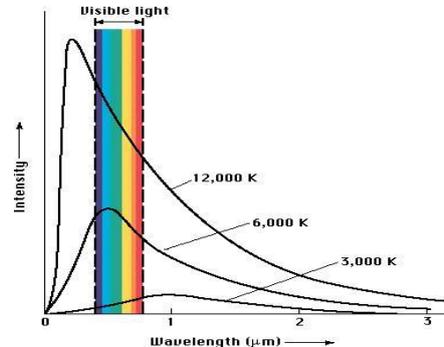


# 太陽能電池

[什麼是太陽能電池]

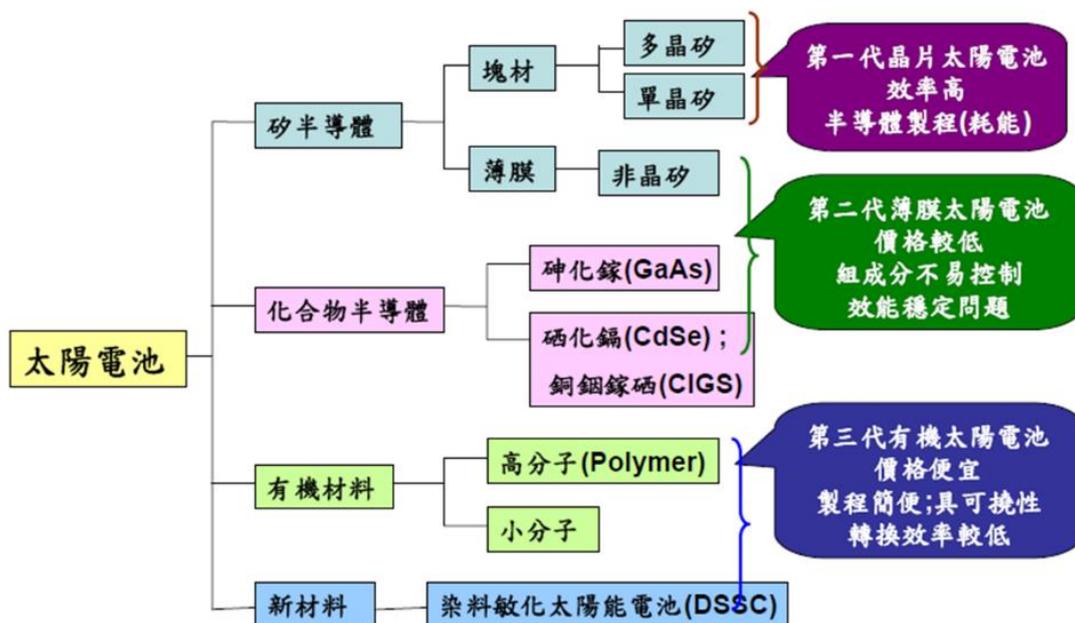
太陽能電池的發電能源來自太陽光，而太陽輻射的光譜主要是以可見光為中心，波長從 0.3 微米的紫外光到數微米的紅外光是主要的分布範圍。



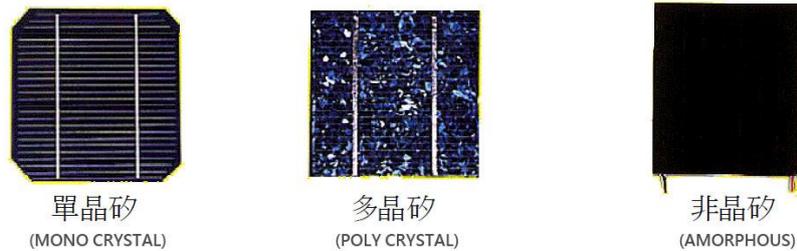
如果換算成光子的能量，則大約在 0.3 到 4 電子伏特之間，因此能隙大小在這個範圍內的材料，像矽材，會具有比較好的光電轉換效率。利用電位差發電，無電磁波產生 太陽電池 (solar cell) 是以半導體製程的製作方式做成的，其發電原理是將太陽光照射在太陽電池上，使太陽電池吸收太陽光能透過圖中的 p-型半導體及 n-型半導體使其產生電子 (負極) 及電洞 (正極)，同時分離電子與電洞而形成電壓降，再經由導線傳輸至負載。

