

半導體材料製程與研究

The studies and processes of semiconductor material

作者：蘇漢儒

中華民國九十八年四月五日

目 錄

第一章 單晶矽晶棒	1
1.1 柴氏長晶法 (Czochralski crystal growth)	1
1.2 浮動區長晶法 (Float-Zone Crystal Growth)	3
1.3 提煉純矽的基本原料	4
1.4 提煉純矽的化學反應式	4
1.5 反覆精煉製程，化學反應式	4
1.5.1 反覆精煉製程，化學反應式如下述：	5
第二章 半導體材料	7
2.1 半導體二族元素	7
2.2 半導體三族元素	7
2.3 半導體四族元素	8
2.4 半導體五族元素	8
2.5 半導體六族元素	9
第三章 半導體元件分類	9
3.1 三五族半導體元件	9
3.2 四族半導體元件	10
3.3 二六族半導體元件	10

第四章 材料的電阻值	11
4.1 材料阻抗數值表	11
第五章 鍺及矽的物理特性	11
5.1 鍺及矽在 0° K 及 25° C 的物理特性	11
5.2 本質半導體	12
5.3 質量動作定律	13
5.4 N 型半導體材料特性	13
5.5 P 型半導體材料特性	13
5.6 導體與半導體的差異	14
5.7 半導體的電流密度	14
第六章 本質半導體的特性參數	15
6.1 本質半導體特性參數表	15
第七章 驗證矽本質半導體的電阻值	15
7.1 分析矽本質半導體原子的濃度	15
7.2 分析矽本質半導體的電阻值	16
7.3 驗證 N 型矽半導體的電阻值	17
第八章 驗證矽本質半導體的導電率	18
8.1 計算矽本質半導體的導電率	18
第九章 測試半導體材料之型式	19
9.1 霍爾效應	19

9.1.1	N 型材料之測試電壓極性	20
9.1.2	P 型材料之測試電壓極性	20
9.2	測量半導體材料之電荷密度	21
9.3	霍爾係數	21
第十章	半導體材料主載子之移動速率	22
10.1	主載子之移動速率	22
第十一章	驗證矽半導體載子的擴散係數	22
11.1	矽半導體載子的擴散係數	22
第十二章	驗證矽半導體載子的移動速率	24
12.1	載子的移動速率，測試電路說明如下述。	24
12.2	載子的移動速率，計算步驟如下述	25
12.3	載子的擴散係數，計算步驟如下述	25
12.4	主載子的擴散移動方向測試方法	25
12.4.1	N 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法	26
12.4.2	P 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法	26
第十三章	單晶矽結晶的座標	28
13.1	單晶矽 $\langle 111 \rangle$ 結晶的座標	28
13.2	單晶矽 $\langle 100 \rangle$ 結晶的座標	28
13.3	長晶摻雜分佈係數	29
第十四章	本質半導體摻入其它元素	30

14.1	純矽晶體添加五價磷元素	30
14.2	純矽晶體添加三價硼元素	31
15.3	純矽晶體添加三價硼元素及五價砷元素	32
第十五章 計算矽晶片電阻值		33
15.1	矽晶片電阻值	33
第十六章 結晶沉積法製程		33
16.1	結晶附著沉積法	33
16.2	結晶附著沉積作用的理論	34
16.3	單晶矽結晶沉積方法	35
16.3.1	真空沉積法	35
16.3.2	蒸氣生長沉積法	35
16.3.3	氫化矽 (Silane) 裂解沉積法	36
16.4	磊晶生長沉積的製程	37
16.4.1.	清洗晶圓	37
16.4.2.	預熱	37
16.4.3.	鹽酸蝕刻	37
16.4.4.	沉積	38
16.4.5.	冷卻	38
第十七章 磊晶沉積設備		38
17.1	磊晶反應器設備	38

17.2 磊晶沉積層的重要參數	39
第十八章 測試磊晶層厚度的方法	39
18.1. 凹槽染色法 (Angle Lap and Strain)	39
18.2. 凹槽深度測量法	40
18.3. 紅外線干涉條紋測量法	40
第十九章 測試磊晶層的摻雜濃度	40
19.1. 切片法	40
19.2. 逆向偏壓法	41
19.3. 凹槽及展佈探針法	41
第二十章 二氧化矽製程	41
20.1. 二氧化矽的化學反應式	42
20.2. 二氧化矽的顏色	42
20.3. 二氧化矽電介質	44
20.3.1. 二氧化矽層崩潰電壓強度的測試法	44
20.3.2 二氧化矽層中漂移污染物質總量的測試法	44
第二十一章 摻雜元素擴散原理	45
21.1. 摻雜雜質元素的擴散物理現象	45
21.2. 摻雜元素擴散速率	46
21.3. 半導體元件擴散製程	46
21.3.1. 預先沉積法 (Pre-deposition)	46

21.3.2. 推入擴散法 (Drive-in Diffusion).....	48
第二十二章 離子佈植原理	49
22.1. 離子佈植原理	49
22.2. 離子佈植機的可控制參數	49
22.3. 離子佈植機應用領域	50

圖 目 錄

圖 1.1 柴氏長晶法圖示	2
圖 1.2 柴氏長晶法設備圖	2
圖 1.3 浮動區長晶法圖示	3
圖 1.4 浮動區長晶法設備圖示	4
圖 1.5 矽晶棒及晶圓圖示	5
圖 1.6 柴氏長晶法設備圖	6
圖 9.1 霍爾效應圖示	19
圖 12.1 測試主載子移動速率圖示	24
圖 12.2 N 型半導體材料主載子測試圖示.....	26
圖 12.3 P 型半導體材料主載子測試圖示	27
圖 13.1 單晶矽 < 111 > 結晶的座標	28
圖 13.2 單晶矽 < 100 > 結晶的座標	28
圖 14.1 電阻阻值對應摻雜濃度曲線表	31
圖 20.1 二氧化矽層崩潰電壓強度的測試法	44

圖 20.2	二氧化矽層中漂移污染物質總量的測試法	45
圖 21.1	固態摻雜雜質元素溶解度對應爐管溫度的曲線表	47

表 目 錄

表 2.1	半導體二族元素	7
表 2.2	半導體三族元素	7
表 2.3	半導體四族元素	8
表 2.4	半導體五族元素	8
表 2.5	半導體六族元素	9
表 4.1	材料每平方公分的阻抗數值表	11
表 6.1	本質半導體特性參數表	15
表 13.1	矽晶體之常用摻雜元素分佈係數表	29
表 20.1	二氧化矽顏色表	42

第一章 單晶矽晶棒

1.1 柴氏長晶法 (Czochralski crystal growth)

柴教授 (Professor Jan Czochralski) 於 1885 年出生於日爾曼帝國(The German empire)，波蘭的西尼爾 (Kcynia)小鎮，(Kcynia , a small town in Western Poland, which then was part of Prussia.)，1953 年柴教授往生，葬在西尼爾小鎮的家族墓園。

1916 年，柴教授發表著名的柴氏長晶法，他使用壹支毛細管浸入液態金屬溶液，然後緩慢拉昇毛細管，使與毛細管沾著的金屬溶液緩慢凝固(固態金相與液態金相之接合面之間存在複雜的熱流特性)，他成功的研製直徑 1 厘米的單晶金屬晶粒。

