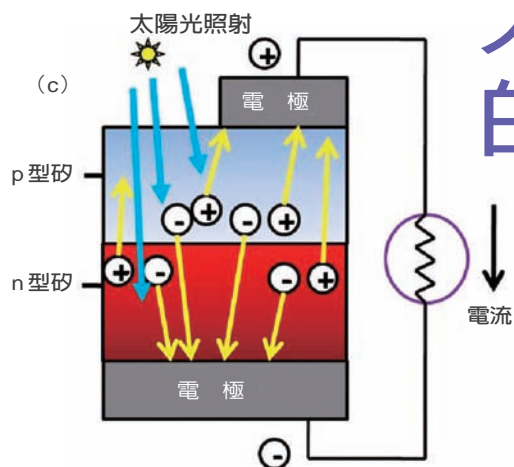


(a) 物質的光電效應；(b) 在外部電場作用下，光照產生的載子被導出的情形；(c) 半導體pn接合構成的太陽能電池的一例。



太陽能電池的高效率化

太陽能電池高效率化的基本原理是結合不同能隙的發電層材質，把它們做成疊層結構，以便能分段吸收波長範圍廣泛的太陽光能。也就是說，利用具有高低能隙的半導體材料，吸收太陽光中對應的短波長及長波長的能量。

劉智生 洪儒生

太陽是一切生命的根源，人類的生存不能沒有太陽。目前，雖然石油、煤礦等化石能源尚無立即耗盡的危機，但是因人類過度使用化石能源而排放的二氧化碳卻造成溫室效應，成為地球溫度持續升高的元兇。此外，近年來原油價格持續上漲，屢創新高，尋找替代能源已成為當務之急。

替代性能源如風力、水力、地熱、生質柴油及太陽能電池，都是相當受矚目的綠色能源，其中尤以太陽能電池因理論效率較高且技術發展較成熟，最被看好。

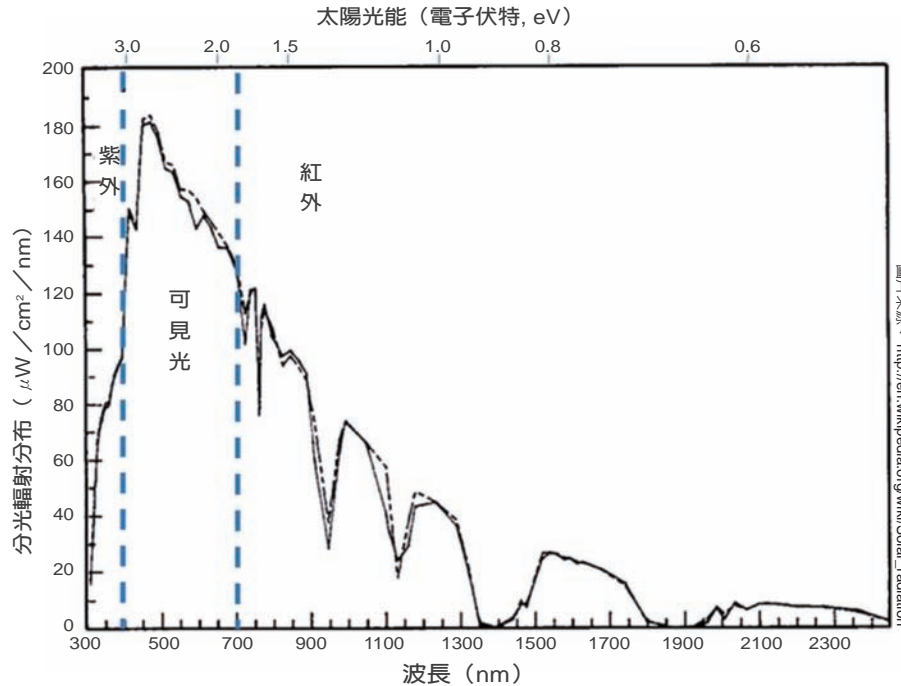
替代性能源如風力、水力、地熱、生質柴油及太陽能電池，都是相當受矚目的綠色能源，其中尤以太陽能電池因理論效率較高且技術發展較成熟，最被看好。

