

## 半導體物理簡介

### 1. 半導體材料介紹

半導體的種類

半導體的鍵結與晶格結構

半導體中的導電載子---電子與電洞

產生與復合

帶溝與半導體的光電特性

半導體的摻雜

### 2. 半導體之導電行為

移動電流與擴散電流

多出載子的傳導行為

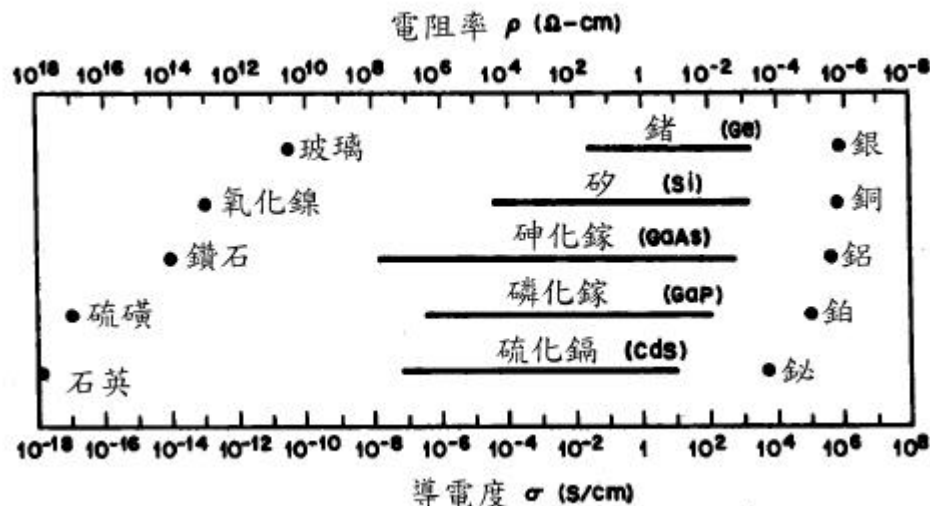
本章是要簡介以半導體為基礎的近代電子學中的基本概念，包括半導體材料、基本半導體元件，以及應用。這裡僅提供簡單且直覺的物理圖像，嚴謹的探討與推導公式不在描述的範圍內。

電子技術的進步造就了我們目前資訊電腦產業的發展，更改變了我們日常生活形態，甚至人類的思考模式、文化活動以及國家間之政治與軍事的互動。電子技術中的主角就是半導體。因此，我們將由半導體材料的種類及特性開始介紹，並就他的重要導電行為加以討論，再來介紹最基本的半導體元件---二極體。對於二極體有了初步瞭解後，三極體（或稱為雙極電晶體 BJT）的特性就很容易能夠掌握。場效電晶體（FET）的操作原理和三極體完全不同，這裡會特別介紹在近代電腦中用得最多的金氧半場效電晶體（MOSFET）。除了基本元件的原理描述外，對於一些特殊功能的元件，例如發光二極體、二極體雷射、高頻電晶體等，均將略加介紹。最後我們將就積體電路技術的內容及發展做簡短的描述，並探討他們在現代人類生活中扮演的角色。

## 1 半導體材料

半導體(semiconductor)顧名思義係指導電度介於導體與絕緣體的物質，圖 1 將一些常見材料依其導電度（下方橫軸）標出，上方橫軸所標示的是對應的電阻率。半導體的導電度大約介於  $10^{-8}$  到  $10^3$  S/cm 之間，範圍相當的廣，即使是同一半導體材料的分布也很大，這主要是由於半導體的導電性很容易受到雜質、溫度及光照等製備及環境條件的影響。也正是由於半導體的這個多變的特性，使得他能夠有多樣性的應用。

圖 1 一些常見材料依其導電度（下方橫軸）及電阻率（上方橫軸）標出。



## 半導體的種類

半導體材料依其構成的元素可分為元素半導體（element semiconductors）以

及化合物半導體(compound semiconductors)。元素半導體，例如矽(silicon, Si)、鍺(germanium, Ge)，由單一的四價元素（有四個價電子）所形成。常見化合物半導體又可依照成分元素的週期表分類分為四四族化合物半導體（如碳化矽 SiC、矽鍺合金等）三五族化合物半導體（如砷化鎵 GaAs、氮化鎵 GaN、磷化鎵 GaP、砷化銦 InAs 等二元化合物，及砷化鋁鎵 AlGaAs、磷化銦鎵 GaInP、氮化銦鎵 GaInN、磷砷化銦鎵 InGaAsP 等三元或四元化合物）以及二六族化合物半導體（如硫化鎘 CdS、碲化鎘 CdTe、硫化鋅 ZnS 等）圖 2 是週期表內二價到六價的元素，大部分的半導體是由這些元素所組成。

