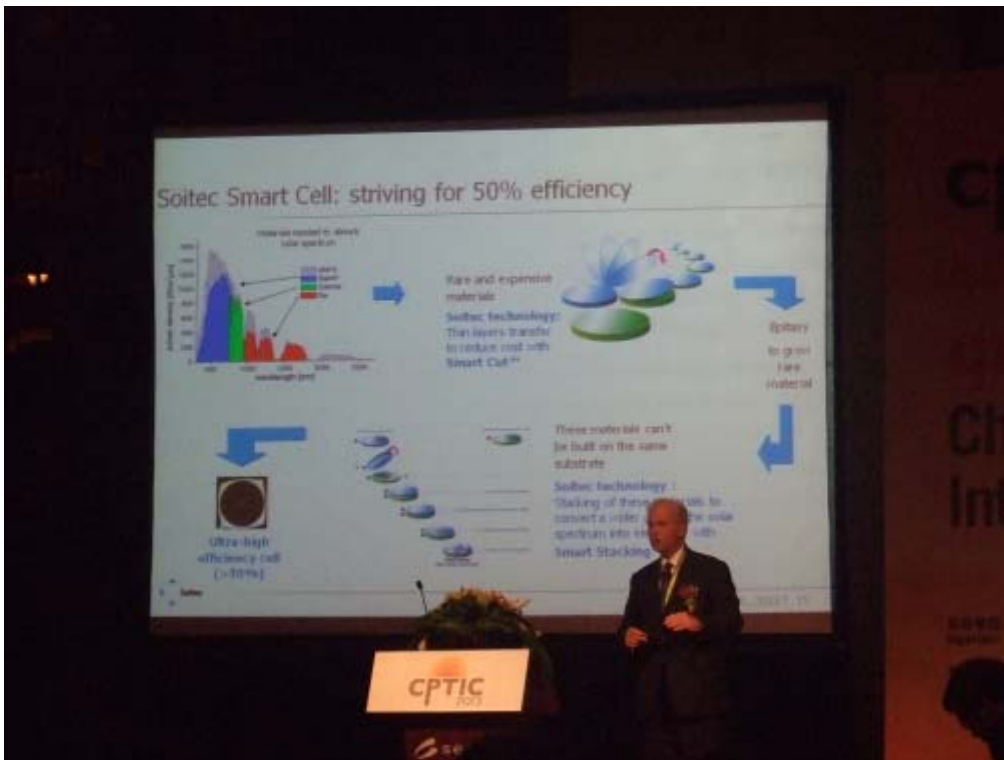
中國國際光伏技術大會(CPTIC)是中國規模龐大的光伏研發生產應用技術人員以及市場金融行業研究等專業人士打造的全新技术與商業交流平台，中國目前為世界最大的矽晶太陽電池製造地，參與此大會將能獲得最新矽晶太陽電池技術發展以及未來產業需求，並且可在會議期間尋找潛在的合作單位。Sunprime 公司採用低成本之冶金級矽製作太陽電池，為了更進一步降低成本，Sunprime 公司擬往銅電極製程發展，將由 Sunprime、國立中央大學以及本所進行三方面的電鍍鍍銅技術研發合作，將於 CPTIC 會後(3 月 23 日)協同張正陽教授前往 Sunprime 公司參訪並洽談三方可能的合作方式及相關細節。

二、過程

3/20 號早上八點半左右到達會場上海嘉里大酒店二樓宴會廳，這次 2013 CPTIC 會議由幾位在學術及產業界重量級人物進行演講及討論中展開，20 號早上的這個 Conference Keynote Session 共有三個主題，各進行 30 分鐘之演講，休息 15 分鐘後接著的是 Panel Discussion。

首先是 Soitec 公司 CEO Andre Jacques 先生就 *CPV Technology a major Energy Source for the Sunbelt* 這主題進行演講，由於 CPV(Concentrated Photovoltaic)的系統運作特殊性(需聚光，對於入射光方向敏感)，大多使用在大型的太陽能電廠之中並且需安裝在具高 DNI(Direct Normal Irradiation)的區域，所以 CPV 的領先者之一 Soitec 公司採用低製作及維護成本以及高轉換效率 CPV 系統在太陽光直射強度較高區域(Sunbelt)建設大型發電廠，藉由與傳統矽晶電池應用上的差異化而獲利，目前已經有在 14 個國家安裝 CPV 系統之經驗。Soitec 公司使用的 CPV 電池為三接面三五族磊晶電池，現在量產且販賣的電池其轉換效率可達 38%~40%，此外正在研發新型的電池結構，並且採用特殊的剝離技術將高效磊晶電池轉移到便宜的基板上，保留磊晶所需之昂貴基板重複使用(圖一)，最終目標則是 50%的轉換效率並且能降低製作成本，與 Soitec 公司的 CX-S410 舊系統相比，新的 CX-S530 系統製作成本降低了 42%以上(包含追日控制以及模組製作)，高轉換效率系統能使用最少的材料(包含模組等)來達到相同的發電量，電池上的聚光鏡使用 500 倍 Fresnel 透鏡，由 SOG(silicone on glass)所製作而成，整個 CPV 系統不需要使用水進行冷卻，也不怕長時間強烈的風沙侵襲影響。與矽晶發電模組相較下，CPV 模組由於有追日系統所以一天中的供電輸出穩定，能源回收期(Energy Payback)只需 0.8 年，以及對於土地有最少的影響衝擊(圖二)。

世界上約有 20%的人無法輕易的取得電力，這些人民住的區域大多有很大的潛能來使用太陽能源，使用獨立的太陽能發電設備及配合適當的儲能設備即可以提供每天 24 小時不間斷的電力取代原本以石化燃料發電之方式，例如 Soitec 於南非 Touwsrivier 建立第一座大型 CPV 太陽能電廠(發電量 76.5kWp)。在高 DNI 區域使用 CPV 太陽發電系統肯定是最划算的選擇(圖三)。



圖一 採用特殊的剝離技術將高效磊晶電池轉移到便宜的基板上，保留磊晶所需之昂貴基板重複使用。



圖二 採用 CPV 太陽發電系統對於土地環境影響是最小的。



圖三 Soitec 公司 CEO Andre Jacques 先生對於 CPV 太陽發電系統的總結。

第二個主題是 *Advanced Processing for High Performance Silicon Solar Cells* 由美國 BP Solar 的 David E. Carlson 演說，內容針對幾個目前可達 20% 以上轉換效率的可工業化矽太陽電池結構及相關技術作一個回顧，包括 MWT (Metal Wrap Through)、IBC (Interdigitated Back Contact) 以及 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin films) 等，單一技術方面雷射製程的相關應用佔了相當大的比率，展示了如何使用雷射製作圖形化射極及電極製作。

從需求以及價格面可以發現到，2008 年以來太陽電池的需求是逐年上升但售價卻也大幅下降，這兩者或許是有因果關係，可以預期未來太陽能電池的需求會再創新高，由於電池廠競爭激烈大量生產下矽太陽電池售價已經低於 0.5\$/W，反倒使後端的模組以及安裝費用所佔生產成本比重升高，在後端成本費用不易下降的情況下，採用較高轉換效率的矽太陽電池有助於 LCOE (Levelized Cost of Electricity) 的下降而達到與市電同價的最低競爭門檻。在高效率矽太陽電池的研究上已經接近其理論可達之最高轉換效率 (29%)，但這些高效率電池 (>24%) 尚採用許多昂貴的半導體製程完成，無法進行量產，目前仍需克服的問題是如何將這些實驗室等級之矽太陽電池結構以及技術落實到產業界可以大量且低成本地生產，於是相關的簡化以及替代技術將被討論，這些方式目前在實際製作上仍趨複雜但有一定的潛能可導入業界的標準生產流程。除了簡介大家熟知的 IBC、MWT、HIT 等高效率矽太陽電池結構外，Carlson 還特別提到由 ISFH (Institute for Solar Energy Research Hamelin) 所開發的幾種高效率 N 型背界面型 (Rear Junction) 電池，使用 N 型基板有高少數載子生命週期、較不怕金屬雜質以及沒有照光衰減的問題，是未來往高效率矽太陽電池的主流，但是由於其界面製作上需使用高溫硼擴散 (溫度較磷擴散高出 150°C 以上) 以及後續的硼玻璃去除問題，使得業界採用 N 型基板製作上有些困難 (除了採用 HIT 結構之外)，所以 ISFH 改採用鋁當摻雜物來取代硼摻雜即可避免這些難題，並且在前後電極都採用低成本鋁來製作。目前產業界採用 N 型基板並使用硼熱擴散製程的只有英利 (Yingli Green Energy) 的 PANDA 太陽電池 (圖四)。

個別的技術方面，可以發覺到 Carlson 先生很看好未來有關於使用雷射加工的製作方式，除了介紹現在較為人知的 LFC (Local-Fired Contact) 製作背面的局部電極接觸外，University of Stuttgart (in Germany) 使用線型擴束 (8um x 225um) 的雷射來進行摻雜製作射極界面，轉換效率可達 18.9% (4cm²)，IBC 型的太陽電池具有無電極遮蔽之優勢，但是其交替的界面製程很繁雜成

本高昂，若採用雷射來做此交替的射極接面會簡單許多，以此方式製作出轉換效率達 19.2% 的 IBC 太陽電池，此外他們也在研究使用 LTC(Laser Transferred Contacts)技術來製作前後電極(配合後續的電鍍製程)，參考圖五，欲取代目前的網印銀鋁漿製程，LTC 加電鍍法所製作出的電極主要的優勢是能達到非常細的線寬(<50um)與優異的高寬比(>0.5)，於是能在不增加串聯電阻的前提下減少遮光面積提高短路電流密度 J_{sc} ，目前製作出的電池達 17.5% 轉換效率。University of Virginia(in USA)也進行類似的實驗，但是採用全 LTC 製程來製作前後電極，其轉換效率可達 15%。雖然目前看來使用 LTC 技術的轉換效率並未特別的高，但隨著時間的演進以及可以搭配電鍍銅製程(低成本考量)的能力，未來這項技術會有很大的發展空間。為了進一步減少製作成本，目前佔電池製作成本約 17% 的銀漿希望由低成本的鋁或銅來取代，其中的銅電極可以採用電鍍的方式製作，有大量生產的潛能，Silevo 公司在其 HIT 太陽電池上採用了前後的銅電鍍電極製程，並且擁有很低的溫度係數(-0.22%/°C)。

除了往高效率發展，使用較少的矽原料也是未來發展趨勢之一。如何製作以及使用較薄的矽晶片也是一種減少矽使用量的方式，較薄的矽晶片無法採用傳統的網印製程來製作電極(易碎裂導致低良率)，所以非接觸式的電極製作被廣泛的研究，除了上述的雷射開孔配合電鍍技術外，非接觸式的方式尚有類似印表機噴墨的技術，將待使用的電極漿料利用極細的噴嘴準確的塗在矽晶片上，可以有極細的線寬以及較好的高寬比(圖六)，例如 Inkjet Printing、Aerosol Jet Printing，使用類噴墨技術的可能缺點是噴嘴孔洞非常細所以也容易堵塞。

有一些更新穎的矽太陽電池技術被提到，但是其可行性尚待時間證明，例如 Silicon wire array 或 quantum dots，都屬於剛萌芽階段的實驗。在過去數十年矽晶太陽電池有著顯著的進展，而且可以預期未來的 10 年內也還是太陽電池市場的主流商品，技術研發方向將朝著使用鋁或銅金屬取代昂貴的銀並且減少矽的使用量以及製程熱預算(圖七)。



