

# What's fun in EE

臺大電機系科普系列

## LED：引領新世代的終極燈泡

吳肇欣／臺大電機系教授

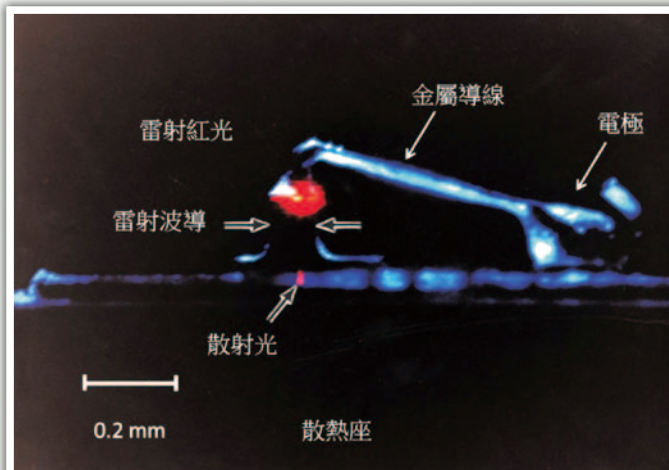
最近「節能減碳」這四個字很夯，由於地球暖化帶來的氣候變遷，對人類的生活影響逐漸發酵，環保意識抬頭，各國也積極地推動綠能產業的永續發展，其中「LED」(Light-Emitting Diode，發光二極體)和「太陽能電池」兩大光電產業，在臺灣儼然成為當前最熱門的研究領域。依光電科技協進會(PIDA)的統計，今年全球LED的產值可達300億美元，而臺灣目前的LED產量居全球之冠，產值居全球第二，約佔全球21%，預估今年臺灣的LED產值將達新台幣1,816億元。到底這個讓臺灣揚眉吐氣的產品，是何方神聖？連半導體業的龍頭－臺積電－也在前兩年成立了新事業部門，專門研發LED。在我們日常生活中，幾乎處處可見LED的蹤影，例如手機，顯示器面板，交通號誌燈，室內照明等，你可能常聽到LED這個名詞，但它為什麼既可以節能，又擁有不同的顏色？它的原理和優勢到底是什麼？

### 發光二極體的歷史

現在我們看到的LED有許多顏色，但你知道第一顆可見光的LED是紅色的嗎？距今五十年前(1962年)，由目前在美國伊利諾大學香檳分校的教授，Nick Holonyak, Jr. 所發明，當時他還在美國通用電器公司(GE)工作，利用一種化合物半導體材料叫「磷砷化鎵」(GaAsP)所製作出來，當時他還將它製作成紅光雷射！因為這顆具有實際應用的可見光LED，Nick Holonyak Jr. 被視為「發光二極體之父」，圖一為當初發明紅光二極體和雷射的元件照片。到了1972年，M. George Craford，曾是Holonyak在伊利諾大學的學生，發明了第一個黃光的LED，而且亮度比紅光LED還要高出十倍，材料也是用磷砷化鎵，Craford後來開了一家LED的公司叫Lumileds，現在改名叫Philips Lumileds，為全球LED數一數二的LED大廠，他本人也因此成了億萬富翁。至於現在普遍應用在照明上的藍光LED，是由日本日亞(Nichia)化工的中村修二(Shuji Nakamura)於1993年，第一個展示由「氮化鎵」(GaN)成長在藍寶石基板上的材料所製作，目前中村先生任教於美國加州大學聖塔芭芭拉分校。藍光LED的出現，在發光二極體的發展歷史上有著很重要的意

義，尤其衝擊到人類在「照明」方式上的改變。自從愛迪生發明鎢絲燈泡後，帶給人類生活的方便，科技進步一日千里；但發光二極體的發明，一種更有效率、更省電的發光元件，未來將帶給我們更有智慧的生活方式，對地球能源的節省和環境保護，也有更進一步的貢獻。