他的研究至此便擱置，直到 1950 年(第二次世界大戰期間)美國貝爾實驗室 G.K. Teal 和 J.B. Little 使用柴氏長晶法 (如圖 1.1 及圖 1.2 所示) 成功的研製鍺單晶晶粒。柴氏長晶法至今廣泛的被半導體工業界應用於生產矽晶棒。

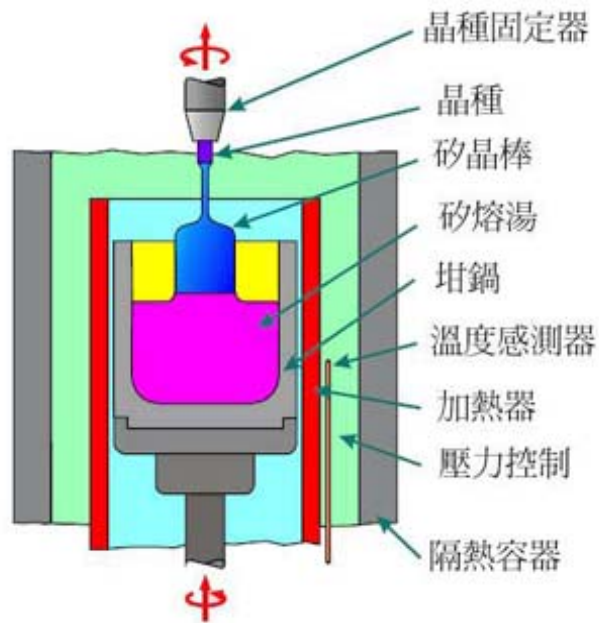


圖 1.1 柴氏長晶法圖示

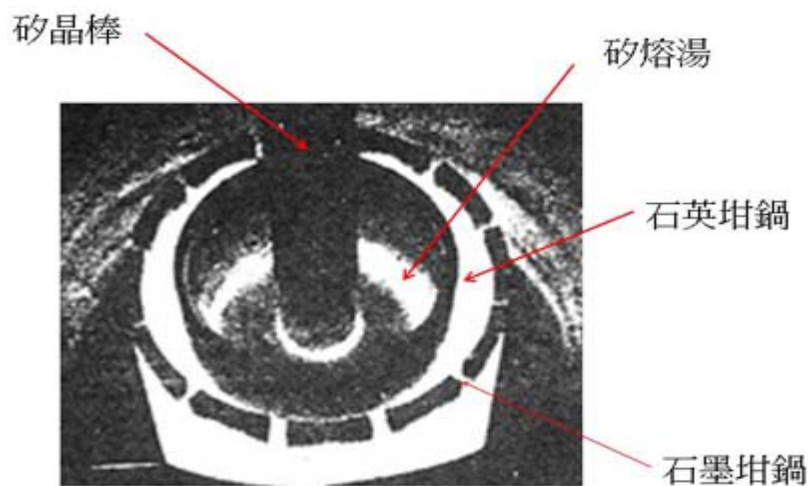


圖 1.2 柴氏長晶法設備圖

1.2 浮動區長晶法 (Float-Zone Crystal Growth)

1916 年，修利爾(Henry Theurer) 發明浮動區長晶法 (如圖 1.3 及圖 1.4 所示)，FZ 法的製程設備沒有使用高溫坩鍋 (Crucible) 盛裝熔融的矽熔湯，使用射頻加熱器，所以沒有氧污染的問題。

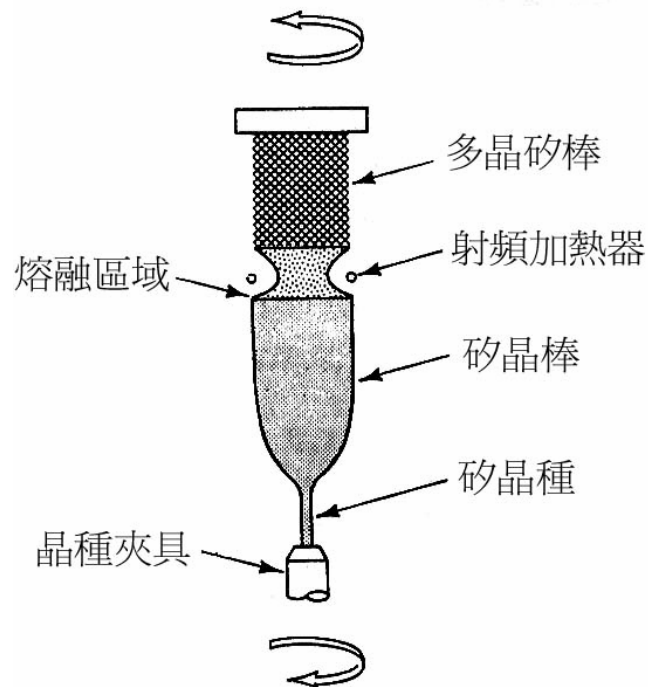


圖 1.3 浮動區長晶法圖示

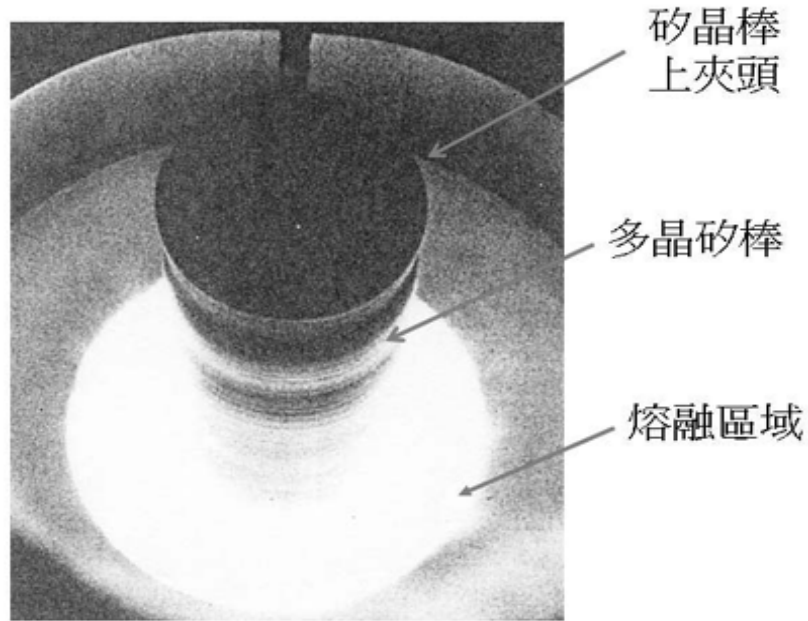


圖 1.4 浮動區長晶法設備圖示

1.3 提煉純矽的基本原料

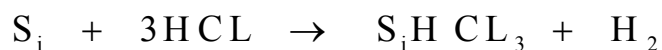
提煉半導體單晶矽棒的基本原料是矽砂 (SiO_2)。

將矽砂置入坩鍋 (Crucible) 以攝氏 1500 度左右之高溫熔解成液體。 液体二氧化矽添加碳 (Carbon), 使矽砂中之氧 (Oxygen) 與碳結合成二氧化碳 (CO_2), 排出坩鍋, 留下純矽 (Silicon)。

