

# 電子學講義

## 第一回

50223A-1



社團  
法人  
考友社

考友社

出版  
發行

# 電子學講義 第一回

## 目錄

第一講 半導體.....	1
命題重點.....	1
一、電力、電場及能量.....	1
二、金屬內之傳導現象.....	3
三、本質半導體.....	4
四、外質半導體.....	4
五、矽質材料特性的改變.....	5
六、擴散.....	5
七、Graded Semiconductor .....	6
八、霍爾效應.....	8
精選試題.....	10
第二講 接面二極體的特性.....	14
命題重點.....	14
一、開路接面.....	14
二、偏壓接面.....	15
三、二極體電阻.....	17
四、步級接面二極體.....	18
五、擴散電流及擴散電容的計算.....	20
六、基納二極體.....	22
七、蕭特基位障二極體.....	22
八、二極體的負載線.....	23
九、二極體的模型.....	23
精選試題.....	25
第三講 二極體電路.....	30
命題重點.....	30
一、簡易應用.....	30
二、限制電路.....	31
三、電壓調整器.....	37
四、半波整流.....	37
五、全波整流.....	49
六、橋式全波整流.....	40
七、倍壓電路.....	41
八、電容濾波器.....	42
九、定位電路.....	43

精選試題	44
第四講 電晶體特性	51
命題重點	51
一、基本結構與操作模式	51
二、主動區下的 npn 型電晶體	52
三、電晶體的易柏—摩爾 (Ebers-Moll) 模型	53
四、大信號電流增益	54
五、射極開路 ( $I_E=0$ )、 $J_C$ 反偏時的集極電流 $I_{CO}$	55
六、電晶體的特性方程式	55
七、共基極特性	55
八、共射極特性	56
九、典型的電晶體電壓值 (對矽而言)	57
十、電晶體的直流模型	58
十一、飽和條件	58
十二、電晶體的交換速度	59
十三、縮短儲存時間的方法	59
精選試題	61

# 第一講 半導體

## ◎ 命 題 重 點 ◎

### 一、電力、電場及能量

(一)帶電質點：電子為基本帶電質點，其電量為  $1.60 \times 10^{-19}$  庫侖（1 庫侖為  $6 \times 10^{18}$  個電子所帶之電量）。因為 1 安培之電流係 1 秒鐘流過 1 庫侖之電量，所以 1 PA ( $10^{-12}$  A) 表示 1 秒鐘內流過 6 百萬個電子。

(二)價電子：原子最外層軌道的電子。

(三)游離：原子失去或獲得電子之過程。失去電子後變為正離子；得到電子後變為負離子。

(四)共價鍵：矽或鍺等四價元素結晶狀態時，價電子共價謂之共價鍵。共價鍵上之電子所受束縛力極強，不易脫離軌道。共價鍵上之電子脫離軌道後，留下電子缺，謂之電洞。電洞之行爲形同正電荷，其電量與電子相同，但為正值。

(五)電子在電場中所受之力：

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (\text{單位：牛頓}) \dots\dots\dots ①$$

1. 其中  $E$  為電場強度， $q$  為基本電荷所帶之電量。

根據牛頓第二定律， $F$  亦可表示為

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\mathbf{a} \quad \dots\dots\dots ②$$

2. 其中  $m$  為質點之質量， $v$  為質點之運動速度， $a$  為加速度。

(六)電子在磁場中所受之力：

$$\mathbf{F} = Bq\mathbf{v} \quad \dots\dots\dots ③$$

其中  $B$  為磁場強度， $v$  為載子的漂移速度。

(七)電位：任意點  $x$  對某一參考點  $x_0$  的電位為

$$V = - \int_{x_0}^x \mathbf{E} d\mathbf{x} \quad (\text{單位：伏特}) \dots\dots\dots ④$$