表一列出的是不同半導體材料的成長方式以及對應的發光波長。LED 在製作上需要先有一層基板，然後在上頭透過一些化學反應，將我們想要的原子分子慢慢地累積在上頭，合成出我們想要的半導體材料。因為不同的材料，會有不同的發光波長（顏色），至於是什麼決定 LED 的發光顏色呢？後面我們會再跟各位介紹。



圖一 第一個紅光 LED 和雷射的元件 (IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, No. 6, 2000)

磊晶法	LED基板	發光層	顏色	波長(nm)	光度(mcd)	
LPE	GaP	GaP	紅光	700	40	
			黃綠光	570	250	
			綠光	565	200	
LPE(SH)	GaAs	AlGaAs	紅光	660	50	
LPE(DH)	AlGaAs	AlGaAs	紅光	660	5000	
VPE	SiC	SiC	藍光	470	30	
VPE+擴散	GaP	GaAsP	紅光	650	100	
			橙光	630	300	
			黃光	590	200	
	GaAs	GaAsP	紅光	660	20	
MBE	GaAs	ZnCdSe	綠光	512	4000	
MOVPE	GaAs	AlGaInP	紅光	635-644	6000	
			紅橙光	612-615	7000	
			黃光	590	8000	
			黃綠光	570	8000	
	Sapphire	GaP		綠光	525	9000
	Sapphire	GaN		藍綠光	505	8000
	Sapphire	GaN		藍光	470	8000
	SiC	GaN		藍綠光	505	6000
SiC	GaN		藍光	470	6000	
GaAs	ZnCdSe		藍綠光	500	2000	

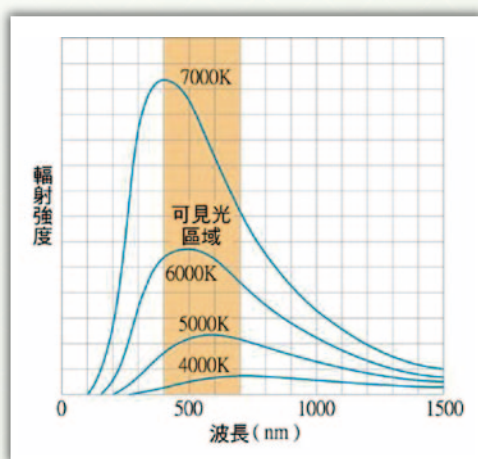
表一 不同顏色的發光二極體和對應的半導體材料及其成長方式。(來源：工研院經資中心)

## 固態照明

固態照明 (Solid-State Lighting)，指的是利用發光二極體來當作照明的工具，因為發光二極體本身是一種「固態」材料囉！因為半導體製程技術的演進，材料成長的方法也不斷地在進步，LED 在許多應用上，逐漸地取代傳統白熾燈泡，在照明這塊市場上，開始了革命性的變化，因為和白熾燈泡相比，LED 可以將電力做更有效率的轉換，同時也有較長的壽命。全世界大概有 20% 的電力消耗，是用在照明的需要，而傳統的照明方式是利用愛迪生發明的白熾燈泡，是一種很消耗能源的發光方式。平常我們所用的鎢絲燈泡，是利用「黑體輻射」的概念，如圖二所示，當物體在特定溫度下，會輻射出特定的電磁波頻譜，例如在室溫時，物體所發出的電磁波為遠紅外線（波長大於可見光）；當物體的溫度升高時，電磁波的分佈會往可見光移動，例如烤肉時的木炭，溫度大概在 1000K，其表面呈現暗紅或紅色；太陽表面溫度約有 6000K，輻射出來的頻譜會有更多部分在可見光的範圍，所以呈現出來的是白色光；而白熾燈泡是當我們將電流通過一條高熔點且電阻很大的鎢絲線時，由於電阻很大，鎢絲的溫度會上升將近 3000K，此時會發出亮黃或白熾的光輝，恰好可以被我們拿來照明。從以上黑體輻射的理論，我們可以瞭解到白熾燈泡其實是一個很沒有效率的發光物品，因為大部分的能量供給，都轉換成熱，而且在高溫下操作，鎢絲的壽命也是很快就沒了。