發電原理

太陽能電池是利用材料的光電效應，把太陽光能直接轉換成電能的元件。光線照在物質內部而產生導電載子增加的現象，稱為光電效應。對半導體物質而言，當照射光線的能量大於其能隙時，就會在內部產生自由的電子—電洞載子對。但是這些電子—電洞對會很快地再結合或被半導體內許多復合中心捕捉而消逝。

這時，若能施加內部電場，就可在載子對尚未消逝前迅速把它們引出。這一內部電場可藉由p型半導體及n型半導體的接合，而在界面處產生。太陽能電池就是利用這內建電場，有效取出電流而獲致電力。

要談提高太陽能電池的發電

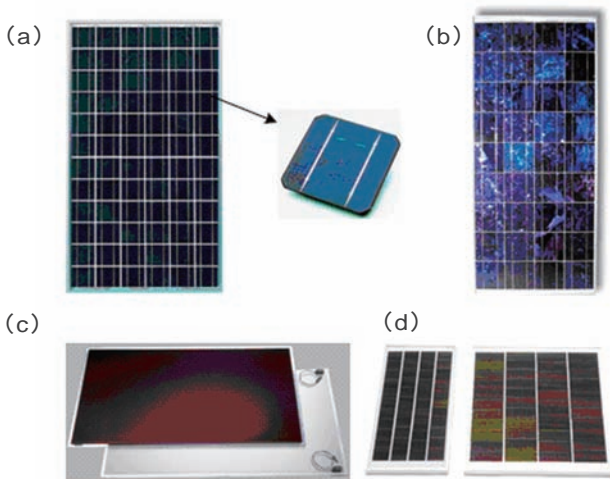


太陽光照射到地球海平面處的分光輻射分布

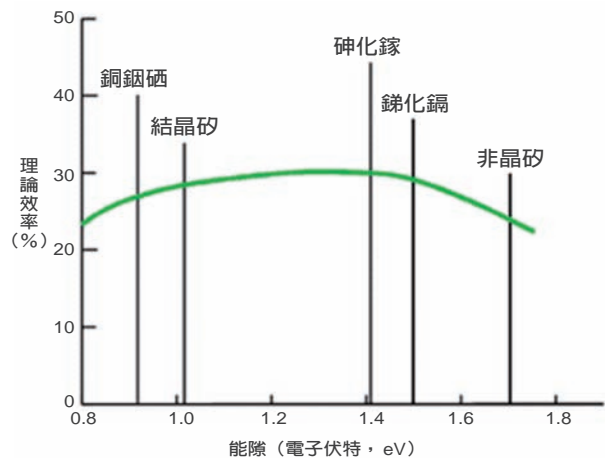
圖片來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_radiation

效率之前，首先要了解照射到地球表面的太陽光頻譜。太陽光透過稜鏡可觀察到七彩顏色，這是因為不同波長的光有不同的折射率，這現象顯示太陽光是由許多

波長不同的電磁波所構成的。其中可見光的部分從波長約700奈米的紅光到波長約400奈米的紫光，人類眼睛看不到的還有紅外光及紫外光部分。



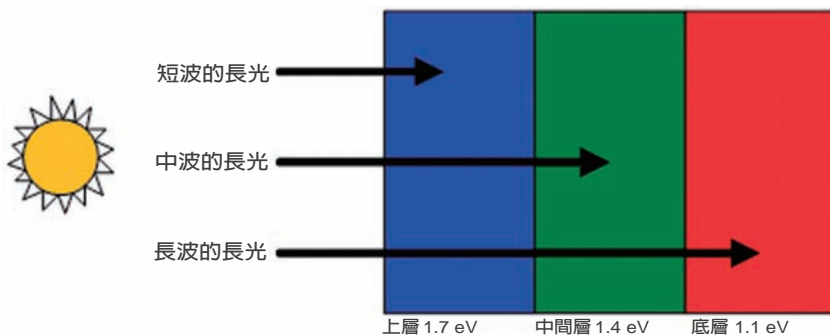
(a) 單晶矽太陽能電池；(b) 多晶矽太陽能電池；(c) 非晶矽薄膜太陽能電池；(d) 銅銦鎵硒薄膜太陽能電池。



