

應用薄膜太陽能電池於光伏建築一體化之探討

郭章淵^{1*}、鄭顯銘²

¹朝陽科技大學建築及都市設計研究所副教授

²朝陽科技大學建築及都市設計研究所博士生

摘要

受到地球暖化所衍生的溫室效應及燃料能源逐漸枯竭的問題，利用太陽能發電成為近年來備受各界矚目的焦點之一，光伏建築一體化即是薄膜太陽能電池為響應世界節能潮流的一項重要應用，它結合太陽能電池發電和建築物外牆的功能，將太陽能電池組件裝置在建築物上，使其擁有發電及替代建築材料的雙重用途，並能解決土地成本過高和整合發電運送的最佳方案，且因薄膜太陽能電池具有發電、輕薄、低成本、可撓曲、多種外觀設計等優點，又能降低二氧化碳的排放量，成為繼矽晶太陽能電池之後，被認為是當前最具發展潛力的太陽能技術，這也是未來一項新的趨勢。本研究除說明薄膜太陽能之製程原理外，並說明光伏建材一體型太陽電池模板系統之發展趨勢及實務應用，擬提供一整體性的探討。

關鍵詞：光伏建築一體化、薄膜太陽能電池、矽晶太陽能電池。

THE STUDY OF THE THIN-FILM SOLAR CELL APPLICATIONS IN THE BUILDING INTEGRATED

Jhun-Iuan Kuo¹, and Shien-Ming Jenq^{2*}

¹Institute of Architecture and Urban Design Chaoyang University of
Technology, Wufeng township, 413, Taiwan

²Institute of Architecture and Urban Design Chaoyang University of
Technology, Wufeng township, 413, Taiwan

Abstract

The greenhouse effect derived from global warming and the gradual depletion of fuel energy sources resulted in problems. Therefore, the applications of solar power have drawn much attention and become one important subject of the foci in recent years. The building integrated photovoltaic utilizing thin-film solar cells is an important application in response to the global energy saving trends. It combines the functions of solar power production and the external walls of buildings. Installation of the solar modules in the buildings suits to dual purposes as power generation devices and alternative building materials. Meanwhile, it is also the best solution for the high cost of land and the integration of power generation and delivery. The thin-film solar cells are not only with the advantages of power production, lightness, low cost, flexibility and a variety of exterior designs, but also with the ability to reduce carbon dioxide emissions. The thin-film solar cells are hence recognized as the most promising solar technology after silicon solar cells and become a novel trend towards the future. In this study, overall discussion will be provided by characterizing the processing principles of thin film solar cells and illustrating the developments and applications of building integrated photovoltaic solar cell modules.

Keywords: Building Integrated Photovoltaic, Thin-Film Solar Cell, Silicon Solar Cell.

一、前言

太陽能發電系統早期多是在室外空地架設太陽能板以產生電力，稱為光伏 (Photovoltaic, PV)，但近幾年來，隨著能源危機日益高漲與地球暖化的議題，開始有以太陽能取代傳統電力之發展，將太陽能模組取代傳統建材，作為建築物表面材料，以節省外觀建材費用及達到發電功能，此即所謂「光伏建築一體化」 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) [1]。

太陽能模組現今大多建構在建築物屋頂的平台上，但其使用面積卻無法達到該建築物所需的用電量，尤其是在用電量較高的辦公大樓，可架設光電板的區域實際是有限，所以必須尋找新的架設太陽能模組的空間。建築物的外觀可謂是光伏產業最具潛力的發展舞台，光伏建築一體化也是建築材料的一大革新，是一種綠色建築新的設計手法，其不僅具有發電與節能的經濟效益，更可替代既有建材，降低初置成本及減少資源浪費，使建築物本身變得更有價值。太陽能模組成為建築的構成材料，可以使單純的建築材料更具生命力，吸收陽光達到發電的功能，新的建築物形態已然誕生，BIPV將是未來太陽光電應用的主流。

BIPV在世界各國已蓬勃發展，尤其是德國，在當地政府積極配合下，已有輝煌成績；反觀，我國在光電產品產量雖佔全世界第四位，太陽能建築之實際案例卻屈指可數，顯見政府與產業方面仍須努力推展，亟待積極介入。以德國光伏建築四處林立為例，政府有一套完整之獎勵補助措施，投資者可以在短短時間內回收成本，六年後就開始賺錢，另以四倍之電價收購民間太陽能發電，讓民眾願意裝設太陽能系統，此為最關鍵的環節，也是該政府對環保意識之推展成果的最佳證明。

