

# 太陽能與光電效應

你可知道愛因斯坦獲得諾貝爾獎的最主要理論不是難懂的相對論，而是高中生就能了解，今日太陽能面板理論基礎的光電效應嗎？太陽能面板的發電、二極體的發光原理究竟如何？

賴昭正

隨著第三世界的快速工業化，人類對能源的需求也顯著地急增；傳統石化工業所依賴的石油，不但將有用罄的一天，其所造成的環境汙染，更是人類要提早面對的問題。因此世界各國都在積極尋找「永遠用不完」，且無環境汙染的替代能源。這些所謂的「綠色工業」中，發展較快且又有相當大進展的應該首推太陽能面板的開發。然而有多少讀者了解，太陽能面板的物理不但是促進現代量子物理的大功臣，也是愛因斯坦獲得諾貝爾物理獎的最主要理論貢獻呢？！

## 太陽能

太陽一天所放射出的能量，足供人類一年所須；可是還好只有大約百億分之一的能量抵達地球，否則地球應該早就被全部蒸發掉了。但儘管如此，這「一點」能量已是地球上所有動、植物進化及生存的原動力。

太陽表面溫度約為  $6000^{\circ}\text{C}$ ，所發射出來的能量（電

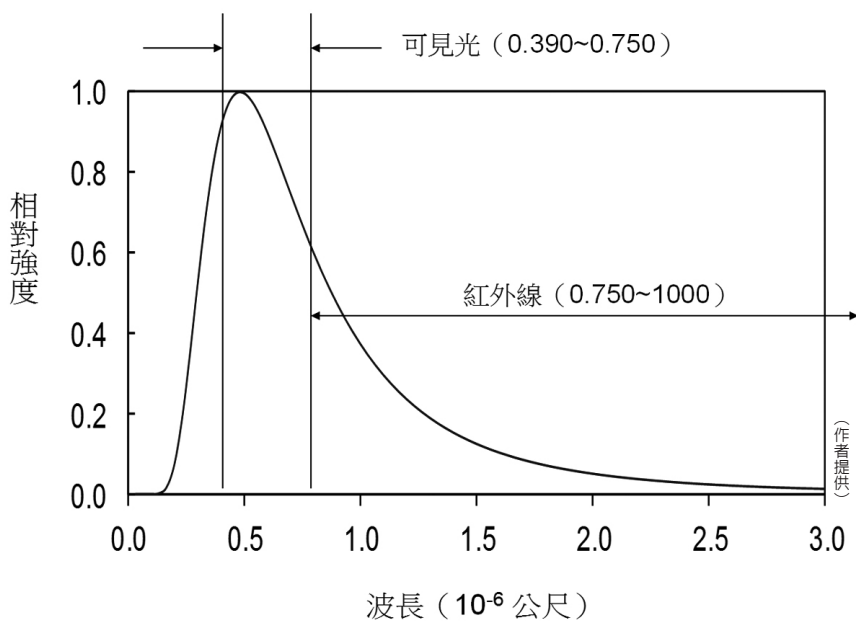
磁波）分布如圖一所示。可見光以上之輻射（如紫外線）大都為臭氧及大氣層所阻擋（吸收），因此未能抵達地球表面；否則因適者生存的演化，X - 光今日可能不是一種對人體有害的輻射！我們從圖一可以看到：五官中最重要的器官——眼睛——所能感應到的電磁波範圍，正是太陽能分布中最強的部份（占 47%）：我們因之稱此範圍為可見光，其波長大約在 390~750 奈米（ $10^{-9}$  公尺）之間！你說這是巧合還是演化的必然結果？事實上不僅人類及大部份動物如此，大部份植物也是利用可見光來進行其生存與繁盛所必須之光合作用的！

波長在 750 奈米至 1 毫米之間的輻射，大約占太陽輻射能的 46%，因在可見紅光之外，我們稱之為紅外線；它的主要作用是讓我們感到熱與溫暖。比紅外線波長更長的輻射也許因為強度太低，因此似乎與動、植物的演化與生存沒有太大的關係；但

