

第一章 1-1

半導體特性 

第二章 2-1

二極體特性及應用 

第三章 3-1

雙極性接面電晶體

第四章 4-1

雙極性接面電晶體放大器

第五章 5-1

接面場效電晶體

第六章 6-1

金氧半場效電晶體

第七章 7-1

頻率響應

第八章 8-1

回授放大器

第九章 9-1

運算放大器 

第十章 10-1

濾波器與弦波振盪器

第十一章 11-1

波形產生器

第十二章 12-1

功率放大器

第十三章 13-1

BJT邏輯電路

《附錄一》 16-1

基本邏輯閘與真值表

《附錄二》 17-1

最新試題

第十四章 14-1

金氧半數位邏輯電路

第十五章 15-1

類比積體電路

目錄



出奇制勝

►本章命題重要性

	選擇題型	計算題型
半導體材料	☆☆☆	★
半導體內的總電流	★	★
PN 接面特性	★★★★	★★★★

►有點關鍵

🔍準備重點：

此章節由半導體材料物理特性開始討論，進而延伸至二極體元件特性介紹。

🔍常考、必背的觀念、公式或電路：

1. 質量作用定律（mass-action law）： $np = n_i^2$

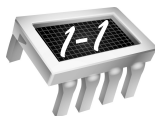
2. 電中性定律（electrical neutrality law）： $N_D^+ + p = N_A^- + n$

3. 內建電位 $V_{bi} = V_T \ln \sqrt{\frac{N_A N_D}{n_i^2}}$

4. 空乏區寬度 $W = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V_A)}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$

5. PN 接面電容 $C_{JR} = \frac{C_{J0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_{bi}}}}$

6. 擴散電容 $C_D = \frac{\tau I_D}{V_T} = \frac{\tau}{r_d}$



半導體材料

(一) 固態材料 (solid-state material) 分類：

固態材料依導電性大小可區分為絕緣體，導體與半導體：

1. 絕緣體 (insulator)：

絕緣體材料，其鄰近原子間價電子形成緊密結合的共價鍵，難以使其斷裂，故無自由電子提供電流傳導。亦即絕緣體有一非常大的能隙，價帶中的電子無法到達導電帶。例如： SiO_2 （二氧化矽）等。

2. 導體 (conductor)：

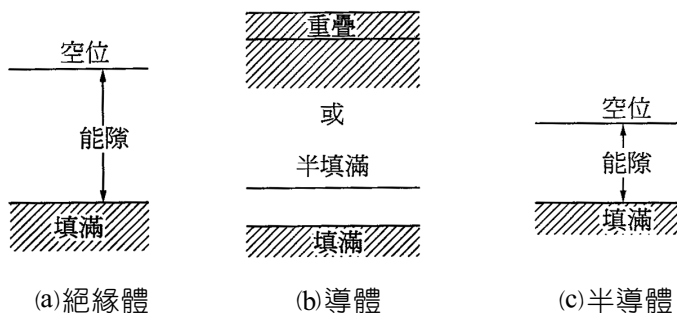
導體材料，其鄰近原子間充滿了電子，形成一片的電子雲。亦即導體中不存在能隙，價帶與導帶是重疊或半填滿狀態，電子能自由的傳導電流，例如： Cu （銅）， Ag （銀）等。

3. 半導體 (semiconductor)：

半導體材料，其鄰近原子間共價鍵的力量介於絕緣體與導體間，在溫度的變動下，有些共價鍵將會斷裂而形成電子與電洞對，當加上外加電場時，負電的電子與正電的電洞將提供傳導電流，其能隙大小亦介於絕緣體與導體間。在低溫下半導體材料類似絕緣體，溫度超過室溫後其導電性變好。例如： Si （矽）、 Ge （鍺）、 GaAs （砷化鎵）等。

註

能隙 E_g 簡單的說即打斷一個共價鍵（產生電子電洞對）時所需之能量。



4. 半導體，導體與絕緣體之區別：

(1) 從能隙 E_g (energy gap) 大小的觀點：

$$\begin{cases} \text{絕緣體：} E_g \geq 3\text{eV} \\ \text{半導體：} 0 < E_g < 3\text{eV} \\ \text{導體：} E_g = 0\text{eV} \end{cases}$$