各種不同半導體材質的能隙及理論效率

目前用作太陽能電池的材料，以矽材料最為普遍，因為它是IC半導體的主要原料，且人們對於矽原料的製作及元件加工技術已累積相當成熟的經驗。

現在市售矽晶太陽能電池的轉換效率僅約 15%，
表示矽晶太陽能電池的高效率化其實還有相當大的空間。



利用具不同能隙的半導體發電層復數疊層，來吸收不同波長範圍的太陽光能量，以獲得高轉換效率的概念圖。

太陽光頻譜的能量分布可分為 3 區塊：紫外光部分大約占 9%，可見光占 47%，剩下的紅外光約占 44%。光的能量由波長決定，波長較短的光可視為擁有較大能量的光子，長波長的光則由能量較低的光子所構成。太陽能電池的理論效率雖高，但因種種因素使實際效率降低，例如在光吸收初期就遭遇到無法把所有波長的光做最適當利用的問題。

以矽晶太陽能電池為例，由於它的能隙是 1.1 電子伏特，僅能吸收波長約 1,000 奈米以下的近紅

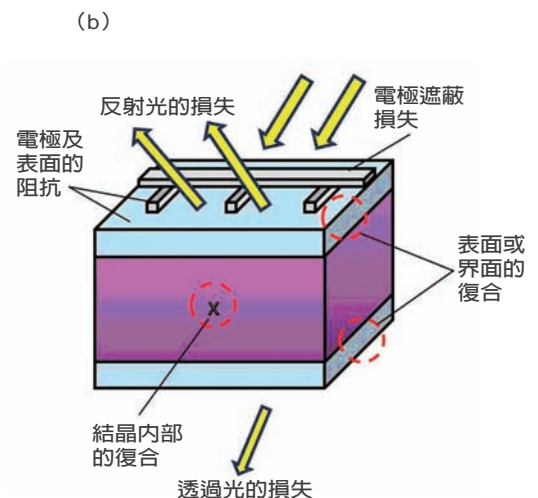
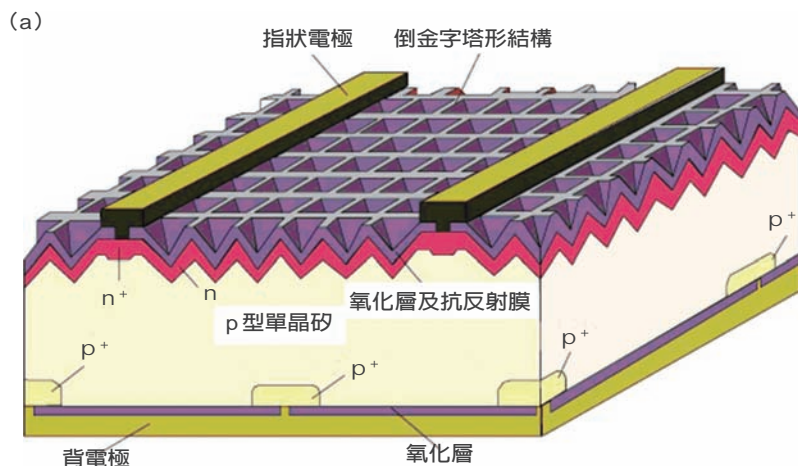
外光、可見光及紫外光的部分，至於波長較長的紅外光則完全無法吸收。此外，太陽光中短波長的藍紫光光子能量雖然高，但照射到矽晶太陽能電池時，也僅有等同於近紅外光的較低能量被利用，其餘轉為熱，這是矽晶太陽能電池效率難以超越 40% 的主要原因。