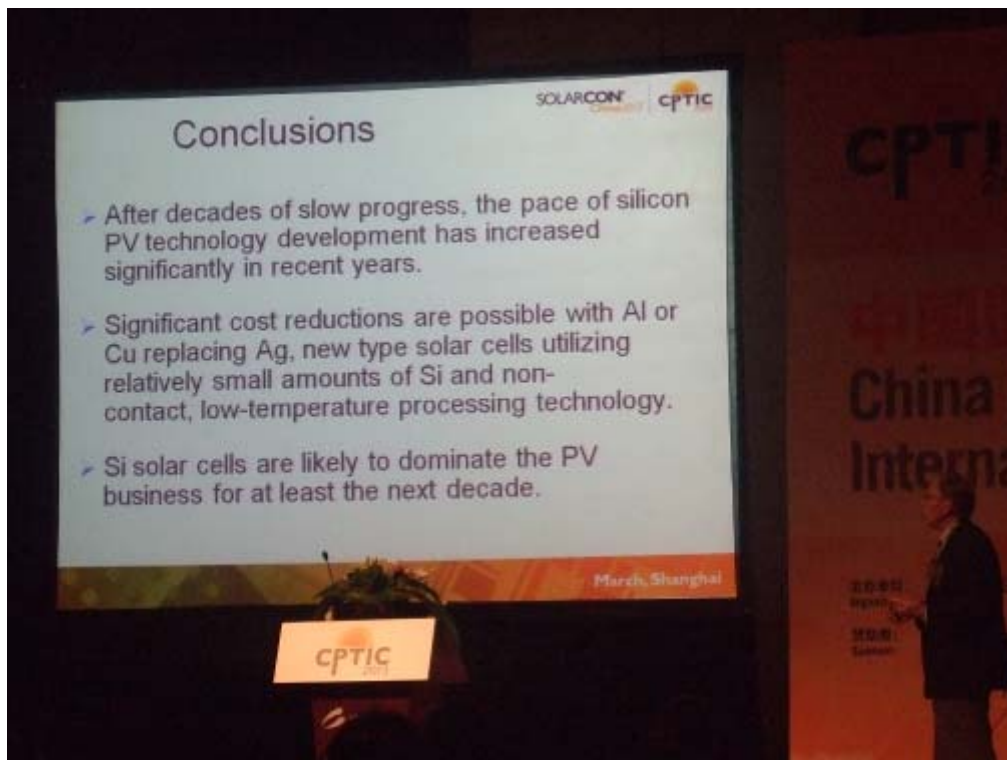
圖四 大陸英利公司(Yingli Green Energy)生產的 PANDA 矽太陽電池。



圖五 University of Stuttgart (Germany) 使用 LTC(Laser Transferred Contacts)技術來製作圖形化的電極。



圖六 非接觸式的類噴墨技術製作電極可達到極細線寬以及高的高寬比。

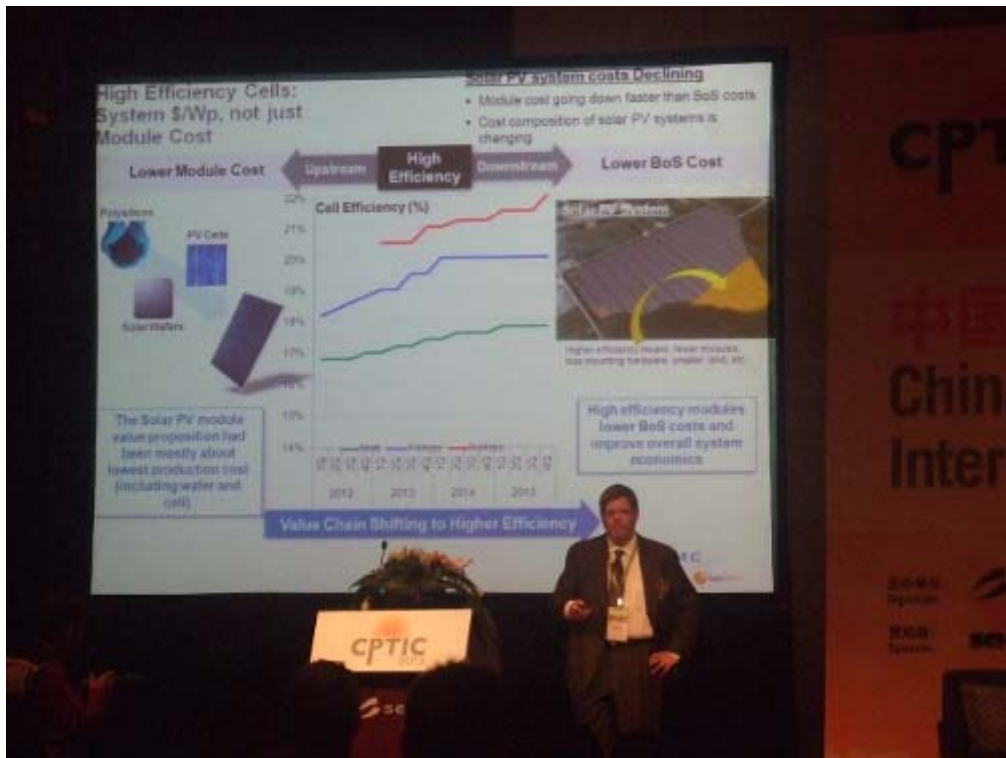


圖七 BP Solar 的 David E. Carlson 對於高效能矽太陽電池的進階製程發展做個結論。

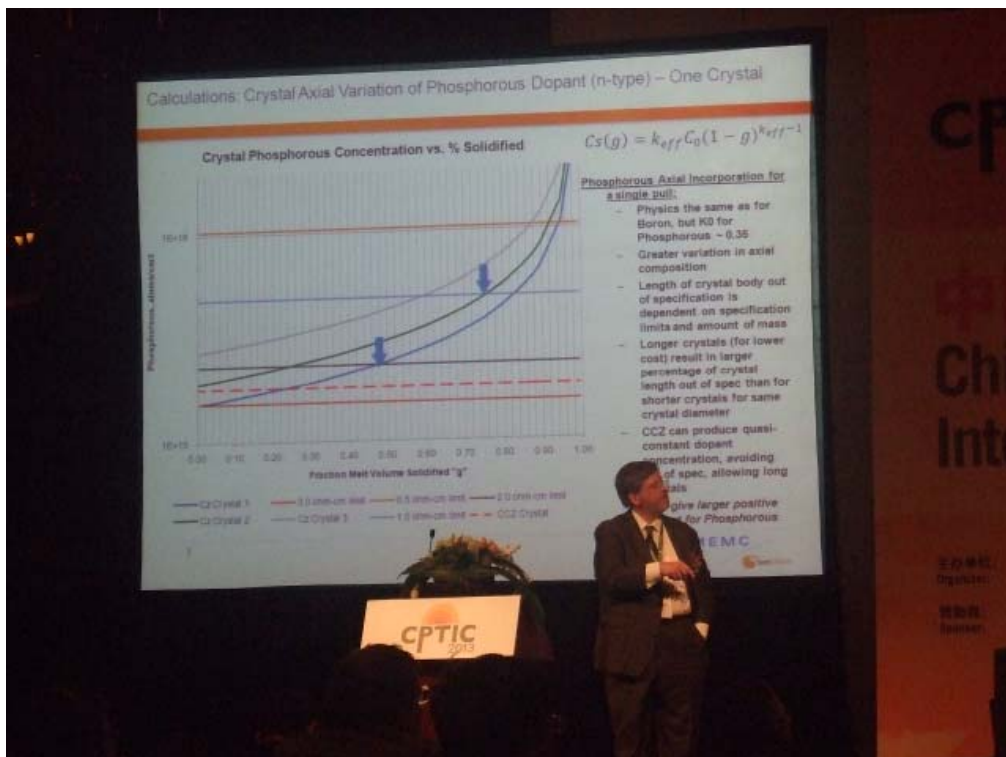
最後由 MEMC 的 Joel Kearns 針對未來製作高效率太陽電池所需之 N 型單晶矽基板作演講，題目是 *Advanced n-type Silicon Mono Wafer for High Photovoltaic Efficiency Solar Cells*，他一開始就切入高效率太陽電池的競爭力在於整體最終系統的發電成本可以下降，主要是因為電池模組的成本下降速度遠高於 BOS(Balance of System)的成本下降速度，所以採用稍貴一點點的高效率電池來建立太陽能發電系統反而是有利的(圖八)，矽晶高效率電池未來以 N 型基板的發展性最高(>21%)，N 型基板有高的 MCLT(Minority Carrier Lifetime 少數載子生命週期)、受金屬雜質影響較不明顯以及沒有 LID(Light-Induced Degradation)效應等優點。但是目前無法大量生產的重要因素是 N 型矽基板的價格還太高，無法降低成本的原因是傳統的 CZ 或 FZ 法所生產出的晶柱中，通常只有晶柱中段一小部份能夠合乎電池製造廠的需求(例如特定的電阻值、摻雜濃度、含氧濃度等)，造成有效產能低落，原因是磷的分離係數約 0.35 遠低於硼的分離係數約 0.8，於是在拉晶的過程中矽熔化物的實際摻雜濃度會隨著拉晶的進行而快速的變濃，得到的晶柱中自然也有一個快速增加的摻雜濃度變化分布(圖九)。為了克服這項問題 CCZ(Continuous Czochralski)技術被研究，CCZ 簡單來說就是在拉晶的過程中加入適當份量的矽原料來維持矽熔化物的摻雜濃度，以此達到整個晶柱在生長過程中的摻雜濃度可以維持幾乎是固定的狀態，這個技術想法已經存在很久了但直到最近才進入可以大量生產的狀態，這方式可能的隱憂是矽熔化物的雜質含量將隨著後續多晶矽原料的加入而增加，於是在尾端部分的 MCLT(Minority Carrier Lifetime)也隨之下降(圖十)，可以在 MCLT 下降到無法容忍的程度之前(例如小於 1000us)就結束拉晶製程，即可不繼續浪費時間與多晶矽原料。

矽晶柱到矽晶片這中間的線切割製程也需改善，使用鑽石線(Diamond Wire)來取代原研磨漿(Slurry)切割，研磨漿切割使用含 silicon carbide 顆粒的研磨液及金屬線，研磨顆粒在金屬線與矽晶柱間摩擦達到切割作用，但研磨顆粒的速度約只有金屬線的一半，平均產生的表面裂縫深度 7.5~10um(最深可達 30um)，鑽石線則是將研磨顆粒直接固定再金屬線之上，所以其顆粒速度將與金屬線一致，理論上切割的速度會是使用研磨漿方法的兩倍，而其平均產生的表面裂縫深度是 1~2.5um(最深可達 17.5um)，表面裂縫越深後續的去除表面傷害化學蝕刻深度也要增加，並且在無形中造成矽原料的浪費。有廠商反應使用鑽石線所切割出的矽晶圓破片率較研磨漿所切割出的矽晶圓破片率來得低，兩者在後續的鹼蝕刻結構化製程上沒有特別的差

異性。



圖八 高效率太陽能電池的市場競爭力分析。



圖九 採用傳統拉晶法的 N 型矽晶柱摻雜濃度分布。



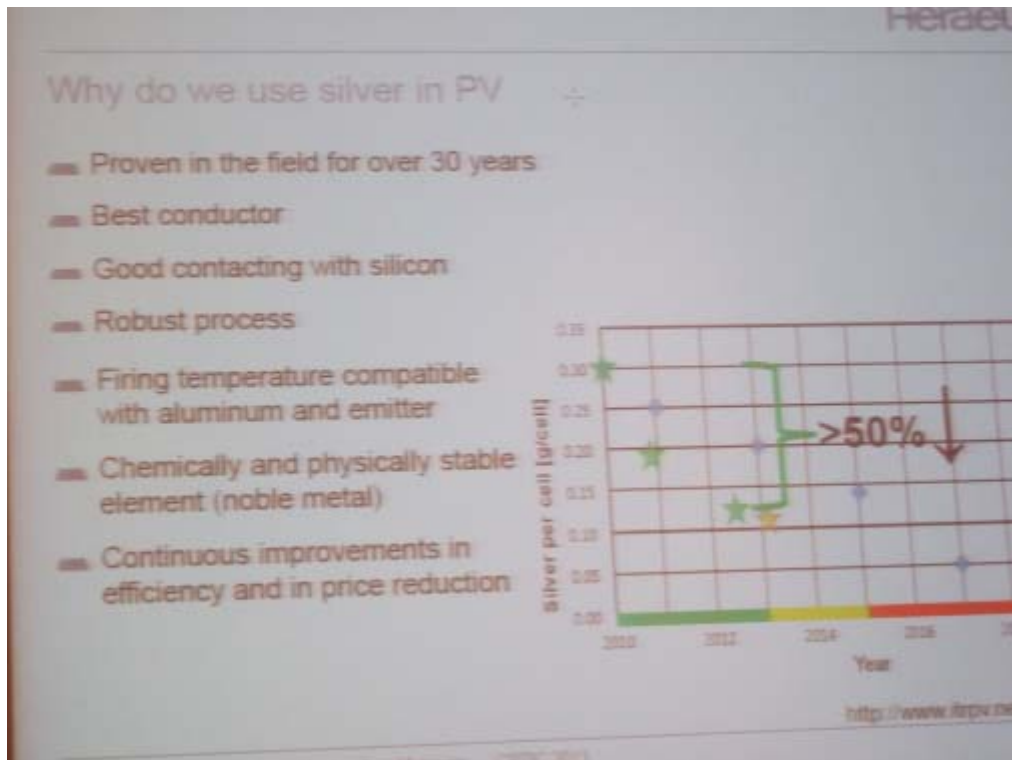
圖十 以 CCZ 法製作矽晶柱時，其 MCLT(Minority Carrier Lifetime 少數載子生命週期)隨著矽熔化物中雜質的累積而下降。