當中所謂微波及廣播波帶卻是近代文明社會通訊的主要工具。

雖然地球上之植物顯然有效地利用太陽能，但這些利用似乎乎是「消極」地：為了生存與繁殖！自 18 世紀中之工業革命後，人類似乎突然領悟到了我們可以創造出許多不同的機器來代工及改進我們的生活品質。這些機器均需要能源驅動，因此隨著全世界人口的不斷增加及各國的工業化，我們對能源的需求也不斷地提高與迅速化！我們終於理解到煤及石油等（也是靠太陽能經千萬年儲存下來的產物）不但製造了空氣汙染，且終有用罄的一天！因此「積極」開發太陽能的直接利用已是近代文明社會的主要課題！

風力及水力等綠色能源的開發，均是大家耳熟能詳的技術。這些技術的最終來源雖然也是太陽，但技術本身卻是在探討如何有效地利用風力及水力等，因此是一種「間接」的太陽能利用技術。我們在此所要探討的，



圖一：太空中之太陽能分布情形。因空氣之關係，太陽能抵達地面之分布大不相同。

是如何有效地「直接」以太陽能來發電。它所憑藉的物理現象——光電效應 (photoelectric effect) ——雖然早在十九世紀末時就已經被科學家所發現，但其理論基礎不僅是近代量子物理的產物，事實上還是推動其發展的先鋒！

## 光電效應

1900 年底，德國物理學家普朗克 (M. Planck) 為了解釋圖一之「黑體輻射」的能量分布，被迫大膽地提出了「物質只能以小包裹的形式吸收或釋放輻射能」，率先敲響了量子物理革命之鐘！他之所以「大膽」，乃是因為此一觀念完全違反了那時已被廣為證實與接受的馬克士威 (Maxwell) 電磁理論。這一理

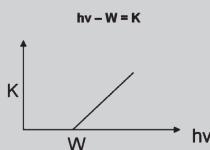
論完全肯定了光及電磁波的波動性，因此它們與物質的作用也應是連續性，不應是包裹的交換形式。普朗克之所以「被迫」，乃是因為他實在想不出其他的解釋方法。此後的十幾年，他便一直在努力地想使他的量子觀念能容於古典力學裡；可是每次嘗試的結果，似乎均使自己失望得想收回那革命性的「大膽假設」而已〔註一〕。

1905 年，一位名不見經傳的瑞士專利局小職員愛因斯坦不但不為普朗克擔憂，他反而火上加油，提出「事實上光本身就具有粒子 (小包裹) 性」！經他計算的結果，這小包裹的能量正好就是普朗克被迫所提出的： $h\nu$  (與頻率  $\nu$  成正比，比例常數  $h$  現稱為普朗克常數)！這不可能

是巧合，因此理論上普朗克應該是很高興才對；但事實正好相反：1913 年當普朗克等人推薦愛因斯坦為普魯士皇家科學院士時，他們的決議書這樣寫著：「……總結而論，我們可以說在近代物理的肥沃土地上，幾乎每一個大問題裡都有愛因斯坦的重要貢獻。因此在其大膽的假設下——例如『光量子』，他雖然有時過分越了軌，但我們不能因此而否定他。因為即使在最嚴格的科學領域，要提出一個前所未有的新觀念，有時也是必須冒點風險的。」

確實，當時像愛因斯坦這種無名之輩 (1905 年時)，如果沒有幾張王牌來支持他的論點，他的論文是決不可能被德國的著名物理期刊接受發表的。這幾張王牌中，最主要的就是輕易地解釋了光電效應。1900 年時，物理學家早已發現了電子，也了解到物質是由電子 (及其它東西) 組成。光是一種電磁波，因此它與物質作用能將電子釋放出來 (光電效應)，應該是不值得大驚小怪的。問題出在依馬克士威的理論，釋放出來的電子速率應隨光強度的增加而增加——但這卻不是勒納 (Lenard) 在實驗中所發現的！依愛因斯坦之「光量子」說，增加光強度只是增加小包裹的數量，因此只能多打一些電子出來，不能增加電子的速