目前做為太陽能電池的材料，有單晶矽、多晶矽、非晶矽、砷化鎵、銻化鎘、銅銦硒等。其中以矽材料最為普遍，因為它是 IC 半導體的主要原料，且

人們對於矽原料的製作及元件加工技術已累積相當成熟的經驗，是很理想的太陽能電池材料。

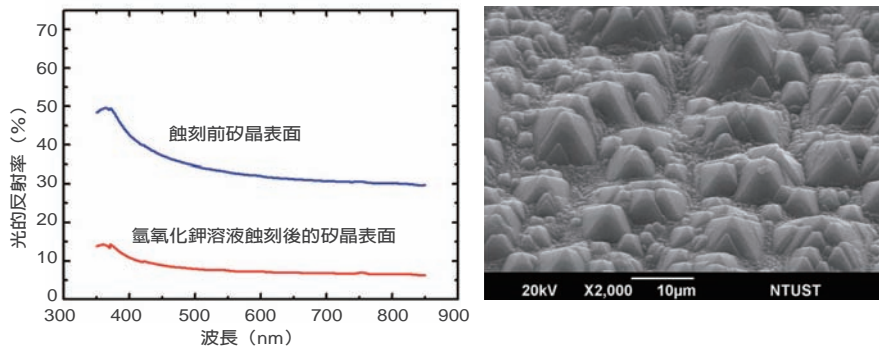
但是以矽晶做成的太陽能電池的轉換效率，除了受前述僅能吸收 1.1 電子伏特以上的太陽光能所限制外，反射光造成的損失、材料對太陽光的吸收能力不足、載子在尚未被導出之前就被材料中的缺陷捕捉而失效，或是載子受到材料表面的懸浮鍵結捕捉產生復合等諸多因素，也都會使效率下降。因此現在市售矽晶太陽能電池的轉換效率僅約 15%，這表示矽晶太陽能電池的高效率化其實還有相當大的空間。

太陽能電池高效率化的基本原理就是結合不同能隙的發電層材質，把它們做成疊層結構，以便能分段吸收波長範圍廣泛的太陽光能。也就是說，利用具有高低能隙的半導體材料，吸收太陽光中對應的短波長及長波長的能



(a) 結晶矽太陽能電池的結構示意圖；(b) 各種效率損失因子的分類。

近年來多晶矽嚴重缺料並造成價格高漲，用料極少的薄膜太陽能電池因而受到重視，其中又以無環境污染顧慮的非晶矽太陽能電池最受青睞。



(a) 藉由矽晶表面的蝕刻粗糙化以減少光反射率；(b) 蝕刻後的矽晶表面電子顯微鏡影像圖。

量。

電池製作

要理解如何提高太陽能電池的效率，須從太陽能電池的基本結構來說明。現有矽材料的太陽能電池可大致分為兩類：一是含單晶及多晶的結晶矽太陽能電池，另一是非晶矽薄膜太陽能電池。結晶矽太陽能電池是使用一定摻質程度的 p 型矽晶做為基材，在其表面製作出 n 型區域層，完成 pn 接合。由於平坦的矽晶表面會使部分太陽光反射而無法貢獻於發電，為了減少反射光的損失，一般都以氫氧化鉀的鹼性溶液把矽晶片表面蝕刻出金字塔結構的粗糙面，藉以把反射光的比率降到 10% 以下。