簡單的說，太陽光電的發電原理，是利用太陽電池吸收  $0.2 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$  波長的太陽光 (針對不同材質的太陽能版，所能吸收的太陽光波長會有些差異)，將光能直接轉變成電能輸出的一種發電方式。由於太陽電池產生的電是直流電，因此若需提供電力給家電用品或各式電器則需加裝直/交流轉換器，將直流電轉換成交流電，才能供電至家庭用電或工業用電。

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：



## [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。

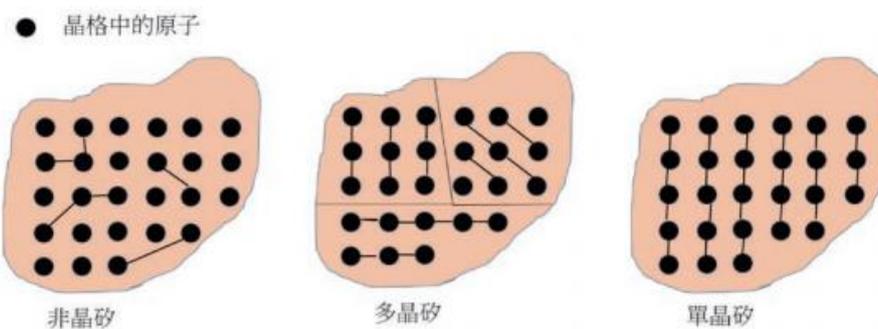


圖 1

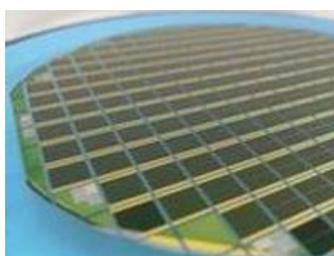
如圖 1 所示

(1)**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。

(2)**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。

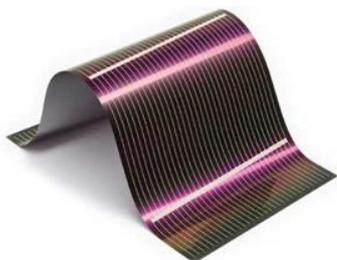
(3)**非晶矽**則是在晶體內，原子排列方向和原子之間鍵結都沒規律，主要應用於薄膜太陽能電池，非晶矽材料的製作成本最低，非常適合大面積的生產，同時也可利用我們目前 LCD 平面顯示器 的生產機台加以改良而大量生產，當然，這材料相對來說，效率較為低落。

## [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、銅銦鎵硒化物、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%。

### [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。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<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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]

太陽能電池能將光能轉換成電能的原理是應用半導體的光伏特效應。光伏特效應一般是指當光子射入具有 PN 接面的二極體組件後，會在二極體的兩端電極產生輸出功率的電壓值，這個過程主要包含的是光子射到半導體內產生電子-空穴對、電子與空穴因為 PN 接面所形成的內建電場作用而分離、電子與空穴各自朝著相反方向運動，並且由兩外電極輸出至負載，並在迴路上形成光電流。如圖 2 所示，當太陽能電池受到陽光照射時，太陽能電池可以吸收能量大於其能帶的光子，使電子由價電帶躍遷至導帶，進而產生電子空穴對，其中自由電子會因內建電場的作用而向 N 型區漂移，相反地，空穴則因內建電場的作用向 P 型區漂移，這種因為內建電場的影響而產生從 N 型區向 P 型區的漂移電流，就是光電流。光伏特效應中的光電流對 PN 二極體而言，就是逆向偏壓的電流方向。最後光電流經由 PN 二極體的金屬接觸輸出至負載，形成一個迴路，這就是太陽能電池的基本原理。

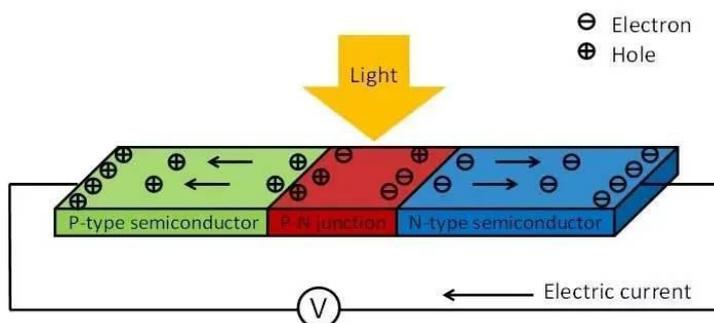


圖 2 太陽能電池的發電原理

## [太陽能電池的等效電路]

對原本的理想太陽能電池而言，太陽電池照光產生的光電流為負向電流，所以太陽電池的電流-電壓關係就是理想二極體加上一個光電流  $I_L$ ，其等效電路如圖 4 所示，理想太陽能電池的電負載電流關係可用下式表示： $IR = I_L - I_D$ 。這表示太陽能電池受到光照後產生一定的光電流  $I_L$ ，其中一部分用來抵消電流  $I_D$ ，另一部分為供給負載的電流  $IR$ ，其端電壓為  $V$ 。

