

What's fun in EE

臺大電機系科普系列

半導體元件中的電子何去何從

胡振國／國立臺灣大學電機工程學系教授

現今之電子產品因晶片功能之神奇放大，使得許多創新構想可經由軟硬體之整合而加以實現，進而衍生出各種精彩多元之多媒體世界，身為現代學子，實應具備基本之半導體技術常識，以免落後前端技術面太遠，而整體大環境仍需要更多的有志之士投身前瞻半導體元件之開發與應用，使得高科技之發展可永續經營，不斷創造先機，持續造福人群。在先進積體電路晶片中，半導體元件之數量已多到令人不可思議的地步，想想看一個元件最小尺寸就舉例以 50 奈米 (nm) 估算，假設元件與元件間隔也是 50 nm，不考慮其他電路需求因素，僅以規則性元件擺設估算，則在一個面積為 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 大小之晶片上，就約有 10^8 個元件在運作，可想見的在半導體晶片中的世界，是多麼的複雜神奇。但是，人們在叫晶片做事的源頭，基本上就是加上電訊號控制元件中各區域之電子前往被設定的另一個區域，簡單來講，就是要知道半導體元件中之電子何去何從。

對物理有高度興趣的學子，半導體物理無疑的是你的選項之一，先不論進入大學後將以何種方式學習半導體科技，聊聊晶片中之電子到底應呈現何種基本面相來進出半導體元件，應是值得注意的。以下就半導體中之載子 (carriers) 基本成因及特性做介紹，這與金屬或絕緣材料是不同的，有了這些概念後，將來再進一步欣賞前瞻電路中之元件技術就更有意思了。

電子與電洞 (electron and hole)

首先對極為重要之矽晶體中之電子做介紹，在晶體中因為多種作用力之合成，使得各軌域之電子要存在晶體中必須符合特定條件，亦即晶體中有許多的能階 (energy states) 可供電子佔住，有低能量之能階平常易被電子佔住，而高能量之能階，平常較少被電子佔住，每個能階被電子佔住之情況可用統計熱力學分析估算，井然有序，而晶體中有哪些存在之能階可供電子佔住，是與晶體中之各種作用力相關，這表示不同之晶體其作用力不同，而相對之電子能階分布也就彼此不同。可想

見的是會有某些能量區沒有能階與之對應，電子在低能階要躍升至高能階，需有足夠能量才行。這在原子之光譜分析中可清楚觀察到能階之不連續，而該學理可用量子力學來精彩解釋，目前僅以定性說明。

矽原子為第四族元素，每個矽原子外圍有四個價電子，在形成晶體時，每個矽原子會與鄰近四個相同矽原子共同使用外圍之價電子，進而形成每個原子外圍均有八個電子出現，滿足外圍軌域電子數之數量，可使原子之化性趨穩定，進而形成晶體，如圖 1 所示，此種鍵結稱之為共價鍵（covalent bond）結合。共價鍵之電子所處之能階區域，稱之為價帶（valence band），剛好將價帶之能階全部佔滿，這是半導體的一個特徵。