以一顆標準 100 瓦的白熾燈泡，平均的壽命是 1000 的小時，如果一天用 12 小時，大概 84 天就要換一顆燈泡。相對來說，LED 燈泡的壽命至少為兩萬小時（通常更久），平均消耗的瓦數不到 10 瓦，是相對地「節能減碳」的。





圖二 黑體輻射的頻譜 (圖片擷取自網路)

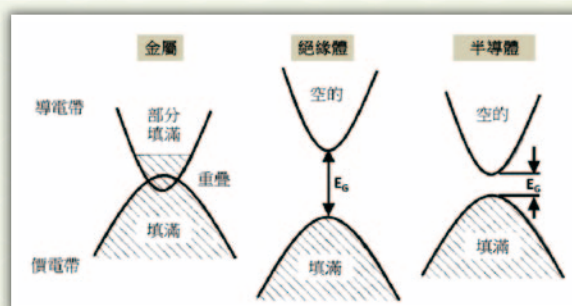
## 發光二極體的原理

### 能帶

要瞭解半導體，首先要瞭解「能帶」的概念。當許多個單一原子組合而成一個固體時，鄰近的原子之間，會有許多交互作用產生，原子核帶正電，外頭圍繞許多電子帶負電，彼此之間的吸引力和排斥力，會形成穩定平衡的狀態。這形成的過程中，會在電子能階上會產生一些重要的改變，導致我們有不同的固態材料，例如：導體，絕緣體，半導體。當許多原子聚集在一起時，原子之間的鍵結靠的是彼此電子的分享，像是一人伸出一隻手，拉在一起一樣。平常這些形成鍵結的價電子，可以安穩地手拉手在那裡，如果用能量狀態來看的話，這些電子具有較低的能量，形成所謂的價電帶 (Valence Band,  $E_V$ )；當這些電子從外界獲得能量的話，例如我們給它升溫、照光、通電等，它就不會安穩地在那裡，就有可能自由地跑來跑去，一旦脫離了原本的束縛，這種會自由移動的電子，就可以傳導電或熱，由於他們的能量狀態較高，形成所謂的導電帶 (Conduction Band,  $E_C$ )。那從價電帶到導電帶之間的能量差，亦即要讓價電子能夠脫離束縛，自由移動的能量，我們叫做能帶或是能階差 (Band gap,  $E_G$ )。

一般來說，物理系統都傾向往較穩定的低能量狀態去分佈，所以電子都會填滿在價電帶的位置，除非獲得能量，才有機會跑到導電帶。圖三所畫的就是絕緣體，導體，半導體之間能帶的差異。絕緣體中的電子完全都在價電帶，一般室溫下，電子的平均熱能 ( $KT$ ) 為  $1/40$  電子伏特，而一般絕緣體的  $E_G$  都超過 4 電子伏特，所以不會電子在導電帶，故為絕緣體。導體的話  $E_G$  可以小於零，表示價電帶和導電帶會有重疊，此時電子會在導電帶中形成電子海，可以輕易的導通電流。

半導體的  $E_G$  則小於絕緣體，所以電子有機會透過獲得能量 ( $E > E_G$ )，跑到導電帶上，所以導電度會隨著溫度上升而增加。一旦一個電子從價電帶躍遷到導電帶，它在價電帶就形成一個電子空缺，通常我們稱做「電洞」，其他的價電子可以填補到那個空缺，而在原來的位置則形成新的空缺，看起來就好像「電洞」在價電帶中移動一樣，如同一個電子在導電帶中可以自由移動般。當我們外加電場時，帶負電的電子和帶正電的電洞會往反方向移動，此時便可以產生電流。



