發展高效率矽晶太陽電池

Development of High-Efficiency Silicon-Based Solar Cells

林江財

現任：台灣熱泵協會理事長、工研院綠能與環境研究所顧問

學歷：美國加州大學柏克萊分校(University of California at Berkeley) 材料博士

專長：精密陶瓷、太陽光電、複合材料

摘 要

自 2011 年以來全世界的太陽光電產業面臨市場不確定的大挑戰，歐洲各國的補助在未來將不斷下降，此外，現階段多晶矽原料的產能遠超過市場需求，如果市況持續低迷，銷售價格卻低於生產成本，將導致廠家陸續破產或放棄投資太陽光電產業。以過去眾多大廠積極研發改善矽晶太陽電池光電轉換效率，對於我國廠家而言是否具有正向效果？本文針對全球主要矽晶太陽電池廠家的高效率太陽電池發展現況與動向，探討我國太陽電池廠家是否有機會找出解決方案。

關鍵字：太陽光電(PV, Photovoltaic)、多晶矽(Polysilicon)、太陽電池(Solar Cells)、模組(PV Modules)、轉換效率(Conversion Efficiency)

一、2012 年太陽光電市場挑戰

2012 年對全球的太陽光電產業而言，應該是一個重要的分水嶺，市場變化的確超乎想像地快，一般投資過大或規模太小的廠家都很難因應，所以導致歐美太陽能廠紛紛傳出破產的消息。曾經在 2007、2008 連 2 年產量世界第一的德國 Q-Cell 公司，2010 年營收為€13.5 億，而 2011 年營收銳減為€10.2 億，虧損高達€8.46 億。Q-Cells 在今年在 4 月初債轉股的計畫失敗之後宣佈破產。該公司曾經風光的宣布投資大量資金，完成設立太陽能研發中心，以求加速提高矽晶太陽電池的轉換效率，降低生產成本，但卻為何也無法幫助該公司渡過難關呢？在此之前已有多家德國太陽能企業宣佈破產，2011 年 12 月是 Solon 和 Solar Millenium，2012 年 3 月破產的有 Scheuten Solar、Solar Hybird 和 Odersun。德國多家太陽能公司的連續破產，反映了目前德國太陽能製造業面臨了重大的困境。主要原因是策略錯誤、一窩蜂地擴廠、超額舉債投資、生產成本居高不下、毛利降低、投資研發到產生效益的時間過於冗長等等。以德國為例，其太陽光電產業有龐大內需市場的支撐，資金雄厚的大規模企業都無法長期承受虧損，更何況是錯估情勢與缺乏技術、研發能量的中小企業呢？總之 2012 年將會是太陽光電產業面臨前所未有的極大挑戰，策略上要如何因應，對於台灣規模都不是太大的廠家來說，將是荊棘遍佈，更需步步為營小心布局。

TPVIA

根據 IMS Research 的研究報告宣稱，2012 年全球太陽光電裝置容量至少可以增長 3.5%，最高增幅達 21%。這家市場分析機構預計，儘管全球最大的太陽光電市場削減補貼，但全球裝置容量將從 2011 年的 26.9 GWp 增至 2012 年的 27.8 GWp，或更高達至 32.6 GWp，漲幅為 21%；而歐洲裝置容量比例從去年的 69%降至今年的 50%。儘管預計太陽光電產業前景仍將黯淡，但實際上受到 PV 系統價格下跌、補貼削減而引發的搶裝潮，以及中等規模新興市場的驅動，需求量出現反彈。當考慮德國、義大利和法國等個別國家時，很容易對需求量做出悲觀預計；然而，觀察 60 個國家的需求量情況，前景就變得比較樂觀。依據 2012 年第一季市場資料顯示，2012 年至少有 23 個國家的裝置容量超過 100 MWp，或甚至於更多，而 2011 年僅有 17 個國家。此外 IMS 研究調查報告顯示，2011 年全球 PV 模組的製造廠排名如表一所示，中國大陸無錫尚德的模組出貨量連續 2 年排名第一 2011 年高達 2 GWp。

