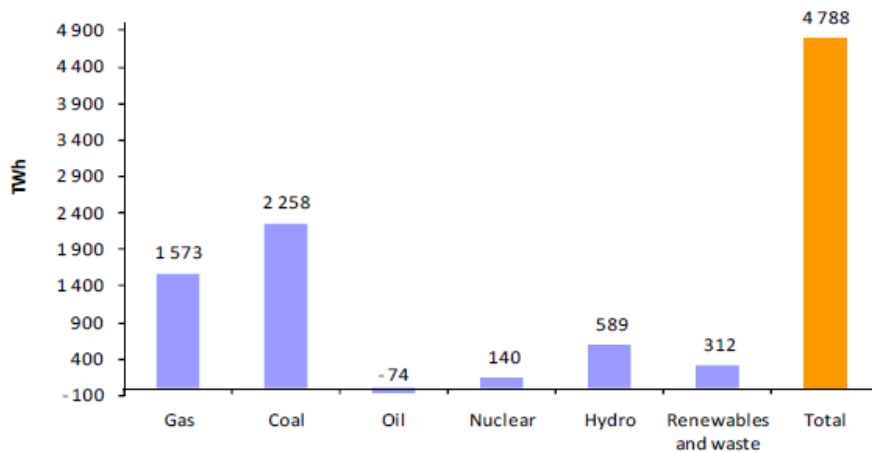


超高效率太陽電池的研究動向



電力的發明、使用與普及是人類文明發展的一大關鍵，然其大量燃燒化石燃料，亦是造成地球暖化的元兇。人類面臨能源需求與地球暖化的兩難抉擇中，再生能源發電不失為解決問題的良方。自 2000 年至 2008 年期間，全球的總發電量共增加了 4788 兆瓦·小時(TWh)，除了燃油發電減少了 74 兆瓦·小時外，其他方式的發電量皆呈現增加。遺憾的是，在全部的發電增加量中，再生能源發電的增加量僅佔了 6.5%(312 兆瓦·小時)。追究其原因，主要是發電量受天候影響不穩定，且能量密度不高。各國現今除了積極發展電網併聯技術外，同時亦大力研究如何提升再生能源的能量密度以為因應，其中提高效率是最直接的方法。本文將就再生能源中的太陽光電部份，探討超高效率太陽電池的研究動向。



Note: Renewables and waste category excludes hydropower

資料來源：Clean Energy Progress Report, IEA 2011.6

圖一、2000-2008 年全球發電增加量一覽表

目前已開發使用的太陽電池材料有許多種，主流材料為單/多晶矽、薄膜材料(矽薄膜、CIGS 及 CdTe)等。各種太陽電池的光電轉換效率(實驗室的最高值)及技術擁有者如表一所示。