由此可知， $E$  亦可表為

$$E = - \frac{dV}{dx} \quad (\text{單位：伏特/米}) \dots\dots\dots ⑤$$

(八)電位能：

$$U = qV \quad (\text{單位：焦耳})$$

(九)電子伏：

$$1 \text{ 電子伏} = 1.60 \times 10^{-19} \text{ 焦耳}$$

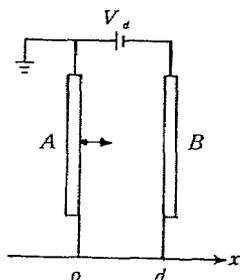
(十)能量守恆：

1.定義：總能量 $W$ 為電位能 $U$ 與其對應動能之和，其值為常數，即

$$W = U + \frac{1}{2}mv^2 = \text{常數} \quad \dots\dots\dots \text{⑥}$$

2.能量守恆之說明：A與B為兩平行極板，其間距離為 $d$ ，又B極板對A極板之電位為 $-V_d$ (A極板為參考電位)。若有一電子以 $v_0$ 之初速由A極板投向B極板，其方向與極板方向成垂直。由於這些假設，可聯想到下列問題：

- (1)這個電子會不會順利到達B極板？如果會的話，到達B極板時，其速度如何？  
如果不會，該電子究竟止於何處？
- (2)多大的電位會使得該電子止於某一位置？



(3)分析：

$V_d$ 之極性會使電子反彈，因此，該電子若欲順利到達B極板，必須具足夠大之初速。當電子離開A極板，其電位能增加，但動能隨之減小(減小之量恰等於電位能增加之量)，也就是電子的速度會隨著距離而遞減。如果該電子可以到達B極板，其速度完全決定於 $v_0$ 與 $V_d$ 之值。由圖知，B極板的電位能為 $U = qV = -qV_d$ 。若到達B極板時的速度為 $v_f$ ，則下式必然成立

$$W = \frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_f^2 + |qV_d| \quad \dots\dots\dots \text{⑦}$$

(取絕對值之理由乃因電子帶負電，使得電位能 $U$ 為正值。)

由⑦式知 $v_f$ 必小於 $v_0$ ，又為使電子到達B極板，必須使

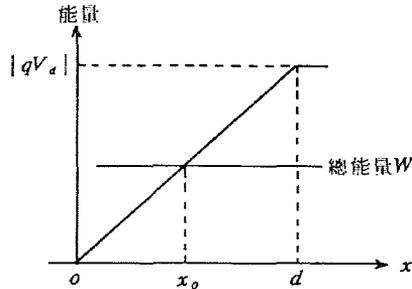
$$\frac{1}{2}mv_0^2 \geq |qV_d| \quad \dots\dots\dots \text{⑧}$$

了解了這些，上列兩個問題就迎刃而解了。

(十一)位能障壁的由來：

位能障壁的觀念可由上面有關能量守恆的解釋歸納而得。已經知道，當電子由A極

板投向B極板時，電位能增加，而動能減小。因此推論，直到電位能等於總能量時，其動能恰好為零，此時電子不再前進，反而反彈，電子反彈之點就是其所能到達最遠之處。不同的初速所能到達之處不同，初速愈大，所及之處愈遠，不同的初動能與不同的反彈點可由上圖表示。圖中斜線表示位能障壁，其意為：電子永遠無法滲透該斜面。（圖中 $x_0$ 為電子在某一初速下所能到達之距離）



## 二金屬內之傳導現象

(一)電子氣體說：金屬導體內，電子可自由來回移動形同氣體謂之。

(二)mean free path：金屬內部，電子與原子碰撞距離的期望值（mean value）謂之。

(三)電子的漂移速度：與電場強度  $E$  成正比。

$$\mathbf{v} = \mu \mathbf{E} \quad (\text{單位：米/秒}) \dots\dots\dots \textcircled{9}$$

其中  $\mu$  為電子遷移率。

(四)電流密度：

1.單位面積之電流量

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{A}} \dots\dots\dots \textcircled{10}$$

可另表為

$$\begin{aligned} \mathbf{J} &= \frac{\mathbf{I}}{\mathbf{A}} = \frac{Nq}{\mathbf{AT}} \quad (N \text{ 為電子個數}) \\ &= \frac{Nq}{\mathbf{AT}} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}} = \frac{N}{\mathbf{AL}} q \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{T}} = nq\mathbf{v} \quad \dots\dots\dots \textcircled{11} \end{aligned}$$