表一、2011 年全球前十家量產單晶矽太陽電池轉換效率廠家

		模組出貨量(MWp)
2011 年排名	**公司**	**2010 年 ⇨ 2011 年排名變化**
1	Suntech	
2	First Solar	
3	Yingli	+1
4	Trina Solar	+1
5	Canadian Solar	+1
6	Sharp	-3
7	Jinko Solar	+11
8	SunPower	
9	Hanwha Solar One	
10	Kyocera	-3
未包含模組製程服務或 OEM 出貨量		

資料來源：Suntech Tops 2011 PV Module Rankings as Chinese Dominance Continues 27 February 2012.[1]
http://www.pvmarketresearch.com/press-release/Suntech_Tops_2011_PV_Module_Rankings_as_Chinese_Dominance_Continues/2

儘管德國仍將是全球最大的太陽光電市場，但 IMS Research 預計中國大陸將緊隨義大利，成為第二大的太陽光電市場。中國仍是全球供需平衡中一大難以預測的因素之一。隨著歐洲需求量的衰退，在日益增加的壓力下，中國大陸將加速國內市場的應用，從而扶持其巨大的太陽光電模組製造基地。今年中國太陽光電裝置容量或有機會達到 8 GWp，但這一切仍是變數。未來太陽光電新興市場會以美國、澳大利亞、東南亞國家為主，但美國太陽光電市場將以大型發電廠的投資為主，開發的期程比較長。而未來日本、東南亞國家、澳大利亞將是產業關注的重點。

TPVIA

二、高效率太陽電池的研發

美國 SunPower 公司的榮譽董事長 Dr. Swanson 在今年 2 月的演講中提到，太陽光電的未來必須依靠高效率太陽電池的突破。表一[1]為全球前十大量產單晶矽太陽電池轉換效率廠家，轉換效率最高者即為 SunPower 產品 Maxeon 太陽電池 22.5%，僅接在後的是日本三洋電機的 HIT 太陽電池的 20.2%，第 3 與第 4 名則為中國大陸的晶澳與尚德。再來則為美國的 Suniva 的 19.4%，第 6 名是韓國的 Shinsung Solar Energy，7 到 10 名都是台灣的廠家，綜觀台灣的太陽電池廠家在整體的表現上算是差強人意，但如何在未來有更好的轉換效率之外，工廠大小規模與品質也會嚴重影響製造成本與出海口。

表一、2011 年全球前十家量產單晶矽太陽電池轉換效率廠家

太陽電池造廠	太陽電池轉換效率	太陽電池型式
美國 SunPower	22.5%	Maxeon Cell Tech
日本 Sanyo Electric	20.2%	HIT Solar Cell
中國大陸 晶澳 JA Solar	20.0%	JAC M6SL Secium
中國大陸 尚德 Suntech	19.7%	Pluto Cell
美國 Suniva	19.4%	ARTisun Select
韓國 Shinsung Solar Energy	19.4%	SH-1940S3
台灣 益通 E-Ton	19.3%	Mono Cell 3BB
台灣 茂迪 Motech	19.2%	XS 156B3-200R X-cells
台灣 新日光 Neo Solar	19.2%	Perfect 19
台灣 昇陽 Solartech Energy	19.1%	SR-156-3

備註：表中的單晶矽太陽電池尺寸都是 156 mm × 156 mm；效率是 2011 年夏季 Solarplaza 訪查核對的結果。

資料來源: James Montgomery, SunPower Tops in Mono C-Si Solar Cell Efficiency, Renewable Energy World, 2012 年 3 月 29 日[2]
http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/03/sunpower-tops-in-mono-c-si-solar-cell-efficiency