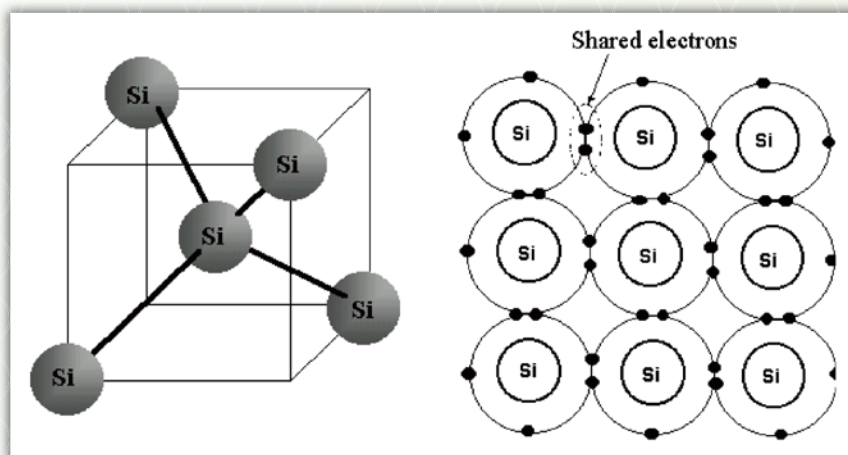


圖 1 矽晶體中之矽原子與周圍原子空間關係圖及共價鍵之形成

（圖參考出處：D.A.Neamen, "Semiconductor Physics and Devices - Basic Principles", 4th Edition, 2012）

矽晶體在 0 K 時所有價電子均被共價鍵束縛住，無可移動之電荷，呈絕緣特性。當溫度上升，部分價電子可獲得足夠能量脫離束縛（ $E > E_g$ ，其中 E_g 為能帶隙 - band gap）而躍升至較高能量之能階區，進而形成可傳導的電子（electron），遺留之空位可供鄰近價電子佔住而導電，稱該空位等效為電洞（hole）。這時，請注意躍升至較高能量之能階區域稱為傳導帶（conduction band），在傳導帶之電子能量較原先共價鍵束縛住時之電子能量為高，如圖 2 所示，所佔用之傳導帶中仍有許多空的能階（因為原先電子剛好將價帶之能階填滿就達穩定了），因此在傳導帶中之電子當受到電場加速移動時，相當容易，簡稱傳導電子（一般而言，在描述半導體中之電子即指該傳導電子）。

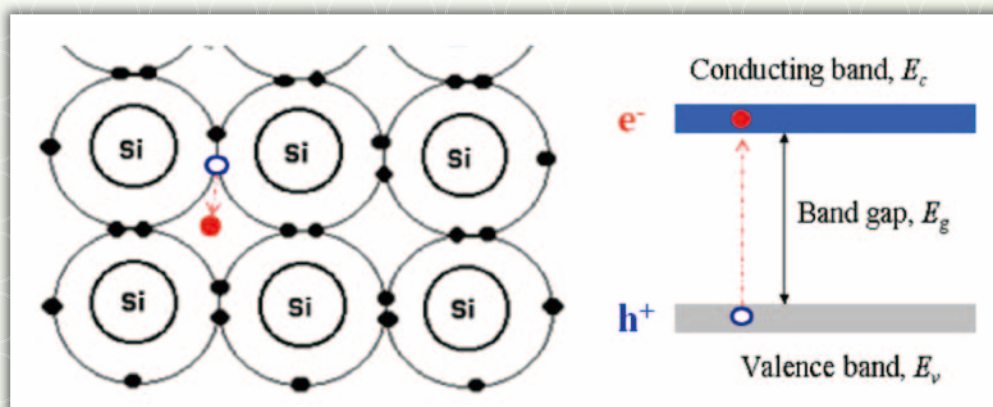


圖 2 矽晶體中因熱能形成傳導帶電子與價帶電洞之示意圖及相對能階

（圖參考出處：D.A.Neamen, "Semiconductor Physics and Devices - Basic Principles", 4th Edition, 2012）



對於價帶中出現之空位，雖然實際上是周圍價電子之移動來佔住進而形成導電，但是不要忘了原先在 0 k 時，所有價電子均被束縛住而無法導電的，這對於半導體之特徵是相當重要的，不可忽視這基本特性。簡單而言，於 0 k 時若加上電場，雖有眾多價帶電子，但因能階均被佔滿，價電子無法移動導電，導電電流為零，相當於呈現絕緣體特徵，此可用下列公式描述。

$$J = -q \sum_{i(\text{total})} v_i = 0 \quad \text{其中 } i(\text{total}) \text{ 代表整個價帶中所有能階之電子}$$