其中  $n = \frac{N}{\mathbf{AL}}$ ，代表單位體積之電子個數，也就是電子濃度。

2.定義  $\rho = nq$ ，代表電荷密度，其單位為庫侖 / 米<sup>3</sup>。由此， $\mathbf{J}$  可表為

$$\mathbf{J} = \rho \mathbf{v} \dots\dots\dots \textcircled{12}$$

(五)傳導率：

1.因  $\mathbf{J} = nq\mathbf{v}$ ，且  $\mathbf{v} = \mu \mathbf{E}$ ，故  $\mathbf{J}$  又可表為

$$\mathbf{J} = nq\mu \mathbf{E} \dots\dots\dots \textcircled{13}$$

2. 定義  $\sigma = n q \mu$ ，這就是傳導率，其單位為 ( 歐姆 · 米 )<sup>-1</sup>。由此 J 又可寫為  

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \dots\dots\dots(14)$$

(六) 歐姆定律：

$$\mathbf{I} = \mathbf{J}\mathbf{A} = \sigma \mathbf{E}\mathbf{A} \cdot \frac{\mathbf{L}}{\mathbf{L}} = \frac{\sigma \mathbf{A}}{\mathbf{L}} (\mathbf{E}\mathbf{L})$$

$$\therefore \mathbf{V} = \mathbf{E}\mathbf{L}$$

$$\therefore \mathbf{I} = \frac{\sigma \mathbf{A}}{\mathbf{L}} \mathbf{V} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}} \dots\dots\dots(15)$$

其中 
$$\mathbf{R} = \frac{\mathbf{L}}{\sigma \mathbf{A}}$$

### 三、本質半導體 (intrinsic semiconductor)

(一) 定義：尚未摻入雜質之半導體。

(二) 本質濃度  $n_i$ ：本質半導體中，電子濃度  $n$  等於電洞濃度  $p$ ，這種濃度叫做本質濃度。即

$$\mathbf{n} = \mathbf{p} = \mathbf{n}_i \dots\dots\dots(16)$$

本質濃度與溫度有關，在室溫時  $n_i = 1.45 \times 10^{10} / \text{厘米}^3$ 。

(三) 電流密度：對半導體而言，電流密度可以寫為

$$\mathbf{J} = \mathbf{q} (\mathbf{n} \mu_n + \mathbf{p} \mu_p) \mathbf{E} = \sigma \mathbf{E} \dots\dots\dots(17)$$

其中傳導率為

$$\sigma = \mathbf{q} (\mathbf{n} \mu_n + \mathbf{p} \mu_p) \dots\dots\dots(18)$$

因本質半導體  $n = p = n_i$ ，所以傳導率可以寫為

$$\sigma = \mathbf{q} \mathbf{n}_i (\mu_n + \mu_p) \dots\dots\dots(19)$$

以上  $\mu_n$ 、 $\mu_p$  分別代表電子、電洞的遷移率。在 300 K 時，矽質半導體中， $\mu_n = 1500 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{S})$ ， $\mu_p = 475 \text{cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{S})$ 。

### 四、外質半導體 (extrinsic semiconductor)

(一) 定義：摻入雜質之半導體。

(二) 受體：摻入之雜質若為三價元素，如硼 ( boron, B )、鎵 ( gallium, Ga )，銦 ( indium, In )，謂之受體。

(三) 施體：摻入之雜質若為五價元素，如磷 ( phosphorus, P )、砷 ( Arsenic, As )、銻 ( Antimony, Sb )，謂之施體。

(四) 質量作用定律 ( mass-action law )：在熱平衡情形下，自由電子與電洞濃度之積為常數，而與施體或受體之摻雜度無關，且這個常數等於  $n_i^2$ ，即

$$\mathbf{np} = \mathbf{n}_i^2 \dots\dots\dots(20)$$

(五) 電中性定律：在半導體中，若施體之摻雜濃度為  $N_D$ ，受體之摻雜濃度為  $N_A$ ，因這些雜質實際已被游離，所產生的正離子與負離子的濃度分別為  $N_D$  與  $N_A$ ，則下式必須

## 精選試題

一在 n 型矽中，若原子與施體雜質之比率為  $10^{18} : 1$ ，試求室溫下，該材料的電阻率為何？

【答】先決出矽原子濃度 C

$$C = \frac{6.02 \times 10^{23} / \text{mole} \times \text{原子密度} (g / \text{cm}^3)}{\text{原子量} (g / \text{mole})}$$