美國 SunPower 公司在上週宣稱，將在今年底前限量生產 24%效率的 Maxeon 單晶矽太陽電池，並將 128 片電池封裝製作成模組轉換效率亦會超過 20%以上。據稱其電池可以提供較低的反向崩潰電壓值，並且擁有較低的溫度係數，另外在遮蔭與比較骯髒的環境，可以改善發電性能。Panasonic 株式會社(併購 Sanyo Electric)本週亦聲明其 HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer)太陽電池可以達到 24.0%轉換效率，其 HIT 模組的轉換效率已經超過 20%，並且也安裝至少 2 年以上。中國大陸尚德的 Pluto 太陽電池也有 19.7%的轉換效率，該公司最近亦宣稱其 20.3%的太陽電池即將量產。而全球其他有近 24 家的太陽電池廠，也都可以量產轉換效率為 18.0-18.8%的太陽電池。但是必須瞭解的是太陽電池的轉換效率不全然與模組的效能有直接關係，高幾個百分點的模組效率，更會直接

TPVIA

影響 PV 系統的大小，以達到所設計的發電功率。對於 PV 系統設計而言，模組的轉換效率、模組成本、每峰瓦的成本、每度電的成本、安裝的實際條件等等，都需要考慮進去。

過去各國政府推動的購電優惠政策，使得太陽光地產業在 2006-2010 年的年平均成長率高達 75%，所以一般民眾可以真正體會再生能源的發展是非常明確的。然而在短期內的高成長率卻有副作用，造成政府的財政負擔也是快速地增加，尤其在歐洲與其周邊的國家，為了削減補助的財政壓力，因此將目標轉向聚焦在屋頂太陽光電系統上，在相對比較小的面積上安裝 PV 系統，所以對於高效率的太陽光電電池(與模組)的需求更為殷切。

全球在過去 30 年已經有許多公司投入研發高效率矽晶太陽電池，最典型的例子為美國 SunPower 公司的 IBC (Interdigitated Back Contact)與日本三洋電機的 HIT，其效率比一般傳統的太陽電池約高 3~4%，但是價格也高了 40%。因此要將高效率的太陽電池產品廣泛應用，而且價格又必須降低，則是相當不容易的事。目前中國大陸的太陽能業者已經相當清楚，為了提高其品牌形象與國際市場占有率，可說是傾巢而出的發動中低價位的高效率太陽電池研發與量產，例如選擇性射極(Selective Emitter)、金屬電極穿繞(MWT, Metallization Wrap-through)與雙面(Bifacial)發電電池。在 2010 年以前 SunPower 與三洋電機在高效率太陽電池的市占率達 80%以上，目前中國大陸已經急起直追，在全球著名的設備與材料大廠，如 Centrotherm、Roth & Rou、Schmid、Manz 提供整廠技術與設備自度動化的解決方案協助下，尚德(500 MWp)、英利(600 MWp)、晶澳、阿特斯、中光電等公司，在 2011 年都已經進入高效率矽晶太陽電池的量產。因此研究預估 2015 年 IBC 與 HIT 的市占率將下跌至僅 20%，而中低價位的高效率太陽電池將有近 80%的市場占有率。表二[3]列出目前市場上高效率矽晶太陽電池/模組商品化製造廠家、使用高效技術、矽晶種類與轉換效率，多晶矽太陽電池的效率也達到 18.0%的水準。由此可見未來 2 年內的市場爭奪戰將會非常白熱化，台灣的矽晶太陽電池製造廠的另一波挑戰是馬上得面對的。

尚德是施正榮博士於 2001 年在無無錫所創設的太陽光電廠，在 10 年內其規模已經達到全球最大，2006 年產能為 300 MWp，2008 已到達 1 GWp 的規模，預定 2011 年時可以高達 2.4 GWp，且期望能占有全求 50%的市場，姑且不論其能否達到目標，但尚德在高效率太陽電池的研發投資的確是非常可觀。尚德自 2003 年起即投入高效率 Pluto 太陽電池的研發與傳統的網印技術比較，可以提昇光電轉換效率 1-1.5%，並且到了 2011 年才開始量產，2008 年僅有 34 MWp 的產能，到 2011 年底已經有 16 條高效率 Pluto 太陽電池生產線，規模達 500 MWp。尚德的高效率 Pluto 太陽電池源自澳洲新南威爾斯大學(UNSW)的 PERL (Passivated Emitter and Rear Locally diffused)技術，至少 8 年的時間與 UNSW 合作研究與技術交流才獲得的成果。圖一為無錫尚德公司高效率太陽電池生產線設備相片。