理想太陽能電池的電流 $I$ -電壓 $V$ 關係可用下式表示： $I = I_S \left( e^{\frac{qV}{K_B T}} - 1 \right) - I_L$

其中 $I$ 代表電流，電流的方向是定義在元件內從 $p$ 型流向 $n$ 型； $V$ 代表電壓，電壓的正負值，則是定義為 $p$ 型端電壓減去 $n$ 型端電壓； $I_S$ 為二極體的逆向飽和電流(saturation current)； $K_B$ 為Boltzmann常數； $q$ 為單位電量； $T$ 為絕對溫度，在室溫下， $qV/K_B T=0.026$ 。

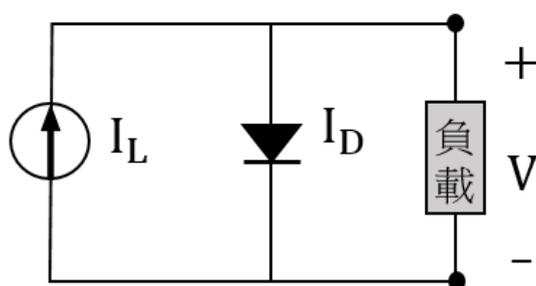


圖 4 理想太陽能電池等效電路

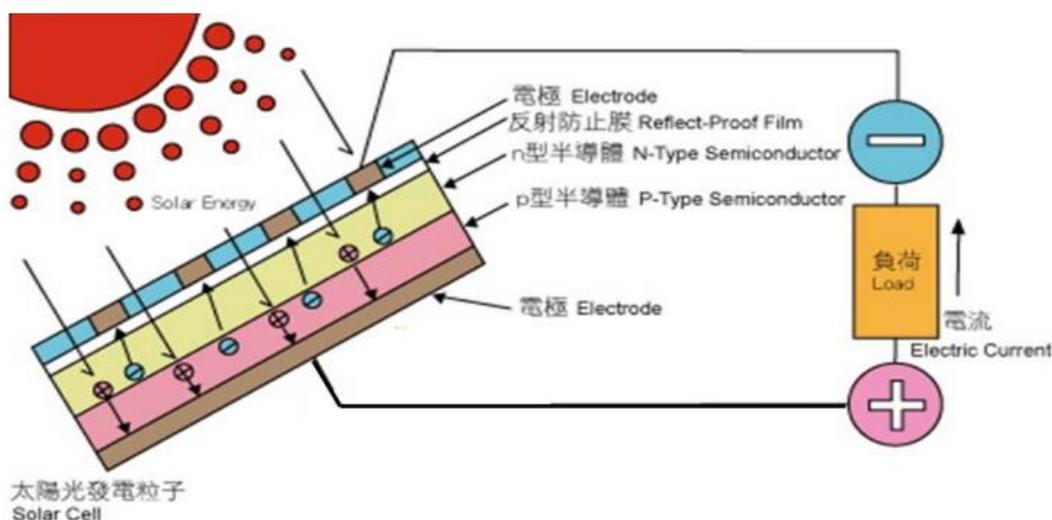


圖 5 太陽能發電示意圖

資料來源：經濟部能源局及經濟部工業局太陽光發電示範系統資訊網

## [參數說明]

### 短路電流 ( $I_{SC}$ )

當阻抗較低，而且計算當下的電壓等於 0 時，短路電流  $I_{SC}$  會對應至短路狀態。

$$I (\text{當 } V=0) = I_{SC}$$

$I_{SC}$  會發生在順向偏壓開頭，同時也是功率象限中的最大電流值。在理想的電池狀態下，最大電流值會等於太陽能電池之光子激發所產生的總電流量。

對順向偏壓功率象限而言，

$$I_{SC} = I_{max} = I_L$$

### 開放電路電壓 ( $V_{OC}$ )

開放電路電壓 ( $V_{OC}$ ) 會在電池中沒有任何電流流經時發生。

$$V (\text{當 } I=0) = V_{OC}$$

對於功率象限中的順向偏壓而言， $V_{OC}$  也是電池中的最大電壓差異。

對順向偏壓功率象限而言，

$$V_{OC} = V_{max}$$

### 最大功率 ( $P_{max}$ )、 $P_{max}$ 的電流 ( $I_{max}$ )、 $P_{max}$ 的電壓 ( $V_{max}$ )

電池所產生的功率 (單位為瓦特) 可在 I-V 間，透過方程式  $P=IV$  輕鬆計算得出。 $I_{SC}$  與  $V_{OC}$  兩點的功率將是零，而最大功率值將發生在兩者之間。此一最大功率點的電壓與電流，會分別標示為  $V_{max}$  與  $I_{max}$ 。

## [轉換效率的計算與量測]

太陽能電池的轉換效率(energy conversion efficiency)是指電池將入射太陽光的功率 $P_{in}$ 轉換成最大輸出之電功率 $P_{max}$  之比例，意即