二、薄膜太陽能電池發電原理

薄膜太陽能電池 (Thin-Film Solar Cell)，是以 pn 半導體界面作為光吸收及能量轉換的主體結構。在基板上分別塗上二種具不同導電性質的 p 型半導體及 n 型半導體，當太陽光照射在 pn 界面，部份電子因而擁有足夠的能量，離開原子而變成自由電子，失去電子的原子因而產生電洞。透過 p 型半導體及 n 型半導體分別吸引電洞與電子，把正電和負電分開，在 pn 界面兩端因而產生電位差。在導電層接上電路，使電子得以通過，並與在 pn 界面另一端的電洞再次結合，電路中便產生電流，再經由導線傳輸至負載[2]。

目前薄膜太陽能電池模組的成長速度約和全球太陽能電池產業成長率相當，2005 年約成長四成，達 88MW；而美國再生能源實驗室 (NREL) 預測至 2009 年，其全球年產量可進一步擴大為 280MW，並仍以美國產量 166MW 為最高，其中 a-Si 技術年產量約 55MW。美國於太陽電池產業之發展規模明顯落後日本及歐洲，但在開發薄膜型太陽電池方面仍然具有領先地位，因此在薄膜太陽能電池未來的成長潛力被廣為看好之下，未來仍有相當機會能重返世界太陽光電產業之領導階級。

薄膜太陽能電池節省材料 (厚度可低於矽晶圓太陽能電池 90% 以上)，可在價格低廉的玻璃、塑膠或不鏽鋼基板上製造，甚至可以 Roll to Roll 方式大量生產大面積太陽能電池的特性，在業界持續尋求降低生產成本的要求，且因具有可撓曲性，容易搭配建築外牆施工等優點下，已廣被認為將是未來的明星產品。

從光能產生電能的過程中可瞭解，薄膜太陽能電池的能量轉換效率，與材料的能隙大小、光吸收係數及載子傳輸特性攸關，因此廠商為提升轉換效率的研發

方向，往往也從材料選用、鍍膜方面著手。薄膜太陽能電池中有許多種技術，包括矽薄膜技術（包括非晶矽、微晶矽及薄膜多晶矽）、化合物半導體技術（包括銅銦鎵硒 CIGS 及碲化鎘 CdTe）及新興材料技術（包括有機電池、奈米技術、球狀矽技術等）等，以下將針對薄膜太陽能電池優缺點加以說明（表 1）。

表 1 薄膜太陽能電池之優缺點分析

項目	優點	缺點
投資效益	1.非具有雄厚資金能力者無法進入，市場競爭者較少 2.產業垂直整合性高，仍有較高毛利	1.投資成本昂貴，是矽晶電池模組的 5~10 倍 2.矽晶電池模組價格回穩，減少市場對薄膜電池的使用誘因
材料供應	矽用料少或是不用矽原料，不受非晶矽價格影響	硒、銦、碲等為稀有金屬，無法支應全面性量產所需
製程管理	製程數少，製程管理相對容易	設備及技術尚未形成標準，安裝到試車所需時間長，過程中調校程序複雜
轉換效率	轉換效率提升空間大，新技術研發活動頻繁	轉換效率較低，所需裝置面積大
產品應用	可用透明、可撓曲的基板及客製化大面積生產，應用範圍廣	大面積產品之良率及穩定性控制不易

資料來源：資策會 MIC，2009 年 1 月

然而，目前的薄膜太陽能電池，有明顯的製造成本過高或是轉換效率太低的缺點，因此，各研究單位和廠商仍不斷在進行新材料或製程的研發，期望能改善目前的缺點；短期內，薄膜太陽能電池仍將是以特殊應用的市場為主。

三、 光伏建築一體化

光伏建築一體化 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) 是結合太陽能發電與建築物外牆兩項功能的產品。BIPV 能夠提供解決土地設置成本過高與整合發電設備與建築物外觀的最佳解決方案，相對於現有裝設太陽能電池模塊的方法其所帶來的優點計有：1.可有效利用建築物的表面積；2.替代建築物的外表包覆材料；3.代替屋頂、牆面、窗戶之建材；4.可遮陽，降低建築物外表溫度；5.降低整體建築成本；6.建築物外觀較美觀等[3]；但 BIPV 的日照時數與轉換效率，會因為受限於建築物外牆或頂樓板的位置而有所降低，建物部分外觀的形狀與顏色受到 BIPV 原先形狀與顏色的限制，均為 BIPV 目前所存在的缺點。