TPVIA

表二、高效率矽晶太陽電池/模組商品化製造廠家與轉換效率

廠家	使用高效技術	矽晶種類	量產的轉換效率	
			太陽電池	模組
SunPower	半導體製程	p-型單晶	22.4%	21%
三洋電機	HIT	n-型單晶	21.0%	20%
尚德	選擇性射極 (Selective Emitter)	p-型單晶	19.0%	15.7%
		p-型多晶	17.0%	15.2%
天合	選擇性射極	p-型單晶	18.1%	16.4%
晶澳	選擇性射極	p-型單晶	19.2%	16.8%
		p-型多晶	18.0%	16.2%
中光電	選擇性射極	p-型單晶	-	16.6%
阿特斯	金屬貫穿式背電極 (MWT, Metal Wrap Through)	p-型單晶	-	16.5%
		p-型多晶	-	15.9%
英利	雙面受光(Bifacial)	n-型單晶	18.5%	16.2%

資料來源：Solar&Energy, “Next-Generation High-efficiency Si Solar Cell Technology and Market Forecast (2008~2015),” 2011.[3]

圖一、無錫尚德公司高效率太陽電池生產線設備

澳洲新南威爾斯大學(UNSW)的 PERL 太陽電池是採用雙層抗反射膜 DLAR (Double Layer Anti-Reflection Coating) 材料(SiO_2/ZnS/MgF)，而尚德的 Pluto 太陽電池則使用單層抗反射膜 SLAR (Single Layer Anti-Reflection Coating, SiNx)以降低成本，當然其光線的反射會

TPVIA

稍為多一些。既有的 PERL 太陽電池有主要的缺點即使用半導體的光罩製作倒金字塔的絨面處理(Inversed Pyramid Texturing)，其製程成本過高。Pluto 太陽電池的正面導線高度約 13 μm，寬度約 28 μm，高寬比約為 1:2，一般傳統的網版印刷的高寬比約為 1:4，降低導線的寬度可以減少遮蔭效應。另外，減少金屬電極導線/矽界面(Metal/Silicon Interfaces)，可以降低載子再結合(Recombination)所引發的電壓損失，所以 Pluto 太陽電池的開路電壓值(Voc, Open-circuit Voltage)可以提高。表三比較 UNSW 與無錫尚德高效率矽晶太陽電池使用的晶片種類、閉路電流、開路電壓、填充因子與轉換效率的關係。

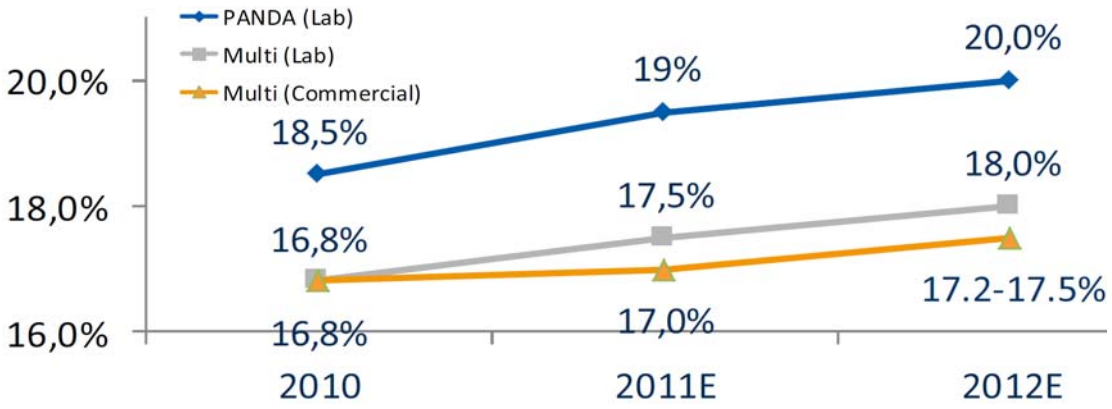
表三、高效率矽晶太陽電池使用的晶片種類與轉換效率

項目	UNSW PERL 太陽電池(FZ)	UNSW PERL 太陽電池(CZ)	Suntech PESC 太陽電池(CZ)
閉路電流 Jsc (mA/cm^2)	42.0	39.5	38.1
開路電壓 Voc (mV)	714	665	640
填充因子 (%)	82.8	81.8	81.9
轉換效率(%)	24.8	21.5	20.0