表一、各種太陽電池的光電轉換效率及技術擁有者

材料	機構	國家	太陽電池面積 (cm ²)	光電轉換效率
單晶矽	UNSW	澳洲	4.0	25.0%
	SunPower	美國	148.0	24.2%

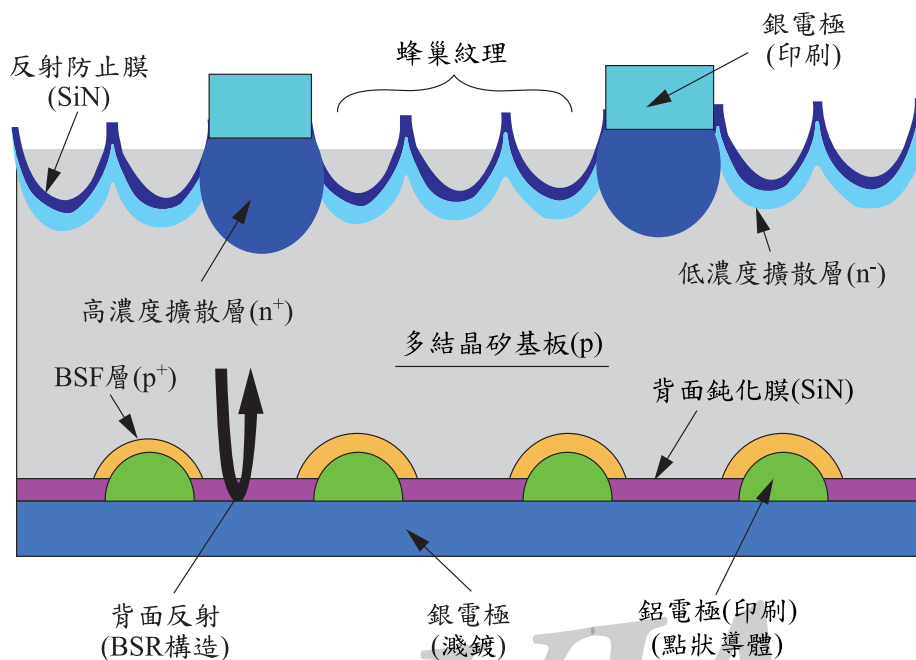
	三洋電機	日本	100.4	23.0%
多晶矽	UNSW	澳洲	1.1	19.8%
	FhG-ISE	德國	1.0	20.4%
	三菱電機	日本	217.4	19.3%
球狀矽	Clean Venture 21	日本	75.0	12.8%
III-V 族化合物	夏普	日本	0.88	35.8%
	Spire(集光型・343倍集光)	美國	1.008	41.3%
非晶矽/微結晶矽	Kaneka(模組)	日本	3827	13.4%
CIGS	ZSW Stuttgart	美國	0.503	20.1%
CdTe	NREL	美國	1.032	16.7%
染料敏化	夏普	日本	0.219	11.2%
有機材料	Solarmer	美國	0.044	7.9%

資料來源：月刊ディスプレイ 2011，6月號

為了提高材料的光電轉換效率，有許多新的結構被發掘，以下分類加以介紹。

一、多晶矽太陽電池

三菱電機採用蜂巢紋理(Honeycomb Texture)結構來減少多晶矽太陽電池受光面的光反射(如圖二)。



資料來源：月刊ディスプレイ 2011，6月號

圖二、高效率多晶矽太陽電池的構造

此種蜂巢紋理結構在過去曾應用於光蝕刻(Photolithography)技術中，成品製作面積當時僅 10 mm^2 。此次三菱電機採用雷射方式來製作圖案(pattern)，成功地開發出 150 mm^2 的快速量產技術。

