

## 二極體

### 一、目的：

熟悉二極體的工作原理及特性，並量取二極體的I-V關係曲線及界面電容。

### 二、原理：

#### (一)能帶與導電性：

固體導電主要依賴電子的運動，電子的運動和固體的能帶有很大的關聯。

孤立原子的能階是分離的，互相間不連續。當兩個原子互相接近時，由於同時有兩個原子核作用於電子，原來的能階會分裂為二。當N個原子互相接近時，原來的能階會分裂為N個，如圖1所示。在固體裡，原子非常密集，所以能階會分裂為非常多個能階而成為連續的能帶。在常溫下，電子先由低能量的能階往高能量的能階排列，即先佔滿低能量的能階再佔較高的能階。如果所佔用的最高能帶未完全佔滿，有剩下的空能階，如圖2(a)所示。電子很容易利用這些空能階移動，這種能帶結構形成「導體」。如果所佔用的最高能帶剛好完全佔滿，沒有剩下空能階，如圖2(b)所示。電子沒有空能階可利用，就會非常不易移動，這種能帶結構形成「絕緣體」。

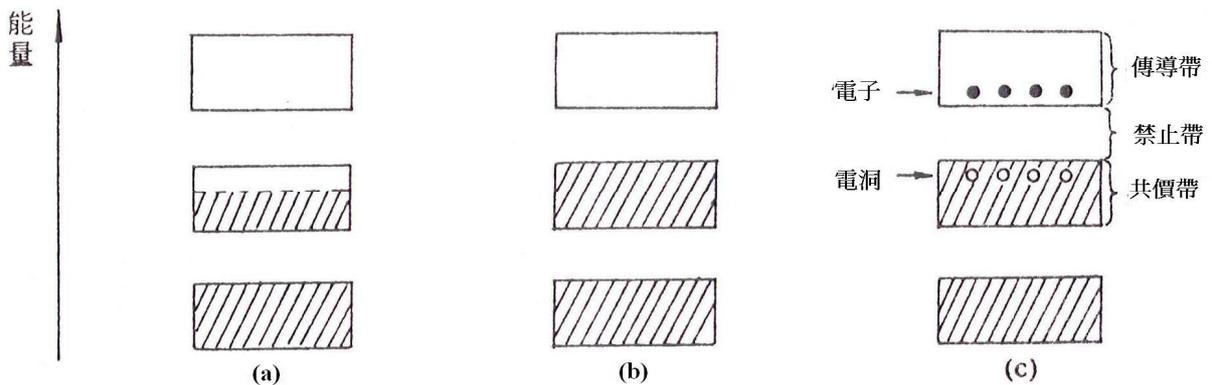
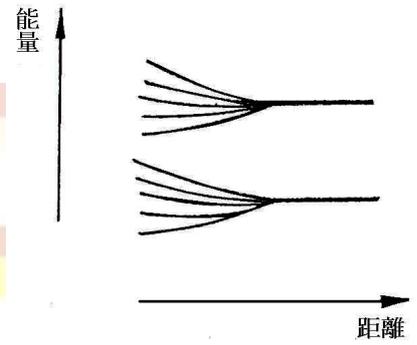


圖2 固體能帶示意圖。(a)導體 (b)絕緣體 (c)半導體。

如果更高的能帶距離不遠，即能帶比所佔用的最高能帶高不了很多，如圖 2(c)所示。在常溫下總有極少數幸運的電子獲得較高的能量跳上這個能帶而變成可以移動。這種能帶結構形成導電性介於導體和絕緣體之間的「半導體」。電子跳上更高的能帶後，在原来的能帶留下的空位稱為「電洞」，其他的電子可以利用這個空位挪動它們的位置，我們可以把這種現象視為空位在移動。這個空位移動的效果相當於正電荷在移動，此事實可以利用霍爾效應(Hall effect)加以證明。因此，我們把「電洞」當作正的載子，而電子當然是負的載子。