1.4 提煉純矽的化學反應式

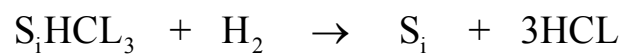


1.5 反覆精煉製程, 化學反應式



進行精煉製程，坩鍋中留下之純矽 (Silicon) 添加三氯化氫 (3HCL) ，反應變成三氯氫化矽 (SiHCL₃) ，剩下的氫氣 (Hydrogen) 排出坩鍋。

1.5.1 反覆精煉製程，化學反應式如下述：



坩鍋中留下之三氯氫化矽，再添加氫氣，反應變成純矽及三氯化氫。經過精煉製程，獲得之純矽屬四族之元素，可提供製作半導體單晶矽棒的原料。

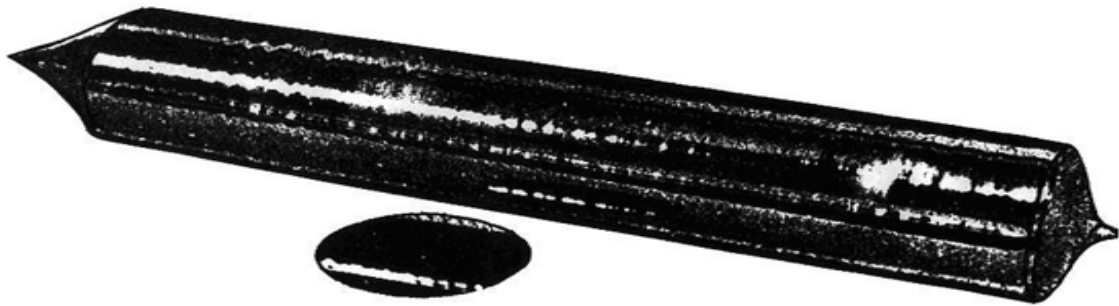


圖 1.5 矽晶棒及晶圓圖示

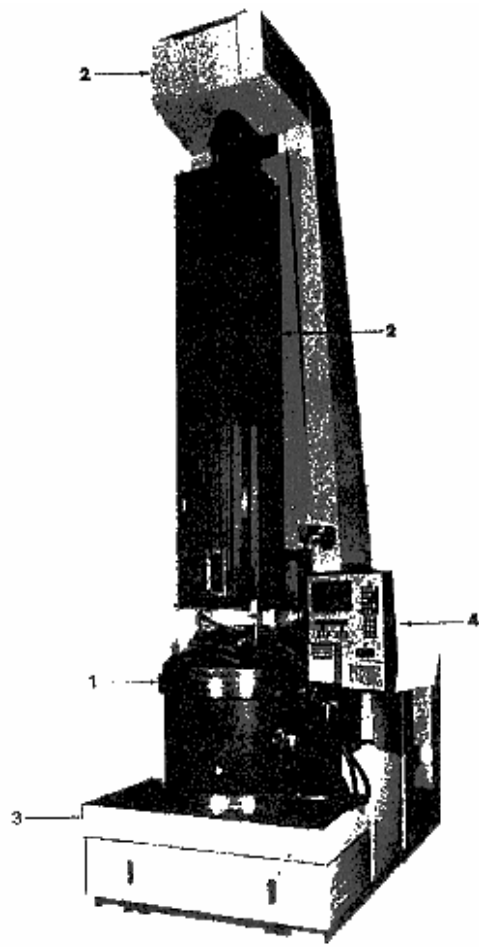


圖 1.6 柴氏長晶法設備圖

第二章 半導體材料

2.1 半導體二族元素

二族元素的原子序如表 2.1 所示。

表 2.1 半導體二族元素

元素名稱	原子序	K層	L層	M層	N層	O層
鋅 Zinc (Zn)	30	2	8	18	2	
鎘 Cadmium (Cd)	48	2	8	18	18	2

2.2 半導體三族元素

三族元素的原子序如表 2.2 所示。

表 2.2 半導體三族元素

元素名稱	原子序	K層	L層	M層	N層	O層
鋁 Aluminum (Al)	13	2	8	3		
硼 Boron (B)	5	2	3			
鎘 Gallium (Ga)	31	2	8	18	3	
銦 Indium (In)	49	2	8	18	18	3

2.3 半導體四族元素

四族元素的原子序如表 2.3 所示。

表 2.3 半導體四族元素

元素名稱	原子序	K 層	L 層	M 層	N 層	O 層
碳 Carbon (C)	6	2	4			
錫 Tin (Sn)	50	2	8	18	18	4
矽 Silicon (Si)	14	2	8	4		
鍺 Germanium(Ge)	32	2	8	18	4	

2.4 半導體五族元素

五族元素的原子序如表 2.4 所示。

表 2.4 半導體五族元素

元素名稱	原子序	K 層	L 層	M 層	N 層	O 層
磷 Phosphorus (P)	15	2	8	5		
砷 Arsenic (As)	33	2	8	18	5	
銻 Antimony (Sb)	51	2	8	18	18	5

2.5 半導體六族元素

六族元素的原子序如表 2.5 所示。

表 2.5 半導體六族元素

元素名稱	原子序	K 層	L 層	M 層	N 層	O 層
硫磺 Sulfur (S)	16	2	8	6		
硒 Selenium (Se)	34	2	8	18	6	
碲 Tellurium (Te)	52	2	8	18	18	6

第三章 半導體元件分類

3.1 三五族半導體元件

發光二極體 (Light - emitting Diode) :

1. 鎵 (Gallium) + 砷 (Arsenic) 。
2. 鎵 (Gallium) + 磷 (Phosphorus) 。

光偵檢器 (Light Detector) :

1. 銦 (Indium) + 銻 (Antimony) 。

雷射半導體 (Semiconductor Lasers) :

1. 鎵 (Gallium) + 砷 (Arsenic) 。

3.2 四族半導體元件

紅外線及核子輻射偵檢器

(Infrared and Nuclear Radiation Detector) :

1. 矽 (Silicon) 。

2. 鍺 (Germanium) 。

3.3 二六族半導體元件

1. 電視螢光幕 (Television Screen) :

鋅 (Zinc) + 硫磺 (Sulfur) 。

2. 光偵檢器 (Light Detector) :

鎘 (Cadmium) + 硒 (Selenium) 。

第四章 材料的電阻值

4.1 材料阻抗數值表

各種材料有其各別的阻抗數值，如表 4.1 所示。

表 4.1 材料每平方公分的阻抗數值表

材料名稱	歐姆 / 立方公分	類別
銀	10	導體
鋁	10	導體
鍺	50 ~ 60	半導體
矽	50 k ~ 60 k	半導體
雲母	10 ~ 10	絕緣體
聚乙稀	10 ~ 10	絕緣體

