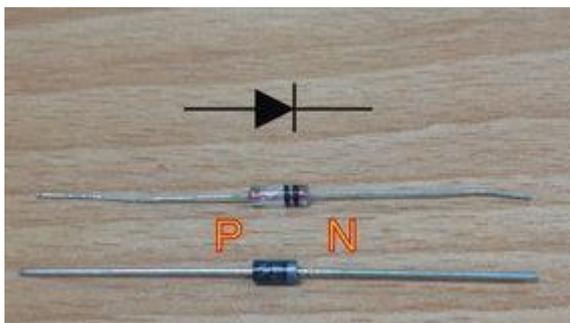


PN 二極體/齊納二極體

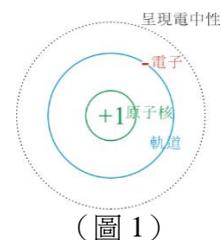


二極體具有陽極和陰極兩個端子，電流只能往單一方向流動。也就是說，電流可以從陽極流向陰極，而不能從陰極流向陽極。對二極體所具備的這種單向特性的應用，通常稱之為「整流」功能。在真空管內，藉由電極之間加上的電壓能夠讓熱電子從陰極到達陽極，因而有整流的作用。將交流電轉變為脈動直流電，包括無線電接收器對無線電訊號的調制，都是通過整流來完成的。

現在我們從最基本的半導體先瞭解起！

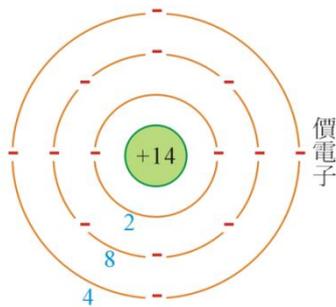
(一) 原子的認識：原子結構如圖 1 所示，具有三大要點：

- 1、原子核：原子核內含有質子和中子，原子的所有正電荷都在原子核內，因此帶正電。
- 2、繞著原子核外軌道旋轉的質點，稱為電子，電子代負電。
- 3、原子核內之正電荷數與軌道上之電子數目相等，故原子本身呈現電中性。

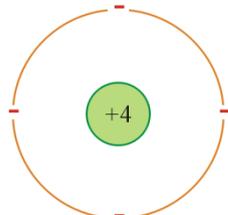


(二) 價電子：

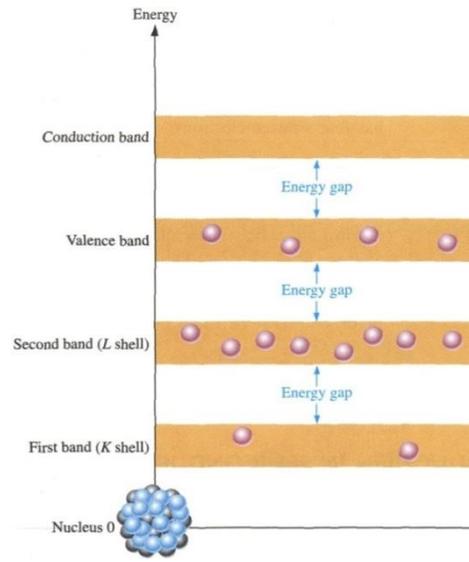
- 1、原子軌道上的電子數目為 $2n^2$ ，其中 n 代表軌道的層數。
- 2、原子最外層軌道上的電子，我們稱為價電子。
- 3、現在最常用的半導體材料---矽 (Silicon；簡稱 Si) 具有 14 個電子，如圖 2a 所示。最外層軌道具有 4 個價電子，故稱為 4 價元素。
- 4、早期的半導體材料---鍺 (Germanium；簡稱 Ge) 具有 32 個電子，其最外層軌道亦有 4 個價電子，故亦稱為 4 價元素。
- 5、各種物質的電氣特性可由價電子的數量來判別：
 - (a) 絕緣體：絕緣體的價電子數最多，在最外層軌道上充滿價電子。需要大量的能量才能釋放價電子，使之成為自由電子，因此在正常情況下，絕緣體不導電，絕緣體的價電子數大多為 8。
 - (b) 良導體：良導體的價電子數少，只需要少量的量就能釋放價電子，使價電子變成自由電子而傳導電流。因此，良導體再正常情況下很容易傳導電流；最佳導體的價電子數通常為 1。
 - (c) 半導體：半導體的價電子數介於絕緣體與良導體之間，通常價電子數為 4 個。傳導電流的難易程度介於絕緣體與良導體之間。
- 6、因為原子的化學及電氣特性都是由價電子決定，為了方便起見，矽或鍺原子都用圖 2b 之簡化模型代替，只表示出價電子及原子核內相等正電荷。
- 7、在半導體元件的製造過程中，常需加入（摻雜）少數三價或五價元素，常用的有：
 - (a) 三價元素---鋁、鎵等。
 - (b) 五價元素---砷、碲等。



(a) 矽原子模型



(b) 簡化模型



(c) 能階

(圖 2)