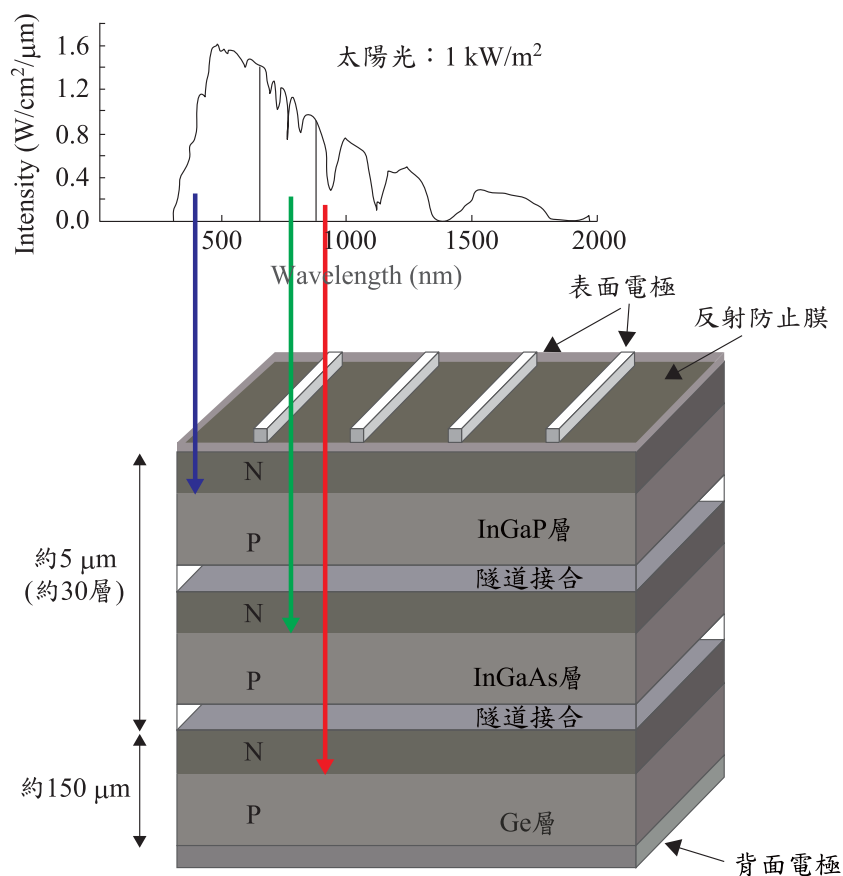
蜂巢紋理結構是如何做出來的呢？首先在多晶矽基板上形成一層耐蝕刻的膜(mask)，再以 YAG 雷射在這層膜上做出圖案，接著將其浸入由氫氟酸與硝酸組成的不具結晶方位依存性的蝕刻液中，形成可使太陽光最密受光直徑約 $14\mu\text{m}$ 的半球狀凹面(蜂巢構造)。在 150 mm^2 的電池中，約有 1 億個半球狀凹面，可以有效地減少多晶矽材料的表面反射。使用一般製程所製作的多晶矽太陽電池的光反射率約 25-30%，採用蜂巢紋理結構在沒有反射防止膜的狀態下，可將光反射率降至 20%。蜂巢紋理結構的多晶矽太陽電池經 AIST 的檢測，其光電轉換效率為 18.6%。

太陽電池若能吸收越廣波長範圍的太陽光，對提高光電轉換效率越有正面效果。但是，結晶系太陽電池卻僅能吸收紅外線波長範圍的太陽光，甚且，一旦太陽電池的厚度變薄，還會減少對太陽光的吸收量。解決前述問題的方式為：在太陽電池的背面設計一層鈍化膜、使用點狀導電以減少背面鋁電極的面積、再加上高反射電極(如圖 2 的銀電極)，以將被反射的紅外線光在太陽電池內部有效的吸收，即可增加產生的電流。採用此種背面反射(BSR-Back Surface Reflector)構造，可大幅改善對於長波長(紅外光波長)的感度。

上述新技術製作的太陽電池(面積 150 mm^2 、厚度 $180\mu\text{m}$)經 AIST 進行電流電壓測試，得到 19.3%轉換效率；為目前世界最高的實用化多晶矽太陽電池光電轉換效率(V_{oc} (開路電壓)=651mV、 J_{sc} (短路電流密度)= $38.76\text{mA}/\text{cm}^2$ 、FF(曲線因子)=0.764)。

二、多接合太陽電池

GaAs 和 InP 等 III-V 族的化合物半導體太陽電池因為價格昂貴，主要用於太空中。此種太陽電池的光電轉換效率的最適能階帶(Band Gap Energy)為 1.5eV 左右，且具有耐放射的優點。單接合太陽電池光電轉換效率的極限約為 28-30%，為了提高光電轉換效率，將電池設計成由多層疊合組成的多接合構造，以擴大對不同波長的感度(如圖三所示)。