第五章 鍺及矽的物理特性

5.1 鍺及矽在 0 ° K 及 25 ° C 的物理特性

在 0 ° K 的溫度 (等於 - 273 ° C) 鍺及矽的結晶結構之物理

特性等同絕緣體，不導電。

在 25°C 的溫度，鍺及矽的共價鍵因熱能而部分崩解，使絕緣體的特性改變為導電體。

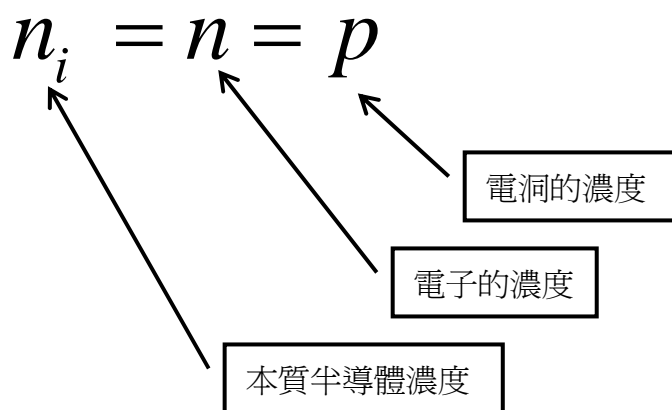
在 25°C 的溫度，崩解鍺的共價鍵能量是 0.72 eV 。

在 25°C 的溫度，崩解矽的共價鍵能量是 1.1 eV 。

$1\text{ eV} = \text{一電子伏特} = 1.6 \times 10^{-19}\text{ 焦耳 (Joules)}$ 。

5.2 本質半導體

本質半導體 (Intrinsic Semiconductor) 的自由電子及電洞的數量是相同。



使鍺原子的共價鍵產生自由電子的能量是 0.01 eV 、矽是 0.05 eV 。

5.3 質量動作定律

$$n_i^2 = np$$

$$N_D = \text{施體離子 (Donor Ions) } m^3$$

$$\text{總正電荷密度} = N_D + P。$$

$$N_A = \text{受體離子 (Acceptor Ions) } m^3$$

$$\text{總負電荷密度} = N_A + n。$$

半導體材料的總正電荷密度等於總負電荷密度時其電性是中性。

$$N_D + P = N_A + n$$

5.4 N 型半導體材料特性

當自由電子的濃度遠大於電洞的濃度 ($n \gg p$)，並且受體離子的數量等於零 ($N_A = 0$) 時，自由電子的濃度等於施體離子的數量 ($n = N_D$)。

5.5 P 型半導體材料特性

當電洞的濃度遠大於自由電子的濃度 ($p \gg n$)，並且施體離子的數量等於零 ($N_D = 0$) 時，電洞的濃度等於受體離子

的數量 ($P = N_A$)。

5.6 導體與半導體的差異

導體材料內部只有單一的載子(Unipolar ; 自由電子)。

半導體材料的內部有兩種載子(Bipolar ; 自由電子與電洞)。

5.7 半導體的電流密度

$$\text{半導體電流密度} = J = (n \mu_n + p \mu_p) q \varepsilon = \sigma \varepsilon \text{。}$$

μ_n = 電子的移動率。

μ_p = 電洞的移動率。

σ = 導電率。

第六章 本質半導體的特性參數

6.1 本質半導體特性參數表

本質半導體特性參數，如表 6.1 所示。

表 6.1 本質半導體特性參數表

參數名稱	鍺	矽
原子的數目	32	14
原子的重量	72.6	28.1
密度，g/cm ³	5.32	2.33
介質常數	16	12
原子數 / cm ³	4.4×10^{22}	5×10^{22}
EGO，eV 在 0° K	0.785	1.21
EGO，eV 在 300° K	0.72	1.1
n _i 在 300° K，cm ³	2.5×10^{13}	1.5×10^{10}
電阻值在 300° K，Ω/cm	45	230K
μ _n ，cm ² / v-s 在 300° K	3800	1300
μ _p ，cm ² / v-s 在 300° K	1800	500
D _n ，cm ² / s = μ _n VT	99	34
D _p ，cm ² / s = μ _p VT	47	13

第七章 驗證矽本質半導體的電阻值

7.1 分析矽本質半導體原子的濃度

使用 Avogadro's Number 計算矽本質半導體原子的濃度。

解算步驟如下述：

1. 矽本質半導體的密度 = 2.33 g/cm³。

2. 矽本質半導體原子的重量 = 28.1 mole / gram 。
3. Avogadro's Number = 6.02×10^{23} Molecules Per Mole 。
4. 矽本質半導體原子的濃度

$$= 6.02 \times 10^{23} (\text{Atoms / Mole}) \times (\text{Mole / 28.1 Grams})$$

$$\times 2.33 (\text{Grams / cm}^3) 。$$

$$= 4.99 \times 10^{22} (\text{Atoms / cm}^3)$$

$$\cong 5 \times 10^{22} (\text{Atoms / cm}^3)$$

與本質半導體的特性參數吻合

7.2 分析矽本質半導體的電阻值

在 300° K (25° C) 的溫度時計算矽本質半導體的電阻值 。

解算步驟如下述：

1. $n_i = n = p$

2. $\sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p)$

$$= 1.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1800$$

$$\left[(\text{cm}^{-3} \times \text{Coulomb} \times \text{cm}^2) / \text{V-S} \right]$$

$$= 0.00000432 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

3. 電阻值 = $\rho = 1 / \sigma$

$$= 232.5 \text{ K}\Omega\text{-cm}$$

$$\cong 233 \text{ K}\Omega\text{-cm}$$

與本質半導體的特性參數吻合

7.3 驗證 N 型矽半導體的電阻值

本質半導體材料滲入 10^{10} 矽原子的施體，求其電阻值。

解算步驟如下述：

$$1. \quad n_n \approx N_D = 5 \times 10^{12} \text{ (Atoms / cm}^3\text{)}$$

$$2. \quad P_n = n_i^2 / N_D$$

$$= (1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2 / 5 \times 10^{12} \text{ (Atoms/cm}^3\text{)}$$

$$= 0.45 \times 10^8 \text{ (Holes/cm}^3\text{)}$$

3. $n_n \gg P_n$ 故可忽略 P_n 的濃度來計算導電率。

$$\sigma = n q \mu_n$$

$$= 5 \times 10^{12} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1300$$

$$= 0.00104 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

$$4. \quad \text{電阻值} = \rho = 1 / \sigma$$

$$= 1 / 0.00104 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

$$= 961.5 \Omega - \text{cm}$$

$$5. \quad \text{未加入雜質前的 } \rho_1 = 233 \text{ K } \Omega - \text{cm}$$

$$\text{加入雜質的 } \rho_2 = 961.5 \Omega - \text{cm} \circ$$

6. 導電率因數

$$\sigma_2 / \sigma_1 = 0.00104 / 0.00000432 = 242.3$$

$$\rho_1 / \rho_2 = 233 \text{ K } \Omega / 961.5 \Omega = 242.3$$

第八章 驗證矽本質半導體的導電率

8.1 計算矽本質半導體的導電率

半導體的導電率.解算步驟如下述：

1. 假設每一顆矽原子，其施體供應一粒自由電子。

2. $n_n = 5 \times 10^{22}$ (Atoms / cm³)。

3. $n_n = 5 \times 10^{22}$ (Electrons / cm³)。

4. $\sigma = n_n q \mu_n$

$$= 5 \times 10^{22} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1300$$

$$[(\text{Electrons / cm}^3) \times \text{Coulomb} \times (\text{cm}^2 / \text{v-s})]$$

$$= 10400 \times 10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1}。$$

5. 未加入雜質前的矽本質半導體。

$$\sigma_1 = 10400 \times 10^3 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