(2) 從導電係數 σ (conductivity) 的觀點，其區別如下：

$$\begin{cases} \text{絕緣體：} \sigma < 10^{-8} (\Omega\text{-cm})^{-1} \\ \text{半導體：} 10^{-8} < \sigma < 10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1} \\ \text{導體：} \sigma > 10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1} \end{cases}$$

(二) 半導體材料分類：

1. 元素 (element) 半導體。

2. 化合物 (compound) 半導體。

● 週期表中與半導體有關之元素 ●

週期表	第II族	第III族	第IV族	第V族	第VI族
2		B (Boron)	C (Carbon)	N (Nitrogen)	
3	Mg (Magnesium)	Al (Aluminum)	Si (Silicon)	P (Phosphorus)	S (Sulfur)
4	Zn (Zinc)	Ga (Gallium)	Ge (Germanium)	As (Arsenic)	Se (Selenium)
5	Cd (Cadmium)	In (Indium)	Sn (Tin)	Sb (Antimony)	Te (Tellurium)
6	Hg (Mercury)		Pb (Lead)		

● 常用的元素半導體與化合物半導體種類 ●

IV族	IV—IV族	III—V族	II—VI族	IV—VI族
元素	化合物	化合物	化合物	化合物
Si	SiC	AlAs	CdS	PdS

Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		BN	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		InAs		
		InP		
		InSb		

(三)常見的半導體材料：

1. 鍺（Ge）：

- (1)第一個製造出來電晶體所使用之材料。
- (2)由於能隙小，所以此材料為元件漏電流大。
- (3)氧化物易溶於水，對於電子元件結構需要氧化物的元件，如 MOS，特性不穩定。

2. 矽（Si）：

- (1)地球上蘊藏量豐富，容易取得。
- (2)能隙較 Ge 大，因此漏電流小。
- (3)其氧化物 SiO_2 或氮化物 Si_3N_4 特性穩定。
- (4)是目前最多商化業的產品，如記憶體、微處理器材料。

3. 砷化鎵（GaAs）：

- (1)能帶是屬於直接能隙（direct bandgap）為光電元件之主要材料。
- (2)電子移動率 μ_n 高，可製成高速元件與微波元件。
- (3)量子效率高可製成高效率發光二極體 LED 或雷射二極體 LD。

以上三者室溫（300°K）下一些重要特性列於下表。

● 常用的半導體材料重要特性 ●

	鍺（Ge）	矽（Si）	砷化鎵（GaAs）
原子或分子量（g）	72.60	28.09	144.63
原子或分子／厘米 ³	4.42×10^{22}	5×10^{22}	4.42×10^{22}

密度 (g/cm^3)	5.32	2.33	5.32
能隙 (eV)	0.66	1.12	1.42
本質濃度 (cm^{-3})	2.4×10^{13}	1.45×10^{10}	1.79×10^6
電子移動率 μ_n ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)	3900	1500	8500
電洞移動率 μ_p ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$)	1900	475	400
介電常數 (F/cm)	16	11.9	13.1
電阻係數 ($\Omega\cdot\text{cm}$) ⁻¹	47	2.3×10^5	10^8
少數載子平均壽命 (sec)	10^{-3}	2.5×10^{-3}	$\sim 10^{-8}$

觀念分析 concept analysis

由上表可得到許多材料和電路概念：

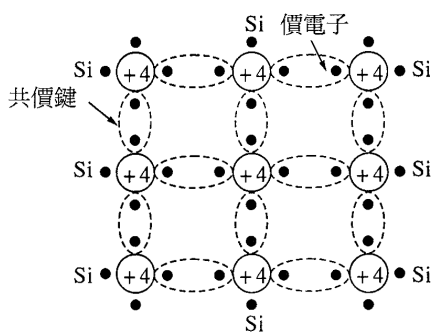
- (1) 電子移動率大於電洞移動率 ($\mu_n > \mu_p$)，故 npn 元件速度比 pnp 元件快，NMOS 元件比 PMOS 速度快。
- (2) 砷化鎵元件電子移動率 (μ_n) 較大，故比矽更適合作為高速微波元件材料。
- (3) 鍺的本質濃度 n_i 值最大，故其作為二極體所得之漏電流 I_s 較大，但切入電壓 V_r 較小。
- (4) 鍺材料能隙 E_g 較小，故其本質濃度 n_i 較大，而導電係數 σ 較大，電阻係數 ρ 較小。
- (5) 矽材料元素半導體間接能隙 (indirect bandgap)，而砷化鎵屬化合物半導體直接能隙，故矽材料不能作為雷射二極體或發光二極體，但仍可作為光檢測器。