圖三 固態材料的電子能階圖



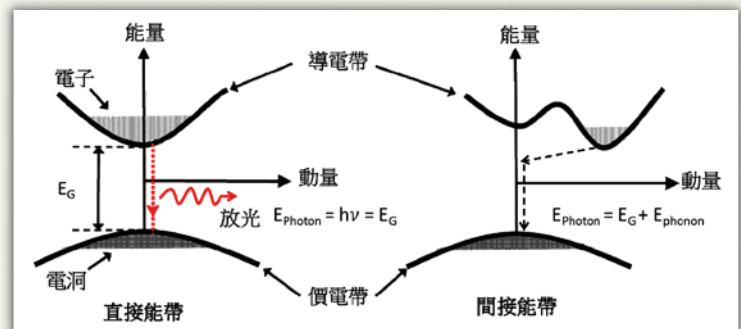
## 直接和間接能帶

知道半導體的能階概念後，LED 的放光原理其實很容易理解。前面提到價電子獲得能量後可以從價電帶躍遷到導電帶，但經過一段時間後，大約幾個奈秒（ $10^{-9}$  秒），這些電子會從導電帶掉回價電帶（為什麼？因為物理系統本來就傾向往低能量的狀態去聚集阿！），這個過程叫做「電子電洞對復合」，表示導電帶中的一個電子和價電帶中的一個電洞復合的過程。不過原本電子在導電帶擁有比較大的能量，復合的過程當然必須滿足能量和動量的守恆，所以電子會把這些多出來的能量，透過其他方式釋放出來（產生光或熱），所以 LED 就是利用這樣的放光方式來產生光囉！

不過半導體材料裡，有些發光效率高，適合拿來做 LED；有些發光效率很差，就不適合拿來做發光的元件。那怎麼樣決定發光的效率高低呢？圖四我們有兩種半導體材料的「能量－動量圖」，一種叫做「直接能帶」：就是導電帶的最低點（最多電子聚集之處）和價電帶的最高點（最多電洞聚集之處），兩點剛好具有相同的動量。另一種叫「間接能帶」：即導電帶的最低點和價電帶的最高點，兩點的動量是不同的。前面提過電子電洞復合，過程必須同時滿足能量和動量守恆，由於光子幾乎沒有動量（有聽過光有重量的嗎？），所以對於「直接能帶」的材料來說，電子電洞復合的過程，動量守恆的條件很容易可以達到，因為原本電子在做垂直躍遷的時候，動量就沒有改變。至於能量守恆，過程中可以透過放出一個光子（Photon）來滿足，此時光子的能量至少會等於能帶  $E_G$ 。

對「間接能帶」的材料來說，當電子從導電帶最低點，躍遷到價電帶最高點時，動量同時也改變了，可是光子沒有什麼動量，那怎麼辦？只好由晶體材料的微擾動來提供動量以滿足動量守恆，這種晶體的震動，我們稱做聲子（Phonon），同時因為能量要守恆，此時放出光子的能量，為能帶  $E_G$  和聲子能量的總和。和「直接能帶」的躍遷過程相比，此時需要多一個聲子的介入，可以想像成三種粒子（電子、電洞、聲子）的彈性碰撞，同時相碰的機率遠比只需要兩種粒子（電子、電洞）來得低多了，所以「間接能帶」的材料其放光效率不佳，電子電洞復合的過程是「非放光性」的，並不適合拿來做發光元件。

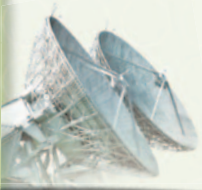
哪些材料適合拿來做 LED 呢？一般來說，矽（Si）和鍺（Ge）這種四族的元素，屬於間接能帶。化合物半導體（三五族半導體）則為直接能帶，因為它們的組成元素屬於週期表中的三族及五族，三族元素如鋁、鎵、銦等，五族元素如氮、磷、砷等。像是磷化鎵（GaP）或砷化鎵（AlGaAs），因為亮度低，開發時間早，且內含 2 種或 3 種元素，多稱為二元或三元 LED。而鋁銦鎵磷（AlGaInP）這種由 4 種元素組成，發光亮度較高的，多稱為四元 LED。氮化鎵材料則因為可以發出以上材料不能發出的藍光，一般另稱為氮化物 LED。