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{in}}$$

太陽能電池的輸出功率就是電流和電壓的乘積：

$$P = IV = I_S V \left( e^{\frac{qV}{k_B T}} - 1 \right) - I_L V$$

明顯地，太陽電池輸出的功率並非是個固定值，而是在某個電流-電壓工作點達到最大輸出功率，最大功率的條件可由 $dP/dV=0$ 來決定。而太陽電池最大輸出功率為：

$$P_{max} = I_{max}V_{max} = I_L \left[ V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{qV_{max}}{kT} \right) - \frac{kT}{q} \right]$$

因此轉換效率為：

$$\eta = \frac{I_{max}V_{max}}{P_{max}} = \frac{I_L \left[ V_{oc} - \frac{kT}{q} \ln \left( 1 + \frac{qV_{max}}{kT} \right) - \frac{kT}{q} \right]}{P_{max}}$$

$$\eta = \frac{FF \cdot I_L V_{oc}}{P_{max}}$$

或

其中FF稱為填充因子(Fill factor)，其定義為太陽能電池在最大電功率輸出時，輸出功率 $P_{max}$ 與開路電壓 $V_{oc}$ 和短路電流 $I_{sc}$ 乘積之比值，也就是電流-電壓特性曲線中最大功率矩形(灰色面積)對 $V_{oc} \times I_{sc}$ 矩形的比例。

實際上，填充因子深受串聯電阻 $R_S$ 與並聯電阻 $R_{SH}$ 的影響，因此我們可以只用填充因子來同時概括串聯電阻與並聯電阻二個效應，因為任何的串聯電阻的增加或是並聯電阻的減少，都會減少填充因子，進而造成轉換效率的降低。太陽能電池的效率可以由三個重要參數：開路電壓 $V_{oc}$ 、短路電流 $I_{sc}$ 和填充係數FF來表達。明顯地，要提高太陽電池的效率，則要同時增加其開路電壓、短路電流(即光電流)，和填充因子(即減少串聯電阻與漏電流)。理論上，在AM1.5的條件下，理想的太陽能電池轉換效率為29%。

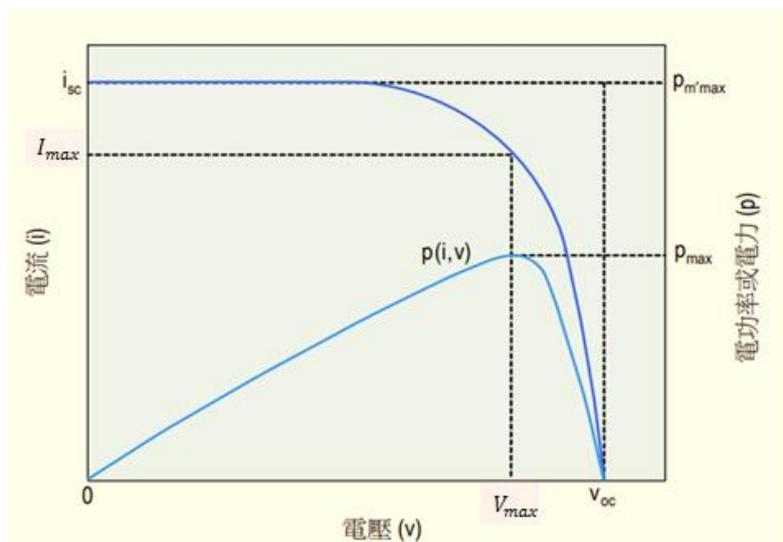
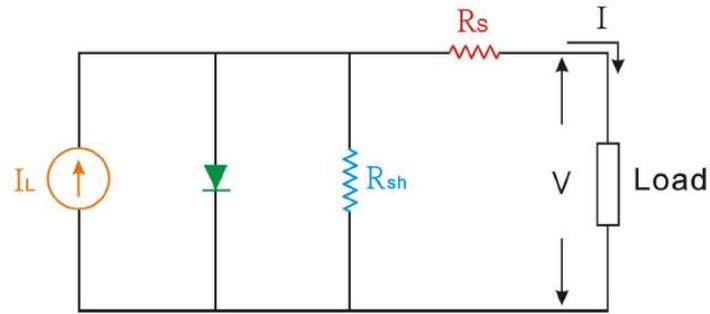