(三) 離子

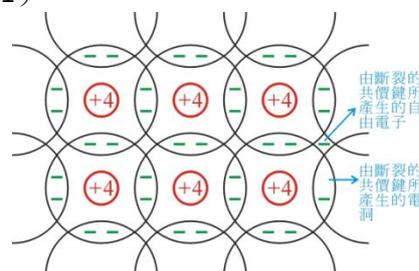
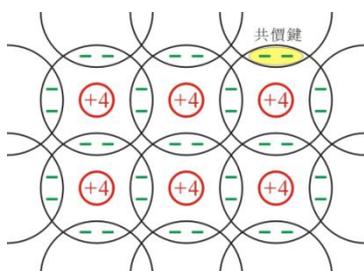
- 1、當原子因為某種原因而獲得（多出）或失去（少掉）一個或多個最外層電子時，此原子即變成一個“離子”。
- 2、三價元素若獲得一個外加電子，則變成負離子。
- 3、五價元素若失去一個電子，則變成正離子。

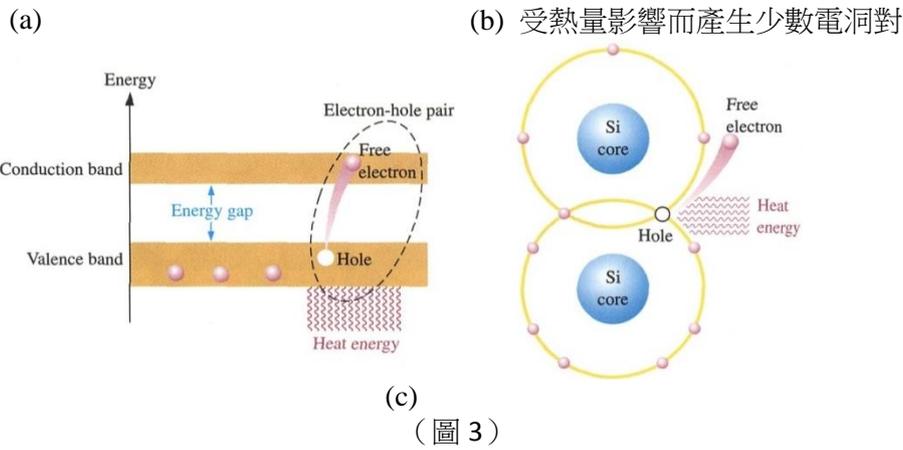
(四) 純半導體

- 1、純半導體，每一個原子的四個價電子都與鄰近的原子共用一個外層軌道，因此，每一個原子的最外層具有 8 個價電子（四對價電子），如圖 3a。在這種情況下，物質的電氣及化學特性都呈現最穩定的狀況，這種電子稱為共價鍵。共價表示共用價電子，減表示原子維持在一起。
- 2、原子形成共價鍵後，電子被束縛住，固純半導體應該不導電。但是當溫度不是絕對零度時，電子將因吸收能量而使繞行軌道之速度加快，並使軌道離原子核更遠，有一部分電子吸收了足夠能量後，將脫離（破壞）共價鍵，而在半導體內部遊蕩，成為“自由電子”，如圖 3b
- 3、電子脫離共價鍵後，在原位會留下一個空位，這個空位我們稱之為“電洞”。原子本來是呈現電中性，如今跑掉一個電子，所以原子就變成了帶正電荷的正離子。為了方便於半導體的研究，我們將電洞看成具有相同性質的“正電荷”。
- 4、由於在室溫下，純矽或鍺都有少許的自由電子存在（亦有相等數量的電洞存在），因此純半導體在室溫下具有稍許的導電能力。
- 5、在室溫下，大約每 3×10^{12} 個純矽原子中，可能發生一個共價鍵的斷裂，而每 2×10^9 個純鍺原子中，可能發生一個共價鍵的斷裂，由這些數字可以推知純鍺的電阻值大約只有純矽的千分之一倍。表一為各種典型電阻值的比較。

物質	區分	電阻值的估計 Ω/cm
銀	導體	10^{-5}
純矽	半導體	50×10^3
純鍺	半導體	50
雲母	絕緣體	10^{12}

(表 1)





(五) 摻雜 (Doping)

1、為了使半導體能夠傳導大量的電流，因此在製造半導體元件時常在矽或鍺中加入少許三價或五價元素，以便產生較多的電洞或自由電子。這種添加電洞或電子的程序，稱為摻雜 (doping)，被加入之少數元素稱為雜質元素。

2、摻雜三價元素，就好像是在純半導體內添加電洞。摻雜五價元素，就好像是在純半導體內添加電子。摻雜可使半導體的電阻值大量下降。

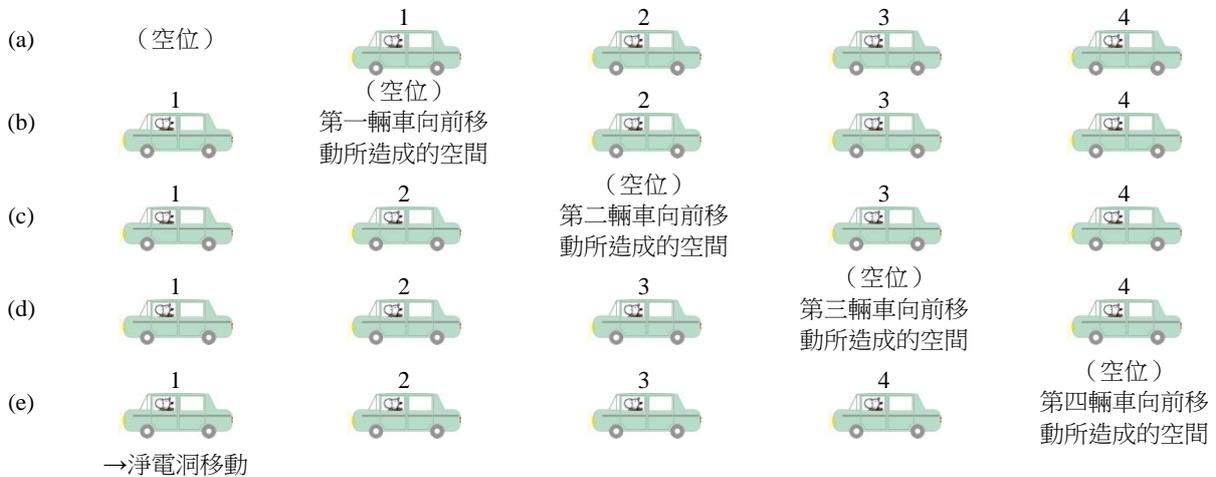
3、N 形半導體:

(a) 如果在矽或鍺中均勻的摻雜五價元素，由於價電子間會互相結合成共價鍵，故每個五價元素會與鄰近的四價矽或鍺原子互成一共價鍵，而多出一個電子來，這就稱為 N 形半導體 (N 表示 negative；電子帶負電)。

(b) 由於加入五價元素後會增加電子，故五價元素又被稱為施體原子。

(c) 加入五價元素而產生的自由電子，在 N 形半導體中佔大多數，故稱為多數載體 (majority carriers)。由溫度的影響所產生之電子-電洞對是少數，所以 N 形半導體中稱電洞為少數載體。

4、P 形半導體:



(圖 4) 電洞移動的模擬 (汽車代表電子，空位代表電洞)

(a) 如果在矽或鍺中均勻的摻雜三價元素，由於價電子間會互相結合成共價鍵，故每個三價元素會與鄰近的四價矽或鍺原子互成一共價鍵，而缺少一個電子，在原子中形成一個空缺，這個空缺我們稱為電洞，如圖 3b 所示，加入三價元素之半導體就稱為 P 形半導體 (P 表示 positive；電洞可視為正電荷)。

(b) 由於加入三價元素後會造成一個空缺，故三價元素又被稱為受體原子。

(c) 加入三價元素而產生之電洞，在 P 形半導體中是大多數載體。受熱使共價鍵破壞而產生的電子電洞對為少數，故 P 形半導體中稱電子為少數載體。

(d) 通常我們都用電荷代表電洞，但是固體中的原子不能移動，所以電洞 (一個空位) 也應該是不能移動的。那麼，為什麼幾乎所有的書籍在談到 P 形半導體時，都以電洞的移動作為導電的解釋呢？請參考圖四。電洞的移動實際上是電子反向移動產生的結果。