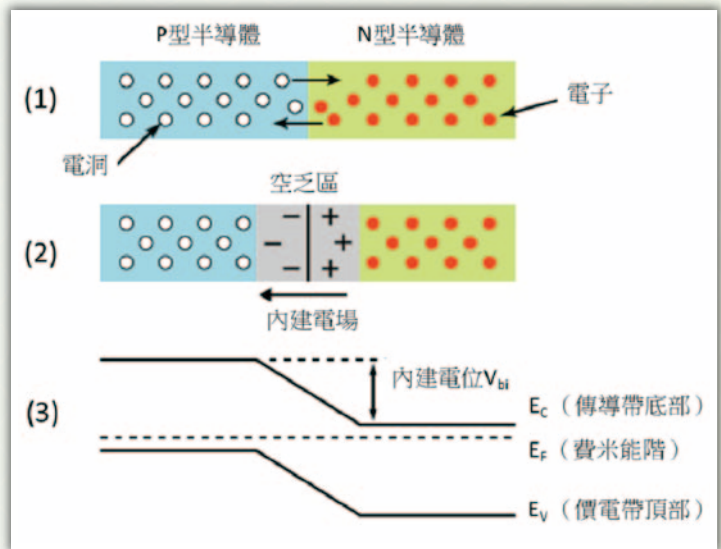
圖四 直接能帶和間接能帶的差異

## 二極體

前面我們已經瞭解發光的機制，接下來要介紹的發光二極體的組成。半導體有趣的地方，在於我們可以控制其導電度和導電載子的型態，透過參入不同原子的雜質到不同的材料中，我們可以改變原本材料的特性（這部分的詳細原理，請詳閱胡振國教授 2012 年二月份的文章：半導體元件中的電子何去何從？）。



半導體中，含有帶正電的電洞比率較高的，我們稱為 P 型半導體（Positive 的意思），若含有帶負電的電子比率較高的，我們稱為 N 型半導體（Negative 的意思）。當 P 型半導體和 N 型半導體接在一起時，界面處會形成 PN 界面，而電洞會從 P 型半導體擴散到 N 型半導體（擴散：從濃度高往濃度低的地方跑）；同時，電子也會從 N 型半導體擴散到 P 型半導體，經過一段時間後，因為電子或電洞擴散跑掉的電荷，會帶正電或負電，這些電荷在界面處會形成內建電場，阻止電子電洞繼續擴散，此時平衡的狀態，界面處只剩下固定電荷，稱做「空乏區」，就如圖五所示。

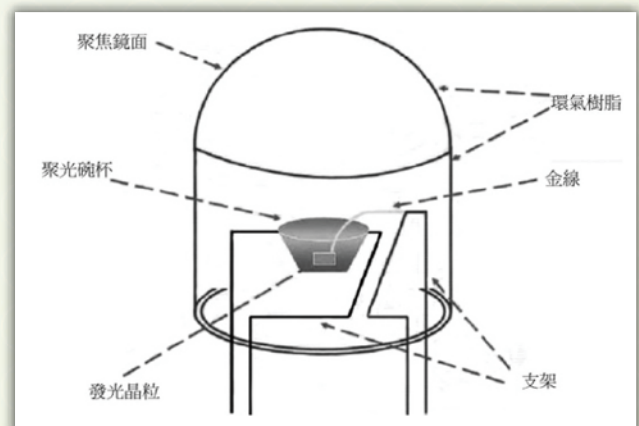


圖五 PN 二極體和熱平衡能階圖。(1) 電子電洞擴散。(2) 形成空乏區和內建電場。(3) 能階圖和內建電位。

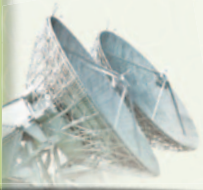
二極體的外觀如其名，有兩個電極，只允許單一個方向的電流流過。當我們將電池的正極接在 PN 二極體的 P 型半導體一端，負極接在 PN 二極體的 N 型半導體一端，此時給予二極體的偏壓稱做「順向偏壓」，二極體可以導通電流；若我們反過來接，接正極接到 N 型半導體，負極接到 P 型半導體，此時給予二極體的偏壓稱做「逆向偏壓」，二極體在這個情況下，是不能導通電流的，不過一旦逆向偏壓太大，會造成二極體崩潰，此時就會導通大量的電流。以 LED 來說，我們是操作在順向偏壓的情況下，從電池的負極將電子注入至 N 型半導體中，電洞從電池正極注入至 P 型半導體中，這些過剩的電子電洞，便會流經 PN 界面，使空乏區縮小並消除，再流到另一邊的半導體中。當電子跑到存在很多電洞的 P 型半導體裡，形成了「少數載子」，那和電洞相碰的機會則大大增加，很容易就會復合放光；同理電洞一旦到了 N 型半導體中，看到很多的電子，復合放光的機率也會大增，此時 LED 發光就是一件再自然不過的事情了，不過要記得材料必須是「直接能帶」才行！