加入雜質的矽本質半導體。

$$\sigma_2 = 0.00104 (\Omega\text{-cm})^{-1}$$

$$6. \sigma_1 / \sigma_2 = 10^{10}$$

與本質半導體的特性參數吻合

第九章 測試半導體材料之型式

9.1 霍爾效應

藉由霍爾效應 (Hall Effect) 之理論，可應用來測試半導體晶圓 (Wafer) 之型式是 P 型晶圓或 N 型晶圓。霍爾效應測試電路模式，如圖 9.1 所示。

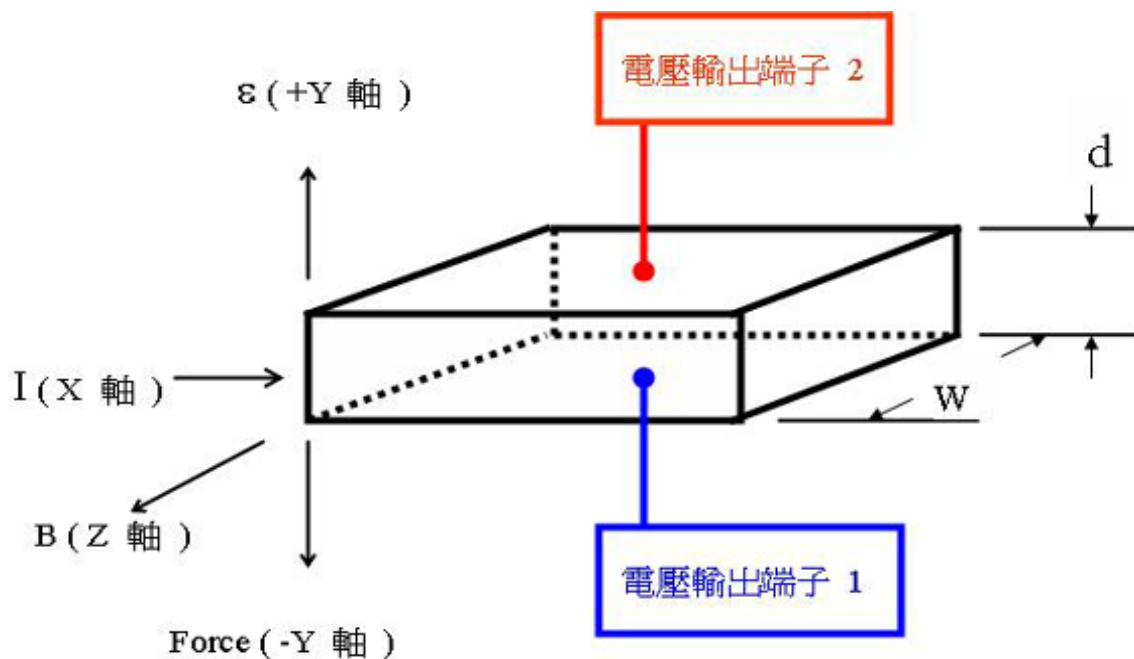


圖 9.1 霍爾效應圖示

一股作用力 (Force) 將沿負 Y 軸的方向，對半導體材料內部流動的電流 (主載子) 施加作用力，作用力使主載子 堆積在電壓輸出端子 1 ，因此主載子 決定電壓的輸出極性。

N 型材料的主載子是自由電子。

P 型材料的主載子是電洞。

自由電子的流動方向沿 X 軸，自右向左流動。

電洞的流動方向沿 X 軸，自左向右流動。

9.1.1 N 型材料之測試電壓極性

測試電壓輸出端子 1，若為負電壓極性，電壓輸出端子 2，為正電壓極性，表示測試的半導體屬 N 型材料，因為自由電子堆積在電壓輸出端子 1 。

9.1.2 P 型材料之測試電壓極性

測試電壓輸出端子 1，若為正電壓極性，電壓輸出端子 2，為負電壓極性，表示測試的半導體屬 P 型材料，因為電洞堆積在電壓輸出端子 1 。

電場強度作用力 = 磁場密度。

作用力， $(\varepsilon q = B q v)$ 。

ε = 電場強度 (每公尺伏特)。

q = 主載子的電荷 (庫侖)。

B = 磁場密度 (每平方公尺韋伯)。

v = 主載子的飄游速度 (公尺 / 秒)。

V_H = 霍爾電壓 (Hall Voltage)

$$= \varepsilon d = B v d = B J d / \rho = B I / \rho W (\text{伏特})。$$

ρ = 電荷密度 (庫侖 / 立方公尺)。

J = 電流密度 = $\rho v = I (\text{安培}) / W d (\text{平方公尺})。$

9.2 測量半導體材料之電荷密度

若 V_H 、 B 、 I 、和 W 為已知之數據，則測量半導體材料之電荷密度變成可行。

$$\rho = \text{電荷密度 (庫侖 / 立方公尺)} = B I / V_H W。$$

9.3 霍爾係數

$$R_H = \text{霍爾係數} = 1 / \rho = V_H W / B I。$$

當 R_H 、 ρ 和 σ 為已知之數據，則測量半導體材料主載子之移動速率 (Mobility ; μ) 變成可行。

第十章 半導體材料主載子之移動速率

10.1 主載子之移動速率

只考慮主載子的平均飄游速度 (v)，不計熱騷動飄游速度之條件，則 $\sigma = \rho \mu$ 。

$$\mu = \text{主載子之移動速率 (cm}^2/\text{v-s)} = \sigma / \rho = \sigma R_H。$$

實際狀況，除考慮主載子的平均飄游速度 (v)，另外需加計隨機方向移動的熱騷動主載子的飄游速度，則霍爾係數如下述：

$$R_H = V_H W / B I = 3 \pi / 8 \rho。$$

$$8 \rho V_H W = 3 \pi B I。$$

$$\rho = 3 \pi / 8 R_H$$

$$\mu = \text{主載子之移動速率 (cm}^2/\text{v-s)} = \sigma / \rho = 8 \sigma R_H / 3 \pi。$$

第十一章 驗證矽半導體載子的擴散係數

11.1 矽半導體載子的擴散係數

D_n = 擴散係數 (Diffusion Coefficient) 。

$$D_n = \frac{\bar{l}^2}{2\bar{t}} = \frac{KT\mu_n}{q}$$

\bar{l} = 隨機方向移動的主載子的平均自由路徑 (cm)。

\bar{t} = 主載子互相碰撞的平均自由時間 (Second)。

K = Boltzmann's Constant = $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} / ^\circ\text{K}$ 。

T = $300 \text{ }^\circ\text{K}$ (Kelvin 絕對溫度)。

μ_n = 主載子的之移動速率 ($\text{cm}^2/\text{v-s}$)。

q = 主載子的電荷 = $1e$ 。

$$\begin{aligned} D_n &= (KT\mu_n/q) = [(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} / ^\circ\text{K} \times 300 \text{ }^\circ\text{K} \\ &\quad \times 1300 \text{ cm}^2/\text{v-s}) / 1e] \\ &= 33.6 = 34 (\text{cm}^2/\text{sec})。 \end{aligned}$$

$$KT/q = 0.026 \text{ Volt}。$$

$$D_n = (KT\mu_n/q) = 0.026 \text{ Volt} (\mu_n)。$$

$$= 0.026 \text{ Volt} \times 1300 (\text{cm}^2/\text{v-s}) = 33.6 = 34 (\text{cm}^2/\text{sec})$$