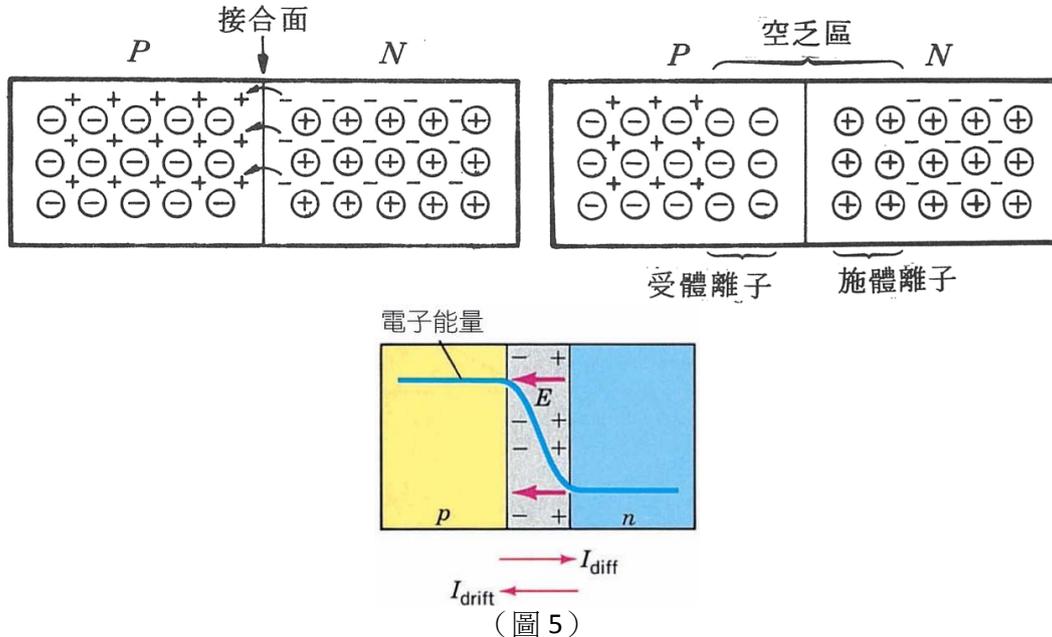
5、P-N 結合：

(a) 當 P 形半導體或 N 形半導體被單獨使用時，由於其導電力比導體 (例如：銅、銀...等) 差，但卻比絕緣體的導電力良好。實際上，就像是一個電阻器一樣。

(b) 但若將數片 P 或 N 形半導體加以適當組合，則會產生各種不同的電氣特性，而使半導體零件的功能多

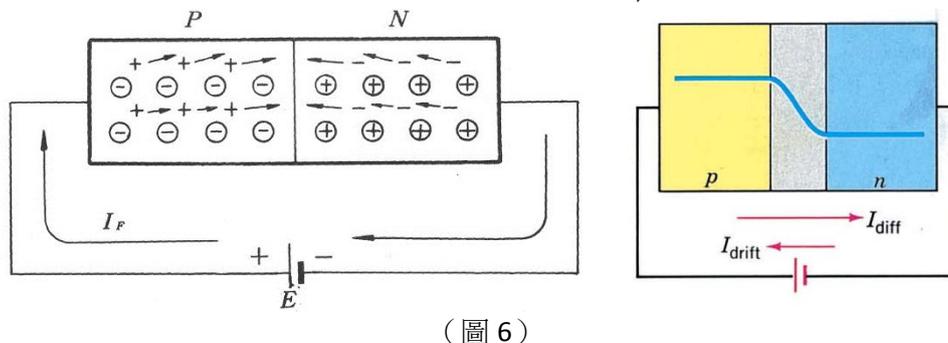
采多姿。今天，我們要先看看把一塊 P 形半導體與 N 形半導體結合起來的情形。

- (c) 當一塊 P 形半導體與 N 形半導體被結合起來時，如圖 5 所示，由於 P 形半導體中有很多電洞，而 N 形半導體中有許多電子，所以當 P-N 結合起來時，接合面附近的電子會填入電洞中，如圖 5。或許你會以為 N 形半導體中的電子會不斷的透過接合面與電洞結合，直到所有電子與電洞消失為止。事實上，靠近接合面的 N 形半導體失去了電子後便成正離子，P 形半導體失去了一些電洞後就變成負離子，如圖 5。此時正離子會排斥電洞，負離子會排斥電子，因而阻止了電子與電洞的繼續結合，而產生平衡之狀態。
- (d) 在 PN 接合面 (P-N junction) 附近沒有載體 (電子或電洞)，只有離子之區域稱為空乏區 (depletion region)。
- (e) 空乏區的離子所產生的阻止電子、電洞通過接合面的力量，稱為障礙電位 (potential barrier)。障礙電位視半導體的摻程度而定，一般而言，Ge 的 P-N 接合面約為 0.2~0.3V 而 Si 的 P-N 接合面約為 0.6~0.7V。



(六) 順向偏壓 (Forward Bias)

- 1、若把電池的正端接 P 形半導體，而把負端接 N 形半導體，如圖 6，則此時 P-N 接合面的偏壓情形稱為“順向偏壓”。
- 2、若外加電源 E 足夠大而克服障礙電位，則由於電池的正端具有吸引電子而排斥電洞的特性，電池的負端有吸引電洞而排斥電子的特性，因此 N 形半導體中的電子會越過 P-N 接合面而進入 P 形半導體與電洞結合，同時，電洞也會通過接合面而進入 N 形半導體內與電子結合，造成很大的電流通過 P-N 接合面。
- 3、因為電池的負端不斷的補充電子給 N 形半導體，電池的正端不斷的補充電洞給 P 形半導體 (實際上是電池的正端不斷的吸出 P 形半導體中之電子，使 P 形半導體中不斷產生電洞)，所以通過 P-N 接合面的電流將持續不斷。
- 4、P-N 接合面再加上順向偏壓時，所通過之電流稱為順向電流 (I_v)。

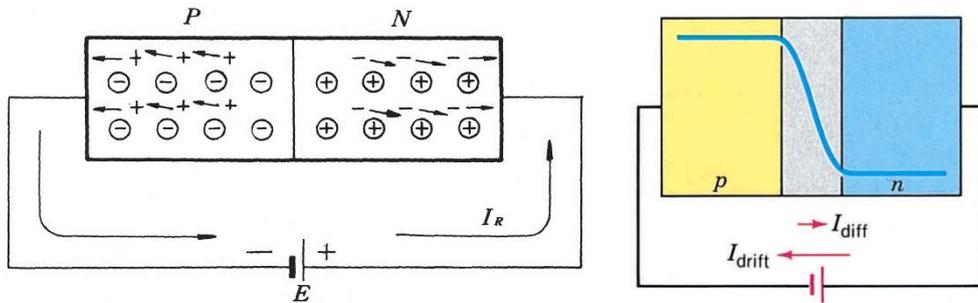


(七) 逆向偏壓 (Reverse Bias)

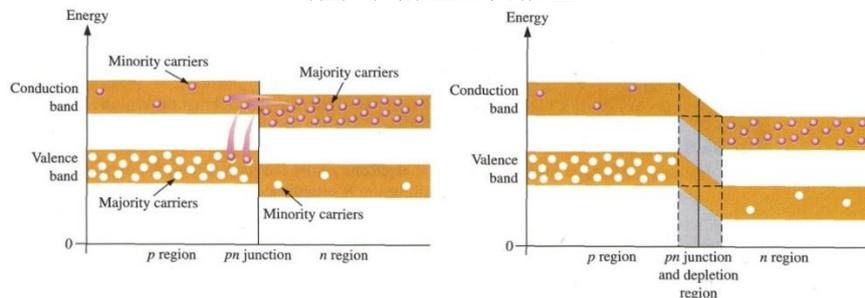
- 1、現在我們如果把電池的正端接 N 而負端接 P，則電子、電洞將受到外加電源 E 之吸引而遠離接合面，使得

空乏區增大，而不會有電子或電洞越過接合面產生結合，如圖七，此種外加電壓之方式稱為逆向偏壓。但是，這時候仍然有少數載子流過接面，縱然逆向偏壓繼續增加，少數載子流也達到飽和而不會再增加，稱之為反向飽和電流 (I_S)