決定矽晶太陽能電池轉化效率的另一重要因素是載子復合的損失，包含在矽晶內部因結晶本身的缺陷造成的、以及在矽晶表面或與金屬電極的界面處存在的

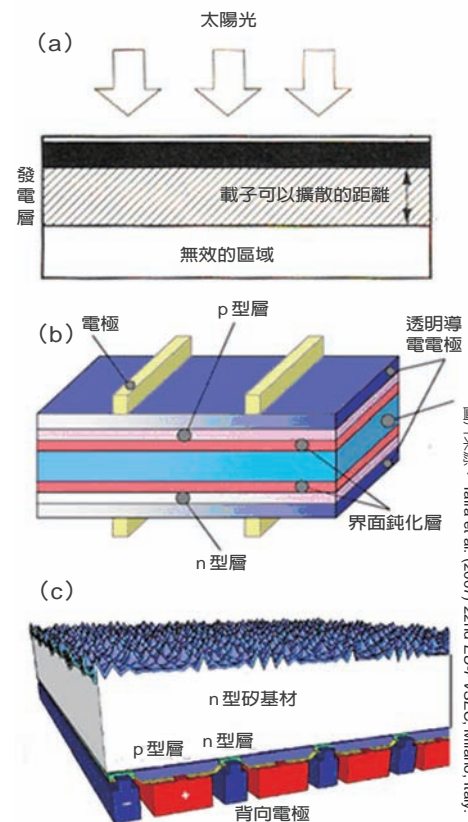
懸浮鍵結所造成的載子捕捉效應。這些都會使得電子、電洞在電池發電層內能夠移動的距離（又稱載子擴散長度）變短，如此一來就造成轉換效率下降。

要避免矽晶因缺陷造成的載子捕捉，可以使用雜質較少的高品質矽晶，但這會使矽晶取得的成本增加。一般國內的長晶廠，如中美矽晶、合晶等公司使用柴式拉晶法製作出的單晶矽，其載子擴散長度可到 100 至 200 微米，多晶矽則會降到 100 微米以下。以現階段結晶矽太陽能電池的基材厚度約為 200 微米來說，最好使用載子擴散長度也約略在 200 微米的矽晶片。

特別要注意的是，決定太陽能電池轉換效率的載子擴散長度，常會因為電池製作過程中的升溫或晶片清洗處理不當而造成特性急遽下降。對此，

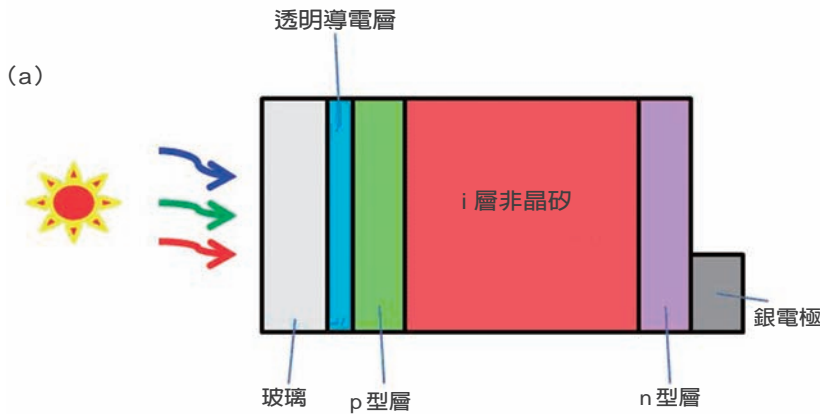
日本三洋電機公司發展出低溫製程的異質接面單晶矽太陽能電池，簡稱 HIT，以低溫的電漿化學氣相沉積技術在攝氏 200 度進行摻質膜層的製作，並獲得轉化效率高達 20% 的產品。然而這種單晶矽晶片做出來的太陽能板上、下兩面都鍍有金屬電極，約占表面 20~30%，這些電極會因遮光效應而導致發電的損失。

因此，近年來把電極全部都做在同一面的背向電極形式的單晶太陽能電池十分受到重視。譬

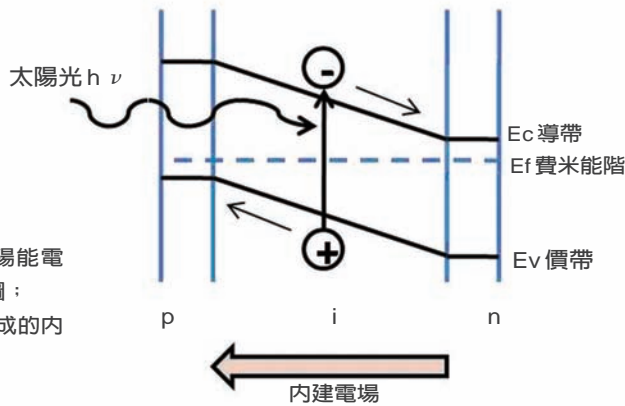


圖片來源：Taira et al. (2007) 22nd EU-PVSEC, Milano, Italy.