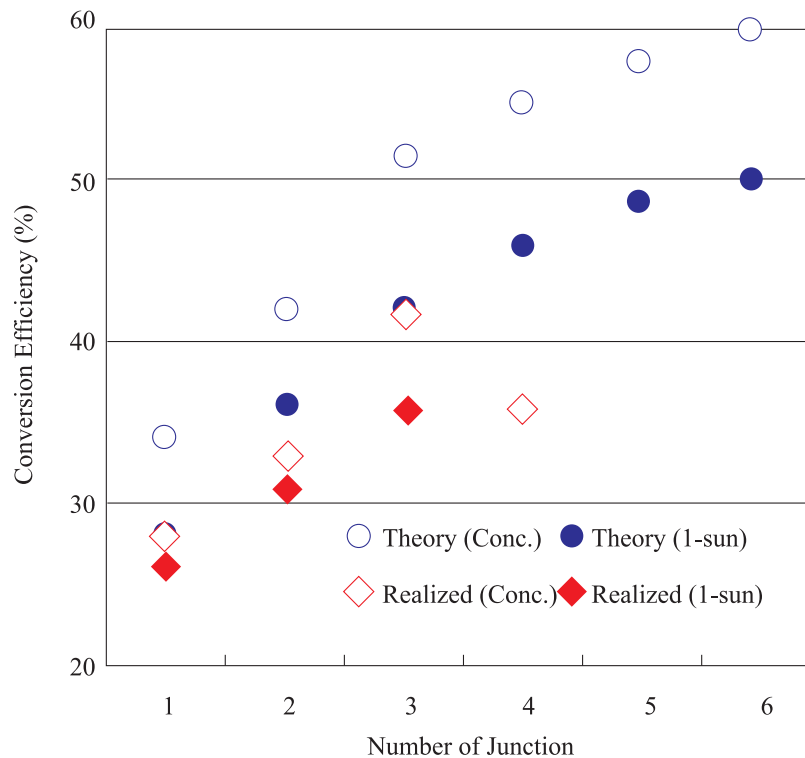
資料來源：月刊ディスプレイ 2011，3月號

圖三、利用多接合(3接合)的太陽電池有效利用太陽光的示意圖

理論上，多接合太陽電池的光電轉換效率與實際的接合層數有密切的關係。非集光的三、四接合太陽電池光電轉換效率分別為 42%、46%，加上集光裝置可將光電轉換效率分別提高至 52%、55%；經由加上集光裝置可將太陽電池的光電轉換效率提高 7-12%(如圖四所示)。

多接合太陽電池結構的構想始於 1960 年，到了 1980 年，應用的結構有下列三種：①利用三稜鏡分離不同波長的太陽光，再依不同波長對應不同的太陽電池材料；②將多層電池以金屬材料連接的金屬跨接(Metal Inter Connector)結構；③將多層電池所產生的電流個別取出的機械堆積(Mechanical Stack)結構。

多層接合時會有因應接合需滿足的低電阻損失、低光學損失的所謂隧道(Tunnel)接合技術問題。隧道接合技術在接合時若有不純物造成的陷阱(Trap)擴散至上層電池，則將無法達成低電阻損失及低光學損失的接合技術要求。



資料來源：月刊ディスプレイ 2011，3月號

圖四、多接合太陽電池的理論/實際效率和接合數的依存性示意圖

1987年，可確實抑制不純物擴散的雙層異質接合(DH-Double Hetero)結構用於隧道接合，促使 Tandem 的出現，做出了當時世界最高光電轉換效率 20.0% (AM1.5)的 AlGaAs/GaAs 二接合太陽電池。NREL 將上層的 AlGaAs 以高品質的 InGaP 取代，做出了更高光電轉換效率的太陽電池。

表二是高光電轉換效率太陽電池的主要技術，主要的技術重點為①頂層太陽電池材料的選定、②低電阻損失和低光學損失的隧道接合技術、③基板、④晶格匹配、⑤載子(Carrier)閉鎖、以及⑥光閉鎖。

InP 太陽電池具有優異的耐放射線特性，豐田工業大學在 1997 年以 InGaP 為三接合太陽電池的頂層材料，經放射線照射後，具缺陷的少數載子產生注入促進退火(Anneal)現象；2000 年，Japan Energy Corporation 成功地做出光電轉換效率高達 31.7%的 InGaP/GaAs/Ge 三層接合太陽電池。2002 年，日本夏普公司已將 InGaP 高光電轉換效率多接合太陽電池實際應用於太空中。