依能量不減定律，光量子的能量 ( $h\nu$ ) 減掉金屬對電子的束縛能 ( $W$ ) 後，應等於打出之電子的動能 ( $K$ )：



如果  $h\nu < W$ ，則打不出電子。左圖正是實驗所得之結果！依古典力學，則  $K$  與  $\nu$  無關，只與光強度成正比。

率——這正是實驗上所觀察到的！要增加電子的速率，則必須提高光的頻率（因光量子的能量與頻率成正比）。愛因斯坦更於 1906 年，用高中就能懂的算術及能量不減定律，提出了一個速率與頻率關係之定量公式。密立根 (millikan) 於 1914 年非常精確地證實了此公式的正確性，愛因斯坦也因之於 1921 年獲得了諾貝爾物理獎〔註二〕，密立根也於兩年後因此一實驗而得獎。

## 半導體

光可以將電子從金屬中打出來，但因為打出來的自由電子難以控制，故金屬顯然不是利用太陽能的良好材料。大部份的非金屬物則是根本不吸收光，顯然更不能作為利用太陽能的材料。因此，我們唯一的希望似乎就是介於金屬與非金屬之間的「類金屬」(metalloid)，如矽及鎢等。不錯，今日用來製造太陽能面板 (solar panel) 之主要材

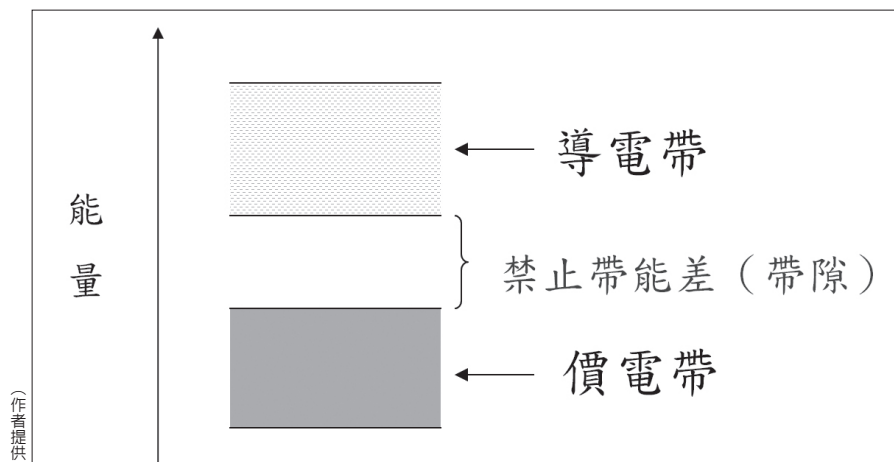
料，便是矽。這些材料的導電性介於金屬與非金屬之間〔註三〕，因此稱之為「半導體」(semiconductor)——今日台灣高科技的主幹。

我們知道原子之性質主要取決於其最外圍，能量最高之價電子 (valence electron)。當這些原子組成晶體，這些外圍的電子同樣地決定了晶體的性質；但這些價電子不存在於原子的能階軌道 (域)，而是由這些軌道構成的能量帶 (band)——價電帶 (valence band, 圖二)。緊接著價電帶而具有較高能量的能量帶則稱之為導電帶 (conduction band)——因為在這能帶的電子決定了該晶體的導電性。

在量子物理裡，電子不像古典力學裡的粒子，可以自由自在的存在任何能態。例如在原子裡，電子只能停在特定的某些能態上；同樣地，在晶體裡，價電子也只能停在價電帶或導電帶。因價電帶能量較低，因此所有價