( $6.02 \times 10^{23} / \text{mole}$  為亞佛加厥常數)

對矽而言，原子量 =  $28.1 g / \text{mole}$ ，密度 =  $2.33 g / \text{cm}^3$ 。

$$\Rightarrow C = 4.99 \times 10^{22} / \text{cm}^3$$

$$\therefore n \approx N_D = 10^{-8} C = 4.99 \times 10^{14} / \text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{且 } \sigma &\approx n q \mu_n = 4.99 \times 10^{14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1500 \\ &= 0.12 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \text{電阻率} = 8.33 \Omega \cdot \text{cm}$$

二求室溫下，矽質本質半導體之電阻率。

【答】本質半導體之傳導率為  $\sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$ ，代入各參數，得

$$\begin{aligned} \sigma &= 1.45 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} (1500 + 475) \\ &= 4.58 \times 10^{-6} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

$$\therefore \text{電阻率} = \frac{1}{\sigma} = 2.18 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$$

三若一步級接面矽質半導體 p 側之電阻率為  $5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，n 側之電阻率為  $2.5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，試計算接觸電位  $V_0$  之值（室溫）。

【答】在 p 側， $\sigma_p \approx p q \mu_p$

$$\therefore \frac{1}{5} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \approx p \times 1.6 \times 10^{-19} C \times 475 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S}$$

$$\Rightarrow p \approx 2.63 \times 10^{15} / \text{cm}^3 \approx N_A$$

在 n 側， $\sigma_n \approx n q \mu_n$

$$\therefore \frac{1}{2.5} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \approx n \times 1.6 \times 10^{-19} C \times 1500 \text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S}$$

$$\Rightarrow n \approx 1.67 \times 10^{15} / \text{cm}^3 \approx N_D$$

$$\begin{aligned} \therefore V_0 &= V_T \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \\ &= 26 \times 10^{-3} \ln \frac{2.63 \times 10^{15} \times 1.67 \times 10^{15}}{(1.45 \times 10^{10})^2} \\ &= 0.618 \text{ V} \end{aligned}$$

四一矽質半導體之施體摻雜度  $N_D = 2 \times 10^{14}$  個原子 / 厘米<sup>3</sup>，受體摻雜度  $N_A = 3 \times 10^{14}$  個原子 / 厘米<sup>3</sup>，試決定室溫時的電子、電洞濃度。

【答】 $\because N_D + p = N_A + n$  (電中性定律)

$$np = n_i^2 \quad (\text{質量作用定律})$$

$$\therefore p = N_A - N_D + n = N_A - N_D + \frac{n_i^2}{p}$$

$$\Rightarrow p^2 - 10^{14} p - 2.1025 \times 10^{20} = 0$$

$$p = 10^{14} / \text{cm}^3 \text{ 或 } 0 \text{ (不合, 因為既有 } N_A \text{ 就不可能為 } 0 \text{)}$$

$$\Rightarrow n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{2.1025 \times 10^{20}}{10^{14}} = 2.1025 \times 10^6 / \text{cm}^3$$

(這是塊 p 型材料，因為  $p > n$ )

五一 P 型矽質半導體，其電阻率為 0.02 歐姆·厘米，試求 300 K (室溫) 時的電洞、電子濃度。

(已知  $\mu_p = 475 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S}$ ， $\mu_n = 1500 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S}$ )

【答】電阻率為 0.02 歐姆·厘米。(電阻率為電導率  $\sigma$  之倒數)

在 P 型材料中， $\sigma \approx pq\mu_p$

$$\therefore \frac{1}{0.02 \Omega \cdot \text{cm}} = p \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 475 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S}$$

$$\Rightarrow p = \frac{1}{0.02 \Omega \cdot \text{cm}} \frac{1}{1.6 \times 10^{-19} (\text{V} \cdot \text{S} / \Omega) \times 475 (\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{S})} \quad (\text{C} = \text{V} \cdot \text{S} / \Omega)$$

$$= 6.58 \times 10^{17} / \text{cm}^3$$

由  $np = n_i^2$  知