矽元素與鍺元素是重要的半導體，它們是鑽石結構的共價鍵晶體。III-IV 族化合物和 II-VI 族化合物也有很多是半導體。

(二)純半導體與滲雜半導體：

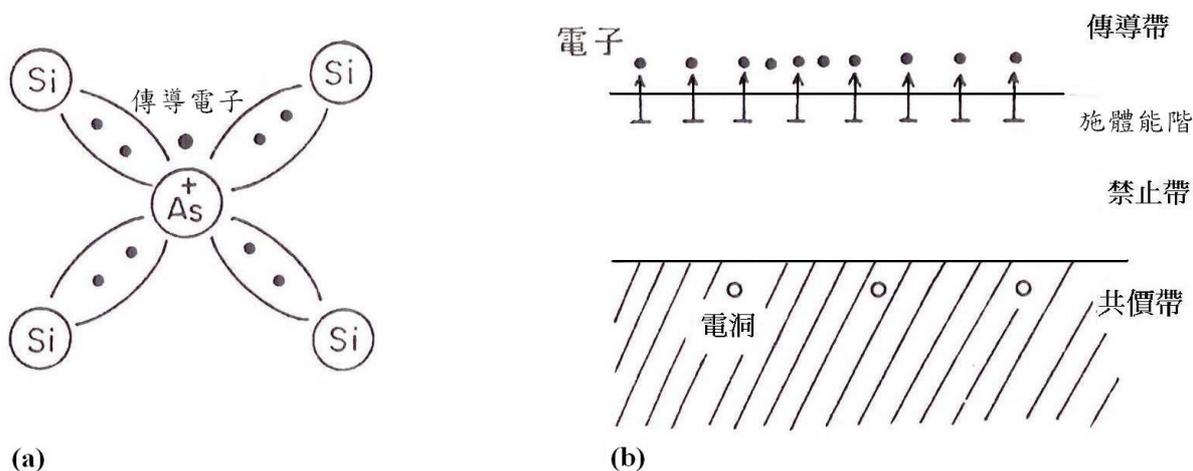


圖 3 n 型半導體的說明。(a)鍵觀點 (b)能帶觀點

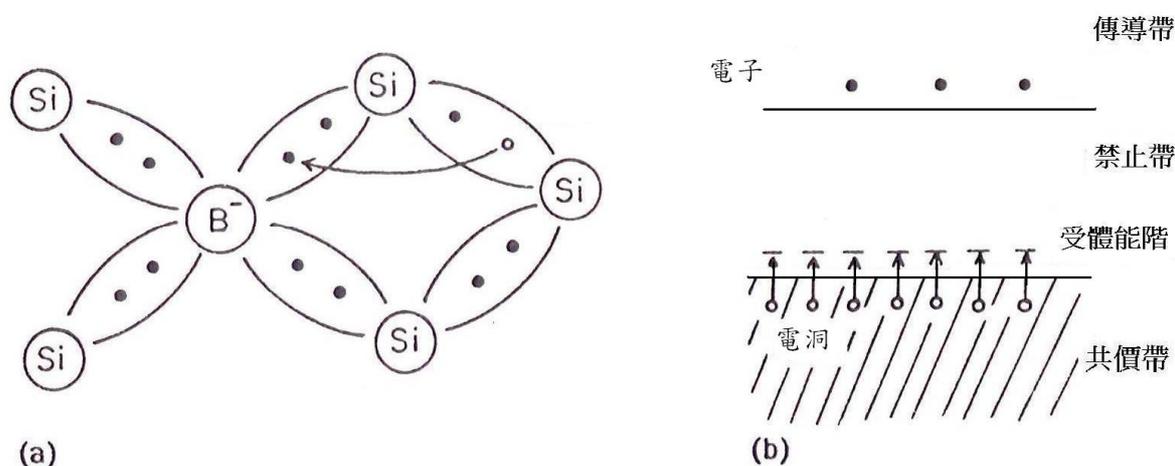


圖 4 p 型半導體的說明。(a)鍵觀點 (b)能帶觀點

上面講的是純半導體，即不含雜質的半導體。純半導體的導電性很低，通常使用的半導體多滲入雜質以增加其導電性。當然，除了導電性較高以外，滲雜半導體還有其他的優點。

如果把磷、砷、銻之類的五價元素滲入矽、鍺半導體中，由於矽、鍺的共價鍵結構只需要四個價電子，剩下的一個價電子很容易移動，而成為傳導電子。這種半導體的導電性主要依賴負電荷的載子，稱為「負型半導體」(n-type)。五價元素移走一個價電子後變成帶一個正電荷的離子。從能帶的觀點來看，我們可以說五價元素有一個價電子的能階很靠近傳導帶，參看圖 3。在常溫下，這個電子有非常大的機會跳上傳導帶，成為傳導電子。提供傳導電子的雜質稱為「施體」，靠近傳導帶的能階稱「施體能階」。負型半導體中的電子居多數，稱為「多數載子」；「電洞」居少數，稱為「少數載子」。