(a) 因載子擴散長度不足造成有效利用的發電區域減小；(b) 異質接面單晶矽太陽能電池；(c) 高效率的單晶矽背向電極新型太陽能電池。



(a)



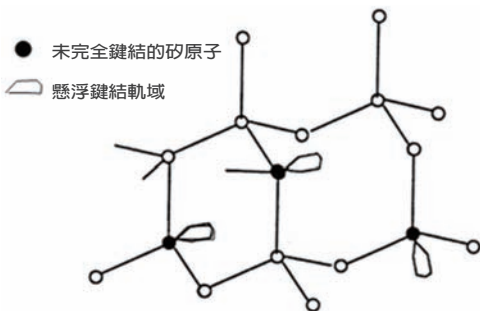
(a) 非晶矽薄膜太陽能電池的結構示意圖；

(b) p-i-n 接合時形成的內建電場。

如美國的 SunPower 公司，就是以這種概念讓太陽能板的受光面不受電極的遮蔽，量產製作出轉化率高達 22% 的太陽能電池。當然這種單面受光的矽晶太陽能電池，因為要把所有受光面產生的載子經由矽晶背面的 pn 區域電極導出，可以想像需要載子擴散長度比晶片厚度長的高品質矽晶

材料來搭配，才能有高轉化效率。

近年來多晶矽嚴重缺料並造成價格高漲，用料極少的薄膜太陽能電池因而受到重視，其中又以無環境污染顧慮的非晶矽太陽能電池最受青睞。在結構上，它包括了在玻璃上製作的透明導電下電極、p 型非晶矽層、本質非晶矽層 (i 發電層)、n 型非晶矽層，以及一層上電極銀層。使用透明的導電下電極層主要是為了增加光的穿透，使其進入本質非晶矽層以產生更多的電子—電洞載子對，再利用 p-n 非晶矽層形成的內建電場把載子經由



非晶矽的原子鍵結模型

電極導出。

與結晶矽太陽能電池單純 p-n 接合方式不同，非晶矽的 p-n 層若直接接合，會因本身缺陷太多而限制了光電轉換效果，因此必須以上下 pn 兩薄層夾著無摻質的 i 層的三明治方式，來獲得較高的光電轉換效果。但由於非晶矽結構混亂，載子的擴散長度僅約零點幾個微米，使得光電轉換效率僅 6~8%，遠不如結晶矽。

此外，非晶矽尚有轉換效率會因長時間照光而變小的光劣化效應。其詳細機制仍不十分清楚，可能與 i 層非晶矽結構中懸浮鍵結數量隨著照光而增加，即復合中心的增加有關。這是非晶矽太陽能電池亟待改善的議題。

非晶矽薄膜太陽能電池的高效率化對策是，可以把 i 層非晶矽的厚度盡量做薄，再利用膜層粗糙化增加光在膜層內的散射距離以增加吸收。另一個有效的策略，就是把不同能隙的薄膜發電層做成疊層結構。