1、 光伏發電的沿革及趨勢

所謂「光伏建築一體化 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV)」，係指太陽能光伏發電與公共電網並網，並且與建築物相互結合之謂。迄今為止，光伏發電經歷漫長的發展過程，太陽能光伏發電系統與建築物結合的早期形式，主要是由德國率先提出“屋頂計劃”方案。光伏發電系統最核心的組件是太陽電池組件，

而太陽電池組件通常是一種平板狀結構，須經過特殊設計和加工步驟，使能夠完全滿足建築材料的基本要求；因此，光伏發電系統若能與一般建築結合，即為光伏建築一體化利用太陽能的最佳形式。

對於光伏建築一體化的發展，德國首先是進行示範，然後逐步推廣，已經歷了一個歷時近 20 年的發展過程：自 1991 到 1995 年，實施 1,000 光伏屋頂計劃，並開始實施電網回收；而從 1995 到 1998 年，為鞏固和評估階段，進行技術與經驗積累，並提出 10 萬屋頂計劃；到 2000 年，德國政府制定“可再生能源法”。在 1991~2003 年期間，實施 10 萬光伏屋頂項目，共安裝 300 兆瓦，至 2003 年秋天，10 萬屋頂計劃已完成。德國政府為進一步加快發展光伏發電系統，在 2004 年又修正可再生能源法，制定更加吸引私人投資光伏發電回收和補貼計劃。到 2004 年底，德國一年就安裝 600 兆瓦光伏發電系統。在 2005~2006 年期間，德國光伏迅速發展，以至於最後的正確數字也難以統計。按照德國目前的發展情形，預計至 2020 年將安裝 10 千兆瓦的光伏系統[4]。

2、太陽能光伏幕牆

太陽能光伏幕牆 (PV Curtain Wall) 是指將太陽能轉換模板密封在雙層鋼化玻璃之中，並安全地實現將太陽能轉換為電能的一種新型生態建材。光伏幕牆中的組件是由多個太陽電池經封裝處理，鑲嵌在特殊的、透明度極高、含鐵量極低的白玻璃中，彼此之間經過其背面的導線相連。光伏幕牆系統主要由光伏陣列、並網逆變設備、遠程數據採集及監控系統、陣列架體、交直流電力網及交流並網配電櫃組成。由於組件的尺寸規格可根據實際工程的幕牆進行量體定型製作，同時還有多種顏色可供選擇，因而光伏幕牆的設計不會對建築師或設計師的構想有任何的限制。此類光伏幕牆的應用，賦予建築一個全新的定義，也使光伏幕牆一體化建築被稱為具有高科技含量的藝術品，尤其是光電與建築物的完美結合，更成為國際建築界的“新寵” [5]。

SunTechnics 公司所生產的太陽能薄膜電池組件，具備獨特的可透光性和美觀的設計，能夠與建築物結合，成為建築物的一部分，裝飾美化城市的作用。它適合安裝在屋頂、幕牆、遮篷、建築物外牆、隔音屏障，或裝置成地面型太陽能發電站；它的高電壓系統，尤其適合大型項目的應用。在綠色和清潔方面有別於晶矽太陽能板，SunTechnics 太陽能薄膜電池組件在發電過程中幾乎是無排放的 CO₂。它兼取不盡之陽光轉化成電能，過程中並不會產生噪音、廢料或污染環境，正為綠色能源的最佳表現（如圖 1、圖 2） [5]。



圖1 柏林Tübingen的光電牆



圖2 柏林Freiburg的光電牆

3、國內光伏建築一體化之發展

目前在國內的太陽能產業中，生產廠家多集中於單晶矽的太陽能電池產品，有 12 家之多，且後續有意投資者仍眾。2007 年各家的產能總和已達 220MW 之多，遠超過上游矽晶圓製造廠的總產能，若太陽能產品仍持續熱銷，各家廠商維持高的移動率，短期間仍須倚靠進口矽晶原料填補此一缺口（如表 2）。