電子均應該全停留在價電帶裡；但如果導電帶很近價電帶，則因為熱能 (室溫) 的關係，有些價電子是可能跑到導電帶的。在導電帶裡的電子好像被放回森林中的老虎，可以非常自由自在的亂跑，因此可以導電 (一加電壓，就往正極跑)。但如果導電帶距價電帶很遠，則所有價電子均被迫集在價電帶裡。如果價電帶被擠得水洩不通，則外加電壓不強時，這些電子均因沒地方跑 (所有價電帶的能態均已被占滿，又不夠能量跳到導電帶)，因此只好不動——我們稱這類不導電的固體為絕緣體。從這一簡單的敘述，我們應該了解到了價電帶與導電帶間的能距 (band gap, 帶隙) 決定了物體的導電性：導體 (如金屬) 的帶隙均很小 (甚或重疊)，絕緣體的帶隙則比室溫之熱能大得很多！介於其間之帶隙不大也不小的物質就是眾所有皆知的半導體。

半導體的帶隙大都在可見光附近，因此是理想的太陽能面板材料。在價電帶之「純」半導體的電子可以吸收一個光子跳到導電帶——光電效應，成為可以導電的電子；與此同時，本來被電子擠得水洩不通的價電帶，也因失去一個電子而產生了一個電洞 (electron hole)，此一電洞亦可導電，在外壓時：電洞將往負極移動。我們如果能讓被激到



圖二：晶體 (及固體) 之「外圍」能量帶示意圖。

導電帶的電子與新產生的電洞在半導體外面重新結合，這不正是電流（發電）嗎？可惜這一對電子與電洞實在沒理由分開，它們在被製造出來後，大都立即重合而放出光，回到原來的狀態！如何讓它們分開以產生電流呢？

## 摻雜

假如在金屬中摻入了雜質原子，其導電性將會下降；但對半導體而言，其導電性一般反而會上升，這是為什麼呢？製造太陽能面板的關鍵與此一答案有關。現在製造太陽能面板的主要材料，為謂之半導體之母的矽；為了方便說明，我們就以矽做例子吧！

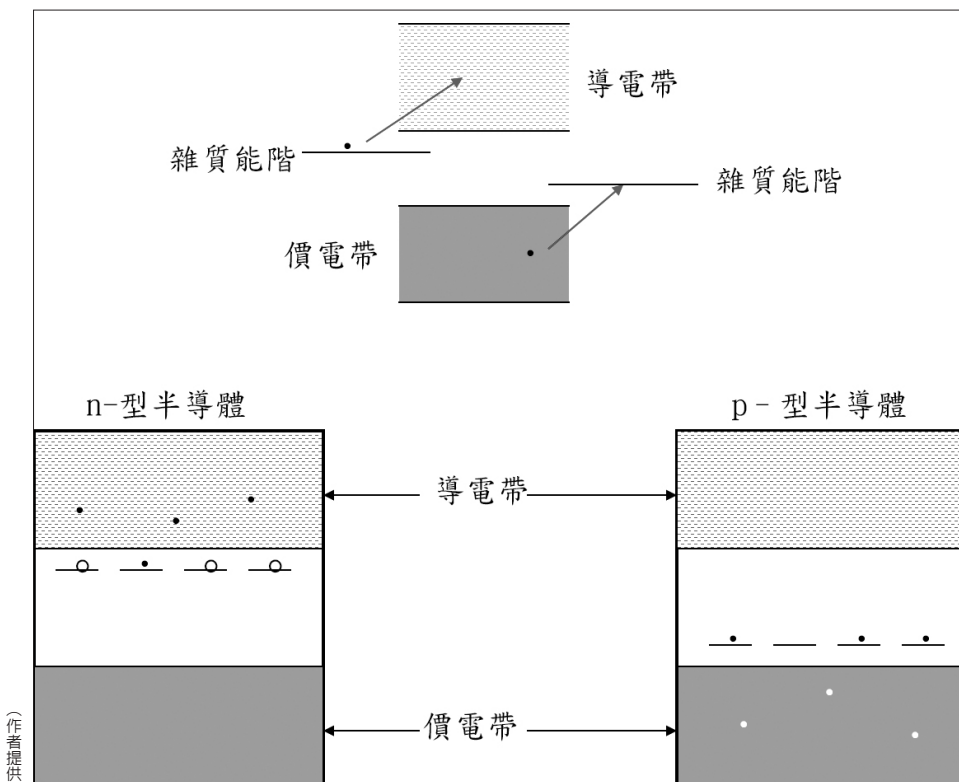
矽原子具有四個價電子；當一大群矽原子組成矽晶體後，這些價電子正好將價電帶全部填滿。其導電帶距價電帶甚遠——能距在 1100 奈米左右（可見光外不遠處之紅外線），因此純矽在常溫下不導電（沒有電子在導電帶內）。可是如果我們在矽晶中增加一些五價的砷原子（砷原子取代矽晶中的某些矽原子），則因砷原子多了一個價電子，這些多餘的價電子因為熱能的關係，有些就跑到導電帶（圖三），而使得矽晶因雜質混入成為導體。此類導電性是靠導電帶中之「負」電子，因之稱為 n - 型半導體（n-type semi-conductor）。