當溫度升高使得部分價電子躍升至傳導帶後，價帶出現上述之空位現象，就以出現 $i(\text{empty})$ 空位為例，這時整個價帶在加上電場後之傳導電流可用下列公式表示

$$\begin{aligned} J &= -q \sum_{i(\text{filled})} v_i = -q \left[\sum_{i(\text{total})} v_i - \sum_{i(\text{empty})} v_i \right] = 0 + q \sum_{i(\text{empty})} v_i \\ &= +q \sum_{i(\text{empty})} v_i \quad \text{其中 } i(\text{empty}) \text{ 代表價帶中空位原先相對應能階之電子} \end{aligned}$$

上式說明了對於空位之角色相當於正電荷之移動，可用等效正電荷觀念來簡化之，亦即半導體之電洞具有正電性，其行為與原有能階之電子相關，但因原先價帶全佔滿電子時之動量淨值為零，使得出現空位時之整體行為竟然由空位之原先電子行為所左右，且電性等效改為正值，在半導體中描述電洞時就是以價帶中之空位被價電子移動佔住之傳導行為作為討論對象，不應與前述傳導帶中之電子混為一談，值得注意。

在常溫（300 k）時，於純矽晶體中因熱激發出傳導電子之同時必會出現價帶之空位，亦即電子與電洞會成對出現，令熱平衡時傳導帶之單位體積傳導電子濃度為 n_0 (cm^{-3})，價帶中之電洞濃度為 p_0 (cm^{-3})，此時 $n_0 = p_0 = n_i$ ，而 n_i 為本質（intrinsic）載子濃度，對於矽晶體，常溫下之 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，這對於矽晶體之矽原子密度（ $\approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ）而言，相當於約 10^{12} 個矽原子才出現一個可傳導之電子或電洞，導電度介於導體與絕緣體之間。在此特別提醒，上述之 n_0 與 p_0 是熱平衡下之統計值，電子與電洞是在熱產生（generation）與復合（recombination）機制中達成之動態平衡，而非固定不變的，根據統計熱力學之推導可得知 $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ ，當溫度為 0 k 時 $n_i = 0$ ，溫度上升則 n_i 很靈敏的跟著上升，此為半導體之基本特性。可是，若只有單純之矽晶體，電子與電洞濃度相同，可應用之場所並不多，工程師想辦法改變矽晶體中之電子或電洞濃度，才能使電子與電洞在元件中會遇到不同之阻擋與導通，進而展開各種精彩之電子元件應用，因此，必須進一步了解如何改變載子濃度之工程技術。

半導體之空間電荷（Space charge in semiconductor）

在矽晶體中摻入五價元素比如 P（磷）或 As（砷），該元素之原子相對矽晶體中四價之矽原子多出了一個電子，該電子在周圍均為矽原子之晶體中屬多餘，因為矽晶體原子外圍已滿足八個共用價電子，該多餘之電子雖被母原子吸引住，但束縛力甚弱，給予稍許之能量即可輕易脫離母原子之束縛而躍升至傳導帶，亦即要形成傳導電子之條件變得容易多了，相當於該多餘電子原先之能階 E_d 離傳導帶不遠，如圖 3 所示，此為五價原子所造成。注意當晶體中之傳導電子因五價原子提供多餘電子而增加時，並未在價帶中伴隨出現電洞（因為它不是由價帶之價電子躍升超過 E_g 來形成），這會使晶體中之電子數隨摻雜五價原子數量而增加，此五價原子稱為 donor，當它的第五個電子因熱能而輕易離開後，本身成為空間上不可移動之正離子（比如 As^+ ）。由於在熱平衡時，電子與電洞對之產生速率必須等於復合速率（否則電子或電洞之數量不會趨於穩態不能算是熱平衡），當電子數因 donor 摻入而增加時，電子與電洞之復合速率亦會隨之增加，進而使電洞數自動減少，也就是說晶體因加入五價原子使得電子數增加，電洞數減少，另出現了空間正離子，該離子因為是原子，故為空間上不可移動之電荷，簡稱空間電荷（space charge）。令摻雜濃度為 N_d ($> n_i$)，則電子濃度 $n_0 \approx N_d$ 稱為半導體之多數載子，熱平衡時 $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ 仍成立，因此電洞濃度 $p_0 < n_i$ 稱為半導體之少數載子，此時 $n_0 > p_0$ ，即形成 N 型半導體。提醒一下，摻雜之五價原子濃度應大於 n_i ，否則原有熱平衡之電子數沒有受到影響，太低數量之摻雜是起