相反的，如果把硼、鎵、鋁之類的三價元素滲入矽、鍺半導體中，由於矽或鍺的共價鍵結構需要四個價電子，因缺少一個價電子而形成一個空位。附近的價電子很容易跳入這個空位，把它填補起來，如此一來空位就移到別的地方去了。這種半導體的導電主要依賴這種可看成帶正電荷的電洞，稱為「正型半導體」(p-type)。三價元素獲得了一個價電子變成帶一個負電荷的離子。從能帶觀點來看，我們可以說三價元素有一個能階很靠近共價帶，參看圖 4。在常溫下，共價帶的電子有很大的機會跳上這個能階把它填滿，而在共價帶留下空位，成為「電洞」。接受價電子的雜質稱為「受體」，靠近共價帶的能階稱為「受體能階」。正型半導體中電洞居多數，稱為「多數載子」，電子居少數，稱為「少數載子」。

### (三)二極體的特性曲線：

如果將正型半導體和負型半導體連接在一起，就形成「正負接面」，當然製造正負接面的方法不是用連接的，而是利用成長時加入雜質，正負型合金，擴散，離子佈置等方法。正型半導體的電洞較多，負型半導體的電子較多。由於熱力學的趨勢，電子、電洞會越過接面而互相中和。電洞電子中和後，在接面附近留下帶負

電荷的受體原子和帶正電荷的施體原子。因此，在界面處及附近造成電場，這個電場會阻止電洞、電子越過界面。最後，這兩個趨勢互相抵消而到達平衡狀態，如圖 5(a)所示。這時候，如果施以一個順向的電壓(對多數載子而言)，可以把這個電場抵消一部分，電洞、電子又可以越過界面而中和，因此有電流通，如圖 5(b)所示。如果施以一個逆向的電壓，則反而加強這個電場，電洞、電子更不可能越過界面而中和，因此電流非常小，如圖 5(c)所示。這個小電流是由少數載子造成的。因為逆向偏壓時，對少數載子而言卻是順向偏壓，因此會被加速而越過界面。所有在界面附近的少數載子都發揮了導電作用，再增加逆向偏壓也不可能提高逆向電流，因此少量的逆向偏壓就會到達「逆向飽和電流」。界面及兩側缺少電洞、電子的帶電區域稱為「空乏區」。

以下我們由能帶的觀點來推導出一個 I-V 關係式。正型半導體電子較少，負型半導體電子較多，負型半導體的電子有流向正型半導體的趨勢。以熱力學的觀點來看，負型半導體的化學勢高於正型半導體的化學勢，因此電子從化學勢高的地方流向化學勢低的地方，直到兩邊化學勢相等才到達平衡。

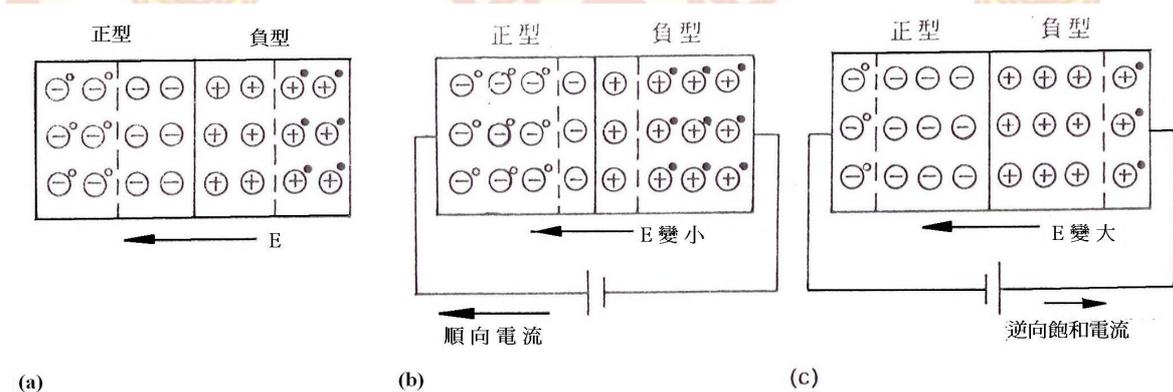


圖 5(a)平衡點 (b)順向偏壓時 (c)逆向偏壓時。

電子從負型半導體流向正型半導體後，負型半導體帶正電荷，因此位能降低，整個能帶往下降，直到兩邊的化學勢相等才達到平衡，如圖 6(a)所示。這時候電子由負型半導體到正型半導體必須克服一個位能障礙  $V_B$ ，所以只有極少數的電子能量夠高。由於電子在能階的分佈大約遵守 Boltzmann 定律，我們知道有能力越過的電子和最低能量的傳導電子的比例約為： $e^{-e(V_B-V)/kT}$ 。如果我們加一個順向偏壓，這個能量障礙就降為  $V_B-V$ ，如圖 6(b)所示。因此，比例增為： $e^{-e(V_B-V)/kT}$ ，增加了  $e^{V/kT}$  倍！常溫的  $kT = 26\text{ mV}$ ，只要增加幾分之一個伏特，比例就增加非常多。我們可以把電流寫成：