Will Technology Be the Essential Driven Force for PV Industry Growth? 是這次 Panel Discussion 的主題，由 CTO 們在台上以討論的形式表達他們對未來太陽能科技的看法(圖十一)，整個問題還是卡在生產成本(直接關係到廠商生存能力)以及最後的 LCOE 能否與市電競爭，畢竟先進技術的發展都是以這兩者為導向，所以技術發展當然是對 PV 產業的成長是有幫助的，目前電池製造端的價格已經到達低點，除了減少或替換銀漿使用(約佔目前矽晶電池成本的 17%)可以較明顯降低成本外，電池製造的技術發展應該朝向在不增加太多(或甚至不變)成本的情況下提高電池轉換效率，將有利於 LCOE 的下降，而後面模組系統設備端的技術則該朝下降製作成本以及簡化流程、安裝維持人力等方向進行，可能是這個主題對於太陽能電池領域的人都已經有相當的共識，所以台下參與者也無人發表其他的看法，場面有點冷淡(據說去年在 Panel Discussion 上是直接吵起來的那般熱鬧)。



圖十一 Panel Discussion 主題是 *Will Technology Be the Essential Driven Force for PV Industry Growth?*

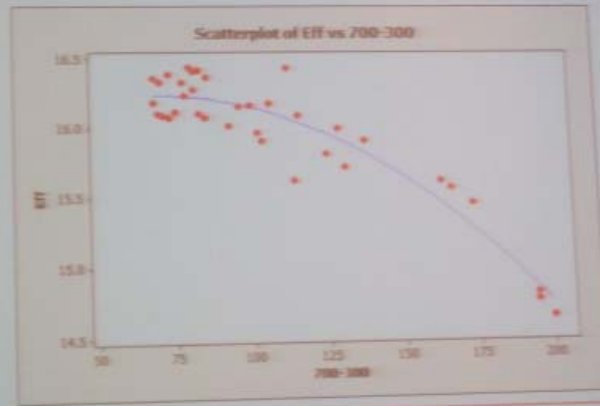
後續的研討會就分成幾個 Symposium 來針對各別主題進行演講，其中 Symposium IV: Solar Cell and Module Engineering 與目前計畫的相關性最高，所以選擇以這個為聆聽的主軸。國際導電漿大廠 Heraeus 簡介了導電銀漿的特性以及如何使用在製作高效太陽能電池上，主題為 *Ag Metallization Paste for High Efficiency c-Si Solar Cell* 演講者是 Dr. Weiming Zhang，當然要先強調一下使用銀的好處，例如化學及物理穩定性、與矽接觸良好、可以與鋁共燒等等(圖十二)。為製作出高效率太陽電池，Fingers 的優化是很重要的，包括製作更細的線寬、提升其印刷後的高寬比、印刷後的線均勻度(包含橫向及縱向)改善以及適合的退火溫度曲線。未來射極的片電阻值還會持續上升(2015 年達到 110ohm/sq 以上)，這時銀漿與射極間的接觸就變得很困難，但 Zhang 先生並未講解銀漿與高片電阻射極之間的接觸電阻該如何改善或任何相關機制，畢竟這是屬於商業機密。除了一般的銀漿外，Heraeus 也有出產 MWT(Metal Wrap Through)以及 N 型基板專用的銀漿，比較特別的是 N 型專用銀漿提到有鈍化金屬接觸面的效果。



圖十二 採用銀來製作電極的好處並可以藉由設計優化電極形狀減少線寬來達到減量使用銀漿的目的。

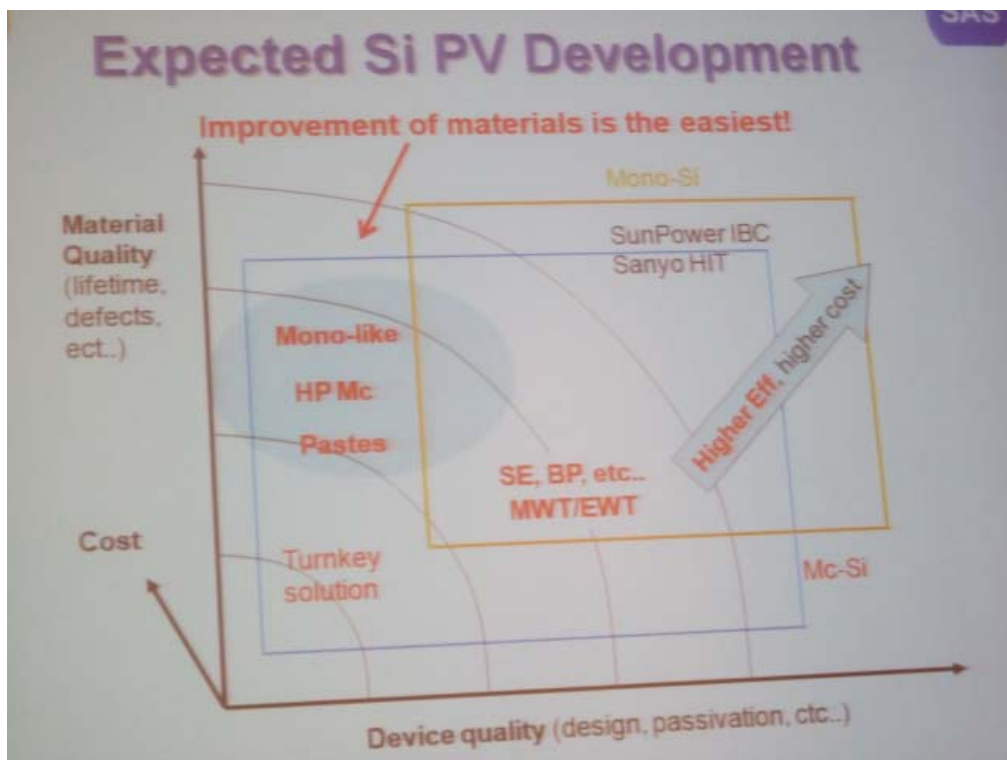
BTU International 的 Brynley E. Lord 針對銀漿的退火溫度優化做討論，主題是 *Effect of Cooling Rates in Metallization Firing on Solar Cell Parameters*，與之前的退火研究不同的是在看溫度下降速度的影響，使用兩種不同的銀漿 A 及 B，根據最後的效率與退火速度的比較之下，可以發現 A 銀漿在 700°C 降至 300°C 這段區間的降溫速度影響很大(圖十三)，而 B 銀漿並不受降溫速度的影響保持一致的效率，由結論可知降溫速度不能太快(高於 80°C/sec)，效率降低的原因是串聯電阻上升，但以電池製作者來說當然會選擇不受影響的 B 銀漿。

- Correlation of efficiency with cooling rate is strongest over the range from 700° to 300° C
- A quadratic curve can be fit to the data with a correlation coefficient (R^2 value) of 0.87
- Effect appears to level off below ~80° C/second

