

What's fun in EE

臺大電機系科普系列

淺談太陽能電池的原理與應用

吳鎮國、林 鴻、盧以昕、許仲成、陳欣卉／臺大光電所碩士班二年級
吳育任／臺大電機系教授

一、引言

炎炎夏日，免不了要開冷氣，你有想過開冷氣時電是怎麼來的嗎？人類在發展過程中總是少不了要使用能源，當然、便宜的能源是我們所希望的。例如：核能發電、火力發電、水力發電等。可是這些便宜的能源也有其缺點，例如：產量問題、污染問題、廢棄物處理問題等。於是，再生能源的需求就誕生了，其中最具代表性的能源之一就是太陽能電池發電，一種最原始、最接近大自然的能源，擁有取之不盡、用之不竭的特性。就如同植物吸收陽光之後埋入地底幾千萬年成為化石燃料，人類將之燃燒轉換成能源，太陽能電池更加簡單，它直接將吸收的陽光轉化成人們所需的電力，想像一下，只需幾秒的太陽光日照就可以滿足地球一整天的電力所需，是多麼美好的一件事情。然而，事情也不如我們想得如此簡單，轉換效率就是個問題，成本也是個問題，但是由於它是如此的具有潛力，所以吸引了大量的研究人員加入研發，希望能帶給人類更加永續環保及更加便利的未來。世界上第一個太陽能電池便是在 1883 年，由美國人 Charles Fritts 利用 Se 材料來製作的，不過當時受限於半導體技術的不足，效率只有 1%。隨著近代半導體技術的進步、太空競賽、能源危機等因素，太陽能電池才得以快速的發展與應用，並對我們的生活造成巨大的影響，下面，我們將從介紹一座太陽能城市開始。

太陽能城市 - 弗萊堡

弗萊堡，一座位於德國巴登 - 佛登堡州 (Baden-Württemberg) 布萊斯高 (Breisgau) 郡內的城市。在二次世界大戰期間，市內的建築幾乎因為轟炸而被炸毀，但這並沒有毀掉這座美麗的城市，反而藉由此契機，引進高端的太陽能技術，將整座城市打造成一座太陽能城市。



圖 1 家家戶戶都有裝太陽能板 [1]



圖 2 家家戶戶都有裝太陽能板 [2]

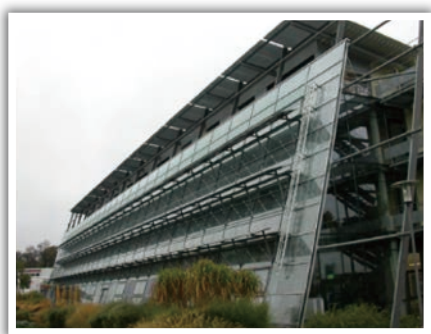


圖 3 弗萊堡的正能源屋 [4]

作為全德國太陽能最發達的地方，弗萊堡最有特色的便是它的正能源屋（plus energy house），所謂的正能源屋，指的是房屋產生得能量比消耗的還多，這種房屋以太陽能面板做為他的屋頂材料，其堅固程度甚至能夠抵抗冰雹而不損壞，最重要的它還有 25 年的保固。平均每間房屋可產出 4kWp 到 8kWp（kWp：千瓦峰值），大約是四度電到八度電、也許一般人沒有概念，我們一般夏日開冷氣、家庭一小時用電大約兩度（20 坪），也就是說，開完冷氣還有剩的電，多出來的電便可以賣給電力公司，算下來平均每戶每年賣電收入可達到 5000 歐元。

弗萊堡的日照時間約為每年 1800 小時，而在台灣中南部，每年的日照時間達到了 2200 小時，但是台灣卻沒有發展出一座太陽能城市、尤其是中南部很多透天厝可以加以發展，由此可見得台灣在對太陽能的發展與應用，還有很多進步的空間。 [3]

太陽能電池

那麼，什麼是太陽能電池呢？顧名思義，狹義或早期的太陽能電池主要定義為吸收以太陽光為主的光能，並將之激發電子，使電子有能量可以流動產生電流的晶片。而現在許多太陽能電池的形式，除了直接轉換為電能，也有直接轉換成化學能，儲存當作電池的使用，例如有些氫電池電能的來源等等。