$$I = C_0 e^{V/kT} - I_0 \quad (C_0 \text{ 是一個常數})$$

這裡  $I_0$  是少數載子造成的逆向飽和電流，它們總是被加速越過界面，故總是這個值。當  $V=0$  時，電流必須為零，故  $C_0 = I_0$ ，因此

$$I = I_0 (e^{eV/kT} - 1)$$

如果把在界面附近空乏區電洞電子相中和的部分也考慮進去，上式應改為

$$I = I_0 (e^{eV/\eta kT} - 1)$$

$\eta$  在 1~2 之間，在小電流時，矽質二極體接近 2，鍺質的接近 1，在大電流時均接近 1，不過電流太大時上式又不適用了。

如果加一個逆向偏壓，能量障礙會增加，如圖 6(c)所示。能量足以克服 5 障礙的電子大為減少，只有逆向飽和電流不受影響，因此只要少許的逆向偏壓，電流就到達逆向飽和值。這可從上式看出。

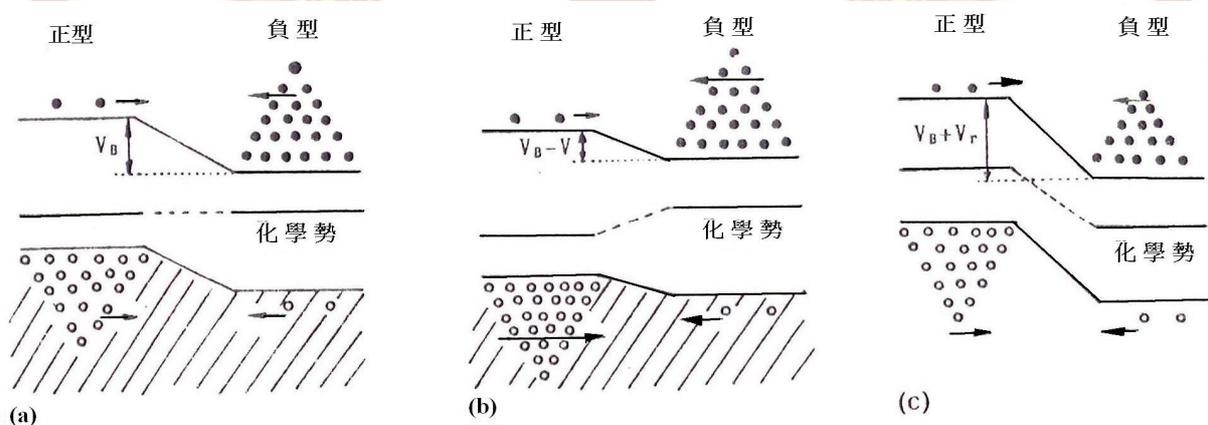
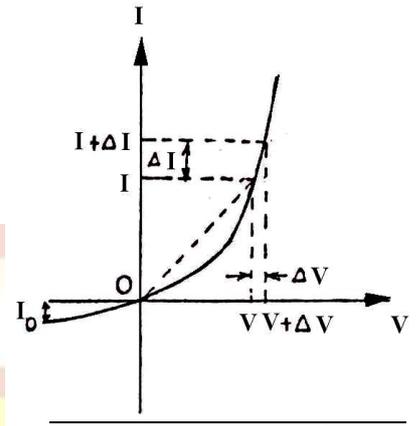


圖 6(a)平衡點 (b)順向偏壓時 (c)逆向偏壓時。

二極體的特性曲線如圖 7 所示，順向偏壓時電流作指數增加，矽質二極體超過 0.6V 時，鍺質二極體超過 0.2V 時，電流迅速增加，這個電壓稱為「切入電壓」。逆向偏壓時電流是極小的飽和值，矽質二極體的飽和值的數量級為 nA，鍺質二極體的飽和值數量級為  $\mu A$ ，大小和二極體的大小有關。



(四) 二極體的動態電阻：

二極體的電流和電壓的關係並不是線性的，因此，它的電阻和電流的大小有關。它的直流電阻為

$$R = V / I \quad (2)$$

它的小信號電阻(即動態電阻)為

$$\begin{aligned} r &= \Delta V / \Delta I = dV / dI = \frac{1}{dI / dV} \\ &= \frac{1}{e / \eta k T I_0 e^{eV / \eta k T}} \approx \frac{\eta k T / e}{I} \quad (I \gg I_0 \text{ 時}) \\ &= \frac{26 \eta m T}{I} \end{aligned} \quad (3)$$