- 2、當 P-N 接合面被加上逆向偏壓時，理想的情形應該沒有逆向電流 ($I_R = 0$) 才對。然而，由於溫度的影響，熱能在半導體中產生了電子-電洞對，而於半導體中有少數的載體存在。在 P-N 接合被接上逆向偏壓時，N 形半導體中的少數電洞與 P 形半導體中的少數電子洽可以通過 P-N 接合面結合，故實際的 P-N 接合面再加上逆向偏壓時，會有一“極小”之電流存在。稱此電流為“漏電電流”，一般以 I_R 表示。註：實際應用時，大多會忽略 I_R ，而不加以考慮。

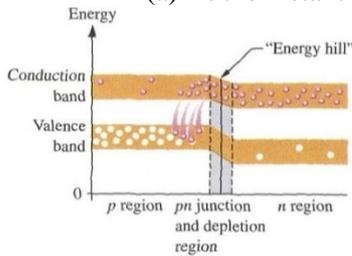


(圖 7) 加上逆向偏壓 E

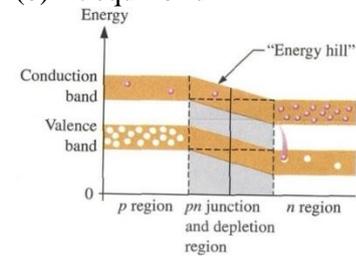


(a) At the instant of junction formation

(b) At equilibrium



(c) Forward bias. There is majority carrier current.



(d) Reverse bias. There is no majority carrier current and only a very small minority carrier current.

(圖 8)

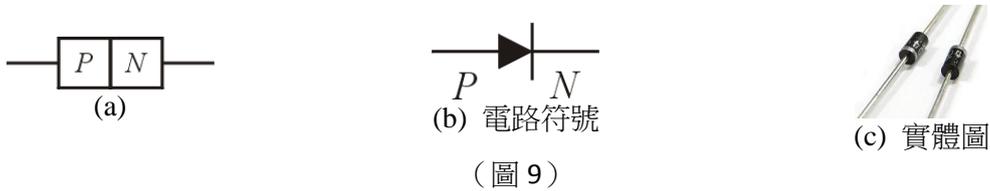
- 3、 I_R 與逆向偏壓之大小無關，卻與溫度有關。無論鍺或矽，每當溫度升高十度， I_R 就增加為原來的兩倍。

(八) 崩潰 (Breakdown)

- 理想中，P-N 接合加上逆向偏壓時，會有一很小且與電壓無關之漏電電流 I_R 。但是當我們不斷把逆向偏壓加大時，少數載體將獲得足夠的能量而撞擊、破壞共價鍵，而產生大量的電子-電洞對。此新產生之電子及電洞可從大逆向偏壓中獲得足夠的能量去破壞其他的共價鍵，這種過程不斷重複的結果，逆向電流將大量增加，此種現象稱為崩潰。
- P-N 接合因被加上“過大”的逆向偏壓而大量導電時，若不設限制通過 P-N 接合之逆向電流，則 P-N 接合將會燒毀。

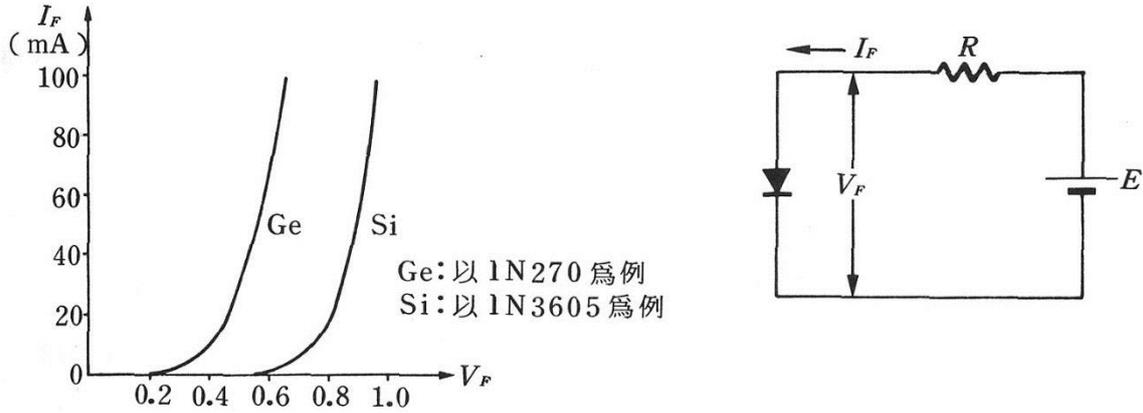
(九) I-V 特性曲線

把 P-N 接合體加上兩根引線，並用塑膠或金屬殼封裝起來，即成二極體。二極體的電路符號如圖 9b 所示，兩根引線分別稱為陽極 P 與陰極 N。



(圖 9)