與本質半導體的特性參數吻合

第十二章 驗證矽半導體載子的移動速率

12.1 載子的移動速率，測試電路說明如下述。

一塊 P 型矽晶片，規格如下述：

1. P 型矽晶片長度 = 1 cm。
2. 兩隻探針測試棒距離 = 0.95 cm。
3. 偏壓 = DC 2 V。
4. 測試脈衝信號，從測試棒 (1) 傳至測試棒 (2) 之時間 = 0.365 m sec。
5. 脈衝信號寬度 = 170 u sec。

計算主載子的移動速率(μ_n)及擴散係數 (D_n)，電路如下：

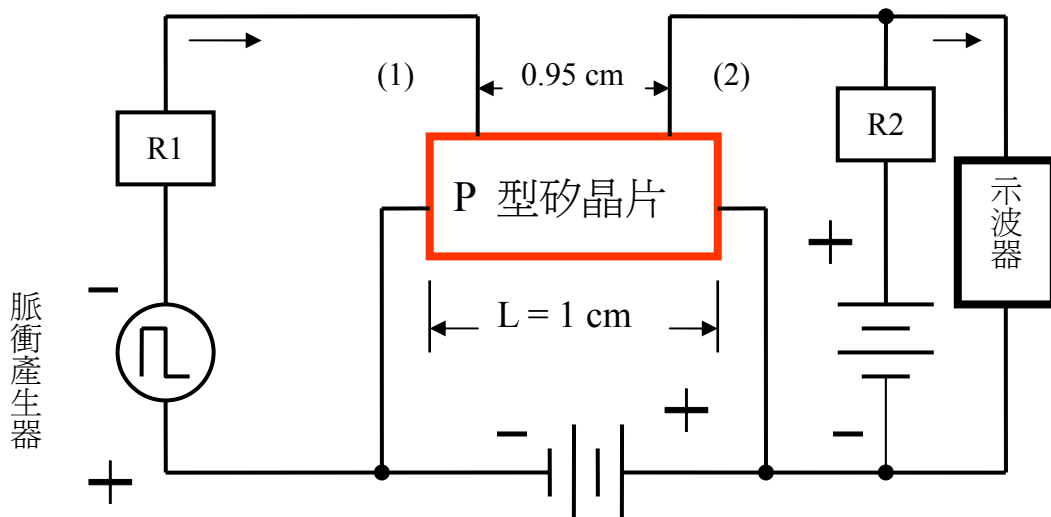


圖 12.1 測試主載子移動速率圖示

12.2 載子的移動速率，計算步驟如下述

$$1. \quad v = L/t = 0.95 \text{ cm} / 0.365 \text{ m sec} = 2.6 (\text{ cm} / \text{ m sec})。$$

$$2. \quad \mu_n = v/\varepsilon = 2.6 (\text{ cm} / \text{ m sec}) / 2 (\text{ v} / \text{ cm})$$

$$= 1300 (\text{ cm}^2/\text{v-s})。$$

與本質半導體的特性參數吻合

12.3 載子的擴散係數，計算步驟如下述

$$D_n = (\Delta t L)^2 / 16t^3 = \frac{(170 \mu\text{sec} \times 0.95 \text{ cm})^2}{16 \times (0.365 \text{ cm})^3}$$
$$= 33.5 (\text{ cm}^2/\text{sec}) = 34 (\text{ cm}^2/\text{sec})$$

12.4 主載子的擴散移動方向測試方法

N 型及 P 型半導體材料之主載子的擴散移動方向受溫度影響，具有從高溫區域往低溫區域移動的物理特性，因此可利用此特性檢測判別矽半導體材料之型式。

12.4.1 N 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法.

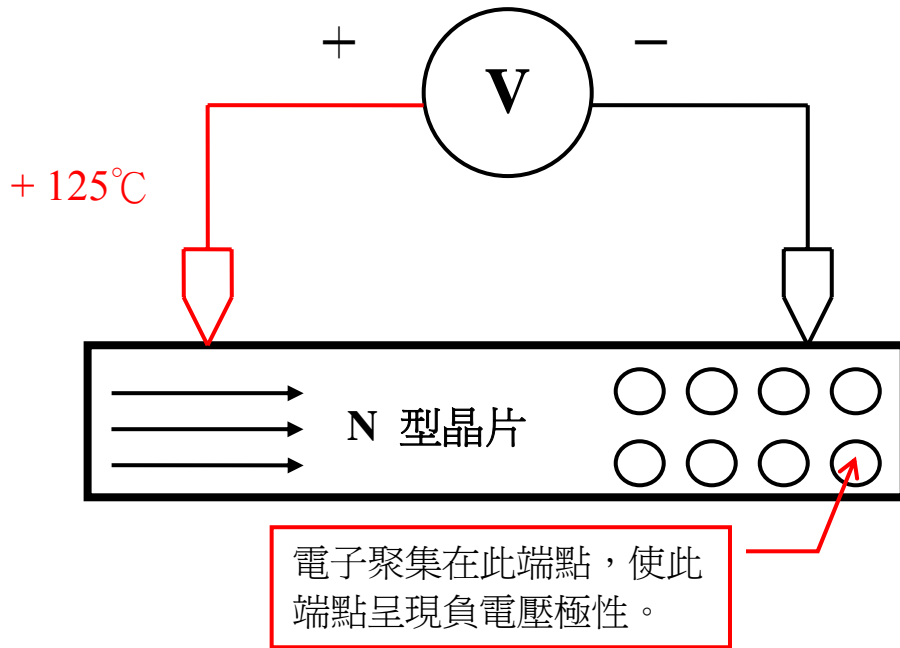


圖 12.2 N 型半導體材料主載子測試圖示

12.4.2 P 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法

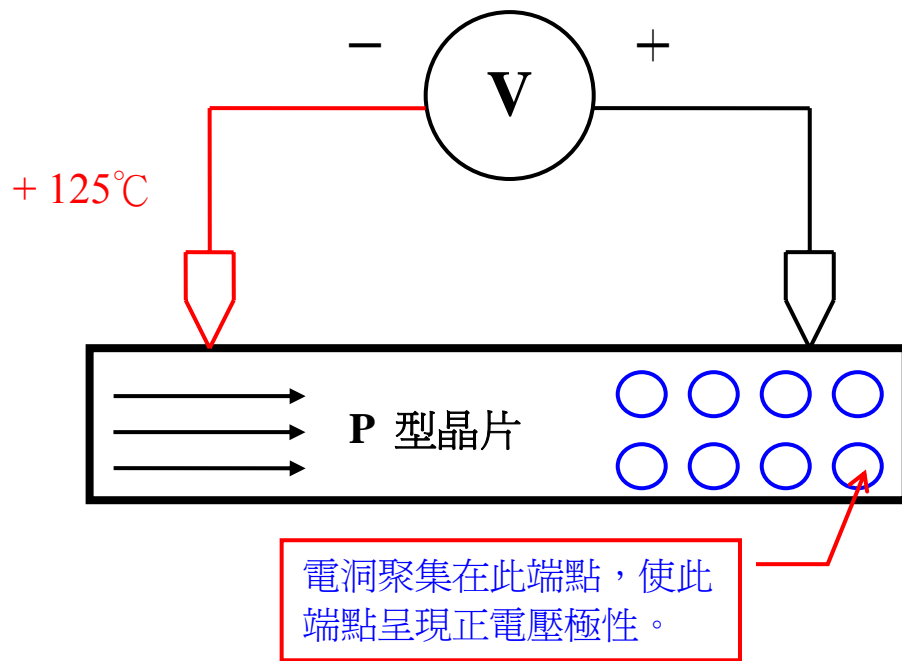


圖 12.3 P 型半導體材料主載子測試圖示

第十三章 單晶矽結晶的座標

依座標 $\langle 111 \rangle$ 及 $\langle 100 \rangle$ 方向生長的單晶矽結晶晶圓 (Wafer) 被廣泛應用於製造二極體、電晶體、及積體電路等半導體元件。