PESC (Passivated Emitter Solar Cell) 射極鈍化太陽電池
PERL (Passivated Emitter, Rear Locally Diffused Cell) 射極鈍化及背面局部擴散太陽電池

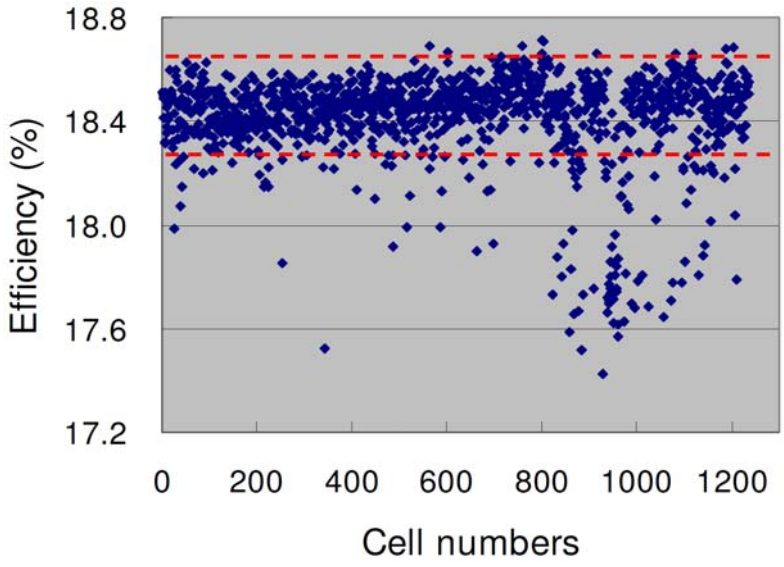
中國大陸英利綠色能源控股有限公司(Yingli Green Energy Holding Co., Ltd)在高效率太陽電池的發展模式是與荷蘭英利綠色能源、ECN 和 Amtech 合作開發 n-型 MWT 高效率太陽電池電池和模組，最大的優勢即為其啟動合作計畫後，在一年的期程就可以有成果出來，大幅縮短研發的時間與風險。圖二為英利熊貓 PANDA (單晶/n-型)與多晶矽太陽電池效率發展藍圖，圖三為英利 PANDA 高效率矽晶太陽電池的轉換效率與數量關係。PANDA 太陽電池的轉換效率約在 17.6-18.7%範圍，而且相對比較集中在 18.3-18.7%之間，平均的轉換效率為 18.5 %。英利除了與 ECN、UNSW、挪威科技大學的國際合作外，亦積極與中國大陸的大學，如南陽科大、清華大學、西安交通大學合作(見表四)。圖四則為英利 2010~2013 年高效率矽晶太陽電池的發展藍圖。英利是世界少數大型的垂直整合的太陽能大廠之一，由多晶矽、晶錠/矽晶片、太陽電池、模組、系統安裝上中下游的整合比較可以加快研發速度、掌握品質與控制製造成本，當然垂直整合是否是未來的致勝關鍵仍然有待觀查。

TPVIA



資料來源：Yingli Green Energy Holding Co., Ltd, Roma, 16 September 2011.[4]