圖 2 和半導體相關之週期表

	II	III	IV	V	VI
		Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se	
Cd	In	Sn	Sb	Te	
Hg					

元素半導體中的矽是目前工業中最主要的半導體材料，其原因在於矽在地球表殼中存量豐富，又能在上面長出品質良好的氧化層，適合大規模的積體電路的製作。其他半導體則依其特性各有不同的用途，例如三五族半導體有優良的發光特性以及快速的電子傳導特性，因此在光電產業及通訊電子方面就佔有非常重要的角色。

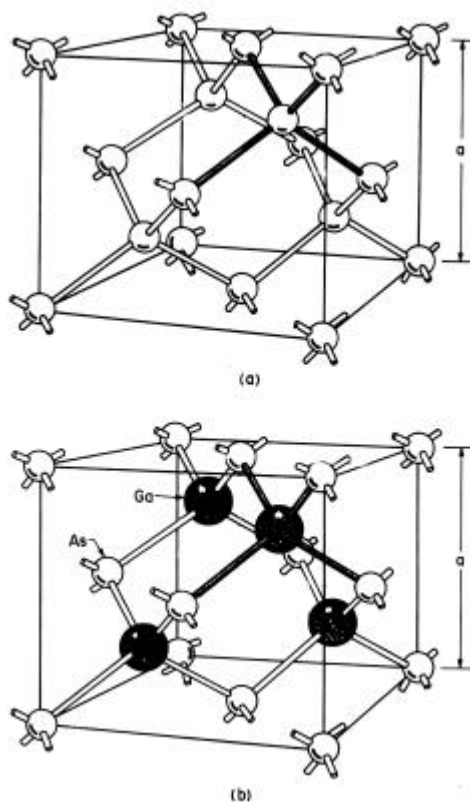
### 半導體的鍵結與晶格結構

半導體的特性和其組成原子間的鍵結以及晶格結構有密切的關係。以矽和鍺為例，原子最外層有四個價電子，若最鄰近原子數為 4，則原子間的鍵結形式為所謂的  $sp^3$  混成軌道形成之共價鍵(covalence bond)，所形成的晶格結構和鑽石相同，稱為鑽石結構(diamond structure)，圖 3(a)是他的一個單位立方晶格中原子排列的情形，實際的結構就是以此為單位重複的在空間中排列。鑽石結構可以看成是兩個相同的面心立方晶格（由正立方體 8 個頂點及 6 個面的中心點組成），在沿著對角線方向相錯四分之一個對角線長度排列。我們可以看出鑽石結構是一個很空洞的結構。

三五族化合物半導體（例如砷化鎵）的平均價電子數也是 4，五族元素多出 1 個電子剛好補足三價元素之不足，因此可以形成和鑽石結構類似的晶格，稱做閃

鋅(Zincblende)結構，如圖 3(b)所示，其中每一個三族元素（鎵）有 4 個最鄰近的五族元素（砷），同樣的每一個五族元素（砷）有 4 個最鄰近的三族元素（鎵）。

圖 3 常見的半導體晶格結構：(a)鑽石結構，(b)閃鋅結構。



並非所有的化合物半導體都是閃鋅結構，有一些二六族化合物半導體，例如硫化鎘及硫化鋅等，則形成以六方晶格為基礎之烏采(Wurtzite)結構，原子密度較閃鋅結構緻密。這些化合物用途較侷限，在此不再詳述。

在討論半導體的鍵結與導電特性時，如圖 3 之立體圖使用上並不方便，通常我們可以將三維的鍵結用二維的圖像代表。在圖 4 中每一個矽原子在同一平面有四個最鄰近原子，各原子間以一個共價鍵連結，而每一個共價鍵由兩個電子組成。這裡還要強調一下，這個平面圖像只是為了討論方便，實際的結構還是要回歸到三維的排列。