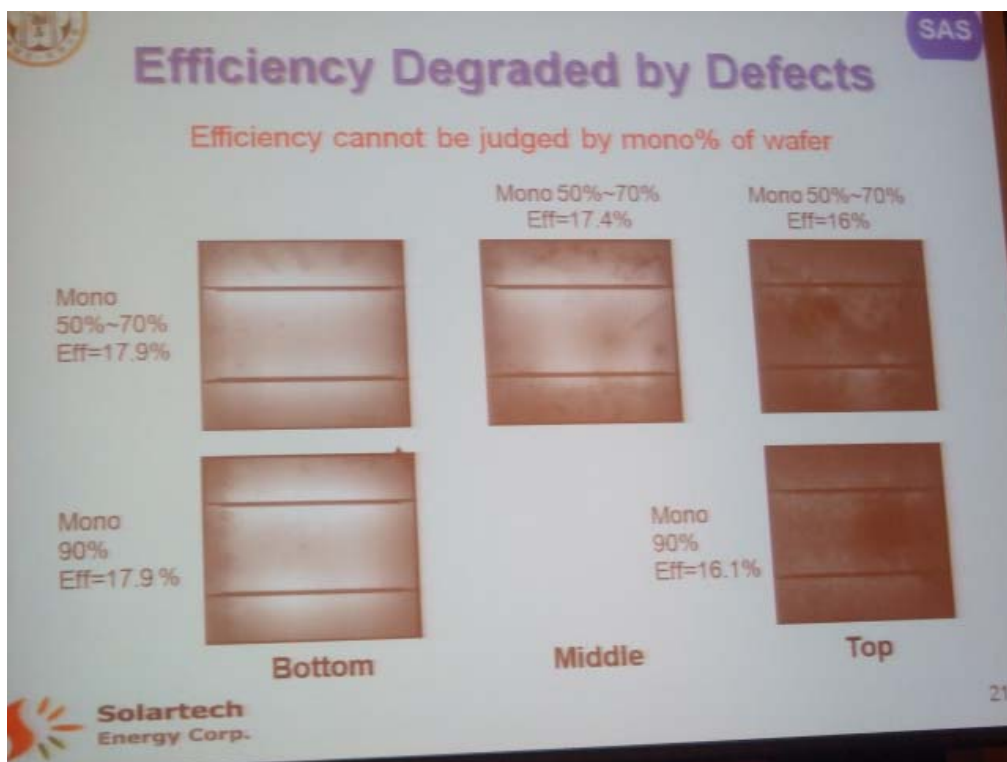


圖十三 使用銀漿 B 時，轉換效率受降溫速度的影響。

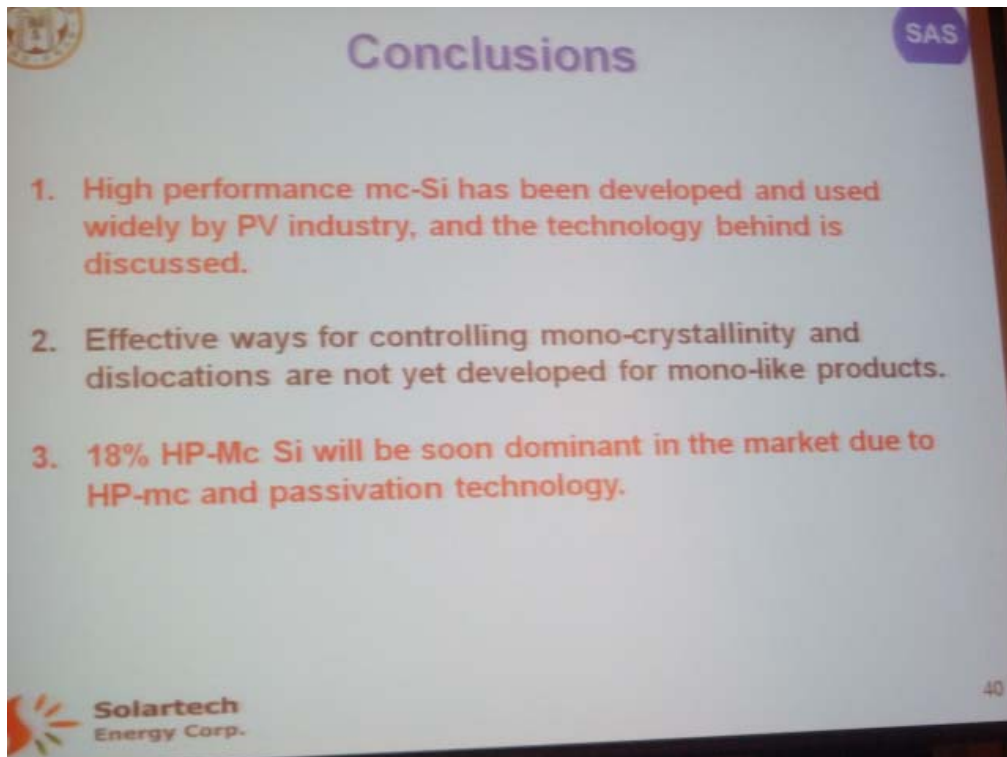
台灣大學藍崇文(Chung-Wen Lan)教授則以 *Recent Progress of High-Quality Multi-Crystalline & Quasi-Mono Silicon PV* 為主題，每年太陽能電池的需求量都超出原先的預期，而 Mc(Multi-crystalline) 矽晶電池的市佔率由 1999 年的 47% 逐漸爬升到 2011 年的 57%，是目前矽太陽電池的主流商品擁有價格的優勢(Mc-Si 價格約 0.19\$/Wp 而 Mono-Si 價格約為 0.26\$/Wp)，太陽電池效率提升對於最終系統發電價格有很大影響，而在矽晶太陽能電池廠商不改變既有的產線設備的前提下，要提升轉換效率最直接簡易的方式就是提升各別材料的特性，例如採用 Quasi-Mono(類單晶) silicon 或 HP(High Performance) Mc-Si 的晶片及提升導電漿的特性(圖十四)。後面開始探討 GB(Grain Boundary)與 Dislocation 對於 Mc-Si 性能的影響，由於我對於前段的這些長晶製程的知識細節不如電池製程(尤其是使用鑄造方式製作矽晶塊)，當下聽起來很吃力並且有許多不了解的地方，所以就我所理解的部份做簡單的說明，製作品塊的技術差異性不大但是其最終生產出的矽晶片卻會有很大的差異，不同公司出產的矽晶片在相同的電池製程下可以有 0.5~0.7% 絕對轉換效率的差異，但是隨著時間的演進，目前各公司都可以生產出品質相當的 HP Mc-Si 晶片。而在 Quasi-Mono Si 部分卻發現與預期的結果有很大的不同(圖十五)，原本預期在 Quasi-Mono Si 晶片裡面連續的單晶比率愈高則表示此晶片品質越好(越接近單晶片)，但是實際上卻發現影響其品質的是缺陷 EPD(Etching Pit Density)，這些缺陷會隨著向上結晶時增加。如何控制減少 dislocation 以及缺陷對於製作高品質 Mc-Si 與 Quasi-Mono Si 是很重要的，相關的研究尚在發展中，使用 HP Mc-Si 所製作出的 18% 太陽電池(配合鈍化層)不久後將成為市場主流(圖十六)。



圖十四 根據使用材料與製程技術來區分不同的研發進展策略。

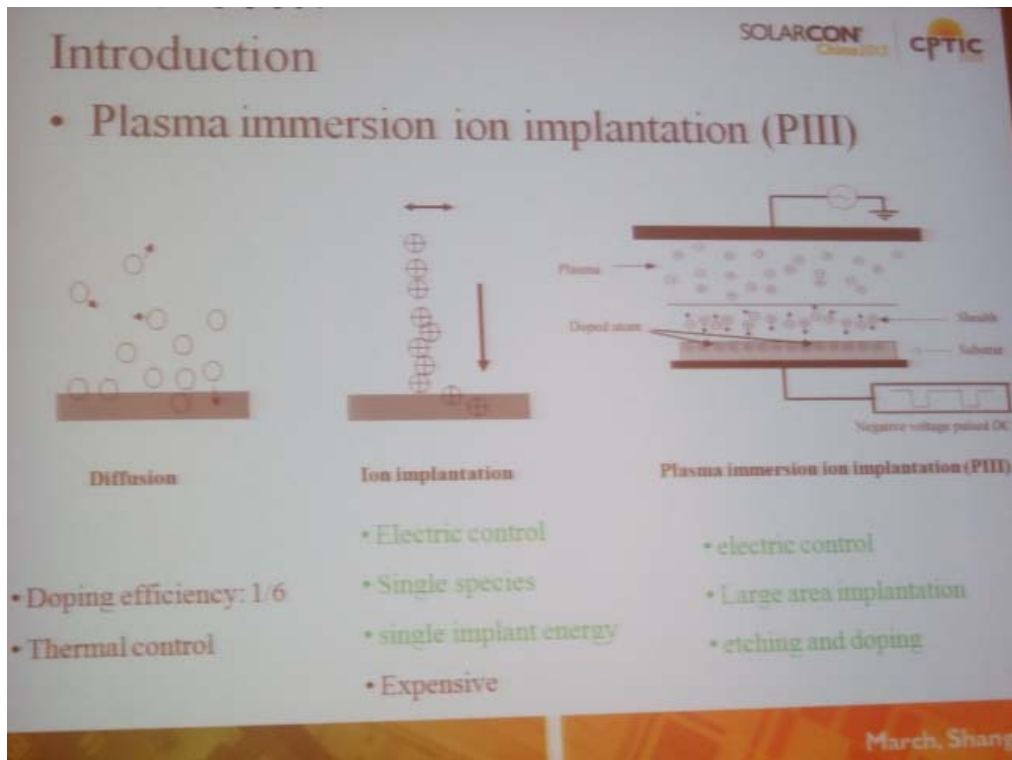


圖十五 決定 Quasi-Mono Si 晶片品質的不是形成單晶的比率，而是不易查覺的缺陷密度。



圖十六 藍崇文教授對於高效能多晶以及類單晶矽晶片的未來發展做個總結。

IMECAS (Institute of Microelectronics Chinese Academy of Sciences)的 Zenan Shen (沈澤南)博士展示了他們開發的 PIII(Plasma Immersion Ion Implantation)設備，標題是 *Plasma immersion ion implantation technique applied on high efficiency solar cell*，是這次我聽到唯一做設備開發的學術單位，個人認為設備自主化很重要，許多新的技術雖然在實驗室可行，但是要跨足量產就得牽扯到設備設計製造，這點在台灣很明顯的是個弱點。PIII 是將待摻雜的離子形成電漿後再提供瞬間的高偏壓使得這些離子能夠被送入矽基板表面形成摻雜，其基本概念有點像離子佈植 (ion implantation)法，主要的差異是產生帶電離子的方式、使用的偏壓及佈植的模式，現在台灣產業界已經有幾家正在研究使用離子佈植來製作 pn 界面，由於均勻度可以明顯的提升，其最終的轉換效率可以提升 0.5~0.8%之多，惟傳統離子佈植機的價格昂貴且後續維修費用亦高，想使用這種方式來取代熱擴散製程有製作成本上的問題，另外可能的問題是其產能速度偏慢，所以 PIII 技術被提出來取代離子佈植，PIII 機台基本架構與 ICP(Inductive Coupled Plasma)相似，但是要另外考量到腔體材質及使用的偏壓更高(>2KV)，PIII 價格以及維修成本明顯就優於傳統離子佈植機(圖十七)。沈博士提出另外一個採用 PIII 的優勢是可以將結構化步驟也整合入同個機台內，只要通入的氣體改變成適合蝕刻矽的成分，即可在 PIII 機台內先將矽晶片進行單面的結構化製程，接續改變注入氣體來進行想要的離子摻雜製程，他們已經可以使用 PIII 機台製作出 Black Surface 的矽晶片，在使用電漿乾蝕刻後得使用輕微的化學酸蝕刻把表面的傷害去除(圖十八)，這點與我們計畫的實作經驗是相同的(我們採用的是 RIE, Reactive Ion Etch 乾蝕刻機台)，他們的轉換效率可因此提升 2.28%之多!市場上有在販賣 PIII 機台的屬法商 IBS 為最知名。



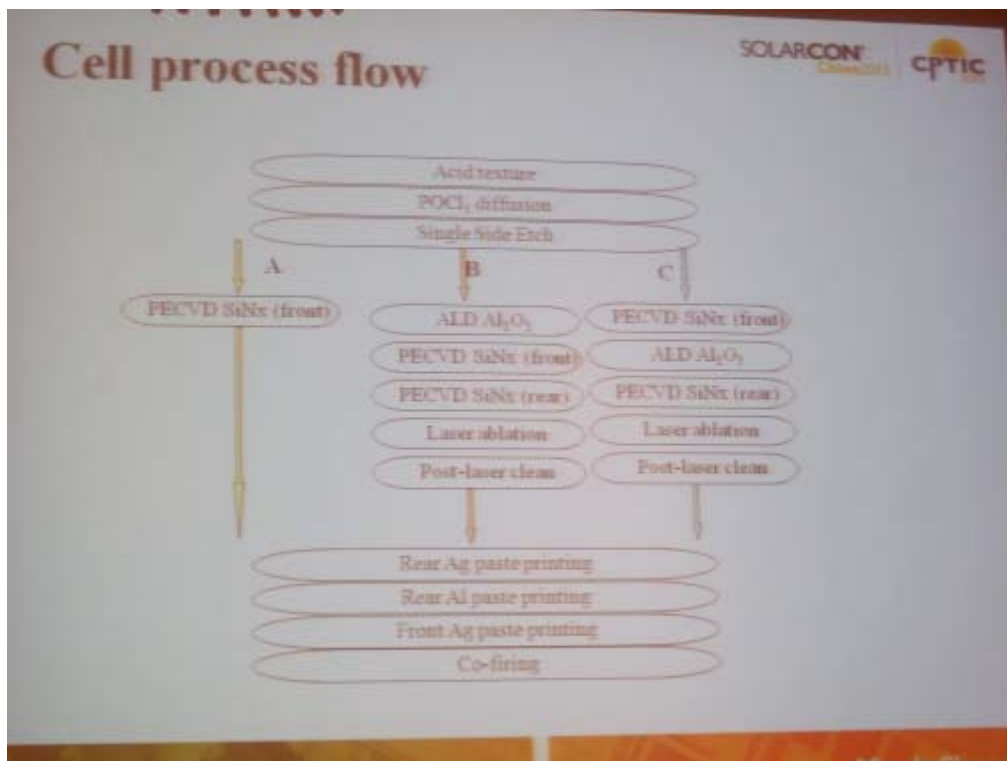
圖十七 PIII(Plasma Ion Immersion Implantation)與其它摻雜技術的比較。



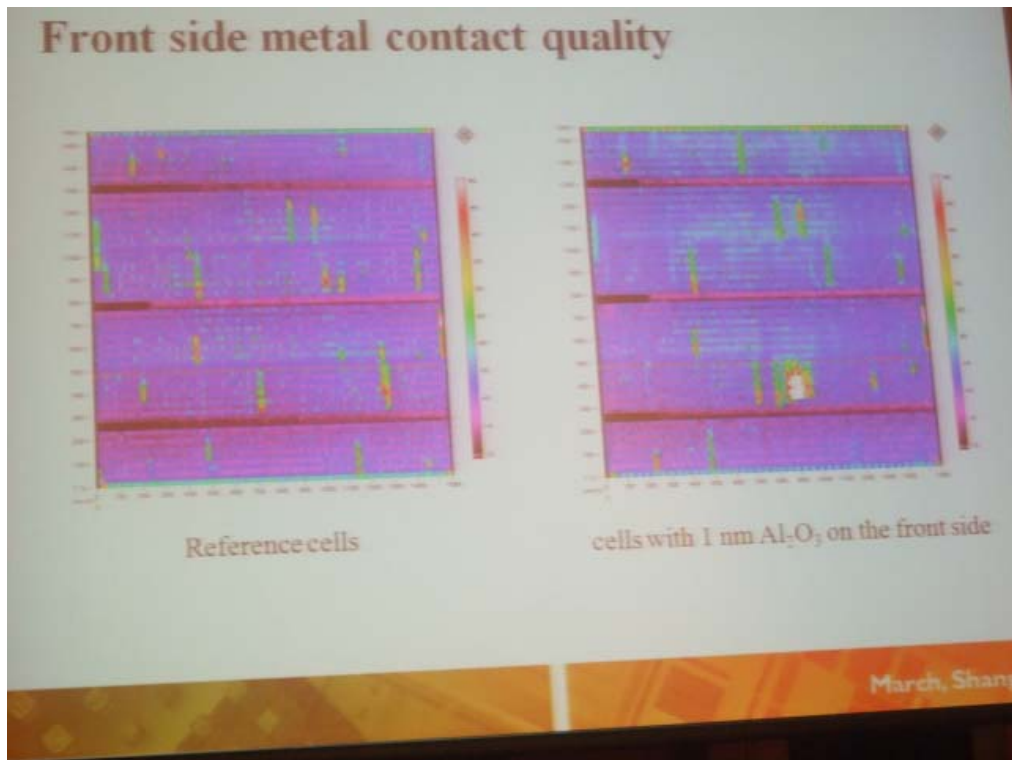
圖十八 使用電漿乾蝕刻製作出的結構化表面後必須有 SDR(Surface Damage Removal)的步驟才能得到更高的轉換效率。