為了進一步了解太陽能電池，我們首先要知道如何比較太陽能電池的標準。太陽能電池主要目的為把光能轉為電能，因此一般所講的效率（ η ）即為輸出電能（ P_{out} ）佔所有輸入光能（ P_{in} ）的比例：

$$\eta = P_{out} / P_{in}$$

而由使用不同的半導體材料，我們可以把太陽能電池分成幾大類：

(一) 矽太陽能電池

單晶矽是一種間接能隙的材料，無法直接吸收光子能量，但因為其在地球上含量豐富、取得容易而生產成本最低，現今市面上太陽能電池仍以矽材料為主流，同時矽也是我們現在半導體產業，IC 元件裡面的主材料，撐起了整個台灣的高科技產業，矽大概是目前人類研究最詳細的半導體材料之一。其中，矽又可以分成單晶矽、多晶矽和非晶矽。

如下圖所示，單晶矽內部的所有矽原子排列方向皆相同，原子之間鍵結也規則性重複，因為結構規則所以吸收光之後產生的電子電洞再復合的機率小，效率在三者中是最高的，不過由於需要好的結晶條件，長晶成本也最高，目前單晶矽的效率已經突破 20% 的障礙，是目前超過 20% 效率太陽能電池中，成本相對較為低的一種。

多晶矽為矽結晶，在幾個原子的範圍內原子排列方向相同，鍵結也規律重複，在不重複的邊界上，也就是晶界上，未鍵結的鍵容易讓電子電洞再結合，和單晶矽相比多晶矽製作方法較簡單且成本較低不過效率也較低。

而在晶體內，若原子排列方向和原子之間鍵結都沒規律，我們稱之為非晶矽，主要應用於薄膜太陽能電池，非晶矽材料的製作成本最低，非常適合大面積的生產，同時也可利用我們目前 LCD 平面顯示器的生產機台加以改良而大量生產，當然，這材料相對來說，效率較為低落。

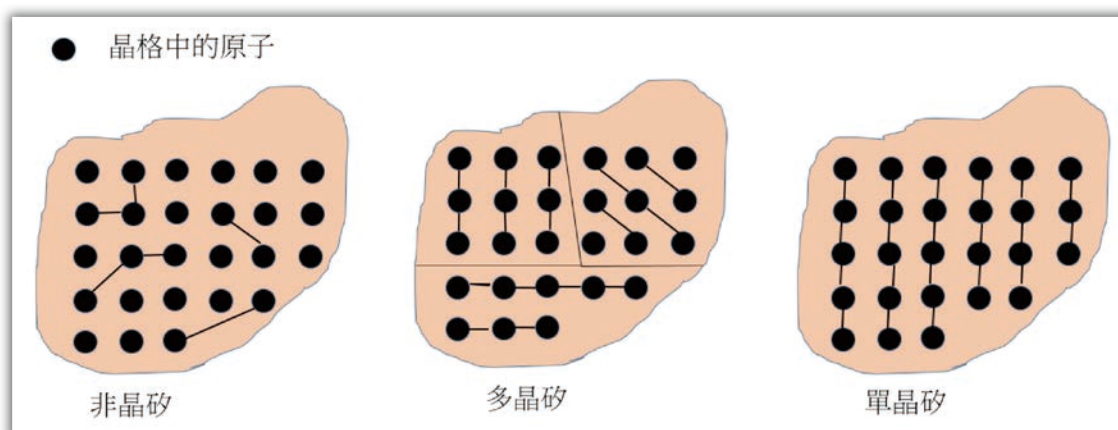


圖 4 各種晶格排列 [5]

(二) 化合物半導體太陽能電池

這種太陽能電池主要由三五族或二六族所形成的化合物半導體做成，例如碲化鎘、銅銦硒化物、銅銦鎳硒化物、砷化鎵等。和矽相比，這些化合物半導體通常為直接能隙，能直接吸收光子能量並有較高的吸收係數，因此太陽能電池能夠做成較薄的厚度，以降低電子再度復合的機會，一般所以有較好的轉換效率，例如以砷化鎵為材料的太陽能電池，其效率已經突破到 28% 不過製程成本相對較高。利用兩三種不同能隙材料組成的串接 (Tandem) 太陽能電池，效率甚至已經突破 40% [5]。