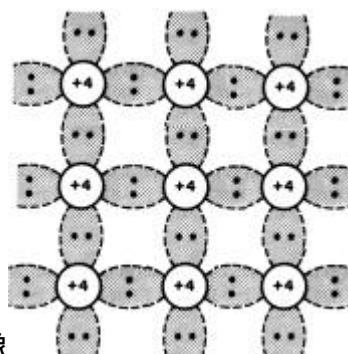


圖 4 矽鍵結的平面圖像

例題 1

在溫度 300K，矽的單位立方晶格的邊長  $a$  (稱為晶格常數, lattice constant) 為  $5.43\text{\AA}$ ，計算矽每立方公分所含之原子數及質量密度。

解：

由圖 3(a)，一個單位立方晶格中包含 8 個八分之一的頂角原子、6 個二分之一的面心原子、及 4 個內部的完整原子，故共有  $8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} + 4 = 8$  個原子。

每立方公分所含之原子數為

$$\frac{8}{a^3} = \frac{8}{(5.43 \times 10^{-8} \text{ cm})^3} = 5.0 \times 10^{22} \text{ 原子/cm}^3$$

質量密度為

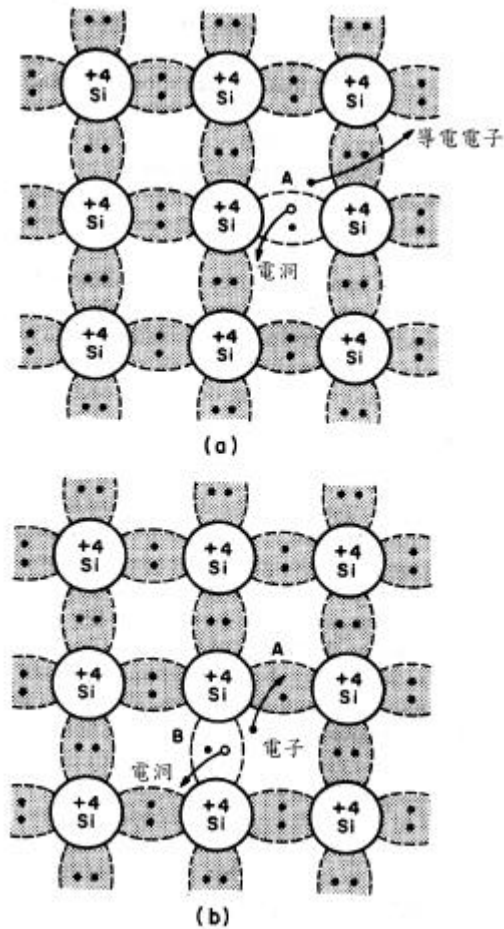
$$\frac{\text{每立方公分原子數} \times \text{原子量}}{\text{亞佛加厥常數}} = \frac{5.0 \times 10^{22} \text{ (原子/cm}^3) \times 28.9 \text{ (g/mole)}}{6.02 \times 10^{23} \text{ (原子/mole)}} = 2.33 \text{ g/cm}^3$$

### 半導體中的導電載子---電子與電洞

由上面討論我們知道半導體中原子間的鍵結都是共價鍵，假如所有的共價鍵都是完整的，晶格中就沒有可導電的自由電子，那麼他應該是絕緣體才對。在實驗上發現，即使是很純的半導體，例如矽，在室溫時還是有些許的導電度，而且溫度上升，導電度會增加。這些導電度來自於在室溫時，少部分共價鍵中的電子吸收了足夠的熱能跳出他的鍵結位置，進入共價鍵間的空間，而大部分的鍵結還是完整的，只要電子不回到空出的鍵結位置，他可以在晶格的空間中游動，因此可以導電。這個可以移動的電子我們稱為導電電子(conduction electron)。圖 5(a) 表示在 A 位置的電子吸收足夠的能量，跳出共價鍵的位置，形成導電電子。