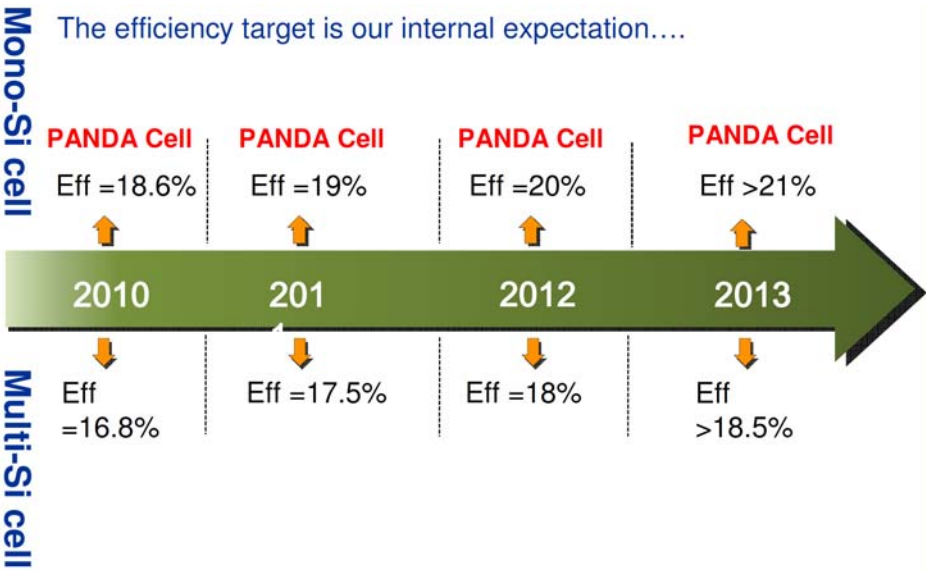
圖二、英利熊貓 PANDA (單晶/n-型)與多晶矽太陽電池效率發展藍圖



圖三、英利熊貓 PANDA 高效率矽晶太陽電池的轉換效率與數量關係[4]

表四、英利在太陽電池的研發合作計畫[4]

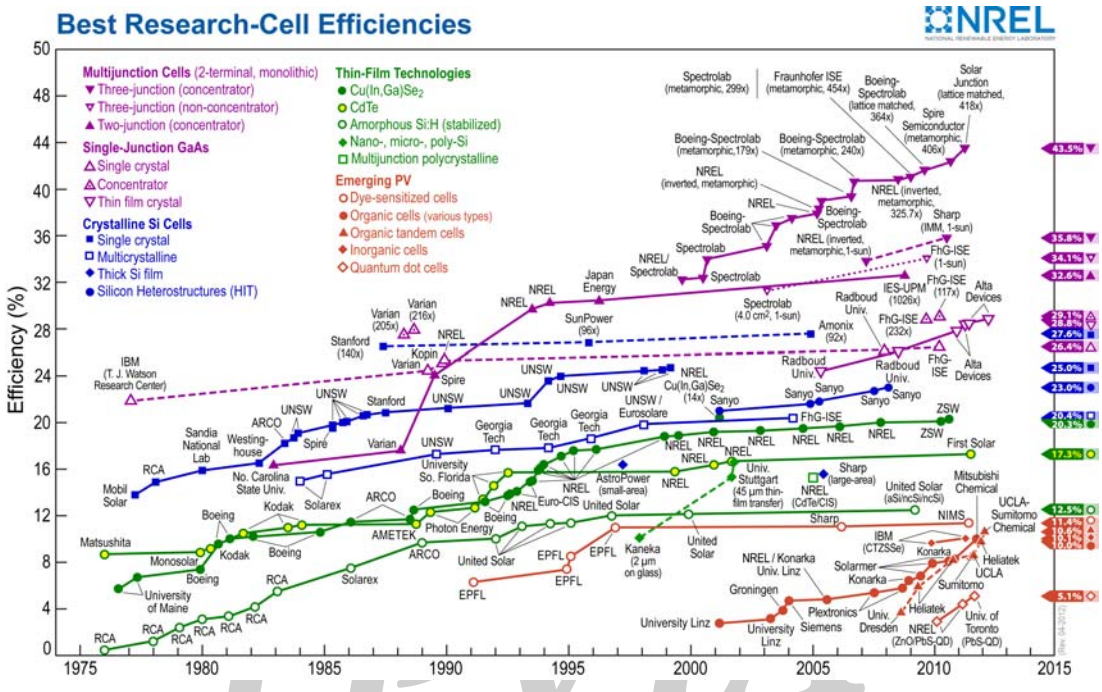
1	Energy research Centre of the Netherlands	High efficient N-Si solar cell and modules
2	University of New South Wales	New solar cells with high efficiency
3	Norwegian University of Sci.& Technology	Growth technology for high quality mono-Si
4	Nanyang Technology university	New Plasma tool for solar cells in low cost
5	Tsinghua University	New passivation thin-film on solar cells
6	Xi'an Jiaotong University	Multi-silicon ingot growth with low defects and large grain size



