



另類太陽電池 - 薄膜太陽電池的發展與機會

華銀徵信部 魯瑞鋒

受到上游多晶矽材料的缺乏，使目前普及的結晶矽太陽電池（註1）發展受到限制，一般預估到2008年矽材擴廠效應逐步釋出後才得以解除警報，甚或有矽晶圓製造商Renewable Energy Corp. (REC)提出多晶矽短缺的情況恐延續至2010-2011年，較先前預期還要多2年之看法，因而在多晶矽的短缺及全球需求不斷上揚的刺激下，更加速薄膜太陽電池等可替代性方案的產生。而這被稱為第二代太陽電池技術之薄膜（Thin Film）太陽電池，也由於矽材的供不應求，限縮矽晶太陽電池產業的成長力道，而取得一個很好的發展舞台。

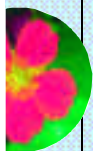
惟薄膜太陽電池之轉換效率較低，每瓦電力將要求較大之裝置空間以及較高之裝置成本，成為其發展限制。另以2005年全球太陽電池佔率6.6%之薄膜太陽電池來看，短期內要取代矽晶太陽電池之主流地位並不容易，EPIA(European Photovoltaic Industry Association)則預估2010年薄膜太陽電池之佔率達12~20%。不

過，目標2020年能將薄膜太陽電池成本降至每度電5美分，相對於未來結晶矽太陽電池之發電成本每度電仍高於10美分之立論顯然較佳，亦成為薄膜太陽電池將是具長期市場競爭力的重要依據。

註1：目前太陽電池技術主要分為晶片型（Wafer-Based）太陽電池與薄膜型（Thin-Film）太陽電池，其中結晶矽（晶片型）太陽電池應用最普遍的為單晶矽與多晶矽，佔率分別為38.3%及52.3%。

【特性與種類】

薄膜型太陽電池技術依材料類型主要可分為：非晶矽（amorphous Silicon, a-Si）、微晶矽（microcrystalline Si; mc-Si）及化合物半導體材料CdTe、及CuInSe₂（CIS）、疊層型（a-Si / mc-Si）薄膜太陽電池等。不過目前薄膜型太陽光電模組效率仍較主流的結晶矽太陽電池效率（15-17%）為低，一



般多在10%以下。茲就目前已量產之薄膜太陽電池說明如下：

1. 非晶矽 (amorphous Silicon ; a-Si)

早期非晶矽光電轉換效率較低及具有光劣化不穩定性的主要原因係材料通常為含氫非晶矽(a-Si:H)，以氫原子來填補非晶矽中之懸擺鍵(Dangling Band)所造成之缺陷，如此所製成之太陽電池，會有隨光線之照射而造成光電轉換效率降低之效果。其與結晶矽結構之主要差異係非晶矽中的載子(電子與電洞)擴散長度(Carrier Diffusion Lengths)僅約0.1 μm長(結晶矽載子擴散長度約200 μm)，所以一般非晶矽薄膜太陽電池的p-及n-層厚度<0.1 μm，但太薄的吸光層將無法有效吸收太陽光，所以一般非晶矽薄膜太陽電池需為p-i-n結構，主要吸光層則為阻值較高的本質層(i, Intrinsic Layer)。此外非晶矽薄膜於太陽電池應用中，本質上因太薄的吸光層將無法有效吸收太陽光以及轉換效率會隨著照光時間拉長而衰減(Staebler-Wronski Effect)等缺點，因此非晶矽薄膜太陽電池研究在研發近30年後，無法打入主流的發電用市場，而多應用於小功率的消費性電子產品，發展漸受冷落。但近年隨著二層或多層接合太陽電池(Multijunction Cell)技術之發展，

使得單層厚度可以降低而減緩照光後衰退的現象，因此轉換效率獲得提升。不過目前以商品化大面積量產仍以多晶矽為主，照光穩定性較差仍是多晶矽薄膜之缺點，且電池模組之效率亦較低。

2. 銅銦硒 (CIS)

CIS (CuInSe₂; Copper Indium Diselenide)吸光範圍很廣，其穩定性及光電轉換效率為各類型薄膜太陽電池中最高者，且被認為是短期內最有可能達到矽晶片型太陽電池效能之薄膜太陽電池，因此商業化之程度最快。在標準測試條件下，最佳CIS太陽電池之光電轉換效率可達19.5%，可媲美最佳的多晶矽太陽電池效率，且其大面積試製品之最佳效率已可達13%以上。但由於製程技術複雜限制量產性，未能與結晶矽太陽電池競爭，因此市場佔有率仍低，不過CIS在寒帶、多霧、多雨等陽光不充足地區，平均表現較結晶矽為優異，因此太陽電池大廠Shell Solar甚至出售原結晶矽太陽電池廠，專注於CIS太陽電池之發展。