表 2 國內太陽光電生產廠商分佈與生產情況

製程	分類	廠商	產能
矽晶圓製造	單晶矽	中美矽晶	90MW (2007 年底達 120MW)
		緣能	20MW
		合晶	20MW (2007 年底達 100MW)
	多晶矽	太陽光電	預計 2008 年底達 3MW
太陽能電池製造	單晶矽太陽能電池	茂迪	200MW 2007 年底達 240MW 2008 年底達 400MW
		益通	100MW (2007 年底達 200MW)
		旺能	50MW (2007 年底達 100MW)
		昱晶	60MW (2007 年底達 260MW)
		昇陽	30MW (2007 年底達 60MW)
		新日光能源	30MW (2007 年底達 60MW)
		科冠	30MW
		太陽光電	30MW (2007 年底達 90MW)
		茂矽	30MW
		太極能源	-
		長生能源	-
		耀華	2008 年底達 30MW
太陽能電池製造	薄膜太陽能電池	大豐能源	30MW
		鑫筌能源	5.5MW
		緣能	30MW (2009 年底達 50MW)
		聯相	25MW (2010 年底達 100MW)
		威奈聯合	5.5MW (2008 年底達 35MW)
		緒能光電	2008 年底達 25MW 2012 年底達 200MW
		富陽光電	2008 年 30MW
		嘉晶	-
		崇越	-
		台達電	-
太陽能電池製造	模組製造與封裝	頂晶	25MW (2008 年底達 40MW)
		奈米龍	10MW
		知光能源	-
		中國電器	-
		生耀光電	20MW (2008 年底達 95MW)

資料來源：工業技術研究院 [6] (2007/11)，作者整理

由於上游矽晶原料的全球性缺料情況仍持續，使業者轉投資用料較節省的薄膜太陽能電池製程。由於單晶矽太陽能電池不透明的特性，使得原先使用單晶矽太陽能電池製造的 BIPV 產品，無法引起建築設計者的喜愛，以致於多運用在雨遮、遮光罩、平面屋頂等非建築主要造型處，大樓的帷幕牆由於強調景觀視覺、透視度是相當重要的因素，薄膜太陽光電電池所做的 BIPV 產品具有這項特色，使得許多業者認為未來太陽能電池，將藉由薄膜產品應用層面的擴大，間接增加產品的使用量。

薄膜太陽能電池目前最大的競爭對手仍是單晶矽的太陽能電池，但在發電的轉換效率上卻相差一倍（7%對 14%），這相當於薄膜太陽能電池需用二倍的面積才能發出與單晶矽電池相同的電量，相對所使用的結構支撐材料、施做人工成本等均增加一倍，在成本優先的考慮下，轉換效率的提升與薄膜產品降價的速度決定其產品普遍化的時間點。以理論轉換效率而言，薄膜太陽能電池系統具有轉換率優勢和耐高溫性能。矽電池的轉換效率約為 23%、單晶的砷化鎵電池轉換效率可達 27%，多晶的 III-V 族電池對光譜進行更全面的吸收，其理論轉換率可超過 50%，即使考慮聚光和追蹤兩者所可能產生的誤差損失。目前的薄膜太陽能電池系統轉換效率可達 25%，高於晶矽電池 17% 左右的轉換效率。

我國地處亞熱帶地區，陽光充足，日照量大，可謂相當適合利用太陽能做為新能源。而太陽能除了可利用曝曬、集光點燃等方法直接利用外，也能將它轉換成熱能和電能進一步加以使用。例如，在日常生活中常用的太陽能熱水器，就是把太陽能轉換成熱能的運用實例（如圖 3、圖 4）。



圖 3 中鋼的太陽能系統（圖片提供：茂迪股份有限公司）[7]



圖 4 (a) 太陽能電池的外觀 (b) 太陽能電池模組
（圖片提供：光華開發股份有限公司）[7]

四、全方位的太陽能解決方案

太陽能產業在 2008 年底，曾因國家對太陽能補貼放緩、石油等傳統能源的價格下降等因素而陷入衰退。因此，引起國內多數太陽能企業利率下降，甚至出現虧損現象，但在僅僅幾個月後，為何太陽能產業又能在市場活絡？一般而言，太陽能產業是一項新興產業，抗衡金融風暴的能力較弱，歸其原因，應是各個國家均採取相應的扶持政策：日本政府重新採取對太陽能的補貼、美國歐巴馬政府將新能源產業作為新的經濟增長點，而我國政府則採取太陽能屋頂計劃，也就是要求新建築必須節能，以建造綠建築世界，這些計劃的推出，使太陽能產業又能在全球蓬勃發展。

當代世界太陽能科技發展有兩大趨勢：一為光電與光熱結合，二為太陽能與建築的結合。在台灣，太陽能熱水器生產企業超過數十家，推廣應用範圍也在不斷擴大。專家學者們認為，太陽能建築物系統係將綠色能源和新綠建築物兩種理念結合的最佳設計，預估太陽能將是未來人類最適合、最安全和最理想的替代能源[8]。目前，世界各國都在實施所謂的“陽光計劃”，即利用太陽能轉化率約為 10%~12% 的功能，在建築物屋頂裝置太陽能發電設備，既能節省電力又有利於環保，造成太陽能的開發利用潛力無窮。據悉，在歐洲的能源消費中，約有 1/2 使用於建築的建設和運作，而交通運輸耗能則只佔能源消費的 1/4，因此可發現，建築物利用太陽能光伏已成為各國家極力倡導的事業。