(四) 本質半導體 (intrinsic semiconductor)：

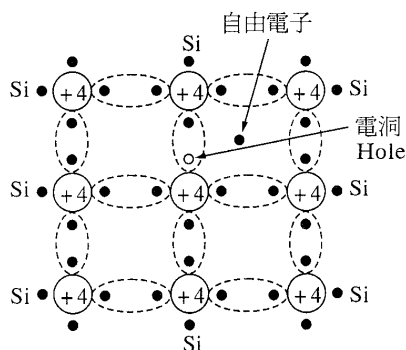
所謂本質半導體，即沒有摻雜任何其它三價或五價元素之純質半導體。

1. 電子與電洞的形成：

- (1) 當溫度很低時，矽晶格內構造如下圖所示，因為沒有自由電子的形成，此時的本質矽半導體類似絕緣體。



(2) 溫度升高至室溫時，矽晶格獲得熱能而振動，如此會使某些共價鍵斷裂，形成電子電洞對，一個電子（electron）離開共價鍵位置相對地形成了一個空位稱為電洞（hole）。



2. 本質濃度 n_i ：

一共價鍵斷裂時會產生一個自由電子與電洞，所以電子濃度 n 應等於電洞濃度 p ，即在本質（intrinsic）或純質半導體，其載子濃度表示如下：

$$n = p = n_i \text{ (本質濃度)}$$

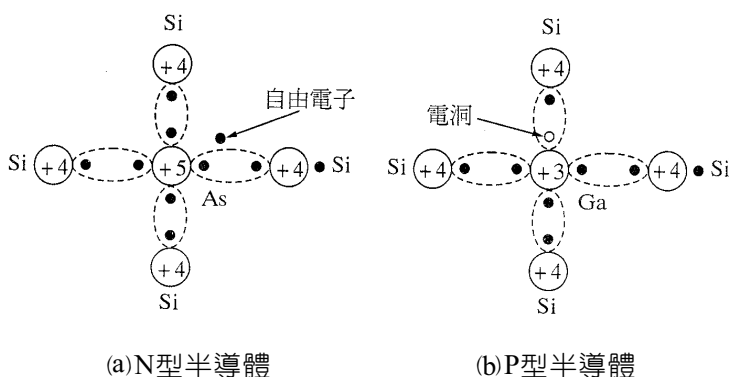
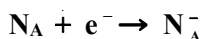
(五) 外質半導體（extrinsic semiconductor）：

1. 純矽半導體加入三價或五價原子，形成外質半導體（或稱雜質半導體），可分為 P 型及 N 型。
2. 矽半導體加入五價原子 N_D （例如：銻、磷、砷）雜質形成 N 型半導體。五價雜質提供額外自由電子，稱為「施體」（donor）或「N 型」。

」雜質。



3. 矽半導體加入三價原子 N_A （例如：硼、鎵、銦）雜質形成 p 型半導體。三價雜質提供接納電子的電洞，稱為「受體」（accept）或「P 型」雜質。



4. 多數載子（majority carrier）和少數載子（minority carrier）：

- (1) N 型半導體：多數載子是電子，少數載子是電洞。
- (2) P 型半導體：多數載子是電洞，少數載子是電子。

5. 半導體多數載子及少數載子的計算：

- (1) 質量作用定律（mass-action law）：在熱平衡下，電子與電洞載子濃度之乘積為一定常數，此數與所加施體或受施體雜質濃度無關，僅與溫度大小有關。

$$np = n_i^2$$

- (2) 電中性定律（electrical neutrality law）：不論本質或雜質半導體都是電中性，在電中性半導體材料中，正電荷總濃度與負電荷總濃度相等。

$$N_D^+ + p = N_A^- + n$$

其中：

$$\begin{cases} N_D^+ \text{ 代表游離後的五價施體正離子濃度 (單位: } 1/\text{cm}^3) \\ N_A^- \text{ 代表游離後的三價受體負離子濃度 (單位: } 1/\text{cm}^3) \end{cases}$$