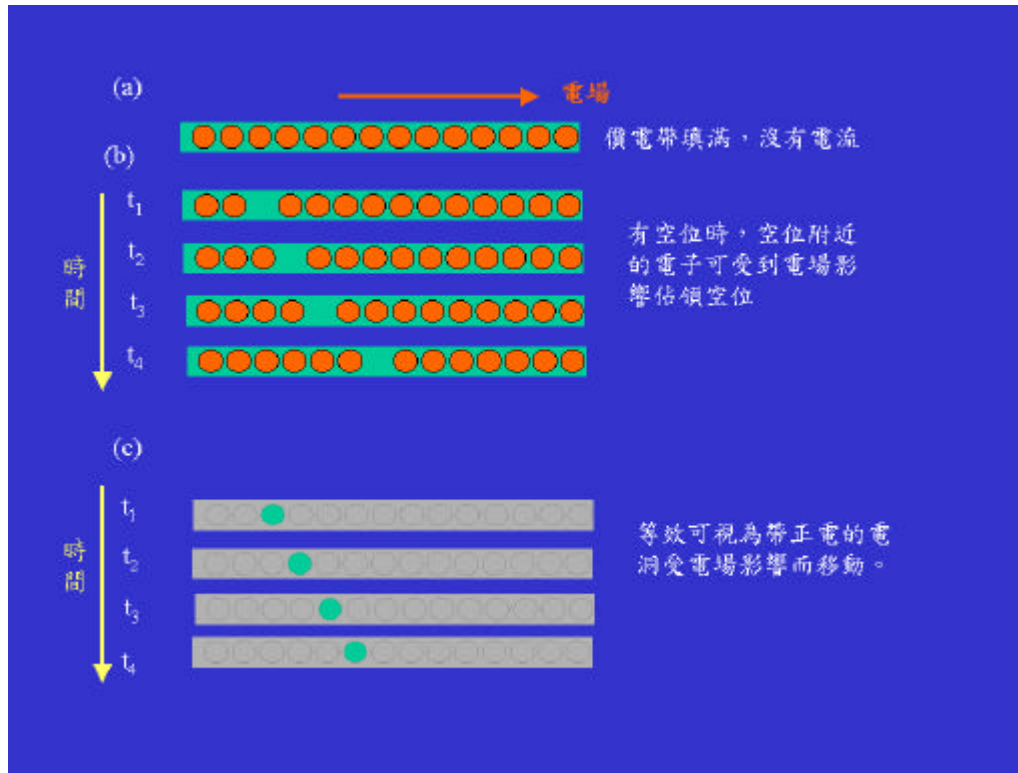
在圖 5(a)中我們同時可以看到，電子跳出後在 A 還留下了一個空位，其他共價鍵的電子，有可能去填充此空位，例如圖 5(b)中之 B 位置的電子去填了 A 之空位，造成空位的位置由 A 移到 B。在沒有空位時，由於原子核的電荷和電子的電荷完全抵銷，故不帶電，成電中性；而在空位附近由於少了個電子，等效上是帶了一個基本單位的正電。因此，空位的移動，我們可以看成是一個正電荷的移動，也可以導電。這個能夠導電的空位稱為電洞(hole)，我們把他當成一個帶有單位正電荷的粒子。導電電子與電洞均可導電，都稱為載體(carriers)。

圖 5 (a)在 A 位置的電子跳出共價鍵的位置形成導電電子；(b)B 位置的電子去填了 A 之空位，造成空位的位置由 A 移到 B。



電洞在電場中的行為真的像一個帶正電的粒子嗎？我們可以利用圖 6 的一維簡化圖像來說明。圖 6(a)代表完全填滿的共價鍵，即使外加了電場，也不會有電流產生。假如某一位置的電子被移除了，所留下的空位由於原子核的帶電，等效上帶了一個基本單位的正電，如圖 6(b)中最上圖。加上正向電場（向右）後，只有空位右方的電子可以移到空位上，其他的電子沒有空位可填，依舊不移動。圖 6(b)是在幾個時間電子及空位的位置圖，很容易可以看出雖然電子是向左移動，但空洞的位置卻向右沿著電場方向移動，和一個正電粒子相同。圖 6(c)只將空洞的位置畫出，其他電中性的部分忽略掉，這就是一個電洞受電場影響而運動的圖像。