一般建築物在設計初期階段，即考量利用天井和外牆空間，希望能以最大面積來接觸光源，使光伏建築一體化成為建築物一個大的能量來源，且毋須利用外加方式即可安裝太陽能電池板，可以部分或全部供應建築用電，在發電率和成本比值方面成為最佳的節能措施。因此，BIPV 使用在建築物方面則有三項優點：1. 太陽能板價格可迅速取代原有的建築材料、安裝成本亦可列入建築成本中，從而降低使用太陽能的成本；2. 在設計階段即納入太陽能，可使接光率提高並且兼具美觀因素；3. 利用建築物外牆做為太陽能電池板，減少面積之浪費，且有新的技術得到廣泛應用。[9]

另太陽能源與光伏建築一體化的相互應用，更具有其獨特的優勢：

- 一、將太陽能融入環境的總體設計，進而把建築、技術和美學融為一體，使太陽能設備成為建築的一部分，相互呈有機結合；
- 二、利用太陽能設備，完全或部分取代屋頂覆蓋層，可減少成本支出及提高效益；
- 三、可使用於平型或斜型屋頂，傳統對平型屋頂使用覆蓋式，對斜型屋頂則採用鑲嵌式；
- 四、該技術屬於一項整合性技術，涉及太陽能應用、建築、流體分析等多種技術領域，致使太陽能與建築的結合應用，遂而成為人們所關注的重要議題。

此外，其他如分體式太陽能熱水系統解決高樓大廈無法安裝太陽能的難題，不僅安裝空間可充分利用陽台、斜屋脊等位置，而且還能避免因裝設太陽能對建築構造的破壞，解決避雷、防水等安全隱憂，這些因素將使 BIPV 成為發展最迅速的太陽能應用產業。

五、結論

目前國內太陽能產業領域已開始針對屋脊、陽台、幕牆等空間加以規劃，使太陽能與光伏建築一體化的技術更加創新。隨著國內科技技術的進步和人民生活水準提高，建築物需求量迅速的增加，推動光伏建築應用是促進建築節能的重要議題。目前城鄉建設是太陽能光電技術應用的主要領域，利用太陽能光電轉換技術，解決建築物需求量增加問題，對替代傳統能源，促進節約能源應具有重要意義。

以德國而言，全年日照量較台灣還低，但該政府卻仍大力提倡太陽能之環保建築概念，此乃我國政府仍需加強推廣的地方。德國為全球第一大光電使用國家，在該政府強力主導下，太陽能建築物如雨後春筍般地建立，我國光伏建築雖為萌芽階段，發展速度較其他國家緩慢，但政府仍必須積極採取節能政策與相關補助計劃，以扶助相關產業之發展，俾能讓民眾確實瞭解太陽能的優點，否則政府與產業之努力也恐將付之一炬，所以建議由政府及產業全力相互合作，始能將 BIPV 普遍推廣至全國每一角落。

參考文獻

1. 謝明憲，太陽能產業展望，DJ財經知識庫，台北，pp.40-45（2010）。
2. 鄭淑娟，薄膜太陽能電池技術，製程與產品特性分析，台北：資策會，（2009）。
3. 姜志勇，"光伏建築一體化（BIPV）的應用"，建築電氣，27（6），pp.32-35，中國大陸（2008）。
4. Philip Drachman. "Third generation thin film solar photovoltaic technologies on track to breakthrough." Solar-Report, 2009, Germany, pp.36-38 (2009).
5. Rolf Hug. "Building integrated Photovoltaic (BIPV): Solar electric power systems conquer large roofs and facades." Solar Report, Germany, pp.29-30 (2007).
6. 工業技術研究院，"機械產業回顧與未來展望"，pp.78-80，台北（2007）。
7. 楊素華、蔡泰成，"太陽光能發電元件"，科學發展，390期，pp.50-55，台北（2005）。
8. 鄭耀宗，"太陽能產業發展問題"，台灣熱泵熱水器產業報導，pp.10-12，台北（2008）。
9. 褚玉芳，"建築節能催生光伏建築一體化"，工業建築，pp.22-26，中國大陸（2008）。