不了載子濃度改變之效。但摻雜之五價原子濃度若超過矽原子密度 ($\approx 10^{22} \text{ cm}^{-3}$)，則此時之矽晶體已大幅失去原有矽之特徵，反而像是另外一種材料了，此種高摻雜之矽已成為類似導電之材料了。

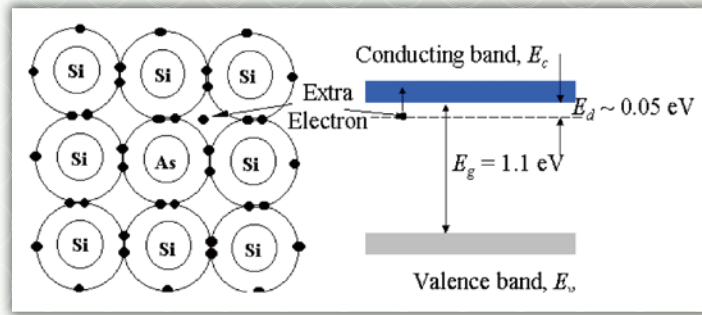


圖 3 矽晶體中摻雜五價砷原子形成 N 型半導體之電子組態與能帶關係圖

(圖參考出處：D.A.Neamen, "Semiconductor Physics and Devices - Basic Principles", 4th Edition, 2012)

另外需特別注意的是， N_d 個 donor 在常溫之熱能提供下幾乎全部變成了 N_d 個空間正電荷，因多數載子（電子）主要來至 donor 之捐贈，故其數量幾乎與 N_d 相當，在沒有外力施加下，於熱平衡時整個半導體之淨電荷為 N_d 個空間正電荷，加上 N_d 個負電性之多數載子電量（電子），再加上正電性之少數載子電量（電洞），由於少數載子數量太少，與多數載子之數量比例懸殊，在看整體電性時幾乎看不到少數載子之電量效應，整個半導體之淨電性可視為不能移動之空間正電荷加上電量相當之負電性多數載子（電子），因此淨量為零，稱為電荷中性（charge neutrality），此特性宜注意不可忽略，因為當可移動之電子或電洞受外加電場或因擴散而移動離開熱平衡之位置時，不能移動之空間正電荷將出現其電性效應，甚至主導該區之電特性行為。

同樣的道理，若想要控制半導體中之電洞濃度高過電子濃度，則須摻雜不同之元素，科學家想到在矽晶體中摻入三價元素比如 B（硼），該元素原子相對矽晶體中之四價的矽原子是少了一個電子，因此在晶體中與矽原子相結合時，提供了一個空位，該空位嚴格來說不能算是價帶之電洞，因為它的能階有受到三價硼原子之影響，使得該能階之能量有別於價帶中之能階，與前述全部是矽原子中之價帶出現之空位，其機制是有所不同的。令該能階為 E_a ，只要稍許能量，就可使周圍價電子易躍升佔住，進而使得矽原子外圍可保有八個價電子之完整軌域，亦即 E_a 離價帶之能階不遠，如圖 4 所示，當然價帶中就因此產生了空位，造成電洞數量之增加，此時硼原子因該空位被價電子躍升佔住而相當於帶負電荷之離子（比如 B^- ），硼變成了空間上不可移動之負電荷，也就是空間電荷。須注意當價電子躍升至 E_a 能階時，雖造成了價帶之電洞增加，但並未在傳導帶中伴隨出現傳導電子，稱此三價原子稱為 acceptor。令摻雜濃度為 N_a ($> n_i$)，則電洞濃度 $p_0 \approx N_a$ 稱為半導體之多數載子，熱平衡時 $n_0 \cdot p_0 = n_i^2$ 仍成立，因此電子濃度 $n_0 < n_i$ 稱為半導體之少數載子，此時 $p_0 > n_0$ ，即形成 P 型半導體。