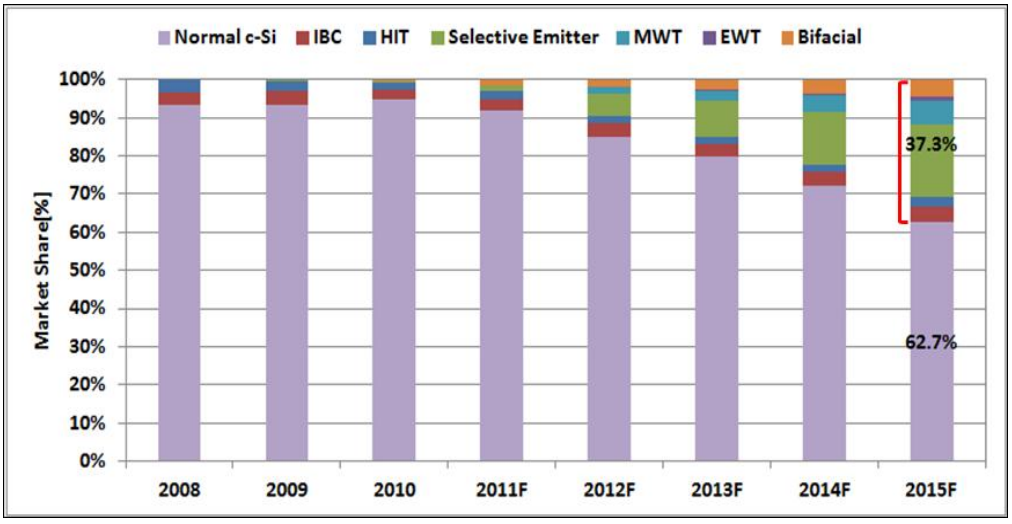
圖四、英利 2010~2013 年高效率矽晶太陽電池的發展藍圖[4]

三、高效率太陽電池的技術

圖五是美國 NREL 在 2012 年 4 月更新各類太陽電池實驗室的轉換效率，單晶矽太陽電池的效率高達 25% (澳洲 UNSW)，多晶矽太陽電池的效率高達 20.4%(德國 Fraunhofer ISE)，而 HIT 太陽電池的效率高達 23%(日本三洋電機)。2008~2015 年高效率與典型的太陽電池技術市場占有率預估如圖六所示。荷蘭 ECN 開發的 n-型矽晶金屬貫穿式背電極(MWT)高效率太陽電池[6]，其太陽電池正面與背面電極的圖案可以設計的更高效率(圖七)，也可以建立自給產品的獨特性與差異化。

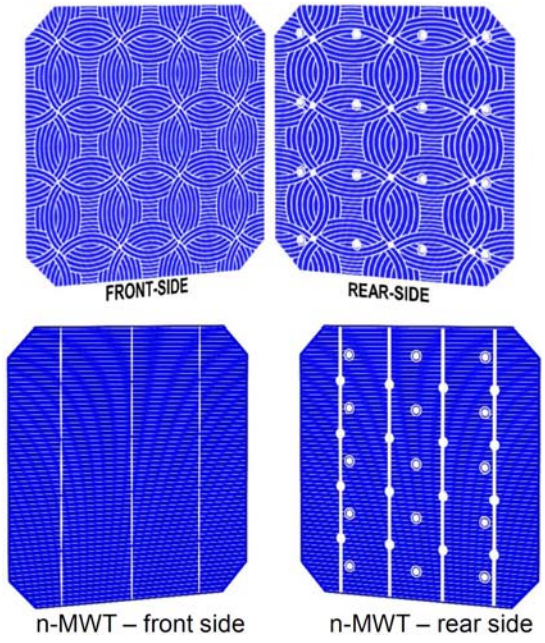


圖五、美國 NREL 更新各類太陽電池實驗室的轉換效率，2012 年 4 月[5]