(三) 有機太陽能電池或染料敏化太陽能電池

有機太陽能電池以具有光敏性質的有機物作為半導體的材料，以光伏效應而產生電壓形成電流。主要是因為光敏性質的有機材料均具有共軛結構並且有導電性，如酞菁化合物、菁 (cyanine) 等 [6]。而有機太陽能電池按照半導體的材料可以分為單質結結構、P-N 異質結結構、染料敏化奈米晶結構，其中最特別的 NPC (nanocrystalline photovoltaic cell) 染料敏化奈米結晶，染料敏化太陽能電池 (DSSC) 主要是指以染料敏化的 TiO_2 薄膜為陽極的一類太陽能電池。它是仿生植物葉綠素光合作用原理的太陽能電池。而 NPC 太陽能電池可選用適當的氧化還原電解質從而使光電效率提高，一般可穩定於 10%，並且奈米晶 TiO_2 製備簡便，成本低廉，壽命可觀，具有不錯的市場前景。

太陽能電池的工作原理

接下來，我們來看看太陽能電池是怎麼工作的。

許多人可能會疑惑，為什麼太陽能電池非得要用半導體做為材料，難道金屬材料不行嗎？根據愛因斯坦所提出的光電效應，金屬中的電子要吸收光能，必須先克服一個能量的障礙，我們稱之為功函數

(work function)，如果能量沒有到達功函數的大小，電子是連一點光能也不會吸收，只會停留在原地不會導通。讓我們看一下圖 5，太陽能輻射的光譜，可以發現太陽輻射的光譜中，主要的成分大多是可見光到遠紅外的波長，能量換算過後大概是 $1\text{eV} \sim 3\text{eV}$ 左右，而金屬的功函數大約為 $3\text{eV} \sim 5\text{eV}$ 甚至更高，因此，太陽的光波大部分是不能被金屬吸收，激發電子的，而電子在半導體中被激發所需的能量大約是 $0.7\text{eV} \sim 4\text{eV}$ ，非常適合做為太陽能電池的材料 [7]。

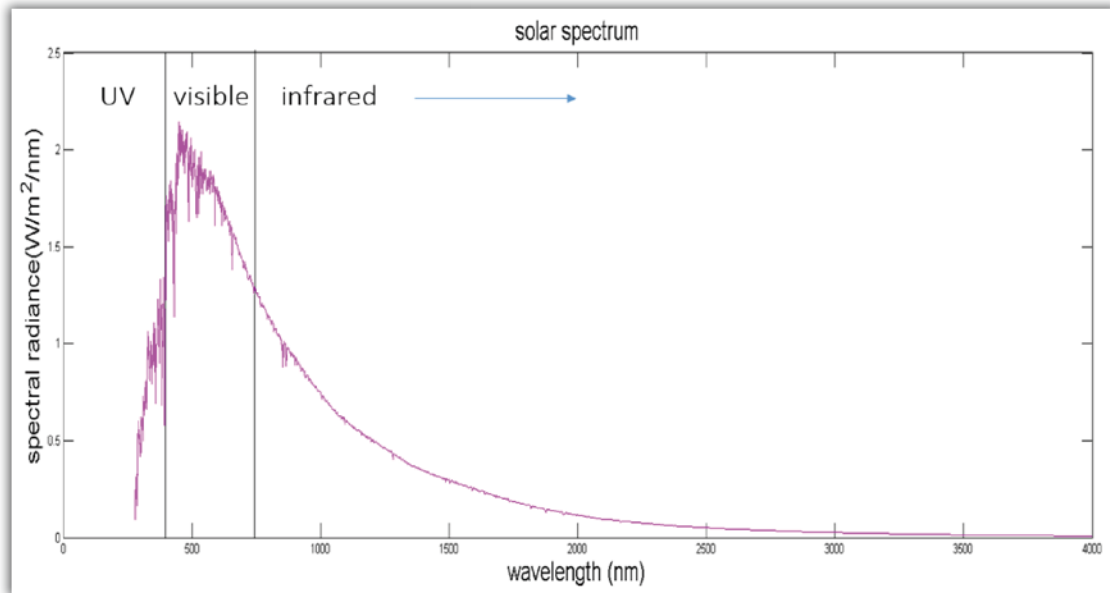


圖 5 太陽輻射的光譜 [8]