3. 碲化鎘薄膜 (CdTe)

CdTe薄膜太陽電池屬於II-VI族化合物半導體，由於CdTe之光譜分布與太陽光譜吻合度高，可有效減少對材料之使用量，此外光電轉換效率較高



是其優點，CdTe太陽電池在實驗室之效率可達16%以上，目前技術若使用耐高溫的硼玻璃(Borosilicate)可得16%的轉換效率，而使用不耐高溫但成本較低的鈉玻璃(soda-lime)也可達12%的效率。由於模組化生產容易，因此近年商

業化的動作亦相當積極，CdTe已應用於大面積屋頂建材。不過由於模組之基材成本過高，並且碲天然蘊藏量有限，無法應付未來大量需求，以及鎘因具毒性，使得應用亦有所限制。

各類薄膜技術之比較

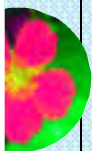
薄膜技術	a-Si	CIS/CIGS	CdTe
PV模組轉換效率	5-7%	9-9.5%	6-7.5%
優點	矽材用料少 輕、薄及彈性	無需矽材 轉換效率高於非晶矽	無需矽材 製造成本較低
缺點	轉換效率低 高設備資本支出 高光劣化現象	銻儲存量有限 製造成本高	鎘具毒性
主要廠商	Kaneka, Schott, United Solar, Fuji, Mitsubishi, Energy Conversion Devices, Energy	Photovoltaics Shell, Honda, Q-Cells, DayStar Technologies, MiaSole and Nanosolar	First Solar, Matsushita Battery Industrial
PV佔率(2005年)	4.7%	0.2%	1.6%

資料來源：IEA；JPMorgan

由於薄膜型太陽電池中目前以非晶矽之矽薄膜太陽電池為主流，同時最具發展潛力，佔率也最高，因此以下主要就非晶矽薄膜太陽電池分析之。

【製程及設備】

薄膜型太陽電池製程部分，先以玻璃、不銹鋼或聚合物等材料為基板，清洗後先用濺鍍機鍍上透明導電膜，如ITO或ZnO等高能隙材料，作為



光線入射面。然後以濕製程或乾蝕刻製程蝕刻後，送進氣相化學沈積系統(PECVD)，沈積p/n型非晶矽(a-Si)薄膜，最後再以蒸鍍機蒸鍍金屬背面電極，此製程一般使用於非晶矽薄膜。此外尚可利用低溫多晶矽(LTPS)薄膜製程技術製造矽薄膜太陽電池(包括非晶矽及微晶矽)，以超高頻電漿薄膜沈積技術，將超高頻電漿沈積系統進行低溫多晶矽薄膜開發。一般而言，薄膜太陽電池使用之材料厚度均在1微米(μm ；矽晶圓太陽電池需數百 μm)，因此極具低成本潛力。然而一直以來困擾之問題，為如何在便宜基板上發展出與矽晶圓相同之光電特性與穩定度。

由於薄膜太陽電池在大量量產後，比起結晶矽太陽電池更具成本效益，因此一直被視為下一世代的主流產品，但目前薄膜太陽電池發展的最大瓶頸，在於設備的投資成本過高，主要係薄膜太陽電池製程尚未標準化，關鍵製程設備單價高昂，導致設備費用約佔製造成本三成，以25MW之非晶矽太陽電池生產線而言，設備投資金額7,000~9,000萬美元，約當結晶矽太陽電池設備的3、4倍，足見該設備領域的技術成熟度不足，使得設備成本難以下降，因此生產設備投資額過高，阻礙薄膜太陽電池市場之成長。

【成本及效率】

由於材料在太陽電池成本中佔最大部分，如何降低成本便為重要的研發方向。而薄膜太陽電池材料厚度僅數微米，為矽晶片基板厚度的1/600至1/100。除此之外，尚省下矽晶片製造過程中，長晶與晶圓切割的花費。薄膜太陽電池更可直接以積體化製作成模組，免除銲接步驟。總體來說，薄膜太陽電池模組成本估計將可降至美金1.5/Wp以下。但由於矽薄膜太陽電池具有效率低、穩定性差等問題，其市場銷售量目前約僅佔全球太陽電池市場之5%。為此改善薄膜太陽電池之效率與穩定性，強化多樣應用面之發展策略，是當前業者提高市場佔有率之根本辦法。