這只是接面的電阻，還要加上半導體本身的電阻。

(五) 二極體的接面電容：

前面提到，在接面兩邊的空乏區內有帶正電的施體原子和帶負電荷的受體原子，空乏區的大小和偏壓有關，因此二極體可以當作電容器，只是電容值隨電壓而改變，不是固定的。

在擴散型的接面，接面兩旁的電荷可以近似地取為

$$\rho = Gx$$

其中  $x$  是和接面的距離，如圖 8(a) 所示。由 poisson 方程式可得：

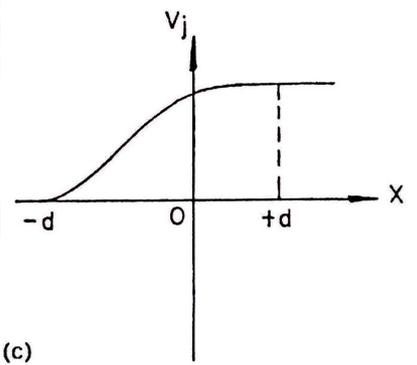
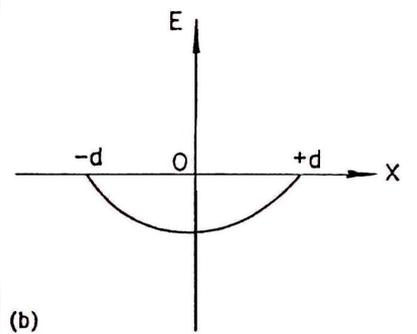
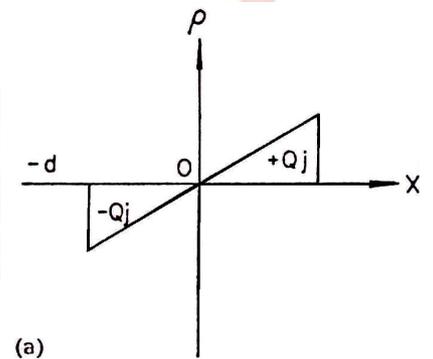
$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{Gx}{\epsilon} \quad (4)$$

故

$$E = \frac{Gx^2}{2\epsilon} + k$$

$|x| \geq d$  時 無電場(參考圖 8(b))，故應選擇  $k$ ，使

$$E = \frac{G}{2\epsilon}(x^2 - d^2)$$



$$V_z = -\int_{-d}^{+d} E dx = \frac{2Gd^3}{3\epsilon}$$

如圖 8(c)所示，因此

$$d \propto V_j^{1/3}$$

$$Q_j \propto \int_0^d G x dx \propto V_j^{2/3}$$

$$C_j = dQ_j / dV_j \propto V_j^{-1/3}$$

這裡的  $V_j$  包括所加偏壓和能量障礙  $V_B$ ，故  $V_j$  應寫成  $V_r + V_B$ ，( $V_r$  是逆向偏壓)，因此

$$C_j \propto (V_r + V_B)^{-1/3} \quad (5)$$

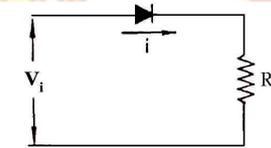
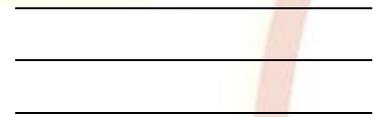
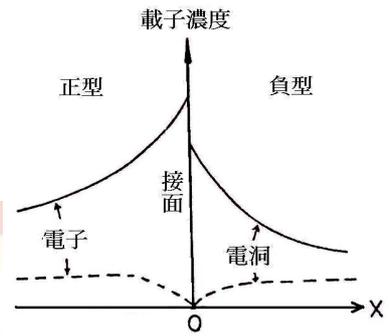
如果用逆向偏壓的二極體組成一個振盪電路，就可以由偏壓控制電容而控制頻率。利用這個原理可以做出自動控制頻率的電路和頻率調變的電路。這種特殊用途的二極體的雜質分布都經特殊設計，以得到所要的  $C_j - V_r$  關係或者適用於高頻範圍。