資料來源：Solar&Energy, “Next-Generation High-efficiency Si Solar Cell Technology and Market Forecast (2008~2015),” 2011. [3]

圖六、2008~2015 年典型與高效率太陽電池技術的市場占有率預估



圖七、荷蘭ECN開發的n-型矽晶金屬貫穿式背電極(MWT)高效率太陽電池[6]

目前在實驗室或量產的高效率矽晶太陽電池技術 (High-efficiency c-Si Solar Cell Technology)有下列 10 種以上，至於何者較適合？則端視設備的投資規模、製程技術、良率與轉換效率高低來決定製造成本，如果可以在成本與轉換效率之間取得平衡的話，才有辦法與其他競爭對手區隔，但是可以確認的是持續長久的 R&D 是不可或缺的。

1. 正面電極埋入式太陽電池 (Buried Contact Solar Cell)
2. 雷射切溝埋入式太陽電池 LGBC (Laser Grooved Buried Contact)
3. 雷射燒結太陽電池 LFC (Laser Fired Contact)
4. 異質接面結合本質矽薄膜太陽電池 HIT (Hetero-junction with Intrinsic Thin Layer)

TPVIA

5. 背面電極太陽電池 (Back Contact Solar Cell)
6. 交叉式背面電極太陽電池 IBC (Interdigitated Back Contact)
7. 射極貫穿式背電極太陽電池 EWT (Emitter Wrap Through)
8. 金屬貫穿式背電極太陽電池 (MWT, Metal Wrap Through)
9. 射極鈍化及背面電極太陽電池 PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)
10. 射極鈍化太陽電池 (PESC, Passivated Emitter Solar Cell)
11. 射極鈍化及背面局部擴散太陽電池 (PERL, Passivated Emitter, Rear Locally Diffused Cell)
12. 選擇性射極 Selective Emitter
13. 雙面發電 Bifacial Cell

四、結語

自 2011 年以來全世界的太陽光電產業面臨市場不確定的大挑戰，歐洲各國的補助在未來將不斷下降，此外，現階段多晶矽原料的產能遠超過市場需求，如果市況持續低迷，銷售價格卻低於生產成本，將導致廠家陸續破產或放棄投資太陽光電產業。高效率太陽電池的發展與多晶矽材料的成本價格與品質有密切的關聯、矽晶片的雜質元素如氧、碳、硼、磷的含量、以及差排等缺陷的密度有關。當然如何提高轉換效率的技術需要時間研發突破，建議廠家應該與研究單位、大學合作研發，或更積極的尋求國際合作，才能使太陽光電發電的成本降低，達到歐盟設定 2030 年全世界有 10%的電力是來自太陽光電的願景，屆時再生能源取代傳統石化或核能發電的時日才能實現。

參考資料：

1. Suntech Tops 2011 PV Module Rankings as Chinese Dominance Continues 27 February 2012. http://www.pvmarketresearch.com/press-release/Suntech_Tops_2011_PV_Module_Rankings_as_Chinese_Dominance_Continues/2
2. James Montgomery, SunPower Tops in Mono C-Si Solar Cell Efficiency, Renewable Energy World, 29 March 2012. http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2012/03/sunpower-tops-in-mono-c-si-solar-cell-efficiency
3. Solar&Energy, “Next-Generation High-efficiency Si Solar Cell Technology and Market Forecast (2008~2015),” 2011.
4. Yingli Green Energy Holding Co., Ltd, Roma, 16 September 2011.
5. The National Center for Photovoltaics (NCPV) at NREL, DOE, USA, April 2012.
6. Wim Sinke, ECN, Clingendael Seminar – The Hague – 30 November 2011.

TPVIA