- (3) N 型半導體：當本質矽半導體加入第五族雜質後，使得電子數增加，而電洞數由於與增加的電子產生復合，所以其數量將降到本質濃度以下，即：

$$n > n_i \text{ 且 } p < n_i \text{ (但依然符合 } np = n_i^2 \text{)}$$

簡單地說，當 $n > p$ 時稱為 N 型半導體

- (4) P 型半導體：當本質矽半導體加入第三族雜質後使得電洞數增加，而電子數由於與增加的電洞產生復合，所以其數量將降到本質濃度以下，即：

$$p > n_i \text{ 且 } n < n_i \text{ (但依然符合 } n \times p = n_i^2 \text{)}$$

簡單地說，當 $p > n$ 時稱為 P 型半導體

- (5) 求外質半導體或本質半導體內 p 與 n 可解下列聯立方程式：

$$\begin{cases} N_D + p = N_A + n \\ np = n_i^2 \end{cases}$$

- ① n 型半導體： $N_D > N_A$

$$n [n + N_A - N_D] = n_i^2$$

$$\Rightarrow n^2 + (N_A - N_D)n - n_i^2 = 0$$

$$\text{精確解 } n = \frac{1}{2} [(N_D - N_A) + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}]$$

若 $N_D \gg N_A$ 且 $N_D - N_A \gg n_i$ ，則可得近似解

多數載子 $n \cong N_D$

少數載子 $p \cong \frac{n_i^2}{N_D}$

② p 型半導體： $N_A > N_D$

$$p [N_D + p - N_A] = n_i^2$$

$$\Rightarrow p^2 + (N_D - N_A)p - n_i^2 = 0$$

$$\text{精確解 } p = \frac{1}{2} [(N_A - N_D) + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}]$$

若 $N_A \gg N_D$ 且 $N_A - N_D \gg n_i$ ，則可得近似解

多數載子 $p \cong N_A$

少數載子 $n \cong \frac{n_i^2}{N_A}$

③ 本質半導體： $N_A = N_D = 0$

$$p = n = n_i^2$$

④ 互補型半導體： $N_A = N_D \neq 0$

$$n = p = n_i$$

註 互補型半導體，易引起雜質散射，造成移動率 μ 下降，導電率 σ 下降。

觀念分析



$$\begin{cases} p_p \text{ 代表 p 型半導體內，多數載子電洞濃度} \\ n_p \text{ 代表 p 型半導體內，少數載子電子濃度} \end{cases}$$

$$\begin{cases} n_n \text{ 代表 n 型半導體內，多數載子電子濃度} \\ p_n \text{ 代表 n 型半導體內，少數載子電洞濃度} \end{cases}$$

	N 型半導體	p 型半導體
多數載子濃度	$n_n \cong N_D$	$p_p \cong N_A$
少數載子濃度	$p_n \cong \frac{n_i^2}{N_D}$	$n_p \cong \frac{n_i^2}{N_A}$

觀念分析



電中性定律： $N_D^+ + p = N_A^- + n$

- (1) 此公式僅適合於「熱平衡」狀態，當有外加偏壓下或光線照射或溫度改變，則處於不平衡狀態，此公式不成立。
- (2) N_D^+ ， N_A^- ， p ， n 單位為個/cm³，必須乘上體積（cm³）才是電荷單位，故此公式適合於同一體積（bulk）內。

EX

1

⊖(D)

以下有關半導體特性之敘述，何者錯誤？

- (A) 具有受體雜質的半導體稱為 P 型半導體
 (B) 具有施體雜質的半導體稱為 N 型半導體
 (C) 電子在漂移速度比電洞的漂移速度快
 (D) 在 P 型半導體中，電子被稱為多數載子

解：(A) 加入三價受體雜質為 P 型半導體。

(B) 加入五價施體雜質為 N 型半導體。

(C) 電子移動率 μ_n 大於電洞移動率 μ_p 。

(D) P 型半導體多數載子為電洞。