圖 6 太陽能電池元件的 電壓、電流、以及 電功率的曲線關係 示意圖

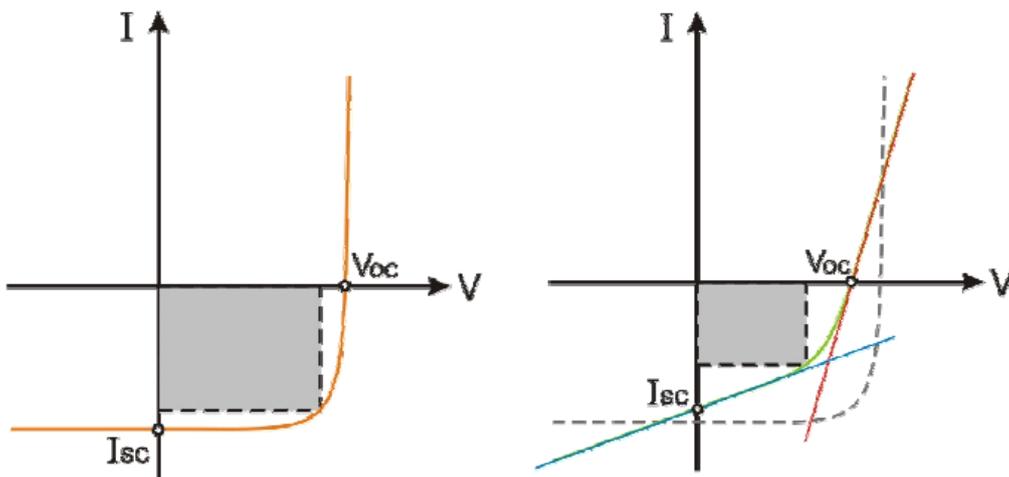
### [串、並聯電阻的影響]

任何半導體材料本身，或是半導體與金屬之間的接觸，無可避免地都會有或多或少的電阻，如此就會產生太陽能電池的串聯電阻，串聯電阻通常與接面深度、p型和n型區的雜質濃度、正面歐姆接觸等有關。另一方面，太陽能電池的正負電極間，存在任何非經由理想PN接面的其他電流通路，都會造成所謂的漏電流(leakage current)，例如因為電子-電洞對的再度結合，在空乏區內所產生的複合(recombination)電流或是在表面的複合(surface recombination)電流、元件的邊緣隔離(edge isolation)不完全、和金屬接觸穿透PN接面造成漏電流等，都是形成並聯電阻的原因。一般

我們可以使用並聯電阻用來定義太陽能電池的漏電流大小，意即  $I_{leak} = \frac{V}{R_{sh}}$ 。並聯電阻越大，就表示漏電流越小。



串聯電阻的存在會使得短路電流變小，並聯電阻不夠大會降低開路電壓，這兩個因素是使太陽能電池轉換效率下降的原因。除此之外，更重要的是串、並聯電阻也會使填充因子FF大幅度的降低。當串聯電阻增加時，電流-電壓曲線在順方向的直線斜率會變小，而當並聯電阻不夠大時，逆方向的直線斜率會變大，這樣一來，填充因子(灰色面積與 $V_{oc} \times I_{sc}$ 的比值)便會快速地減少，進而造成轉換效率的下降。