13.1 單晶矽 $\langle 111 \rangle$ 結晶的座標

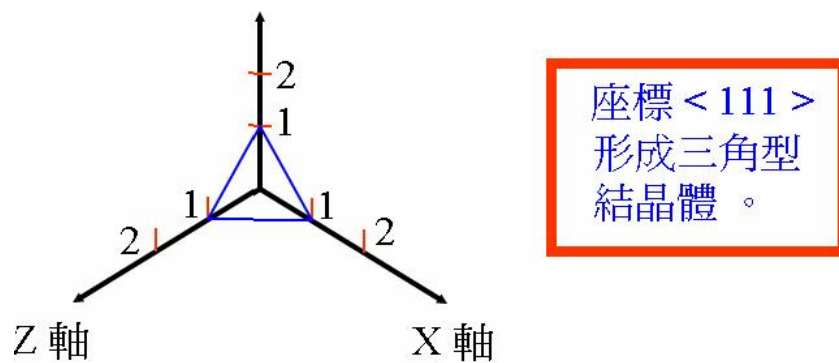


圖 13.1 單晶矽 $\langle 111 \rangle$ 結晶的座標

13.2 單晶矽 $\langle 100 \rangle$ 結晶的座標

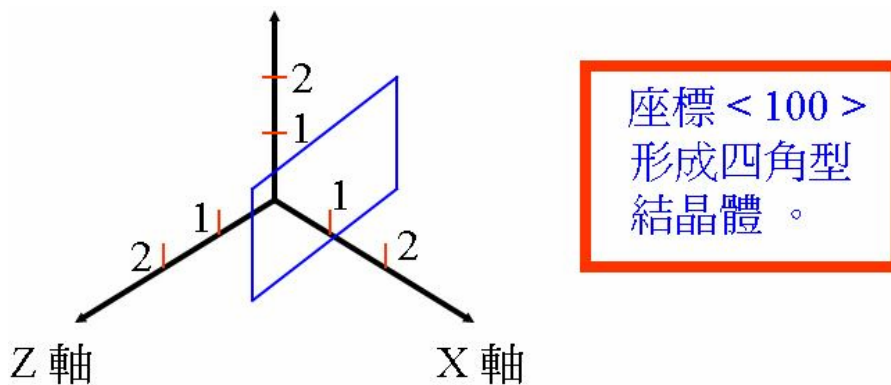


圖 13.2 單晶矽 $\langle 100 \rangle$ 結晶的座標

13.3 長晶摻雜分佈係數

成長矽晶棒之製程期間，結晶體摻雜元素的濃度分佈狀態依賴

二項因素：

- (1) 摻雜元素的型式。
- (2) 摻雜元素的濃度。

分佈係數 K (如表 13.1 所示) 決定摻雜元素的固態相濃度與摻雜元素的液態相濃度之比例數值。

摻雜元素分佈係數 (K) = C_s / C_l 。

C_s = 摻雜元素的固態相濃度。

C_l = 摻雜元素的液態相濃度。

表 13.1 矽晶體之常用摻雜元素分佈係數表

摻雜元素	分佈係數 (K)	摻雜型式
磷	0.32	N 型
砷	0.27	N 型
銻	0.02	N 型
硼	0.72	P 型
鋁	1.8×10^{-3}	P 型
鎵	9.2×10^{-3}	P 型
銦	3.6×10^{-4}	P 型

第十四章 本質半導體摻入其它元素

14.1 純矽晶體添加五價磷元素

一塊矽晶片添加濃度 $10^{15} \text{ Atoms / cm}^3$ 五價磷元素，計算 N_A 、 N_D 、 n 、 p 及 ρ 之數值？

解算步驟如下述：

(1) 計算 N_A 之數值？

$$N_A = 0 \text{ 。}$$

(2) 計算 N_D 之數值？

$$N_D = 10^{15} / \text{cm}^3 \text{ 。}$$

(3) 計算 n 之數值？

$$n = N_D = 10^{15} / \text{cm}^3 \text{ 。}$$

(4) 計算 p 之數值？

$$p = n_i^2 / n = (2 \times 10^{20}) / 10^{15} = 2 \times 10^5 / \text{cm}^3 \text{ 。}$$

(5) ρ 之數值？

查詢 n 型載子摻雜濃度對應電阻阻值曲線表（圖 14.1）

得知 $\rho = 5 (\Omega - \text{cm})$ 。

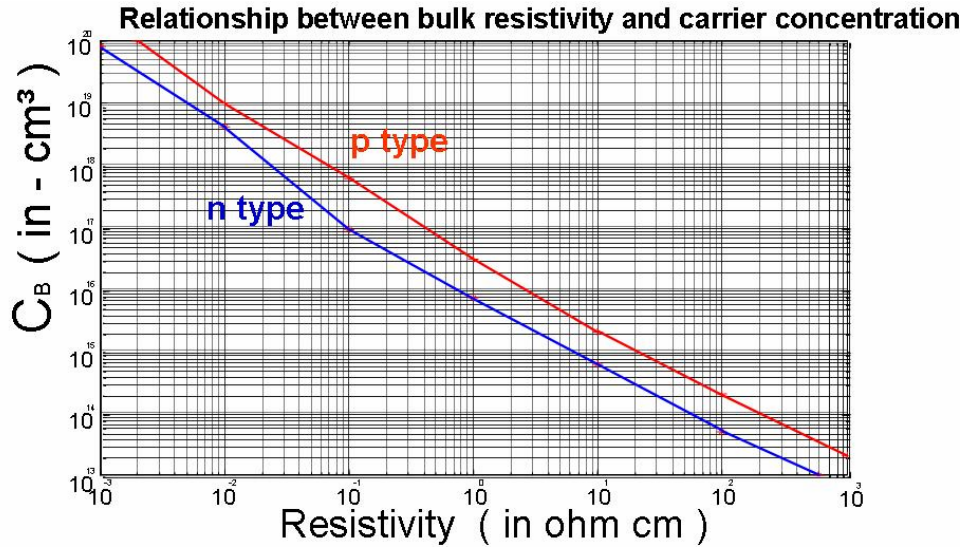


圖 14.1 電阻阻值對應摻雜濃度曲線表

14.2 純矽晶體添加三價硼元素

一塊矽晶片添加濃度 $2 \times 10^{16} \text{ Atoms / cm}^3$ 三價硼元素，計算 N_A 、 N_D 、 n 、 p 及 ρ 之數值？