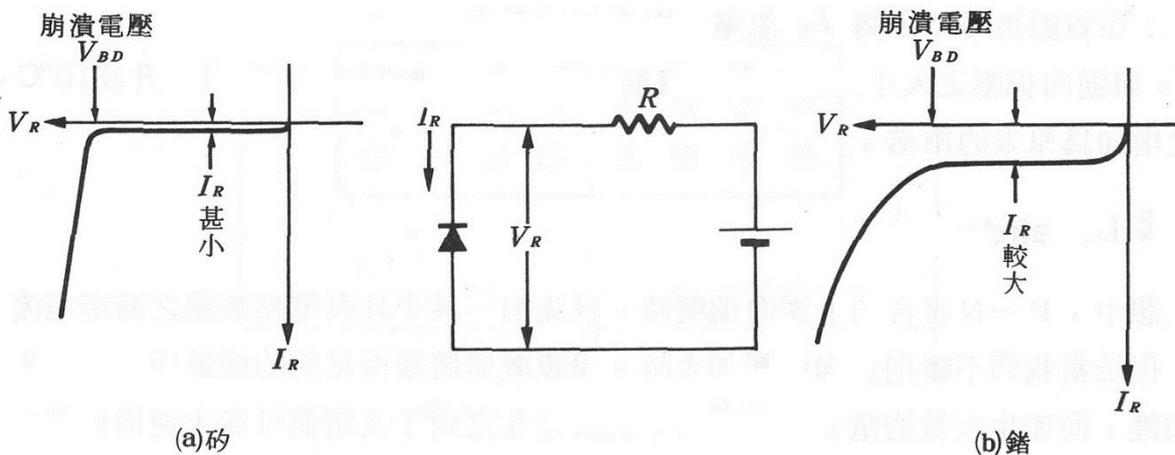
想知道一個元件之特性並加以應用，最好的方法是研究此元件之 $I-V$ (電壓-電流) 特性曲線。圖 10 為二極體之順向特性曲線。由特性曲線可看出二極體所加之順向偏壓低於切入電壓 (cutin voltage) 時，電流很小，一但超過切入電壓，電流 I_F 即急速上升 (此時 I_F 的最大值是由外部電阻 R 加以限制)。矽二極體之切入電壓為 0.6 或 0.7V，鍺二極體的切入電壓為 0.2 或 0.3V。



(圖 10)

圖 11 為二極體之逆向特性曲線圖。由此圖可知：

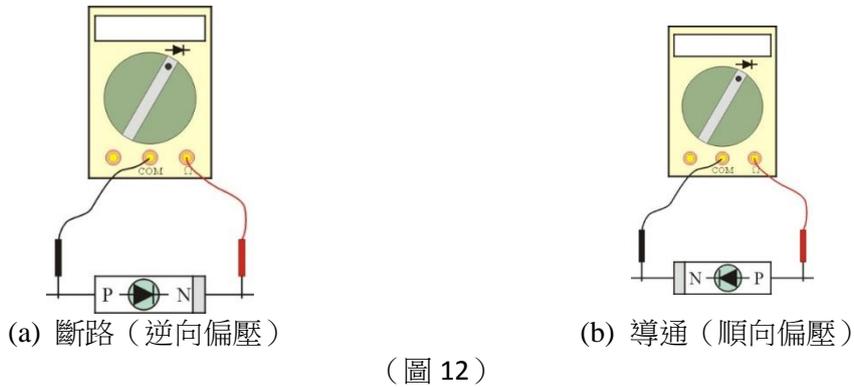
- 1、未崩潰以前，逆向電流 I_R 為固定值，不隨逆向偏壓而變動。
- 2、矽之 I_R 甚小，通常小於 $10\mu A$ ，鍺之 I_R 則高達數百倍。整流二極體很少以鍺來製作，也是因為這個原因。
- 3、二極體，無論鍺或矽，當溫度每增高 $10^0 C$ 時， I_R 約升高為原來的兩倍。
- 4、當逆向偏壓達到崩潰電壓 V_{BD} 後，電流會迅速增加，此時必須由外加電阻 R 限制住 I_R ，否則二極體會燒毀。



(圖 11)

(十) 鍺、矽半導體的判別：

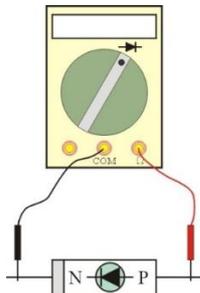
- 1、三用電表置於 \rightarrow 檔，接法如圖 13(b) 會顯示出開路電壓值。若接法如圖 12(a)，則會顯示斷路。若三用電表上為 0.4~0.75V 則為矽二極體，若為 0.1~0.3V 則為鍺二極體。
- 2、三用電表調到電阻檔。接法如圖 12(a) 和 12(b)，分別量出順向電阻與逆向電阻。



實驗步驟及數據

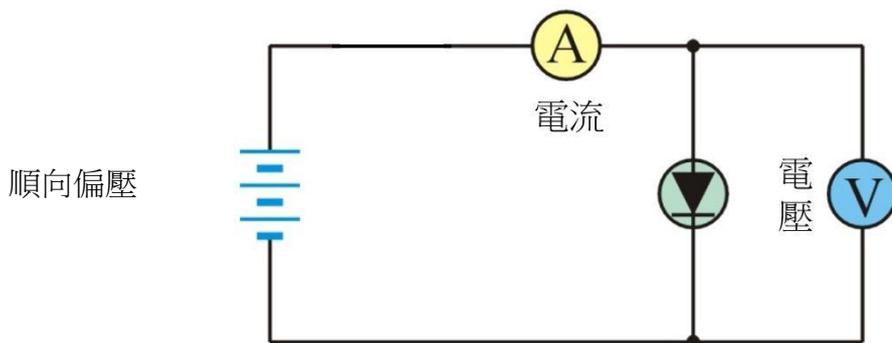
【項目一】用三用電表判斷二極體的狀況與材質

- 1、取 1N4004 & 1N60 二極體各一。
- 2、三用電表置於 $\rightarrow|$ 檔。接法如左下圖，利用三用電表得知此二極體的順向電壓降，並依此判斷使用的二極體為鍺或矽二極體。