資料來源：

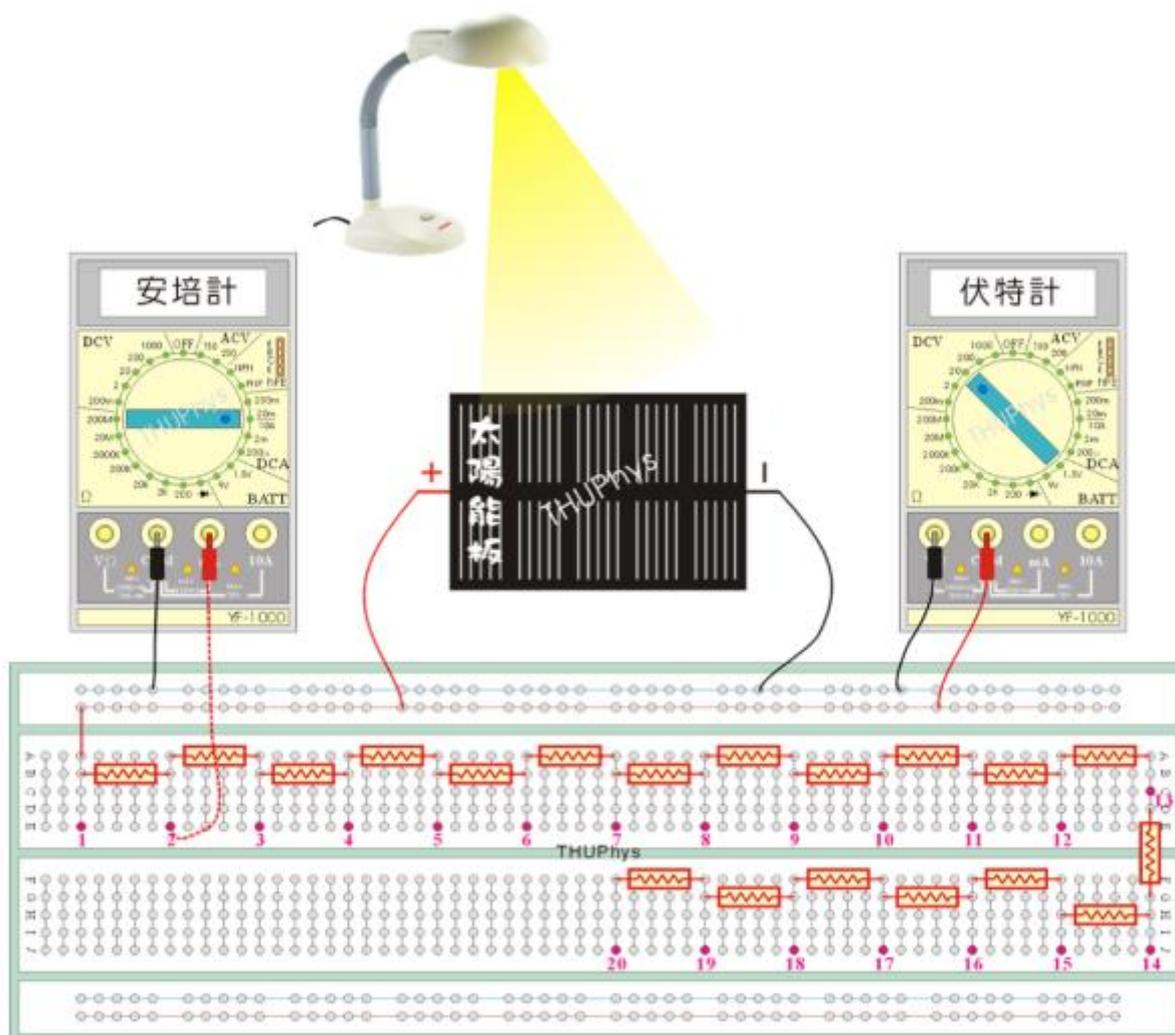
淺談太陽能電池的原理與應用 吳育仁

<https://www.slideshare.net/5045033/r-2999059>

潘小囡：淺談太陽能電池

# 實驗項目與步驟

實驗接線圖：



電阻值配置：

位置	電阻色碼	電阻 (Ω)	位置	電阻色碼	電阻 (Ω)
1-2	黃紫黑金	47	11-12		
2-3	黃紫黑金		12-13		
3-4	黃紫黑金		13-14		
4-5	黃紫黑金		14-15		
5-6	黃紫黑金		15-16		
6-7	橘橘黑金	33	16-17		
7-8	橘橘黑金		17-18		
8-9			18-19	棕黑綠	
9-10			19-20		1M
10-11					

數據：

數據	電阻 R ( $\Omega$ )	電壓 V (V)	電流 I (mA)	功率 $P=V*I$ (mW)
1	0			
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

畫圖：