薄膜式太陽能電池

目前單層非晶矽薄膜太陽能電池的轉化效率雖然比單晶矽低，但是因為矽的用量極少，使得製作成本相較低很多。這時若能藉由疊層結構增加其轉化效率，利基十分值得期待。

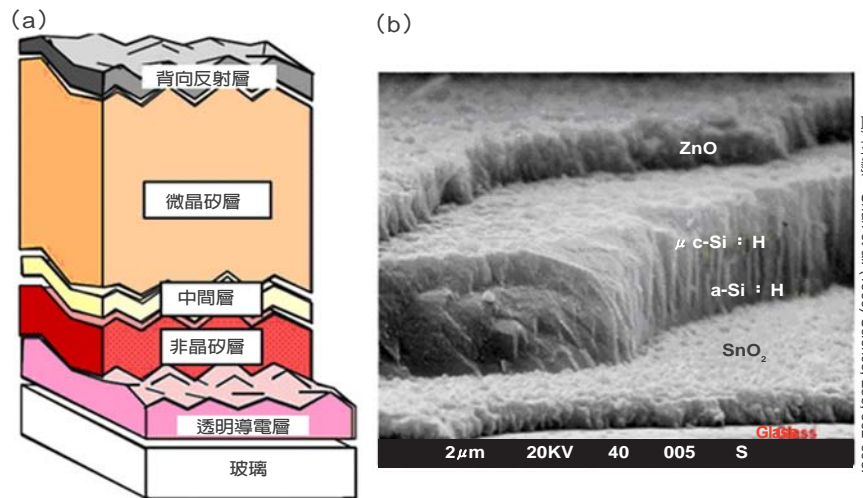
疊層是以兩種以上不同能隙的半導體層串聯堆疊。由於非晶矽的能隙約為 1.7 電子伏特，若與能隙 1.1 電子伏特的微晶矽串聯，

則成為具有兩種不同吸收波段的太陽能電池，如此轉化效率將由原本的6~8%提升到10~12%。最近日本 Sharp 公司藉由3層疊層的結構，一舉把矽薄膜太陽能電池的轉化效率提升到12~16%，已經相當接近多晶太陽能電池的轉化效率，因此已開始投入商業化量產。

由於 Sharp 公司在大型液晶面板的製作長期居世界領先的地位，而矽薄膜太陽能電池的製作技術又與液晶面板雷同，因此有朝一日，非晶矽薄膜太陽能電池會像液晶電視般普及到每一個家庭。

超高效率太陽能電池

目前量產的矽晶太陽能電池轉化效率已經達到23%，對於是否還能夠再提升，答案是肯定的。譬如最近科學家利用 III-V 族



(a) 非晶矽及微晶矽疊層薄膜太陽能電池的結構；
(b) 疊層的剖面電子顯微鏡影像圖

砷化鎵系列的化合物半導體，製作出轉化效率將近理論值40%的太陽能電池。這種高轉化效率的太陽能電池是由3種材質的發電層所構成，包括了一個高能隙的鎵銻磷（1.9 電子伏特）、一個中能隙的鎵銻砷（1.3 電子伏特），和一個低能隙的銻（0.6 電子伏特）基材。這3種材料的結合剛好可以吸收太陽光譜從紫外到紅外光的波段，大大地增加了太陽光能的吸收。

由於砷化鎵具有1.4 電子伏特的能隙，比單晶矽的1.1 電子伏特更接近太陽光頻譜的最佳位置。此外，它在可見光波段的吸收係數是矽的10 倍，表示使用更薄的膜層就可達到與矽同等的吸光效果。最重要的是砷化鎵對於抗輻射的強度也比矽好，即元件在長期使用後比較不會劣化，適合做為太空衛星或探測器的太陽能板使用。

由於太空中的太陽光強度是地表的10 倍以上，日照時間也遠較地表為長，因此美國及日本積極開發太空太陽能發電站，嘗試以微波或雷射形式把能量傳送到地球。但是現階段在製作成本上尚比矽太陽能電池高很多，以普及化的觀點來看，目前矽太陽能電池仍會是主流。

地球上的化石資源總有用完的一天，建立另一個永續能源是延續人類發展的首要條件。無污染且能量供應無匱乏之虞的太陽能電池，是未來值得期待的一項技術。以能源效率的觀點來看，太陽能電池的轉化效率確實遠比生質能源（現在約1%）高，若能持續提高太陽能電池的轉化效率並有效降低製作成本，以現在太陽能電池發電量僅占全球能源使用總量的0.1%來看，未來的發展空間十分廣大。 □

劉智生 洪儒生

台灣科技大學化學工程系