反之，我們如果在矽晶中

加入些許的硼，則因硼的外圍只有三個價電子，提供了一個「空缺」位置，使矽原子之價電子有機會去填滿。當某些矽原子的電子跑到這些空缺位置時，原來被電子擠得水洩不通的價電帶就出現了電子洞（圖三）——像汪洋大海中出現了水泡一樣。此時如果外加電壓，價電帶中的電子就有了移動的空間，因此矽晶便可導電。因為電子的移動是去填補（少數的）電洞，因此加電壓的結果，我們看到的將是電洞往負極的移動——電洞好像是負電大海中的正電子。故我們可說矽晶之所以導電，是因為價電帶中之電洞（正電子）的關係，我們稱此類半導體為 p - 型半導體（p-type semiconductor）。

## p - n 介面

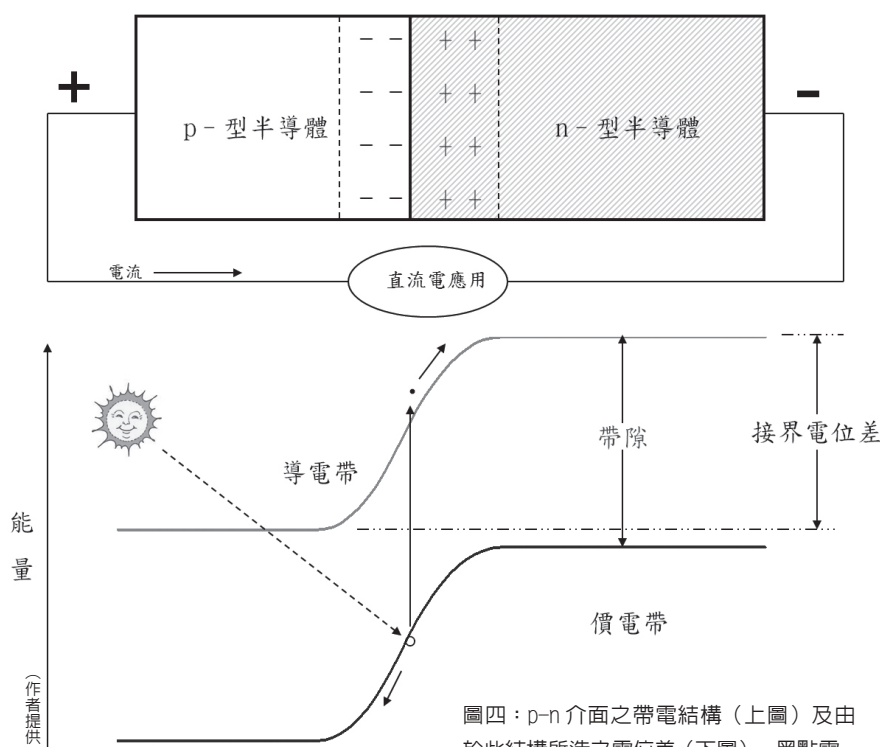
將 p - 型及 n - 型半導體接在一起（製造上，而不是用黏著劑），我們就得到了一個非常有趣且有用的「p - n 介面」（p-n junction）：n - 型半導體中電子因熱能的關係偶爾會跨過介面而抵達 p - 型半導體，在該處與電洞結合而消失。介面旁之 n - 型半導體因少掉一個電子而帶正電，因此下一個電子就比較難再逃離到 p - 型半導體處；……最後是