太陽能電池由 n 型和 p 型的半導體組成，以矽太陽能電池為例：所謂 n 型半導體是矽半導體材料中加入 V 族元素（例如 P），提供施體也就是自由的電子，以及空間中固定不動的帶正電的受體離子，p 型半導體則為參雜 III 族元素（例如 B），提供受體即自由的電洞，以及帶負電的受體離子。同時，半導體材料有不同的能帶，不同能帶之間存在的能隙，一般來說、當半導體吸收了光，且光子的能量大於能隙都會被吸收，進而會產生電子和電洞，如圖 6 所示，電子吸收了太陽光的能量，會往 n 型半導體的方向移動，並且釋放出一些能量成為熱能而掉到比較低的能態，如果電子越快到達電極，其損耗會越少，但是一般來說，能量釋放到能帶邊緣的附近，是無法避免的，所以這直接限制了單一材料太陽能電池的效率，同時，電子離開後所形成的電洞會往 p 型半導體的方向流動，如此就會形成了電流，提供給我們使用電能。

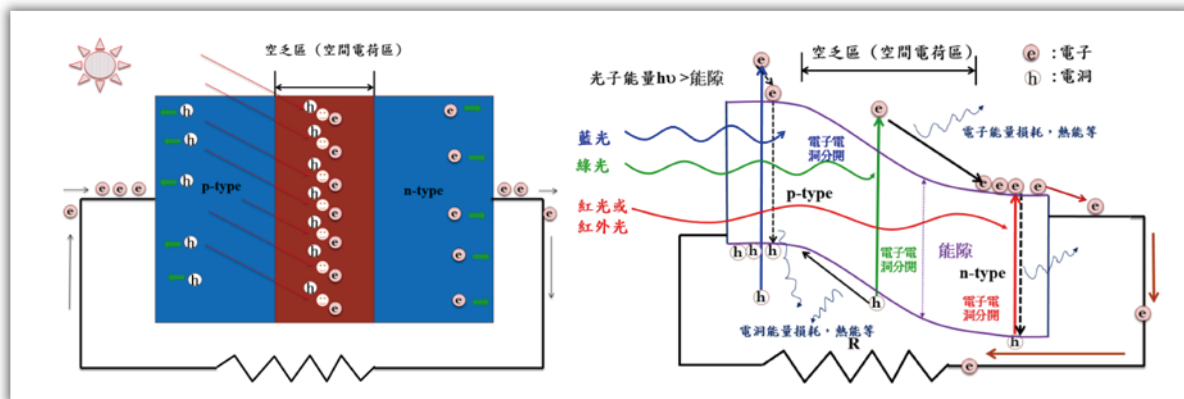


圖 6 (a) 太陽能電池概念，(b) 太陽能電池能帶圖

不過這些都是理想情況，真正太陽能電池，要克服很多問題。首先材料要能吸收的了太陽光，且在吸收太陽光產生電子電洞對時，能將電子和電洞分開，最後讓他們有足夠的能量或較佳的路徑跑到兩側導線，不會在跑到一半的時候沒力，同時如圖 6(b) 所示，如果光子是在 p 型區域或者是 n 型區域被吸收，就有很大的機率無法被拆開來，而直接再度結合釋放出熱或光。這之中牽涉了有關材料、物理、光電、化學…等專業知識，各領域的專家都在用各種角度切入，來想辦法提供改善方案。例如，材料專家會想辦法混和半導體材料長出能吸收最寬波段的晶片材料，改善長晶的品質等等。光電專家可能會改變太陽能電池的結構，防止太陽光被反射不能吸收。半導體物理專家可能會分析電子和電洞會走過的路徑，減少吸收的光能被聲子吸收以熱的形式耗散。而其中改善材料結晶品質，降低材料內部的缺陷，並且利用串接太陽能電池的方式，將不同材料對不同波長的光範圍達到個別轉換效率最佳化的情形，加以串接，以突破理論效率極限，是目前已經證實可行的方法，但是高昂的成本一直是一個需要克服的障礙，而所的努力，最後都是以降低單位面積發電成本以及耐用度為最後考量，克服這些問題，才有機會大量推廣使用。