表二、高光電轉換效率太陽電池的主要技術一覽表

主要技術	過去	現在	未來
頂層電池材料	AlGaAs	InGaP	AllnGaP
第3層材料	無	Ge	InGaAsN 等
基板	GaAs	Ge	Si
隧道接合	DH 結構 GaAs	DH 結構 InGaP	DH 結構 (Al)GaAs
晶格匹配	GaAs 中間電池	InGaAs 中間電池	(In)GaAs 中間電池
載子閉鎖	InGaP-BSF	AllnP-BSF	Widgap-BSF (QDs)
光閉鎖	無	無	布拉格(Bragg)反射 等
其他		(逆磊晶(Epi)結 構)、薄層	(逆磊晶(Epi)結 構)、薄層

資料來源：月刊ディスプレイ 2011，3月號

三、集光型太陽電池

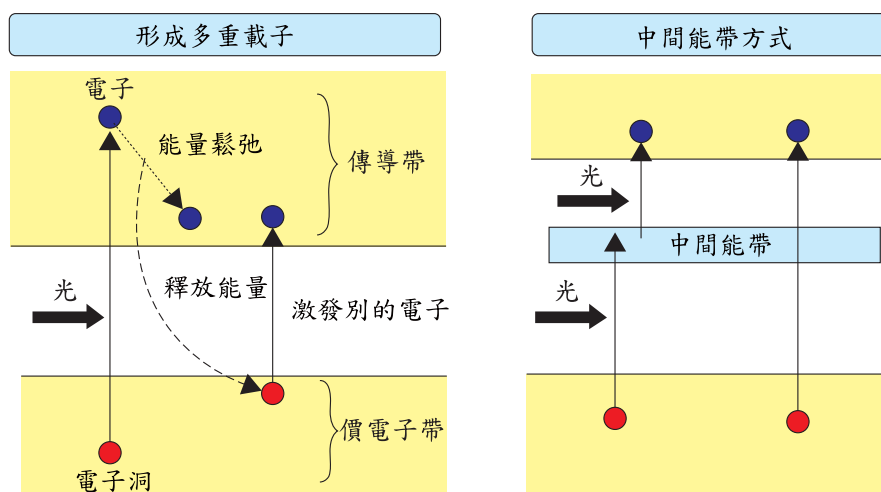
日本 NEDO 於 2001 年開始高光電轉換效率集光型多接合太陽電池及模組的技術開發，已有下列主要成果：①InGaP-Ge 異相(Hetero Phase)結構底層電池的高性能化；②InGaAs 中間層電池能帶(Band Gap)的最適化；③接合不同層太陽電池隧道的改善；④集光用電極結構的最佳設計。日本夏普用此集光結構，在 200 倍的集光下，將 InGaP/GaAs/Ge 三接合太陽電池的光電轉換效率提高至 39.2%。

此外，還有 7 個重要的成果：①鏡片用最佳樹脂的選定；②射出成形技術的最佳化；③以光學設計，以 550 倍 Fresnel Leus 達成 86.2%的光學效率；④以 2 次光學鏡片的設計達成減少色差以及集光強度分佈均一化的效果；⑤集光型太陽電池模組的放熱設計；⑥插入熱傳導性佳的環氧樹脂薄片(Epoxy Laminate)，在 500 倍集光狀態下溫度上升不超過 25℃；和⑦開發太陽電池積層技術，完成在 500 倍集光下，無額外散熱裝置(Heat Sink)而可以空氣自然冷卻的集光模組。