圖 6 (a)完全填滿的共價鍵；(b)一位置的電子被移除了，加上正向電場（向右）後，只有空位右方的電子可以移到空位上；(c)一個電洞受電場影響而運動的圖像。



在純的半導體中，導電電子與電洞是成對出現的，也就是說一個電子離開共價鍵形成導電電子的同時一定留下一個電洞，因此電子的濃度  $n(1/\text{cm}^3)$ 和電洞的濃度  $p(1/\text{cm}^3)$ 必然相同，即

$$n=p=n_i=p_i, \quad (1)$$

$n_i$  及  $p_i$  代表純半導體中之導電電子及電洞的濃度，或稱固有濃度(intrinsic concentration)。純半導體我們有時候也稱他做固有半導體(intrinsic semiconductor)，對應於後面會提到的摻有雜質的非固有半導體(extrinsic semiconductor)。 $n_i$  是溫度的函數，溫度升高，平均被破壞的共價鍵變多，固有電子電洞的濃度增加，導電度增加。表 1 是常見的半導體矽、鍺和砷化鎵在室溫的  $n_i$ 。以矽為例， $n_i=1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，遠小於例題 1 中之矽原子密度  $5.0 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ，平均約每  $3 \times 10^{12}$  個原子才貢獻一個導電電子與電洞！！純的矽導電度不是很好，用途有限。

表 1 常見半導體在室溫的固有電子濃度及帶溝

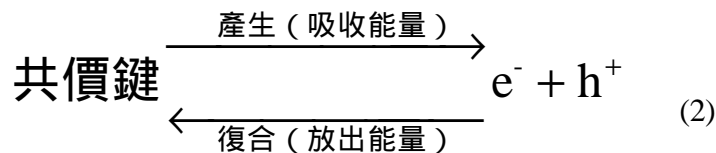
半導體種類	固有電子濃度 $n_i$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	帶溝 $E_g$ (eV)
鍺(Ge)	$2.4 \times 10^{13}$	0.67
矽(Si)	$1.45 \times 10^{10}$	1.12
砷化鎵(GaAs)	$1.79 \times 10^6$	1.42

### 產生與復合

在共價鍵中的電子必須吸收足夠的能量才能跳出形成電子與電洞，而所需之最小能量稱做帶溝(band gap)  $E_g$ ，而這個過程叫做產生(Generation)，所吸收的能量可以是晶格的振動能量(熱能)，光子的能量(輻射)，或高速粒子的能量。當能量不足時，共價鍵的電子並不吸收。帶溝的大小，一般以電子伏特(eV)為單位，和共價鍵的強度有關，共價鍵強度愈強，帶溝愈大，鍵愈弱則帶溝愈小。表 1 也列出了常見半導體的帶溝，矽的帶溝較鍺為大，也就是說矽的共價鍵較鍺強，在室溫時破壞的共價鍵較少，固有的導電電子電洞的濃度矽就較鍺為低。同樣的四價元素碳(C)，排列成和矽相同的鑽石結構，由於共價鍵非常的強，帶溝遠比矽大，在室溫時幾乎沒有導電電子與電洞，故為絕緣體。當然這裡應該可以想得到，當溫度夠高時，鑽石也可以是半導體！！

當導電電子在晶格中碰到了電洞，他們有機會結合形成填滿的共價鍵，並放出和帶溝差不多的能量，放出能量的形式一般可以是熱能(晶格的振盪)或光子。這個過程我們稱為復合(Recombination)。

產生與復合互為逆反應，我們可以用類似化學反應式的形式寫出：



這個可逆反應的反應熱大約是帶溝的能量。其中  $e^-$  代表導電電子， $h^+$  代表電洞。室溫時的導電電子和電洞濃度就是這個可逆反應到達平衡後的平衡濃度，當溫度升高時，平衡濃度上升。

這裡要對光的吸收與放出多做一些說明。一般而言，光被吸收或產生是以光子為單位，一個光子的能量  $E$  和他的頻率  $\nu$  成正比，即

$$E = h\nu \quad (3)$$

比例常數  $h$  稱為普朗克常數(Plank constant)，數值約為  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$   $= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ 。共價鍵中的電子可以吸收一個能量較帶溝大的光子，產生一電子電洞對；一個導電電子也可和一個電洞復合放出一個能量和帶溝相當之光子。產生和復合過程中，吸收或放出兩個或兩個以上能量低於帶溝的光子的機率非常非常的低。