以 PANDA 高效率矽太陽電池知名的 Yingli Green Energy (英利)對於使用氧化鋁層來鈍化 p 型 mc-Si 矽表面(背表面)的製程順序有些建議,演講者 Decheng Yang, 標題是 *Surface passivation of mc-Si solar cell by Al₂O₃: a comparison of two process*, 探討背面氧化鋁與正面的氮化矽層在製

程順序上的影響。圖十九展示了用來比較的三種實驗流程，其重點在於流程 B 與 C 中的背面氧化鋁與正面氮化矽前後順序不同，使用了背面氧化鋁鈍化以及局部雷射燒結技術可以得到 18.1% 的轉換效率，但是如果先鍍背面的氧化鋁(使用 ALD, Atomic Layer Deposition)再鍍正面的氮化矽時，則會有些許的下降，對於這個現象 Yang 認為是先鍍氧化鋁時會稍微污染到正面的區域所導致，所以進行了一設計驗證實驗將正面故意地先鍍上一層非常薄(1nm)的氧化鋁，其它製程則與製程順序 A 一致，發現轉換效率因此而下降了 0.13%，這結果對我來說並非很意外，因為在期刊論文上已經有人提出這個問題，這是因為氧化鋁鈍化層是帶負固定電荷對於 p 型摻雜表面的鈍化有利(排斥少數載子電子，使其遠離表面)，反過來說不利於 n 型的摻雜表面。除了固定電荷的因素外，Yang 提出了另外的可能影響，前電極與矽基板的接觸可能會因為此 1nm 的氧化鋁薄膜受阻，造成接觸電阻上升，圖二十為施加外偏壓的模式下拍攝其紅外線圖形，電阻較高區域產生的高溫會在圖上顯示出，在額外鍍氧化鋁的電池上看到有塊區域溫度明顯較高，導電銀漿中的配方都是針對穿透氮化矽而優化，所以氧化鋁層的確可能造成這個問題。就實際生產流程來說，也應該採用流程 C，否則採用流程 B 就會需要將電池翻面兩次相當麻煩。

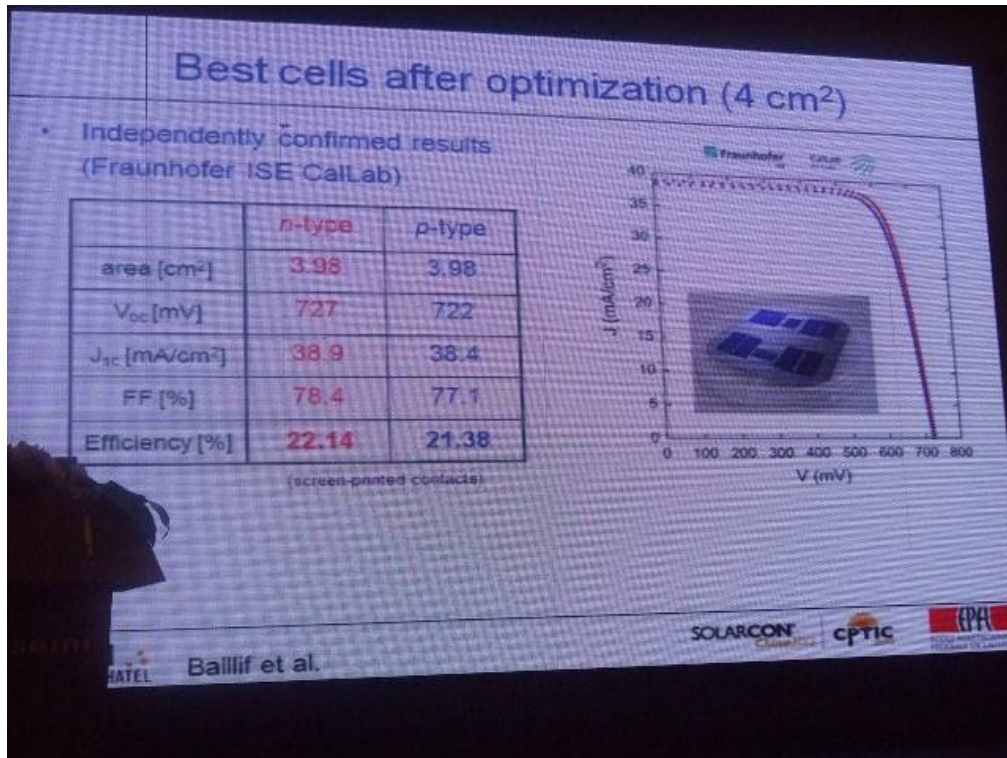


圖十九 三種不同製程順序的比較圖。



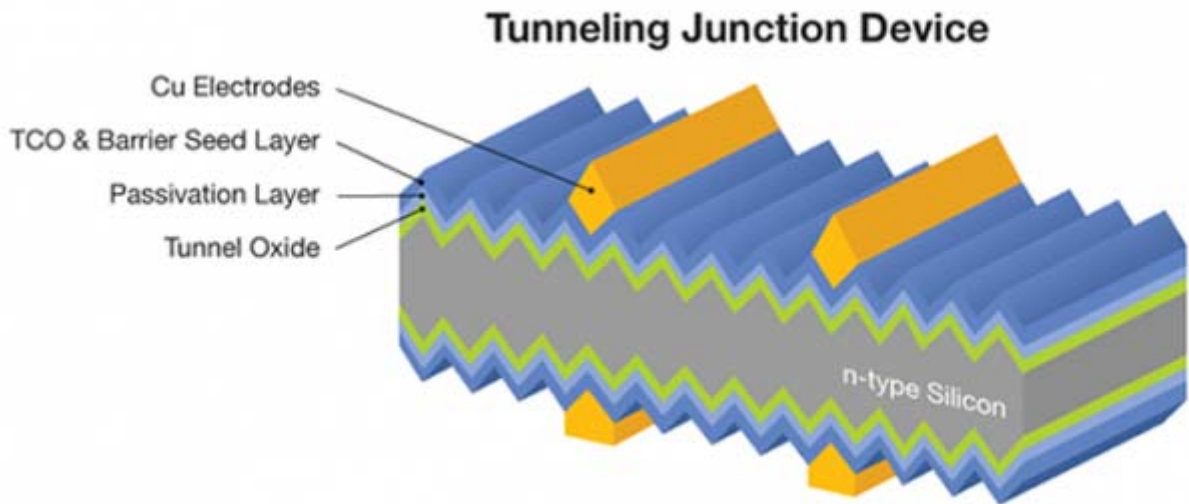
圖二十 1nm 厚氧化鋁對於前電極接觸電阻的影響。

之後的會議屏幕是 LED 發光的大型螢幕，所以使用照相機無法清楚的拍照下來。根據主題份量而言，可以發現接下來探討高效率的主題包含 HIT 電池、n 型基板及 BC (Back Contact) 電池佔了大宗。EPFL (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne) 的 Christophe Ballif 對於使用 N 型及 P 型基板來製作 HIT 電池作個比較，主題為 *High-efficiency silicon heterojunction solar cells on n- and p-type wafers*，內容有兩者的 HIT 數據表比較，可以發現兩者製作出的 HIT 電池差異性不大(圖二十一)，最佳轉換效率分別可達 22.14% 及 21.38%，但這是在使用 FZ 法製作出的晶片的情況下，如果再比較使用 CZ 法製作出的 n 型與 p 型基板結果，卻發現 n 型基板的轉換效率可以達 20% 以上而 p 型的只有 17%。

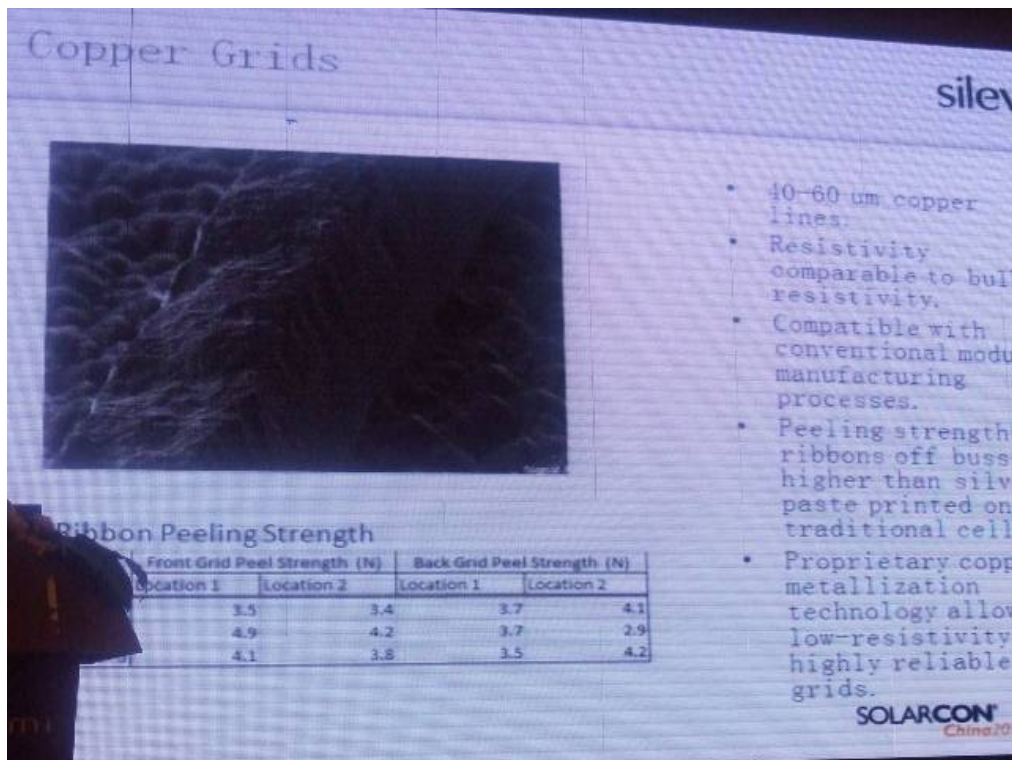


圖二十一 使用 n 型或 p 型基板來製作 HIT 電池後的比較表。

High Efficiency Solar Cell with Tunnel Oxide Junction and Copper Grids, 這主題非常吸引我，這也是目前計畫發展重點-銅電極的製作，由 Silevo 公司的 Jianming Fu 演講，上網搜尋後才知道，這間公司很年輕 2007 年才募資成立，由許多前美商應材的人組成，於 2009 年發表取名為 Triex 的太陽電池，其架構與一般熱擴散電池很類似但是其無 pn 接面而是靠著 MIS (Metal Insulator Semiconductor) 結構來產生蕭基接面，中間的絕緣層採用很薄的 tunnel oxide layer (圖二十二)。這層 thin oxide layer 能達到表面鈍化的作用，最上層的 Metal 層並不是傳統的金屬，是採用 TCO 薄膜來代替(需要能透光)，由於 TCO 與底下的矽基板間的費米能階不匹配，自然在表面附近形成蕭基接面，就依靠這個接面來分離照光所產生的電子電洞對，如同傳統太陽電池般運作，Insulator 層(也就是 oxide layer)不能太厚，過厚時受光激發的電子或電洞無法藉由量子穿隧效應到達前後的收集電極，製作這種方式的電池不需要進行摻雜，對於矽晶片表面幾乎沒有傷害或生成雜質缺陷。對於銅電極製程並未提到詳細的過程，只知道是使用電鍍方式，搭配未知的圖形化方式以及阻擋擴散層，圖二十三顯示了銅電極的 SEM 圖，由這個 SEM 圖形個人猜測其圖形化的方式極可能是採用光阻微影方式，如果是這樣的話尚無法進入業界量產製程，另外由於銅元素相當容易擴散，所以在製作完銅電極後應避免高溫製程，這點在 Triex 電池中看來是不難達到(根據其類似薄膜的低溫製程)，但是要將銅電極應用在傳統矽晶電池上可能會有問題，因為通常最後會有個高溫(>700°C)的燒結動作。這種電池的溫度係數具有很大的優勢，隨著溫度上升只有-0.22%/°C 的轉換效率遞減速率，在高溫度區域(通常也是具高太陽能日照區域)的發電效益較一般傳統的矽晶電池高，這種低溫度係數的特性通常只在薄膜型的太陽電池上出現。相關的模組有經過 85°C/85%RH(相對溼度)中 1500 小時的可靠度測試，以及對於 PID (Potential Induced Degradation) 的測試，正逐漸擴充產能量產轉換效率>21% 的太陽電池。