#### (六) 二極體的擴散電容：

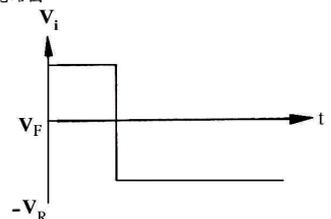
除了前面的界面電容，順向偏壓時，二極體還有擴散電容。

順向偏壓時，正型半導體的電洞越過界面進入負型半導體，負型半導體的電子越過界面進入正型半導體。電子和電洞越過界面後，一面擴散，一面被中和消失，參看圖 9。如果突然加一個送向偏壓，如圖 10 所示。還未中和掉的電子和電洞會被抽回而形成相當大的逆向電流直到這些電子和電洞全部抽回。這段過程所需時間稱為「儲存時間」。接著的過程是逆向電流將電子電洞抽走使界面電容充電到達逆向偏壓值，這段過程所需時間稱為「轉變時間」。這兩段時間合稱「逆向回復時間」，參看圖 10。在這個時間內，二極體失去整流的作用。

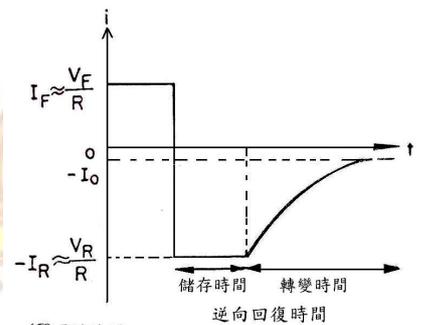
上面所講的是由順向偏壓突然變成逆向偏壓的情形。其實，只要偏壓變化，儲存的電量就會改變，相當於有一個電容，只是電容量隨著偏壓改變。這個電容稱為擴散電容。以下用近似的方法求出擴散電容的值。



(a) 電路圖



(b) 輸入電壓波形



(c) 電流波形

設儲存的電量為  $Q$ ，儲存的電量被中和掉的速率和電量成正比，其比例常數設為  $1/\tau$ ，則

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau}$$

解此方程式可得到

$$Q = Q_0 e^{-t/\tau}$$

在  $t$  及  $t + dt$  之間，被中和掉的電量為

$$-dQ = +\frac{Q_0}{\tau} e^{-t/\tau} dt$$

故少數載子的平均生命期為，

$$t = \frac{\int_0^{\infty} t \frac{Q_0}{\tau} e^{-t/\tau}}{Q_0} = \tau$$

因此我們定義的  $\tau$  等於平均生命期。

上面是假設電流沒有進出的情形，有電流時，方程式應修正為：

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{Q}{\tau} + i$$

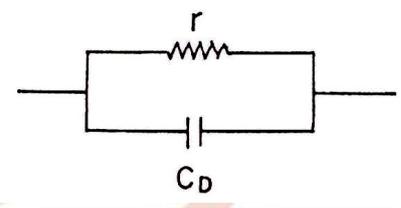
在穩定態時， $dQ/dt = 0$ ， $i = I$

$$Q = \tau I$$

因此，儲存電量正比於電流，擴散電容為

$$C_D \equiv \frac{dQ}{dI} = \tau \frac{dI}{dI} = \frac{\tau}{r} \quad (6)$$

$r$  是二極體的動態電阻。順向偏壓時，二極體可以看成一個電阻  $r$  並聯一個電容  $C_D$ ，如圖 11 所示。此電路的时间常數為  $rC_D = \tau$ ，由此可見，動作快的二極體，少數載子的生命期  $\tau$  必須短。



(七)減少儲存時間的方法，電荷補償：

在前面的電路中，偏壓突然逆向時，儲存的少數載子只能以  $I_R$  的電流移走，因此需要相當的時間，即形成儲存時間。

如果將 R 並聯一個電容，如圖 12 所示，在偏壓突然逆向時，移走所儲存的少數載子的電流，可以經由此電容，不必經由 R 而受到限制，則儲存時間可以縮短很多。

當偏壓為順向  $V_F$  時，電流為

$$I_F = \frac{V_F}{R}$$

故儲存電量為

$$Q = \tau I_F = \tau \frac{V_F}{R}$$

電容器 C 被充電到  $V_F$ ，電量為  $CV_F$ ，如果使  $RC = \tau$ ，則當偏壓逆向時，儲存電量移走時，電容器的電壓也剛好降到零，這時二極體剛好不通，於是儲存時間變得很短。如果  $RC > \tau$ ，當二極體不通時，C 還有電壓，以  $RC$  的時間常數回到零。反之，如果  $RC < \tau$ ，C 的電壓降為零時，二極體的儲存電量還未移完，電容會被逆向充電，等到二極體不通後再以  $RC$  的時間常數回到零。

### 三、儀器：

示波器、電源供給器、信號產生器、波型產生器、三用電表、數字型三用電表。

### 四、步驟：

#### (一) 二極體的方向：

普通二極體以箭頭或一個環表示順向電流的方向，如圖 13 所示。二極體的方向錯誤有時會造成很嚴重的後果，使用者應有能力辨別。若標識不清可用電表量電阻，電阻小的方向就是順向。許多日製和台製三用表量電阻時電流方向從黑色端流出，和一般習慣相反，此點應特別留意，參看圖 14。