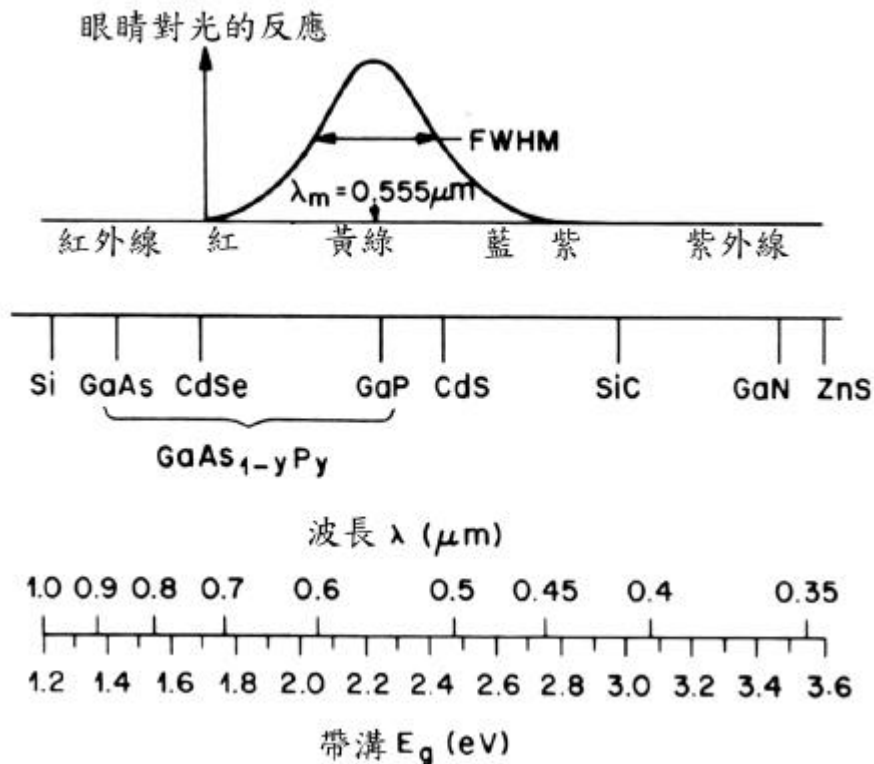


### 帶溝與半導體的光電特性

半導體能夠在光電產業扮演重要的角色，主要是靠半導體吸收和放出光子的特性。以矽為例，他的帶溝是 1.1eV，對應到光譜上的紅外線，部分紅外線及可見光的光子能量均比矽的帶溝大，也就是說這些光子入射到矽晶片上，可被共價鍵的電子吸收產生電子電洞對，導電率因此升高，光的訊號轉也就換成電的訊號。這個特性可以用來偵測能量比帶溝大的光子，製作出來的光電元件叫做光偵測器(optical detector)。現在市面上一般的手提攝影機或數位相機，即是用一以矽晶片為基礎的二維光偵測器陣列放在透鏡之後代替傳統的底片，用來記錄光學影像。若想偵測波長更長的光子，就應考慮帶溝更小的材料。

半導體導電電子和電洞復合時可以放出能量約和帶溝相同之光子，可以利用來製作光源。圖 7 是在可見光附近半導體材料對應不同光波長（或顏色）的對照圖。例如砷化鎵的帶溝為 1.4eV，相當於波長約 0.9 μm 的紅外光，可被用來做紅外光發光二極體或雷射二極體的材料。如果要做可見光的光源，那就必須利用到帶溝能量和可見光光子相同的材料，紅光的能量約在 1.7 到 1.8eV，一般要使用磷砷化鎵(GaAsP)類的三元化合物。目前產業界最有興趣，也是研究的重心，是在藍綠光的光源，必須用到帶溝約在 2.2eV 到 2.6eV 的材料，這個範圍的材料不容易製作，使用上還不像紅光那麼普遍，主要的材料是氮化鎵鎵(InGaN)。由穩定的紅、綠和藍三種半導體光源，我們就能混合出任何顏色的光。

圖 7 在可見光附近半導體材料對應不同光波長（或顏色）的對照圖。



例題 2

由圖 7 人類眼睛最靈敏的綠光波長約在  $0.555 \mu\text{m}$ , 計算其對應之光波頻率及光子的能量。

解：

一光波的波長若為  $l[\mu\text{m}]$ , 其頻率  $n$  為  $n = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{l \times 10^{-6} \text{ m}} = \frac{3 \times 10^{14}}{l} \text{ Hz}$ ,