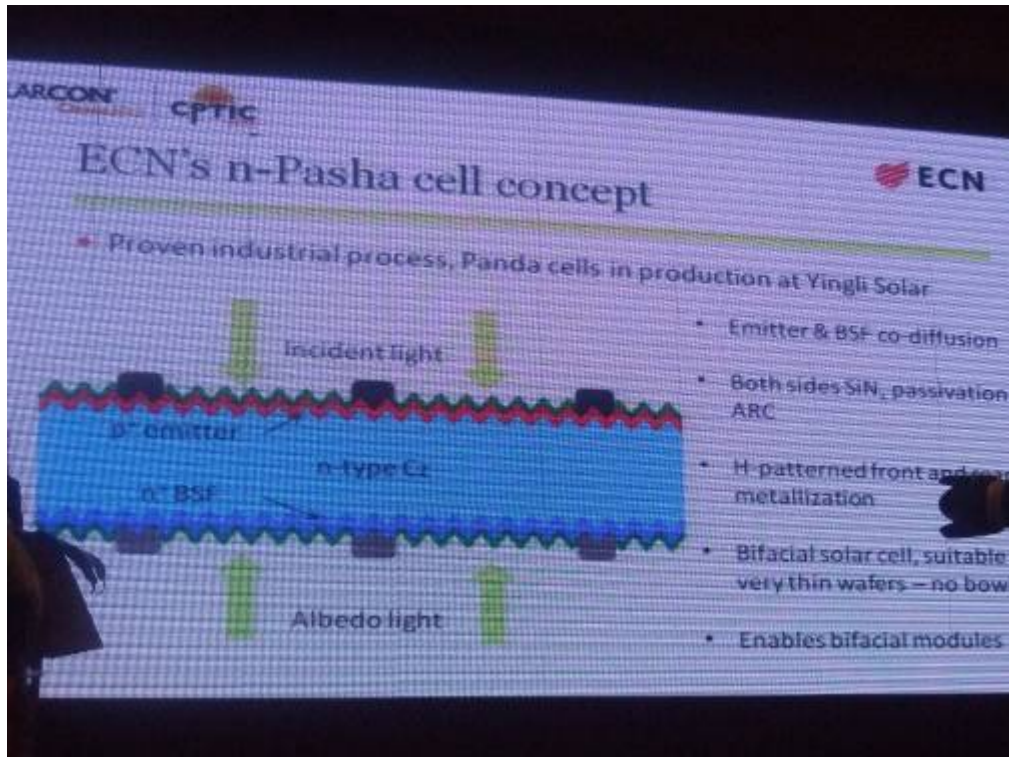
圖二十二 Silevo 公司的 Triex 太陽電池結構示意圖。



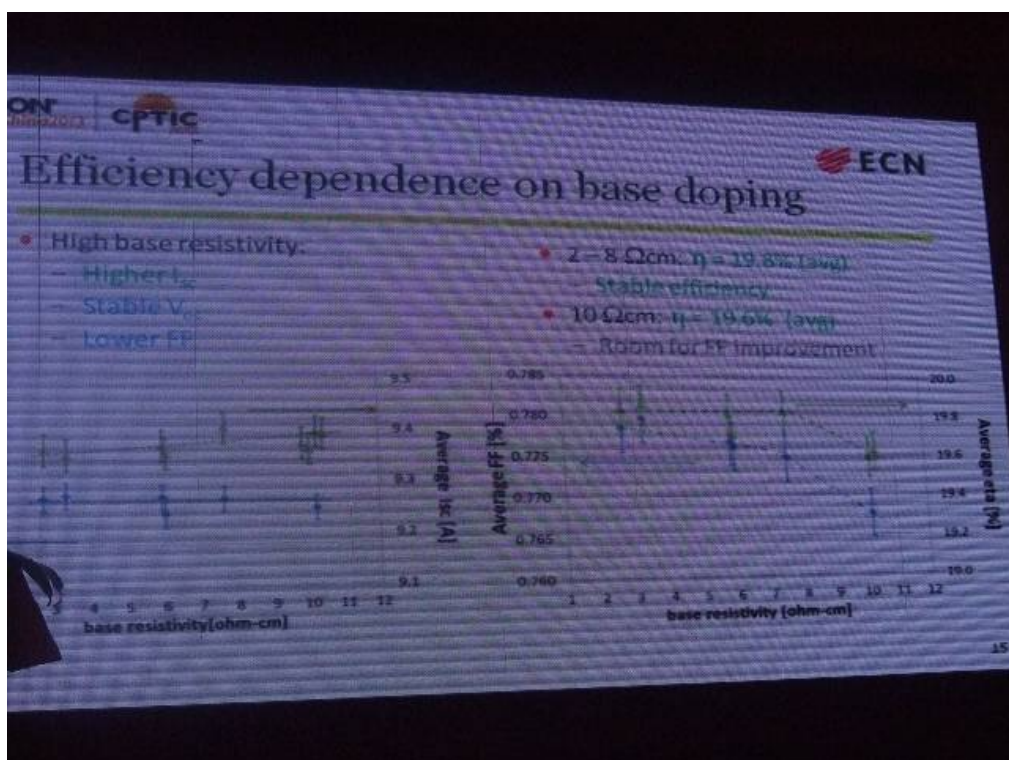
圖二十三 銅電極的 SEM 圖。

輪到 ECN solar energy 展示他們最新的成果 *Industrial n-Pasha solar cells with >20% cell efficiency*，演講者 Ingrid Romijn，開頭簡單說明了使用 n 型基板的好處，由於 ECN 與英利公司有技轉合作關係，這個 n-Pasha 太陽電池與英利的 PANDA 電池在結構上看不出來有什麼區別性(圖二十四)，其雙面的 H 形狀電極不會使電池產生翹曲的情況適合未來使用更薄的矽晶片。中間提到他們做了哪些努力使得電池轉換效率可以從 19%增進至 20%，先是將前電極的覆蓋面積縮小，由 7%降至 5.5%，原本是使用一般的 screen printing 製程，後來更改為 stencil 製程可以使得線寬更細提高短路電流 J_{sc} ，並使 busbar 不直接與矽表面接觸，可以避免金屬接觸處所產生的無效復合提高開路電壓 V_{oc} ，再針對 BSF 層與鈍化層做優化，雖然會稍微降低

FF 值但是優化後轉換效率由 19.5%增進至 20%。由於硼的分離係數太低，在製作 n 型晶柱時會有摻雜濃度變化較大的困擾，同時也會反映在矽基板阻值上，所以 ECN 對於不同矽基板阻值的影響做了實驗，發現在 2~8 ohm-cm 的阻值範圍內對於所生產出的太陽電池效率並無太大的影響(圖二十五)，較廣泛的適用範圍使得 n-Pasha 電池更具競爭力，但這部分隨著 CCZ 的技術開發，將來可能就不再是個問題。

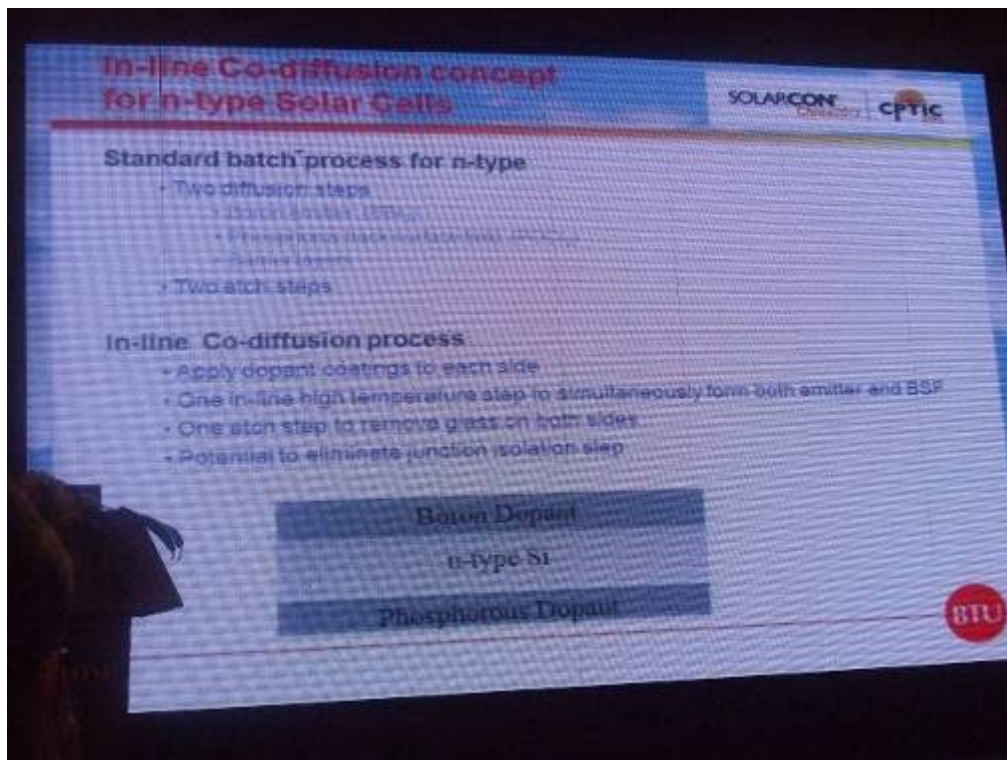


圖二十四 ECN 的 n-Pasha 太陽電池結構，看不出與英利的 PANDA 電池結構有何區別。



圖二十五 使用阻值 2~8 ohm-cm 範圍的 n 型基板都可以獲得穩定的轉換效率。

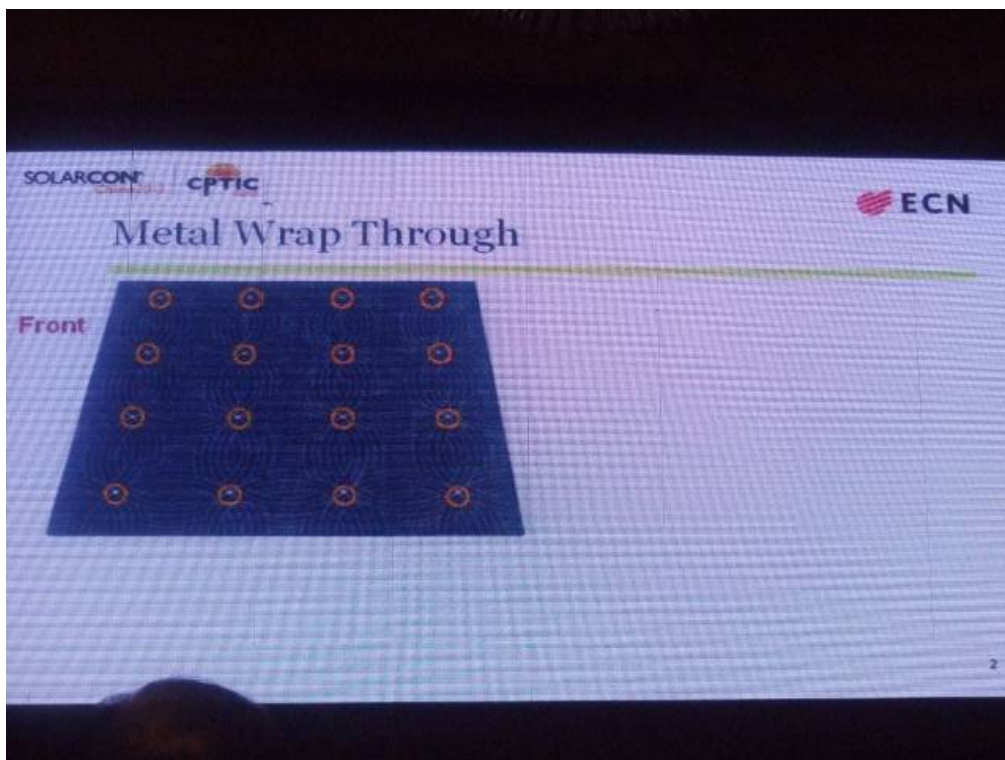
BTU International 發表的第二個主題是 *Formation of Emitter and Back Surface Field for N-type Solar Cells by In-line Diffusion*，由 Frank J. Bottari 演講，爲了製作高效率 n 型矽太陽能電池，通常會在兩面各製作射極以及 BSF，這兩層的所需摻雜物不同，所以若使用傳統熱擴散製程時，其製程步驟相當繁瑣，製作射極時須使用氮化矽之類的薄膜保護背面，反之製作 BSF 時則需保護已形成的正面射極，爲了能快速的製作且降低成本，他們研發出 In-line Diffusion 的技術(圖二十六)，使用含摻雜物的溶液/漿料塗在矽晶片的兩面上後，直接由傳送帶送入高溫爐進行共燒，可以一次就製作出射極以及 BSF 層，現在技術上的難題是這兩面的溶液/漿料有相互污染的可能，將嘗試藉由機械結構來限制其污染情況。