	1	2
二極體編號	1N4004	1N60
順向電壓降		
二極體材質 (鍺 Ge 或矽 Si)		

【項目二】V-I 特性曲線



- 1、二極體取 1N4004 並依照上圖電路接線，Ⓐ是三用電表量測電流，Ⓥ是三用電表量測電壓。
- 2、調整電源供應器電壓輸出，從二極體的電壓 0V 開始，每增加 0.1V 記錄到表 2 直到 0.8V。
如果上不去，就記錄最高的偏壓值即可，然後再從 0V 改變電源方向，紀錄負電壓的電流值直到 -8V。

3、繪製 PN 二極體 1N4004 的 V-I 特性曲線圖。

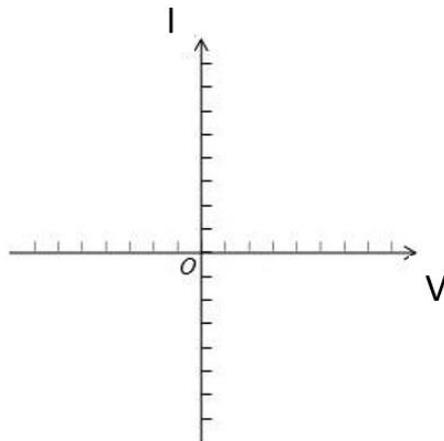
4、更換二極體為 1N60，並重複步驟 1~3，數值紀錄在表 3，V-I 特性曲線可繪在同一張上。

電壓(v)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
電流(μ A)									
電壓(v)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	
電流(μ A)									

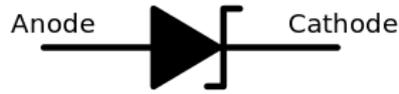
(表 2) 1N4004

電壓(v)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
電流(μ A)									
電壓(v)	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	
電流(μ A)									

(表 3) 1N60



齊納二極體



(齊納二極體在電路中的符號)

一般二極體在逆向偏壓下，只有很小的逆向飽和電流，但是當加在二極體 逆向電壓逐漸加大，並達到某一個定點時，少數的載子獲得足夠的速度，經過游離釋放。造成更多的少數載子，這些載子又可加速游離，進而建立一高電流，稱之為崩潰電流；其中，造成此一崩潰電流的電壓即稱為崩潰電壓；當逆向電壓降到崩潰電壓以下時，逆向電流又回復到正常的逆向飽和電流的大小。

Zener diode 即是具有上述特性的一種二極體。下圖為 Zener diode 的特性曲線，其中，逆向電壓由零增加到曲線膝點部位 發生崩潰現象，膝點部位的電流稱為 I_{ZK} ，大於 I_{ZK} 時，少量的電壓變化將會造成電流很大的變化，小於 I_{ZK} 時，少量的電流變化需要很大的電壓變化；因此，在 I_{ZK} 以下，不適合作為 Zener diode 的操作點。