光子的能量為  $hn = (4.136 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \left( \frac{3 \times 10^{14}}{l} \text{ Hz} \right) = \frac{1.24}{l} \text{ eV}$ 。 (4)

波長為  $0.555 \mu\text{m}$ , 對應的頻率為  $\frac{3 \times 10^{14}}{0.555} \text{ Hz} = 5.4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ ,

對應的能量  $\frac{1.24}{0.555} \text{ eV} = 2.23 \text{ eV}$ 。

半導體的摻雜

純半導體的導電性並不好, 除了在做特殊的偵測器外, 用途不多。半導體可以利用加入特殊雜質(impurities)的方式, 調整他的導電載體種類及濃度, 這個過程稱做摻雜(doping)。例如四價的矽晶體中, 如果少數的矽原子以五價的元素(例如砷 As) 取代, 晶格結構並不受影響, 砷原子依然以  $sp^3$  和周圍的四個矽原子鍵結, 結果多出一個價電子, 圖 8(a)是砷附近鍵結情形的平面簡化圖, 這個多出的價電子在室溫很容易游離形成導電電子, 這種能夠提供導電電子的雜質稱做施子(donor)。失去電子的施子附近帶正電, 如同一正離子。當施子的濃度  $N_D$  遠超過固有電子濃度  $n_i$ , 半導體中的導電電子濃度  $n$  就由  $N_D$  來決定, 即

$$n=N_D。$$

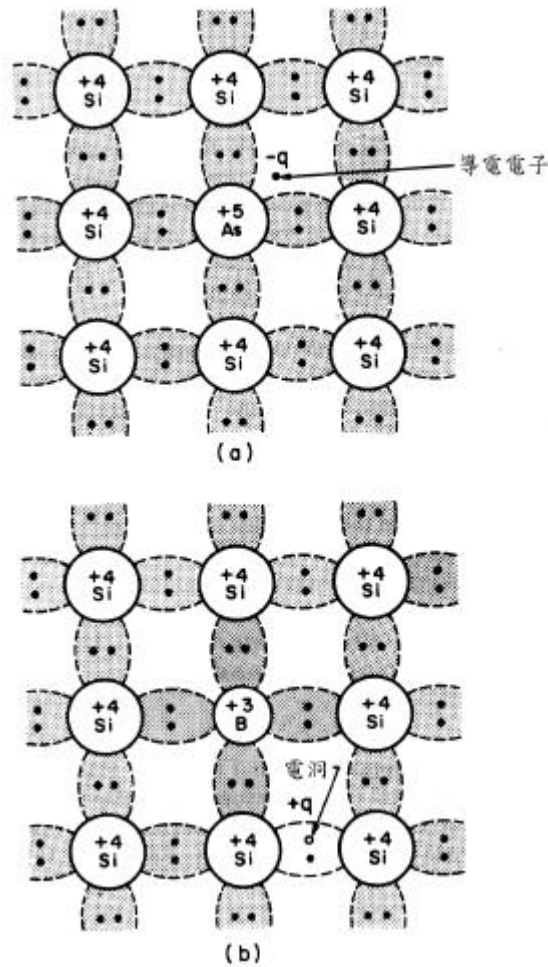
由於電子濃度的大量增加, 電洞容易被電子復合, 電洞濃度  $p$  會大量減小。這時半導體的導電度主要是由導電電子所貢獻, 我們稱此種半導體為 n 型半導體(n-type semiconductor), 導電電子稱為多數載體(majority carrier), 而電洞則稱為少數載體(minority carrier)。

假如矽中的摻雜原子改為三價元素, 例如硼 B, 那麼硼和矽形成共價鍵時就少了一個電子, 也就是說多了一個空位, 當其他共價鍵電子移到這個空位, 或說空位離開了硼原子附近, 便形成一個能夠導電的帶正電電洞, 這時"失去"電洞的硼附近則帶負電, 如同一負離子。圖 8(b)是硼附近鍵結情形的平面簡化圖, 這種能夠提供電洞的雜質稱做受子(acceptor)。當受子的濃度  $N_A$  遠超過固有電洞濃度  $p_i$ , 半導體中的電洞濃度  $p$  就由  $N_A$  來決定, 即