隨著太陽電池市場需求的快速成長，薄膜型太陽電池之主動面積(Active Area，包括半導體層及接觸層)厚度通常只有1到10mm，不像傳統厚膜型之厚度約為100-300mm，需要使用大量、價格昂貴的材料，因此可省下許多材料成本，雖然市場將逐漸成長，但欲普及恐非短期內可達成。若以目前發展趨勢，同時考量各種太陽電池技術之成本與光電轉換效率後，一般認為短期內太陽電池市場對矽晶



片太陽電池之接受度還是較高，因此預期至2020年全球太陽電池市場中薄膜技術之占有率也才提升至23%。

由於薄膜型太陽電池相對矽晶片型轉換效率較低，單位面積發電量小，因此若要產生同樣的輸出功率，薄膜太陽光電模組需更大的裝置面積，在土地與施工成本方面較為不利。此外雖然薄膜型太陽電池可節省許多材料成本，但因現有規模不大，其生產設備卻比矽晶太陽電池生產設備貴三倍以上，以致於目前薄膜太陽電池並未取得明顯的價格優勢。依據Solarbuzz調查，2006年初薄膜太陽光電模組最低價為3.76美元/Wp，而多晶矽PV模組最低價為3.92美元/Wp、單晶矽則為4.05美元/Wp，顯示薄膜太陽電池雖較便宜，但與矽晶太陽電池之差價有限。

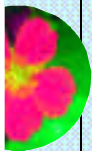
不過薄膜型太陽電池較能吸收漫射光源、適合大面積生產，可做成可撓性、與建材整合之BIPV (Building-integrated photovoltaic) 模組、或應用於消費性電子產品，且未來若有廠商能夠提供標準化的鍍膜設備及自動化生產線，將會使薄膜太陽電池產品之製造成本大幅下降。也因此目前許多TFT設備廠在看好太陽電池市場發展前景下，開始注意到LCD顯示器製程中所利用之非晶矽鍍膜技術，若能將

LCD製程中的Sputtering、PECVD設備順利移轉到薄膜型太陽電池產業，將有助於降低薄膜太陽電池生產線之投資成本與風險，對未來薄膜太陽電池市場的擴大將十分有利。

為此全球半導體設備龍頭供應商應用材料公司 (Applied Materials) 2006年初宣布以4.64億美元購併應用薄膜 (Applied Film)，切入薄膜太陽電池設備領域，也為薄膜太陽能電池的發展添助一臂之力，尤其是應用材料公司切入太陽能設備領域，以著重發展於更具未來性的薄膜太陽電池設備，而非主流性的結晶矽太陽電池設備領域，即可窺知設備大廠對未來太陽電池市場走向之判斷，因此未來若能突破設備成本的瓶頸，薄膜太陽光電在半導體設備龍頭的大力支持下發展將更為快速，甚或比原本預估薄膜太陽電池約在2010年才迅速發展更為提前。

【國際大廠動態】

由於美國太陽電池產業之發展規模明顯落後日本及歐洲，但近年積極開發薄膜型太陽電池，希望能藉此重返世界太陽光電產業之領導地位。目前全球第一大非結晶矽 (a-Si) 薄膜太陽電池廠即為美商United Solar

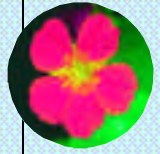


Ovonic (Uni-Solar), 2006年產能50MW, 並積極推動擴產計劃, 估計2010年產能將達300MW。而排名居次日商Kaneka則計劃將年產能由2005年30MW提高至2008年70MW。至於全球矽晶太陽電池大廠Shell, 今年更將矽晶太陽電池廠轉讓給SolarWorld, 以全力衝刺化合物半導體太陽電池的技術發展, 並預期未來短中期薄膜太陽電池將快速拓展。此外全球太陽電池大廠Schott Sola亦投資六千萬歐元興建非晶矽薄膜太陽電池模組廠, 規劃產能30MW, 預計2007年投產。另德國上市的太陽電池模組大廠Solon也入股美國薄膜太陽電池製造廠Global Solar Energy, 持有19%股權, 而目前年產能僅約2MW之Global Solar Energy, 預計2008年將擴增至40MW。