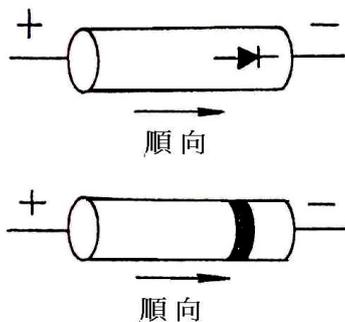
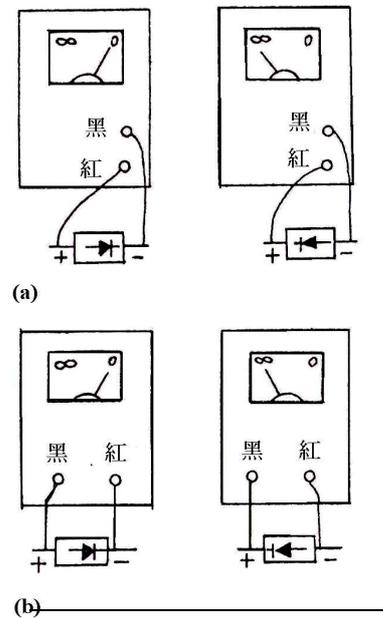
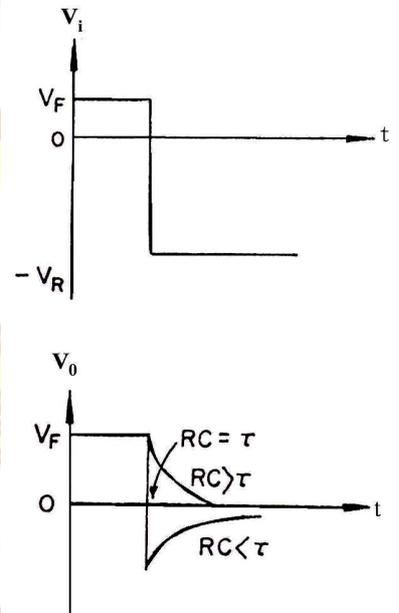
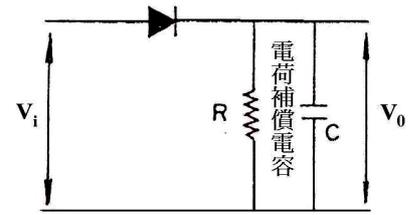
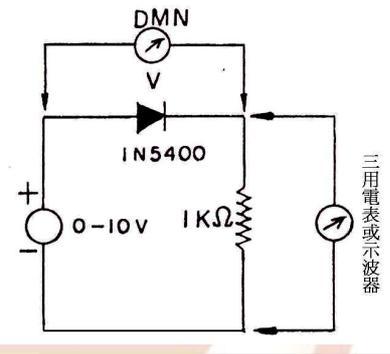


圖 13



三用電表量電阻時，低倍檔輸出的電流較大，較精細的零件有的不能承受這個電流，高倍檔輸出的電壓較高，對有的零件也有危險。中間檔較為安全。

數位電表量電阻時，輸出的電壓或電流較小，也是低倍檔電流較大，高倍檔電表較小。有的檔電壓較高可以使矽質二極體導通。有的檔電壓較低無法使矽質二極體導通，自然不能用來辨別二極體的方向。



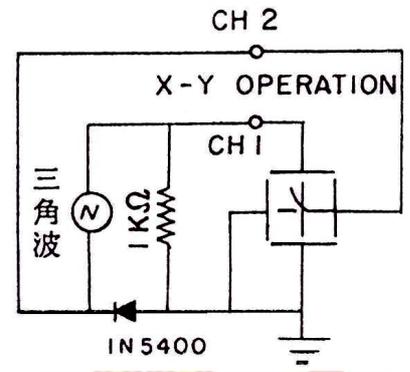
## (二)特性曲線：

矽質二極體的逆向飽和電流極小故從略，只量順向電流，電路加圖 15 所示。二極體的偏壓變化極小，低偏壓時，電流很小，故以靈敏度高，阻抗大的 DMM 量取。用三用表和示波器量取作  $1k\Omega$  的電壓值，除以  $1k\Omega$  就是電流值。