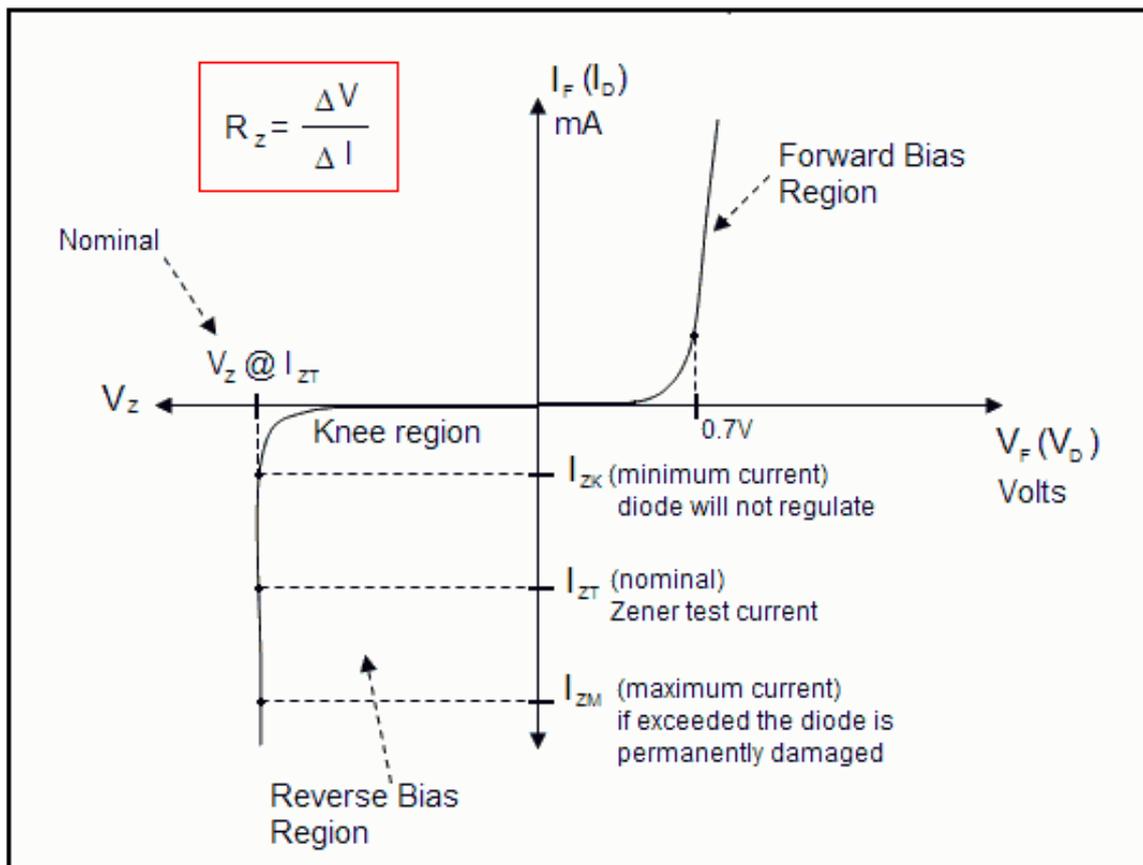


圖 13 zener 特性曲線圖

可知齊納二極體特性:

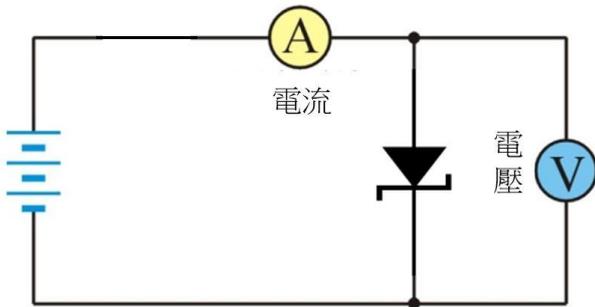
1. 順向特性: 一般二極體無異。
2. 逆向特性: (a) 偏壓達到崩潰電壓時後，逆向電流增大但兩端電壓維持此一電壓不變，此一電壓亦稱為齊納電壓
(b) 偏壓小於崩潰電壓時，產生微量的逆向飽和電壓。

I-V Curve 的第三象限 (左下區域) 為逆向偏壓區 (Reverse Bias Region)，當逆向偏壓低於崩潰電壓，只有極小的逆向電流 (也稱為漏電流)，當超過膝點 (Knee, 是進入穩定齊納電壓的臨界點)，齊納二極體的逆向電流會迅速變大。一般二極體的崩潰電壓在數十伏特以上，而齊納二極體的崩潰電壓經由特定的 PN 摻雜濃度及結構設計可以低到只有 2.4 伏特，且隨著逆向電流增加，崩潰電壓只有小幅度的變化，這個特性使得齊納二極體適合在一般的電壓範圍 (幾伏特到幾十伏特) 提供穩定的參考電壓。

NOTE : Zener diode 在崩潰區內的 V-I 曲線並非垂直，而是有一斜率關係，該斜率即是 **Zener diode** 的電阻值 r_Z 。 r_Z 越小， V_Z 的變化值也越小，因此，**Zener diode** 若要作為穩壓器使用，則應該選用 r_Z 較低者。

實驗步驟和數據

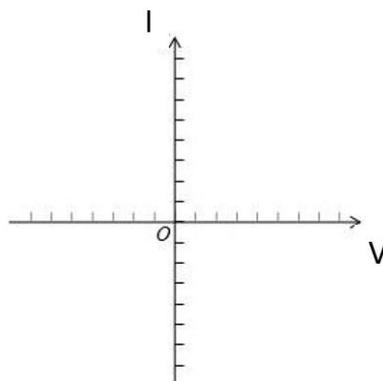
(一)齊納二極體 VI 特性曲線



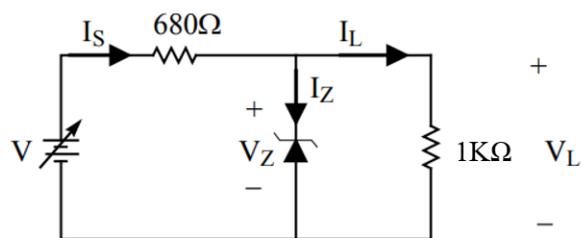
- 1、使用 6.2V 齊納二極體並依照上圖電路接線，。
- 2、調整電源供應器電壓輸出，從齊納二極體的電壓 0V 開始，每增加 0.1V 記錄到表 4 直到 0.8V。
如果上不去，就記錄最高的偏壓值即可，然後再從 0V 改變電源方向，紀錄負電壓的電流值直到 -7V。
- 3、繪製齊納二極體的 I-V 順向特性曲線圖

電壓(v)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
電流(μA)									
電壓(v)	-1	-2	-3	-4	-5	-5.5	-5.8	-5.9	-6.0
電流(μA)									
電壓(v)	-6.05	-6.1	-6.15	-6.2	-6.25	-6.3	-6.35	-6.4	-6.45
電流(μA)									
電壓(v)	-6.5	-6.55	-6.6	-6.7	-6.8	-6.9	-7.0	-7.1	-7.2
電流(μA)									
電壓(v)	-7.3	-7.4	-7.5	-7.6	-7.7	-7.8	-7.9	-8.0	-8.1
電流(μA)									

(表 4) 齊納二極體：VI 特性



(二) 二齊納二極體穩壓特性



1. 使用 6.2V 的齊納二極體接好下圖電路。
2. 改變輸入電壓從 2V 開始每增加 2V 記錄一次 V_L 值 直到輸入電壓 20V。

V 輸入電壓	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
V_L										

(表 5) 齊納二極體：穩壓特性