圖二十六 In-line Co-diffusion 製程。

P-type MWT: Integrated Cell and Module Technology，由 ECN 的 Kees Tool 演講，使用 MWT (Metal Wrap Through) 技術可以將前電極中的 busbar 移除增加收光面積，正反兩極都可由背面接出是一種背電極電池，由於其特殊導電路徑，前電極的圖形設計與傳統 H 型可以有很大的不同(圖二十七)，而且 MWT 技術容易整合入目前主流的太陽電池製作流程，只需多一道雷射開孔製程，每片矽晶片只需開孔 16 個貫穿孔洞，後續的銀漿需採用 MWT 專用的銀漿確保銀漿能填滿孔洞，變成背接觸式電極後其封裝較簡易也可自動化，CtM (Cell to Module) 衰減率可以從 0.91 提升到 0.97，把傳統 H 型矽晶太陽電池加入 MWT 技術後可以增加 0.8% 的轉換效率，這效率增加來自收光面積增加以及前金屬接觸面積下降(圖二十八)，但是逆偏測試下的電流較高，在實際使用上由於太陽能模組有機會被局部遮蔽(雲等)，此時會使其中的電池處於逆偏的狀態下，這逆偏電流會產生局部熱效應(圖二十九)，過度的局部加熱狀況可能導致電池損壞，增加模組不穩定因素，所以降低逆偏電流在使用 MWT 技術時是必須注意的議題，在他

們的測試中退火的條件以及所使用的銀漿對逆偏電流有很大的影響。



圖二十七 MWT 太陽電池的特殊前電極圖形。

H ↔ MWT: cell comparison

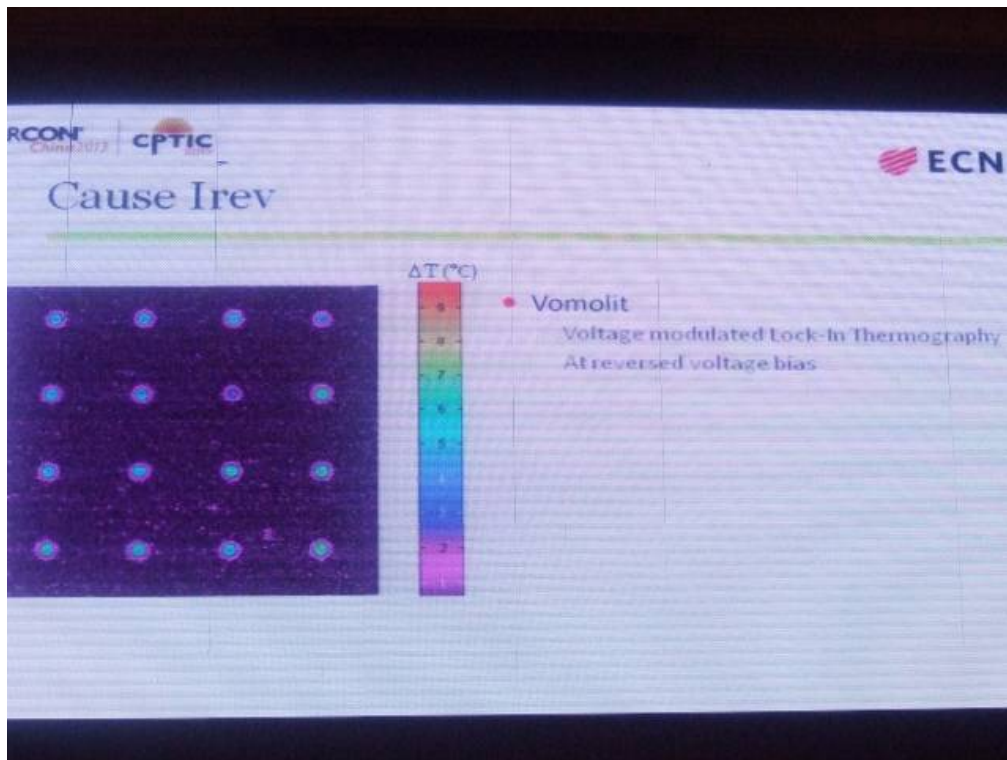
IV characteristics lab results:

Pattern	N	Isc A	Uoc V	FF %	Eta %	Irev @ -10V A	Ag front mg
H	93	9.05	0.625	76.4	17.8	0.10	175
MWT	91	9.22	0.629	75.8	18.1	0.57	170
MWT _{improved}		9.26	0.632	77.4	18.6	0.36	140

Emitter + metallization optimization:
 0.5% efficiency improvement
 30 mg Ag reduction

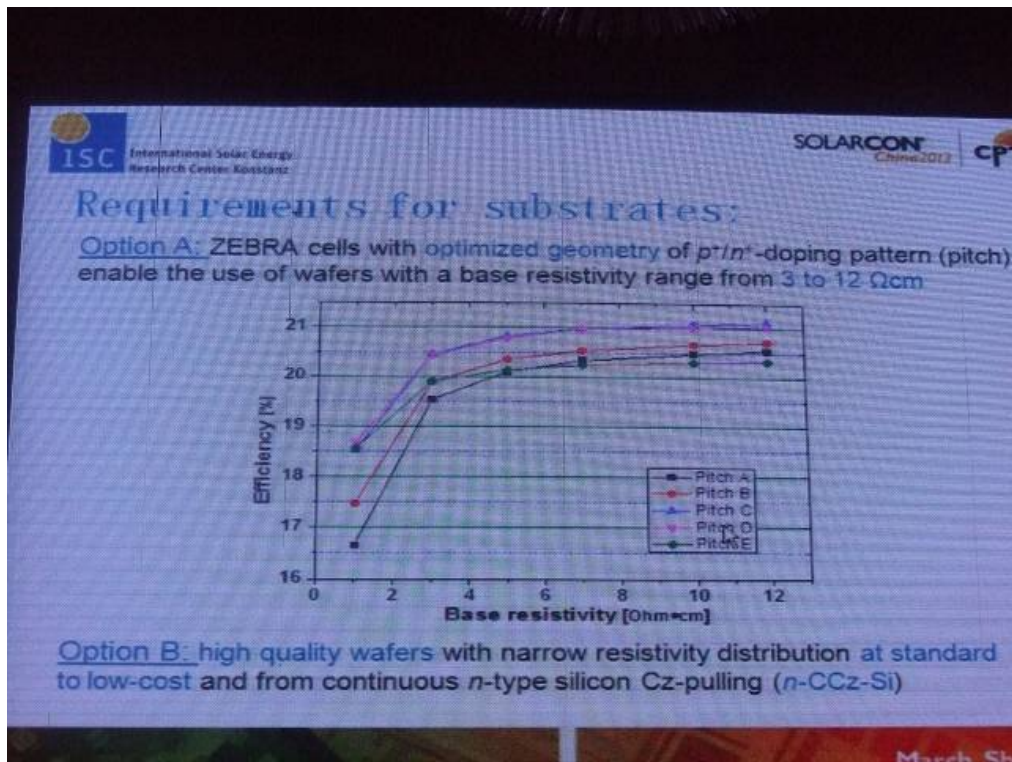
Irev: leakage current at reversed bias: hotspot issue?

圖二十八 原 H 圖形電池與加入 MWT 技術後的比較。

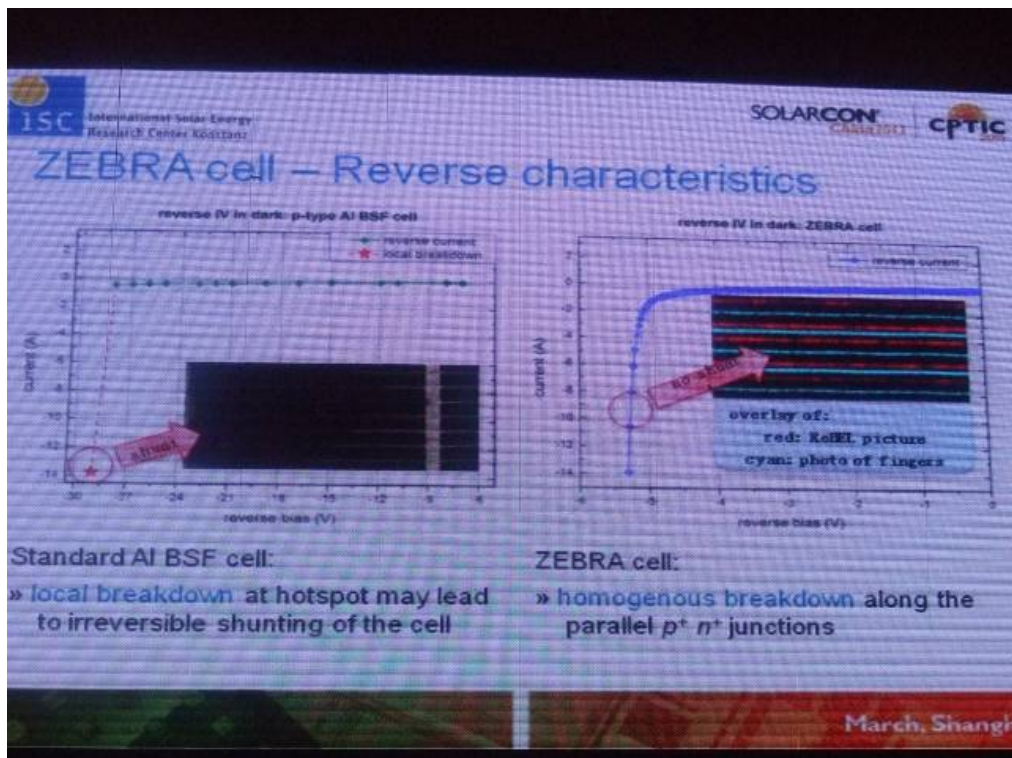


圖二十九 逆偏壓下的熱影像圖，可以看到在鑽孔處有局部的熱效應。

ZEBRA Process: An Alternative Solution for the Fabrication of High Efficiency IBC Solar Cells with Cost Effective Production, 由 ISC Konstanz 與 Silfab 共同開發的 ZEBRA 高效 IBC (Interdigitated Back Contact) 太陽電池可以達到 21.3% 的轉換效率，並且採用的製程是業界已知且可以大量生產的方式，而且可由目前的生產線升級，但要再額外加入五道步驟，也不算簡單，其中使用雷射進行熱氧化層的開孔以及使用熱擴散 BBr_3 的 p 型摻雜，達到不需要使用微影方式製作 IBC 太陽電池，依照他們自行估算製作成本較一般矽晶電池高出 $0.06\$/W_p$ ，但是對於高品質的 N 型晶片成本似乎有低估。製作 IBC 太陽電池需要採用高品質的 N 型矽晶片，除了發展中的 CCZ (Continuous CZ) 法製作出的晶片品質可以維持在一穩定的範圍內，N 型矽晶片的品質變化很大(例如阻值)，ZEBRA 製程可以在 3~12 ohm-cm 的基板阻值內可製作出穩定的電池結果(圖三十)。在逆偏壓測試上，ZEBRA 的崩潰電壓(5~6V)雖然小於一般的矽晶電池(>25V)，見圖三十一，但是由於發生逆偏崩潰時的電流是均勻分布在背表面的 p 與 n 之間，所以產生的熱效應分散後反而不會傷害到電池，逆偏穩定度測試上使用逆偏壓 10V 維持 9 個小時後，其電池並未有損壞的情況。採用 ZEBRA 組成的 60 Cell 電池模組可以產生 $305W_p$ 的功率，較一般的 $256W_p$ 功率增加了 19% 的相對發電量，計算下來 ZEBRA 模組成本需 $0.73\$/W_p$ ，而現在一般矽晶模組成本約 $0.67\$/W_p$ 。