1. 量  $1k\Omega$  的電壓為  $0.1V$ 、 $0.2V$ 、 $0.5V$ 、 $1V$ 、 $2V$ 、 $5V$ 、 $10V$  時，對應的二極體電壓  $V$ 。
2. 算出二極體電流  $I$ ，然後畫出  $I$  對  $V$  的關係圖。
3. 找較容易作圖的點，求出動態電阻  $r (\equiv dV/dI)$ ，和下面關係作比較

$$r \equiv \frac{dV}{dI} = \frac{26 \times \eta \text{ mV}}{I} \quad (\eta \text{ 在 } 1 \sim 2 \text{ 之間})$$

4. 在半對數紙上畫出  $I$  對  $V$  的關係圖，是否接近一直線？找出直線的斜率來，斜率為  $0.434e/\eta kT$ ，求出  $\eta$  值，是否在  $1 \sim 2$  之間？



## (三)以示波器描繪特性曲線：

1. 如圖 16 的電路，以波形產生器的三角波代替直流電壓。 $1k\Omega$  的電壓輸入 CH1，然後到達垂直板；二極體的偏壓輸入 CH2，然後到達水平板。當三角波的電壓變動時，二極體的偏壓和電流隨著改變，因此在示波器上描出  $I-V$  的相對關係曲線。
2. 描下示波器上的曲線和方格，並標出每方格所代表的電壓，電流值<sup>#1</sup>。
3. 把三角波的頻率提高，曲線有何變化？試推想原因。

## (四)接面電容：

1. 先辨別 1N5400 二極體的方向，然後接成如圖 17 所示的電路，二極體必須是逆向偏壓。
2. 示波器的 Probe。使用 10 : 1，補償電容必須調整好。
3. 圖 17 中的 101kΩ 和 1N5400 二極體的接面電容形成一個低通濾波器。其半功率(即電壓為 0.707 倍)頻率為

$$f_{1/2} = \frac{1}{2\pi RC}$$

故  $C = 1 / \pi R f_{1/2}$ ，亦即，從 R 和  $f_{1/2}$  就可以算出電容。

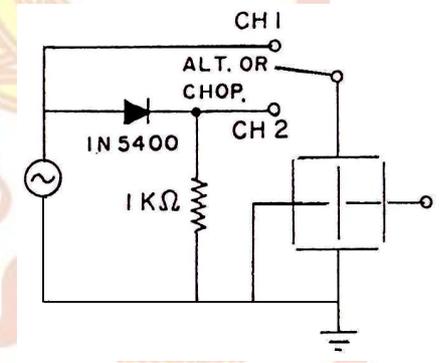
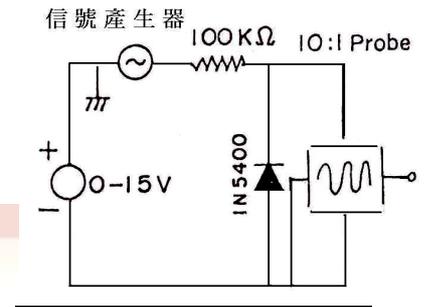
4. 測出逆向偏壓為 1V、2V、5V、10V、15V、20V、25V、30V 時的半功率點頻率  $f_{1/2}$ 。
5. 從  $f_{1/2}$  算出電容值，但要注意，示波器的電容和接面電容並聯，故上面算出的電容必須扣除示波器的電容。
6. 示波器電容的求法：取下 1N5400 其餘不動，量  $f_{1/2}$ ，照前面公式計算電容。
7. 最後算出各逆向偏壓的接面電容值。因為

$$C_j \propto (V_r + V_B)^{-1/3}$$

$1 / C_j^3$  對  $V_r$  作圖是否接近一直線? 這表示什麼?

#### (五) 擴散電容與瞬態響應：

1. 電路如圖 18 所示，觀察二極體整流的波形。
2. 把波型產生器的頻率提高到 100 kHz，示波器上看到的波形有何變化?
3. 波型產生器改為輸出方形波，示波器上看到的波形為何? 那裡代表「儲存時間」，那裡代表「轉變時間」?
4. 以適當大小的電容並聯在 1kΩ，可以大大改善二極體的整流特性。以幾個數百 pF 的電容器找出最好的電容值。這個電容值和 1kΩ 的乘積約等於二極體內少數載子的「平均生命期」 $\tau$ 。
5. 把 1N5400 換成高頻率使用的小二極體 1N914，不用電容補償，波形是否會比 1N5400 好許多?



五、參考資料：

1. J. Millman & A. Grabel : Microelectronics, 2nd ed.,  
(McGraw – Hill Book company), Chap. 2, p.41 ~ p.78 °
2. A. S. Sedra & K, C. Smith : Microelectronic Circuits, 2nd  
ed., ( HRW Inc. ), Chap. 4, p.150 ~ p.200 °