預估未來2~3年內全球矽材供應量仍難以追上市場需求, 在矽晶片太陽電池上游材料不足之虞, 薄膜型太陽電池產業正可藉此機會擴充產能搶占市場, 因此國際上述大廠正藉由生產規模擴增, 使製造成本下降, 同時吸引更多資源投入此一領域, 促使量產技術進一步提升、製程設備趨向標準化, 以確保未來薄膜太陽電池產業之成長茁壯。

【機會及優劣勢】

在矽晶片型太陽電池上游材料不足之虞, 薄膜型太陽電池產業成為市場另一關注焦點。薄膜太陽電池具備低價及大面積化之特性, 為太陽電池大量普及化帶來希望, 因此雖然技術之發展與矽晶圓太陽電池同步, 但在性能與穩定度方面仍無法與矽晶圓太陽電池相比, 主要原因係以目前之技術很難在便宜之基板上長出與矽晶圓相同品質及可靠度之薄膜矽材。不過薄膜型太陽電池雖轉換效率較低, 但較不受日照條件影響, 轉換效率也不像矽晶片型會因溫度上升而明顯降低, 因此不論在晴天或陰天之每瓦發電量反而較高, 同時具有設置地點彈性、重量輕及外表可美觀造型等優點, 而逐漸受到重視, 加上台灣在LCD產業鏈之成熟發展, 若能運用國內既有之製造優勢生產薄膜太陽電池, 將有助於國內薄膜太陽電池之發展, 而如友達、奇美等近期評估進入太陽電池市場, 更顯示其重要性。簡言之, 薄膜電池具以下幾項優勢: (1)不受矽材短缺影響, (2)不受寒暑溫差影響, 年累積發電量較高, (3)薄膜電池封裝較結晶型簡單且外表美觀, 更合適BIPV的設計要求, (4)薄膜技術與面板業相容, 結合低成本基材與成熟設備



後，極具市場潛力。

只是薄膜太陽電池產品，不僅產品轉換效率低，另外相關設備、材料等規模也相對小，因此導致產品競爭力相對薄弱，仍是許多矽晶太陽光電業者評估短期1、2年內不會投入薄膜太陽電池生產之主因。

【國內廠商及現況】

太陽能產業缺料情況嚴重，上游原料價格高漲，刺激許多廠家紛紛有意跨足薄膜太陽電池領域，目前國內從事薄膜太陽電池者不多，最早的為光華科技，成立於1988年，主要產品為消費性產品，由於看好薄膜太陽電池未來發展，2005年8月獨立太陽能部門，成立大豐能源科技，為目前唯一已有量產技術之業者，並積極展開擴廠，預估至2010年增加產能30MW。另外LCD設備廠北儒轉投資的鑫筌能源亦計劃投資5億元，引進美國EPV之技術，設立大面積薄膜太陽電池生產線，開發薄膜太陽電池及模組，規劃年產能10 MW。此外如嘉晶已投入薄膜太陽電池產品研發，崇越也稱將自日本導入技術，明年跨入薄膜太陽電池生產。

台灣在LCD產業價值鏈已奠立相當不錯的基礎，尤其下一代薄膜太陽電

池所需的生產設備，與現有面板業相關設備，有不少技術需求雷同之處，若能運用國內既有設備業之製造優勢來提供低成本、高可靠度之薄膜太陽電池生產設備，將對國內躋身全球薄膜型太陽電池市場地位大有助益。

【未來展望】

太陽光電發展如此火熱，除能源短缺議題外，供需失衡亦是另一主因，尤其是上游多晶矽短缺，造成產能擴張受限。從成本結構來看，矽晶太陽電池材料成本佔60%以上，對缺乏上游材料供應體系台灣業者，發展太陽電池難免受制於人，因此若轉換至原料成本較低薄膜型太陽電池亦是另一發展契機。尤其目前以台灣在面板設備的能量，跨入太陽電池下一代玻璃薄膜材質的生產設備研發，由於同以玻璃為基礎材料，相關領域上可望承接面板設備經驗，將有利於業者未來發展。再者生產薄膜太陽電池雖有助於解決當前多晶矽缺料的難題，不過由於其轉換效率低，僅約矽晶太陽電池的一半左右，在所需面積較大的情況下，施工費用也將同步大增，另外薄膜太陽電池仍有產品品質、穩定性及產品價格競爭力等難題尚待克服。