現在和未來的發展

圖 7 顯示這過去 40 年來太陽能電池效率的發展，如圖所示，除了前面介紹過的矽太陽能電池外，過去以 CdTe 為太陽能電池材料（目前效率約為 20%）也曾經紅極一時，但由於 Cd 和 Te 在地球的低含量與其之高污染性，考慮到當以 CdTe 為太陽能材料其低效率和居家住戶有限的屋頂面積，還有 CdTe 太陽能電池回收時的困難程度，而使得 CdTe 太陽能電池的發展受到限制，進而促使其他太陽能技術高速發展。[9]

CIGS 太陽能電池（效率約為 20%）由 Cu、In、Ga、Se 以特定比例組成，和矽材料相比具有較寬的波長範圍和吸光係數，讓太陽能電池能夠做得更薄，減少缺陷造成非復合式發光的影響，這使得這種太陽能電池，就算在陰天也能有較優秀的表現，而且相較於其他種薄模型太陽能電池，其使用壽命較長。[10]

由於 Si 在地殼的含量極多，因此以 Si 為原料的太陽能電池（效率約為 20%~25%）也是太陽能主要的發展方向，如前面所介紹，單晶矽太陽能電池的轉換效率最好，多晶矽太陽能電池的成本較低，非晶矽太陽能電池則是生產的速度快，如何在產出的良率、效能之間找到一個最佳平衡點，是未來矽太陽能電池的努力方向。

目前能夠達到最高轉換效率的太陽能電池是串接式太陽能電池（效率約為 43%），它是由多個 p~n 界面組合在一起，理論上如果有無限多個不同能隙的 pn 界面組合在一起，其效率甚至能高達 87%，然而雖然它具有如此高的轉換率，但因為其在製程上的複雜和困難程度，使得它的價格較高，未來發展的方向應是著重於如果改善製程和降低它的效率與成本的比率 [11]。近年來，為了讓高成本和高效率的太陽能電池能夠有更實際的應用，許多研究開始嘗試使用聚光型太陽能電池，利用低成本壓克力製作的菲涅耳透鏡，將大面積的光源聚焦在小小一片太陽能高成本且高效率電池上面，縮小倍率 500 倍到 1000 倍，不但對效率有所改善，也直接節省了 500~1000 倍的晶片成本，但是聚焦型太陽能電池，為了讓焦點可以持續聚在小小面積的太陽能上，必須讓鏡面永遠正對著太陽方向，因此必須建立追日系統不停調整角度，又增加了不少成本，因此這類系統主要是應用在大型太陽能發電廠的場址。如圖 7 紫色線的群組，其實際效率可以超過 40%。