$$p=N_A。$$

這種半導體我們稱為 p 型半導體(p-type semiconductor), 多數載體為電洞, 導電電子成為少數載體。

圖 8 (a)施子雜質與(b)受子雜質的鍵結示意圖。



無論是沒有摻雜的本質半導體或有摻雜的 n 型或 p 型半導體，當式 2 的產生與復合達成平衡時，對於同一種半導體，固定溫度時導電電子濃度與電洞的濃度的乘積維持一定值，即

$$np = \text{常數} = n_i p_i$$

又由式 1，可得

$$np = n_i^2(T), \quad (5)$$

固有電子濃度  $n_i$  是溫度  $T$  的函數。這個關係稱做群體作用定律(mass-action law)。這個定律和酸鹼溶液中在改變酸鹼值過程中氫離子與氫氧根離子的濃度乘積為一定值的原理類似。

根據式 5，對本質半導體導電電子和電洞濃度相同，馬上可以得到式 1 的結果。若摻雜濃度較本質濃度高  $10^6$  倍的施子，導電電子濃度則增高  $10^6$  倍，同時電洞濃度為本質濃度的  $10^{-6}$  倍；同樣地若摻雜濃度較本質濃度高  $10^6$  倍的受子，電洞濃度則增高  $10^6$  倍，同時導電電子濃度降為本質濃度的  $10^{-6}$  倍。

假如半導體中同時摻雜有施子與受子，則較多數種類摻雜的載體會先將較少

數種類摻雜的載體中和（或復合）掉，剩下的才成為半導體的多數載體，這個不同種類摻雜中和的現象稱做補償(compensation)。補償在半導體元件製作時提供一個很實用的技術，一個 n 型半導體，只要在其中再摻雜入比原來施子濃度高的受子，就可以形成 p 型半導體。

最後還要強調一點，不管是 n 型或 p 型半導體，只要外界沒有加入或移除其中的任何載體，半導體依舊維持電中性，因為雜質在提供載體的同時，本身會帶一個和載體電性相反的電荷。

### 例題 3

一半導體矽晶圓，其中均勻摻雜砷，濃度為  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，試計算出：

- 摻雜原子和矽原子的比例，
- 在室溫時導電電子與電洞的濃度，
- 導電載體濃度和沒有摻雜矽的載體濃度的比例，
- 假如我們有辦法將半導體中的導電電子完全移除，那麼他的帶電密度是多少？

解：

- 由例題 1 的結果，矽原子的濃度為  $5 \times 10^{22} \text{ 原子/cm}^3$ ，摻雜原子和矽原子的比例為

$$\frac{10^{16} (\text{原子/cm}^3)}{5.0 \times 10^{22} (\text{原子/cm}^3)} = 2 \times 10^{-7} = 0.2 \text{ ppm}$$

- 砷是五價元素，屬於施子類的摻雜，可以提供導電電子。假設在室溫完全游離，導電電子濃度等於摻雜濃度，即

$$n = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}。$$

由表 1，在室溫時矽的固有電子濃度  $n_i = 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，利用式 5

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} = 2.1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}。$$

- 導電載體包括導電電子與電洞。在本例半導體中， $n \gg p$ ，故載體總數

$$n + p \approx n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}。$$

固有半導體的載體總數為

$$n_i + p_i = 2n_i = 2 \times 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} = 2.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}。$$

$$\text{載體總數比例為 } \frac{10^{16} \text{ cm}^{-3}}{2.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}} = 3.4 \times 10^5。$$

這裡我們可以看出僅 0.2ppm 的原子雜質，導電載體增加了約  $3 \times 10^5$  倍！導電度大幅的改善。這是金屬與絕緣體沒有的特性。

- 導電電子完全移除後，每一游離施子帶一個基本單位的正電，故半導體的帶電密度為

$$e \cdot N_A = (1.6 \times 10^{-19} \text{ C}) \times (10^{16} \text{ cm}^{-3}) = 1.6 \times 10^{-3} \text{ C/cm}^{-3}。$$

例題 4

如果例題 3 中的矽晶圓再摻入濃度為  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的硼，導電電子與電洞的濃度為何？

解：

硼為三價元素，為受子類摻雜，可以提供電洞。 $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的電洞足夠將原有  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的導電電子幾乎完全復合，留下和受子濃度相同之電洞。故電洞濃度  $p=10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，導電電子濃度則由式 5 可得

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{18} \text{ cm}^{-3}} = 2.1 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}。$$