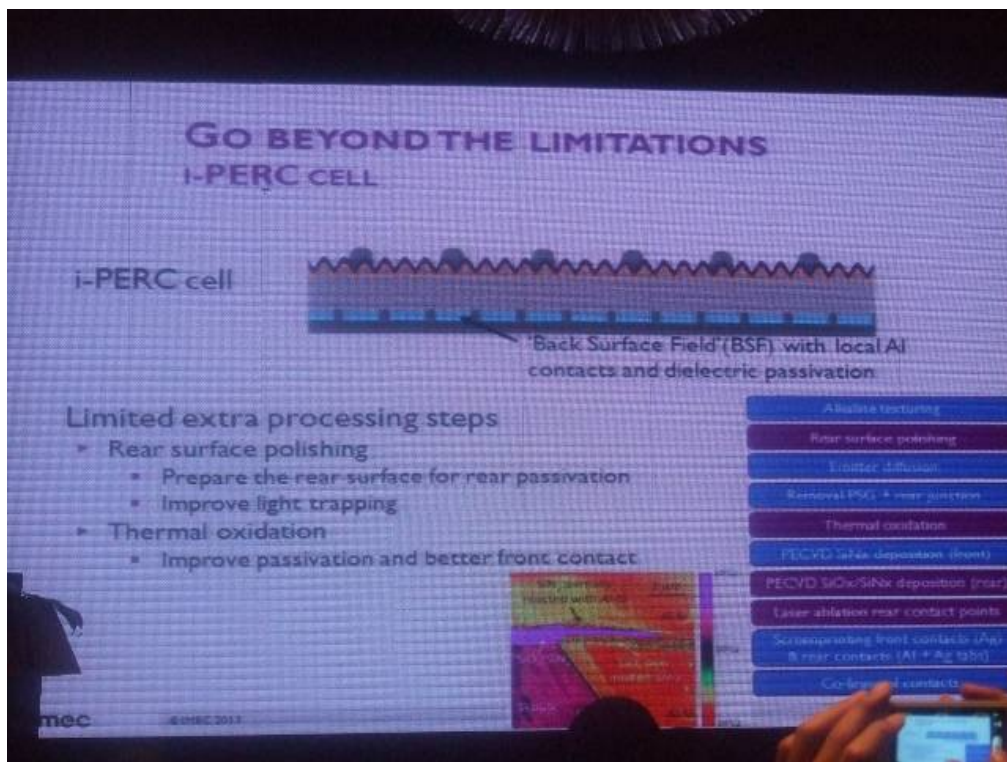
圖三十 IBC 所需的高品質 N 型晶片解決方案，A 方案是藉由 ZEBRA 製程對於基板的容忍度增加來達成，B 方案是使用 CCZ 法生產低成本的 N 型基板。



圖三十一 ZEBRA 太陽電池在崩潰電壓表現上雖然不及一般矽晶電池，但其發生崩潰電流時是均勻地分布在整個背面不受損傷，所以可以回復到正常工作狀態。

IMEC 的 Philip Pieters 演講主題為 *+20% High Efficiency Cost Effective PERC Silicon Solar Cells*，他們認為 PERC (Passivated Emitter and Rear Cells) 結構的太陽電池在製程上很簡易(圖三

十二)，較傳統矽太陽電池製程只需多四道步驟即可以將效率進一步的提升，四道步驟分別是背面拋光、熱氧化、背面鈍化層及雷射開孔，對於背面的額外處理後有幾項明顯的優勢，例如背面反射率上升、背面表面鈍化及矽晶片不彎曲，有助於短路電流開路電壓的上升以及破片率的下降，轉換效率可以達到 20.1%，

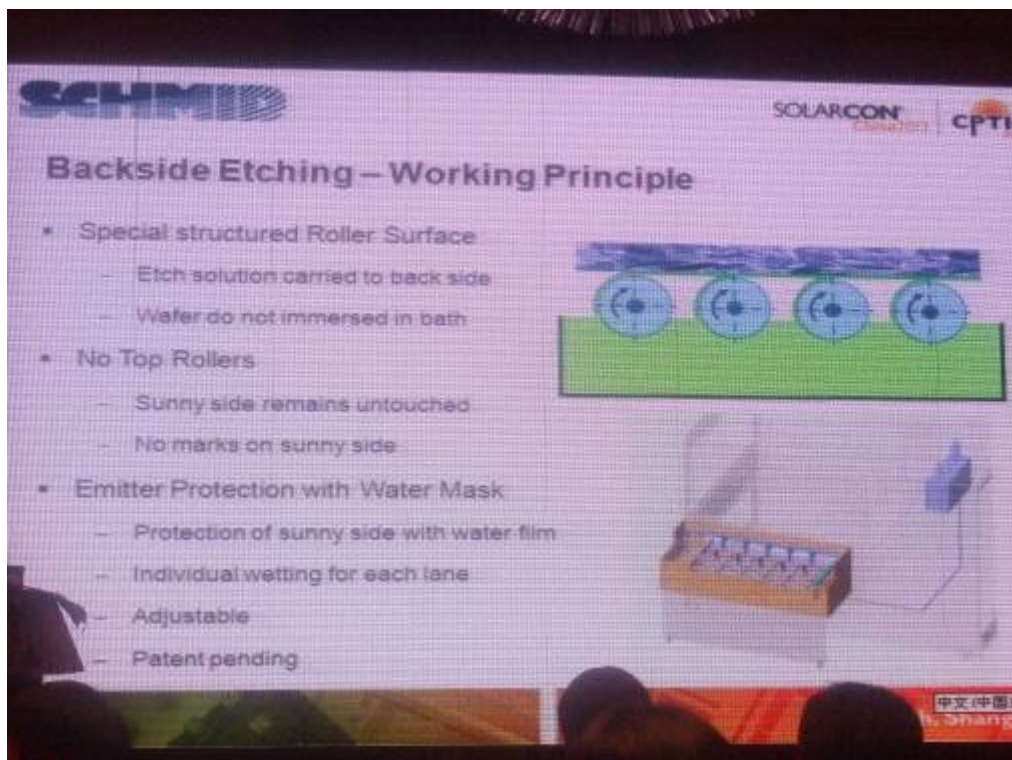


圖三十二 IMEC 開發的 PERC 結構太陽電池，約需額外增加四個步驟。

最後要提到的是 SCHMID 的蝕刻技術，圖三十三展示了 SCHMID 的單面蝕刻機台，由上方噴灑蝕刻液下面則有水流動，可以在不使用 IPA 的情況下在上層蝕刻出金字塔的抗反射結構，其金字塔的特徵尺寸較一般方式(KOH+IPA)製作出的來得小，在製作高效率的電池結構時，能夠針對單面進行處理是很方便的，另外有時候想對背面做拋光蝕刻時，他們也提出了可只對背面進行化學反應的機台設計(圖三十四)，藉由滾輪將底下的蝕刻液帶至矽晶片背面來進行化學蝕刻，其正面則有一層水薄膜加以保護，避免蝕刻液的蒸氣去影響正面的狀況。



圖三十三 SCHMID 的鹼蝕刻機台，可以單面蝕刻出金字塔抗反射結構而且不需使用 IPA。



圖三十四 SCHMID 推出可單純蝕刻背面的機台，蝕刻液藉由滾輪帶上來碰觸矽晶片，而射極面有水膜保護。

最後行程是參訪 Sunpreme 公司的生產工廠，工廠位在浙江省的嘉興，由上海的住宿旅館出發搭地鐵轉動車以及最後的 Sunpreme 交通車接送才到達，單趟車程約需兩小時，這間工廠在 2011 年九月才定案動工建廠，2012 年三月就可以開始量產，這間公司生產類似 HIT 的矽太

陽能電池，主要差異點在於使用了非常低純度的原料來製作矽晶片，所使用的多晶矽純度只有 4N (99.99%)，購買成本只需 5~8 美元/公斤，採用大量的薄膜製程機台，製作過程溫度不超過 200 度，這麼低的製程溫度可以確保不影響到低純度的矽晶片，轉換效率可以達 17%。廠房內從購入的多晶矽原料開始，進行熔融鑄造矽晶錠，切除前後品質較差處後進行切片，每一片矽晶片都會使用載子生命週期量測儀測試，依照其品質分類，這些品質較差的部份還可以混入下一次的晶錠鑄造，所以基本上多晶矽的原料是沒有任何浪費的情況，另外藉由控制鑄造溫度，每批可以生產出一部分的單晶矽，外觀上無任何的晶界，他們試圖將這個單晶矽的生產比率提高。生產出的矽晶片使用化學蝕刻來產生抗反射結構，如果是多晶矽晶片，則會多一個電漿乾蝕刻步驟，以確保不同晶面之抗反射能力相當，接著是雙面的 HIT 結構製作，兩面皆鍍上 10nm 厚的非晶矽層作為鈍化層，射極層及 BSF (Back Surface Field) 層則使用 p 型與 n 型非晶矽薄膜，這些非晶矽層都是使用一般的 PECVD 製作，不同製程的真空腔體則是相連貫的，最後則是用 PVD 的方式鍍上 TCO 薄膜並用網印製作電極，根據前後的功函數需求不同，要使用不同的 TCO 材料，例如 ITO 與 GZO。參觀後進行研究技術的交流，Sunprime 為了降低製作開發成本，要使用電鍍銅的製程來取代銀漿印刷製程，根據他們的研究顯示關鍵在於金屬與 TCO 層之間的附著性不佳，如果能找出適合的方式或中間層可以解決這問題，將是一大突破。

三、心得

2013CPTIC 這個會議與以前所參加過的會議有很大的不同，有很多在業界的廠商參與，所以討論的議題都是非常實際，約有 60% 的投稿論文是由產業界提出，由於近幾年來成本已經下降到低點，本次的會議重點大多放在高效率矽太陽電池量產製程上，如何在改變最少的情況下增加轉換效率，自然也有設備廠商以半廣告式的方式來推銷自家產品，在幾種高效率結構的矽晶太陽電池中，個人認為產業界可以接受的順序為 MWT、PERC 及 HIT 或 IBC，由於轉換成 MWT 製程門檻是最低的，即可以得到 BC 類電池的種種優勢，所以 MWT 或許是接下來的主流趨勢。藉由 CCZ 技術的成熟 N 型矽晶片的成本將持續下降，N 型的高效率電池將是另外一塊市場，相對應的電池製作技術對於 N 型基板的阻值變化容忍度將是關鍵的一環，容忍度越高代表可以有越低的晶片平均成本。雷射技術的局部區域作用特性使得常常被使用在高效率的太陽電池製程裡，雷射加工機台並不昂貴且製程速度屬中上，放入矽太陽電池量產線上是可行的，所以各種雷射相關技術將被持續研發，未來可能變成標準製程中的一環。

參訪 Sunprime 後對於電鍍鎳銅技術的研發進度有明顯的急迫感，這技術在業界已經有其需求但仍有許多困難待克服，之後如何在 TCO 薄膜上進行電鍍鎳銅而不剝落，將是計畫執行的重點之一。

四、建議事項

這次參與 CPTIC 會議得到許多有用的最新訊息，包含學術研究以及產業需求，而參訪 Sunprime 太陽電池工廠後令我更了解產業界的生產狀況。CPTIC 會議後瞭解雷射製程、銅電極技術以及採用 N 型基板的高效率矽太陽電池是重要的研發項目，其中雷射製程的局部背接觸技術以及使用照光鍍鎳銅技術本計劃已經著手研究外，雷射製程 MWT 技術以及使用 N 型基板尚未進行。參訪 Sunprime 進行技術交流後，瞭解業界需要一個在 ITO 上電鍍鎳銅的技術，這部份強烈建議投入人力研發。以下有三點建議：

- (一) 建議有類似機會時多鼓勵所內同仁參與國際交流活動。
- (二) 電極製程上，以銅鋁錫等材料取代貴重金屬銀的相關技術尚需加強研發能量。
- (三) 使用雷射加工技術製作高效率矽太陽電池。