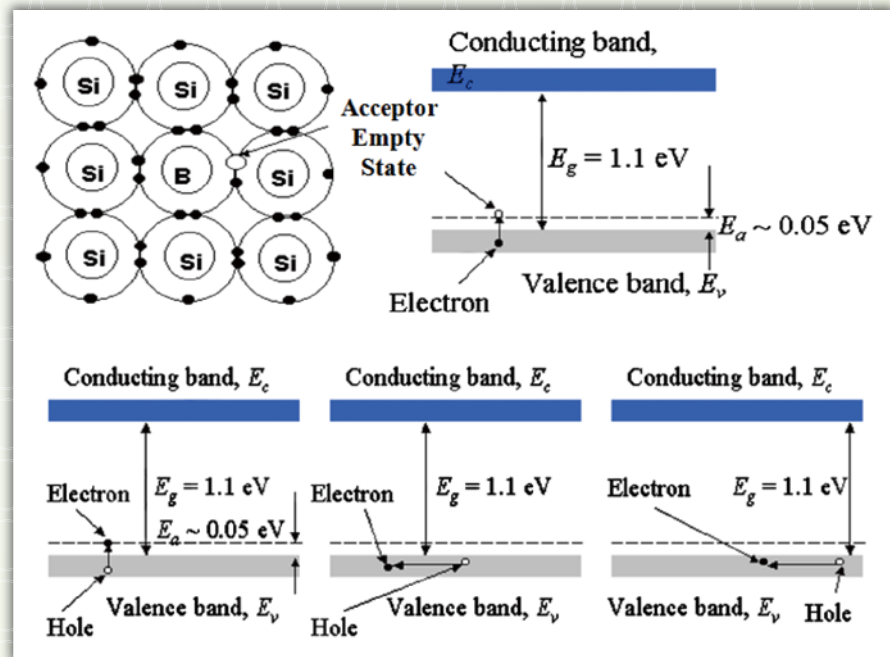


圖 4 矽晶體中摻雜三價硼原子形成 P 型半導體之電子組態與能帶關係圖

(圖參考出處：D.A.Neamen, "Semiconductor Physics and Devices - Basic Principles", 4th Edition, 2012)



需特別注意的是， N_a 個 acceptor 在常溫下幾乎全部變成了 N_a 個空間負電荷，因多數載子（電洞）主要來至 acceptor 接獲價帶電子之躍升而形成價帶之空位，故電洞之數量幾乎與 N_a 相當，在沒有外力施加下，於熱平衡時整個半導體之淨電荷為 N_a 個空間負電荷，加上 N_a 個正電性之多數載子電量（電洞），再加上負電性之少數載子電量（電子），由於少數載子數量太少，與多數載子之數量比例懸殊，在考慮整體電特性時幾乎看不到少數載子電量之效應，整個半導體之淨電性可視為不能移動之空間負電荷加上電量相當之正電性多數載子（電洞），因此淨量為零，稱為電荷中性（charge neutrality），當可移動之電子或電洞受外加電場或因擴散而移動離開熱平衡之位置時，不可移動之空間負電荷將出現其效應，亦即在半導體元件中空間電荷確實佔一席之地，不可隨意忽視。

簡介至此，相信大家對半導體中之電荷有了初步之瞭解，原來對一個材料而言，當加上電壓使得電流通過時，半導體中還分為電子與電洞之貢獻，其能量與數量均可不相同，此外，還有不能移動之空間電荷，有正電性之 donor，也有負電性之 acceptor，在元件形成後，這些電荷將隨設計而多樣變化，元件之奧秘也就被人們逐一探討並加以應用，今日之積體電路就是這樣的成果，希望上述所介紹的道理可以激發你對半導體物理的興趣，並期待他日有緣在一起研究討論。