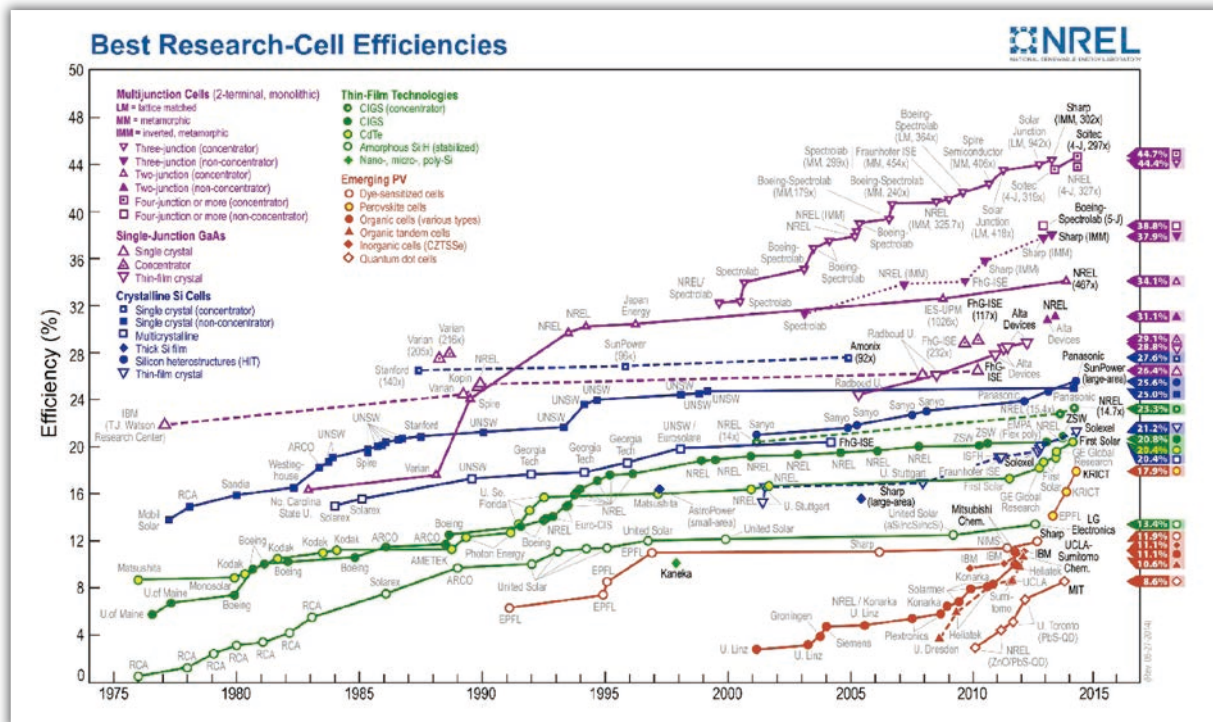


圖 7 各種類型的太陽能發展圖 [12]

結論

最後，我們要知道的是，台灣身為島國，在天然資源缺乏的情況下，能源變成一個很重要的問題，其中太陽能是重要的選項之一。缺乏自然資源既是我們發展太陽能的理由與動力，同時也造成了太陽能發展上的劣勢。例如高純度的矽原料都必須仰賴進口，另外由於人口少，導致市場小，寸土寸金的土地使得我們幾乎沒辦法像許多國土大的國家可以蓋超大型的太陽能發電廠。同時，台灣政府的發展政策和一些太陽能發展好的國家相比，也是比較不足的。當然目前最關鍵的問題是如何提高太陽能的發電效率和降低成本，讓太陽能電池的應用，如德國一樣走入民間消費市場，減少太陽能產業受到政府政策搖擺或國外保護主義的影響，才能讓產業擺脫各國政府採購的依賴，真正進入良性的成長。由於太陽能等再生能源已是未來的趨勢，台灣如何在這些趨勢中佔得先機，便考驗著政府、學者、人民的智慧。當然這還有很常的路要走，如何能做到不過度依賴補助又能繼續發展，這中間的取捨還要依賴有智慧的人來思考，相信假以時日，在大家的努力下，台灣的再生能源也能夠有國際的水準。

引用文獻

1. 2009 年影片 ,home (搶救地球) 中的截圖
2. Rolf Disch-Rolf Disch Solar Architecture <http://www.rolfdisch.de/index.php?p=home&pid=276&L=1&host=2>
3. 徐仁全，遠見 - 向太陽巨人取經 - 弗萊堡的成就 / 20 萬鎮民做綠能巨人 http://www.gvm.com.tw/Boardcontent_12994_4.html
4. 經濟部再生能源兒童網站 - 太陽能 http://140.96.175.54:8081/exhibition.jsp?power_kind=2
5. Halliday:Principle of Physics (9th edition)

6. 周宇翔、王昊禹、胡劍書、趙秋辰，有機太陽能電池的優勢與前景
7. Laurentiu Fara, Advanced Solar Cell Materials, Technology, Modeling, and Simulation
8. NREL, Reference Solar Spectral Irradiance:Air Mass 1.5 <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>
9. 萬寶周刊 – 太陽能技術發展趨勢重點簡析 http://estock.marbo.com.tw/asp/board/v_subject.asp?ID=5438344
10. Abada Energia Renovata Group – CIGS 簡介 <http://www.abada.com.tw/>
11. WIKIPEDIA - Multijunction photovoltaic cell. http://en.wikipedia.org/wiki/Multijunction_photovoltaic_cell
12. ENERGY INFORMATIVE – NREL Sets New World Record with Two-Junction Solar Cell <http://energyinformative.org/nrel-efficiency-record-two-junction-solar-cell>