## 終極燈泡

發光二極體的發光型態是利用電子電洞對復合發光，不像傳統燈泡需要把燈絲加溫到很高的溫度（3000K）而發光，因此不會有太多的能源消耗，可達到節能的目的。而且因為發光機制的不同，使用壽命遠較傳統光源長，所以在許多維修不易且需要光源的地方，LED 是很好的選擇。由於發光二極體的體積很小，封裝可以小至數個立方毫米，所以可以配合不同的應用，設計出適當的大小尺寸，選擇自由度高，這是傳統光源所不及的。此外，發光顏色純度佳（對應的波長就是材料的能帶嘛），可以提供良好的單色光源，若搭配紅綠藍三原色，更可以創造全彩的光。LED 的反應速度快，也可做為訊號傳輸用，這也是它的一大優勢。圖六為常見封裝好後的發光二極體，包括發光用的半導體晶粒，電線，還有一些光學元件。



圖六 封裝好後的發光二極體。  
(圖片擷取自網路)



前面提過復合放光的光子能量和波長，對應的是半導體材料的能階差  $E_G$ ，所以透過不同的半導體材料，我們可以產生不同顏色的光，若要發出白光，則必須利用「混光」的方式，才能使用 LED 來當作照明設備之用。一般來說，我們當然可以使用發出紅、綠、藍三種可見光的發光二極體，將三種光混成白光，不過由於綠光的發光二極體效率較差，此方法的成本會比較高，但近年來隨著技術的不斷改良，越來越多產品使用此方法。

目前比較普及的白光 LED，是利用顏色的互補原理，利用氮化物 LED 發出藍光或紫外光，再用磷光劑將部分的光轉化成含有綠光和紅光等波長較長的光，來混合出白光。或是利用螢光粉激發出黃光，和藍光混合後，可以方便地製作出不同色溫的白光 LED。此種可歸類於單晶型的白光 LED，體積小，成本低，但仍有些亮度和色度的問題需要克服。近年來也有人提出直接在硒化鋅 ( $ZnSe$ ) 基板上生長硒化鋅的磊晶材料，當通電時，同時在主動區和基板發出藍光和黃光，最後混成白色光輸出。

白熾燈泡或日光燈等傳統照明，現在仍較普及，但各有其缺點。例如白熾燈泡雖然製作簡單，價格低廉，但效率低，產生多餘的熱，易破損。日光燈雖較白熾燈泡省電，但有重金屬廢棄物污染的問題，在今日要求節能環保的觀念之下，兩者已不符需求。相較之下，具有省電高效率的白光 LED，便成了一個令人期待的新世紀產物。根據經濟部工業局的統計，台灣所有的照明用電約占總用電的 16%，若可以全面更換為 LED 燈，大約可節省 50% 的能源，估計每年可省下 110 億度電，大約是一座核能發電廠的年發電量。

LED 這個終極燈泡要能夠普及，要能夠和傳統燈具競爭，最重要的是價格問題，價格問題也牽涉到發光效率的問題，亦即每瓦可以產生多少流明 ( $lm/Watt$ ，流明為照度的單位)，目前各大 LED 廠商和研究單位都持續在努力，也需要更多對光電有興趣的後進學子加入研發，希望有朝一日，LED 這個新光源，不僅可以照亮我們的生活，更帶領我們進入一個綠能、環保、數位的新世代！



圖七 市面上販售的白光 LED 燈泡 (圖片擷取自網路)