四、新概念的電池

在競逐太陽電池光電轉換效率的追逐賽中，欲突破瓶頸，單靠現有技術成功的機率將非常渺茫。要再進一步提高效率，唯有導入新的觀念，多重載子及中間

能帶的概念乃應運而生(如圖五所示)。多重載子可更有效地利用不同波長的太陽光；在材料原來的能帶上，將具有倍數能量的高能量光子，轉化為複數個載子。中間能帶方式則是利用目前太陽電池未利用到的較長波長光的光及熱能。簡單來說，從價電子帶至傳導帶，吸收一短波長光子會有一段性的躍遷。若在價電子帶與傳導帶間有形成中間能帶，則可利用 2 個較長波長光子使電子進行從價電子帶至中間能帶，再從中間能帶至傳導帶的二段性躍遷。若能找出中間能帶最適合的能階帶(Band Gap)就能做出比現有三層接合太陽電池更高光電轉換效率的電池，理論上可以達到 60% 的光電轉換效率。目前待克服的問題為量子點的規則排列技術以及包覆量子點材料(基質材料 Matrix Material)的選擇。

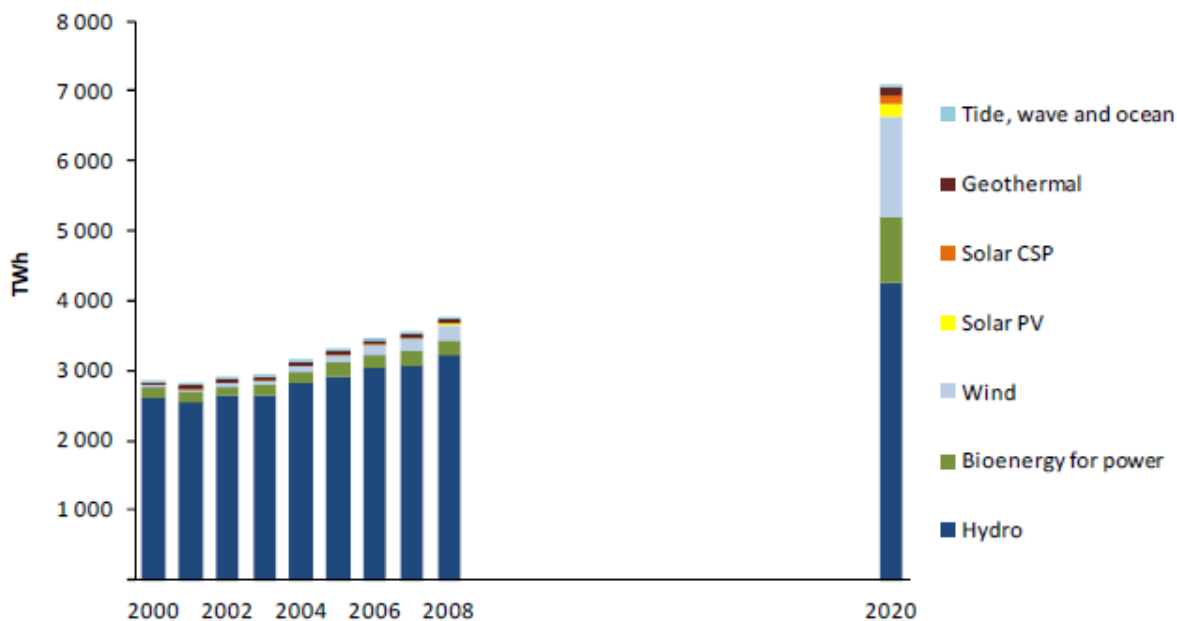


資料來源：Nikkei Electronics 2011.2.7

圖五、新概念的太陽電池示意圖

以減少碳排放來緩和地球暖化速度已是全球的共識，再生能源的發電量亦已逐年穩定地增加，然而增加的幅度卻顯然不足。圖六是過去數年全球再生能源發電量及 2020 年的預估值，其中太陽光電所佔的比例並不高。如能進一步提高太陽電池的光電轉換效率，改善其能量密度低的缺點，相信太陽光電在未來的能源市場將扮演更重要的角色。

TPVIA



資料來源：Clean Energy Progress Report, IEA 2011.6

圖六、全球再生能源發電量及 2020 年的預估

資料來源：

1. Clean Energy Progress Report, IEA 2011.6
2. Nikkei Electronics 2011.2.7
3. 月刊ディスプレイ 2011， 3 月號
4. 月刊ディスプレイ 2011， 6 月號

TPVIA