圖三：在純半導體中加入些許雜質後，電子（黑點）之重新分配圖。短的水平線為雜質之能階。白點為電洞，為電子海中少掉一個電子的地方，其電行為與正電子類似。（示意圖；實際電子之分佈依統計力學。）

（作者提供）





圖四：p-n 介面之帶電結構（上圖）及由於此結構所造之電位差（下圖）。黑點電，白點為電洞。

完全不可能而達到一個平衡狀態：n-型半導體之介面處有一帶正電的層面，p-型半導體則有一帶負電的層面。這兩個層面造成了一個電位，阻止了電子繼續由n-型到p-型（或電洞p-型到n-型）。如果此時層面中之電子吸收個光量子跳到導電帶（光電效應），則因為此一電位，它將立即被推到n-型半導體處；同樣地，少了一個電子的價電帶電洞則將立即被推到p-型半導體處。哈！這不正是我們製造太陽能面板所需要的嗎——立即將光電效應所產生之電子與電洞分開（圖四）？

p-n 介面屬於一種「二極體」（diode），其用途甚廣（如

整流器及控制器等）。事實上海外工業中的另一漸受重視的「發光二極體」（light emitting diode, LED），其基本結構也是p-n 介面。它的原理則正好是與太陽能面板相反：靠外加的電位將電子與電洞推至介面處，使其碰面結合而發出光！在太陽能面板的製造上，我們須用吸光率較好的材料；但發光二極體則正好相反：否則放出來的光都被吸收掉了，還能當發光體嗎？

筆者曾聽聞國內某公司稱「自行生產的太陽能光電板，其光電轉換效率高達 97.5%，為全世界最高的轉換效率」。筆者不知國內如何訂「轉換效率」，但合理且為業界所接受的定義應

是：照在面板上之所有陽光能量（包括看不見之紅外線等），有多少百分比被改成電能。在這一定義下，能在實驗室中達到 30% 的轉換效率就值得慶祝；而實用上如能達到 20% 以上就可以偷笑。50% 呢？世界所有其他太陽能面板廠恐怕全要關閉了！事實上，即使在理論上都不可能達到 97%：因為這表示，該太陽能面板將吸收所有的紅外線及可見光（將它們全都改成電能），這依光電效應，其能隙應在波長為一毫米左右，這樣的材料應是金屬，而不是半導體！

註一：詳見賴昭正所著《量子的故事》，第二版，凡異出版社，2005 年。

註二：相信不少讀者都以為愛因斯坦因相對論而獲諾貝爾獎，但官方的聲明則是因他「在理論物理的貢獻，尤其是發現光電效應的定律」。

註三：讀者可參閱賴昭正〈什麼是半導體〉（科學月刊 1970 年元月號）。筆者想趁此修正該文中之一錯誤觀念。在量子力學，即使在絕對零度，固體中的原子還是在振動著，因此其電阻不可能達到零而成超導電性 (superconductivity)。

賴昭正：美國芝加哥大學化學博士