解算步驟如下述：

(1) 計算 N_A 之數值？

$$N_A = 2 \times 10^{16} / \text{cm}^3 \text{。}$$

(2) 計算 N_D 之數值？

$$N_D = 0 \text{。}$$

(3) 計算 p 之數值？

$$P = N_A = 2 \times 10^{16} / \text{cm}^3 \text{。}$$

(4) 計算 n 之數值？

$$n = n_i^2 / p = (2 \times 10^{20}) / 2 \times 10^{16} = 10^4 / \text{cm}^3 \text{。}$$

(5) ρ 之數值？

查詢 p 型載子摻雜濃度對應電阻阻值曲線表 (圖 14.1)

得知 $\rho = 1 (\Omega - \text{cm})$ 。

15.3 純矽晶體添加三價硼元素及五價砷元素

一塊矽晶片添加濃度 $5 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3$ 三價硼元素及 $3 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3$ 五價砷元素，計算 N_A 、 N_D 、 n 及 p 之數值？

解算步驟如下述：

(1) 計算 N_A 及 N_D 之數值？

已知添加受體濃度(N_A) $5 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3$ 及施體濃度(N_D) $3 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3$ ，受體及施體互相抵消，剩餘之主載子為受體，其濃度如下：

$$\begin{aligned} \text{剩餘之主載子} &= p = N_A \\ &= (5 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3) - (3 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3) \\ &= 2 \times 10^{17} \text{ Atoms} / \text{cm}^3 \text{。} \end{aligned}$$

(2) 計算 N_D 之數值？

$$N_D = 0 \text{。}$$

(3) 計算 n 之數值？

$$n = n_i^2 / p = (2 \times 10^{20}) / 2 \times 10^{17} = 10^3 / \text{cm}^3$$

第十五章 計算矽晶片電阻值

15.1 矽晶片電阻值

一塊矽晶片長度 100μ 、寬度 5μ 、高度 2μ ，電阻率 (ρ)

$2 \Omega - \text{cm}$ ，計算其電阻值為若干歐姆？

解算步驟如下述：

$$L = 100 \mu \quad W = 5 \mu \quad H = 2 \mu \quad \rho = 2 \Omega - \text{cm}$$

$$\begin{aligned} R &= \rho L / A = (2 \Omega - \text{cm} \times 100 \mu) / (5 \mu \times 2 \mu) \\ &= 200 \text{ K}\Omega \end{aligned}$$

第十六章 結晶沉積法製程

16.1 結晶附著沉積法

沉積一薄層的矽單晶結晶物質在基材(矽晶圓)的表面。

結晶附著沉積法應用於製作二極體、發光二極體、電晶體及積體電路等元件。

使用結晶附著沉積法製作的二極體、發光二極體 及電晶體等元

件，具有高開關切換速度、高崩潰電壓、高負載電流的特性。
使用高摻雜濃度晶圓為基材製作的二極體 元件，具有 低阻抗、
高負載電流、低逆向崩潰電壓的特性。

在基材表面沉積一薄層與基材同型的低摻雜濃度的矽單晶
結晶物質，可提高逆向崩潰電壓。電晶體的製程亦與二極體 相
似，它使用高摻雜濃度晶圓為基材，當作集極，在集極表面，沉
積一薄層與基材同型的低摻雜濃度的矽單晶結晶物質，可提高
集極與基極的逆向崩潰電壓。

積體電路的製程，它使用低摻雜濃度的 P 型晶圓為基材，
在基材表面，沉積一薄層與基材不同型，具低摻雜濃度的矽單
晶結晶物質，增加基材內元件之間的絕緣電阻值。

16.2 結晶附著沉積作用的理論

下列兩項條件必須滿足，才會啟動結晶附著沉積的作用。

- (1). 必須有可利用的區域 (Site) 供沉積原子消耗額外的能
量，使沉積原子變成矽結晶基材稱之為晶核過程區域。
晶核過程區域 (Nucleation Site) 影響開始薄膜生長
的速度及穩態薄膜生長率。
- (2). 沉積原子必須進入基材的晶格 (Lattice) 位置，結合成為
一體。在將基材 (矽晶圓) 置入結晶附著沉積反應器之前，

必須用蝕刻劑 (Etchant) 清洗基材的表面其蝕刻厚度大約為 0.25μ 至 1μ 之間。

常用的蝕刻劑如下述：

- (1). 氫氟酸 (Hydrofluoric) 和硝酸 (Nitric Acid) 的混合物。
- (2). 氯化氫氣體 (Hydrochloric Gas)，濃度 1 % 至 4 % 的 HCl 與氫氣混合可達到近乎線性的蝕刻率。

16.3 單晶矽結晶沉積方法

16.3.1 真空沉積法

1. 真空蒸氣壓力範圍 20 torr 至 1000 torr。
2. 工作溫度 負 30°C 至正 70°C 。
3. 低沉積率，不易獲得高品質的單晶矽結晶。

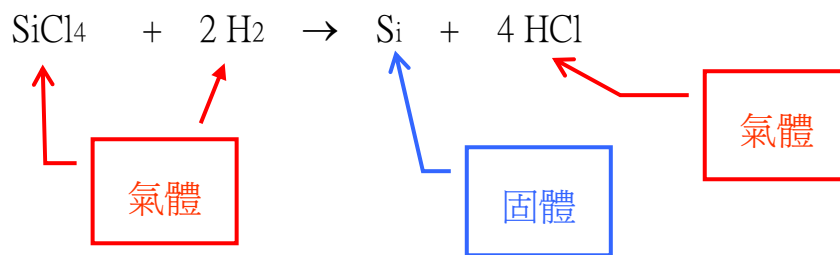
16.3.2 蒸氣生長沉積法

1. 四氯化矽 (Silicon Tetrachloride)
2. 四氫化矽 (Silicon Tetrahydrogen)
3. 三氯氫化矽 (Si H Cl_3)
4. 二氯氫化矽 ($\text{Si H}_2 \text{ Cl}_2$)
5. 四氯化矽與四氫化矽是最常用於蒸氣生長沉積製程的化

學品，它可產生低摻雜濃度的單晶矽結晶物質。

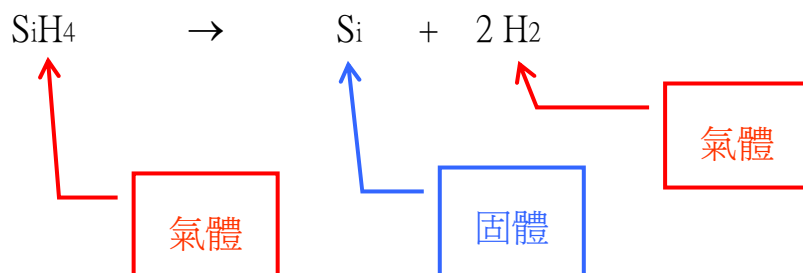
6. 四氯化矽的製程溫度是正 1150 °C 至正 1300°C，它與氫氣混合反應，可產生高品質的低摻雜濃度的單晶矽結晶物質。

7. 四氯化矽製程的化學反應式：



16.3.3 氫化矽 (Silane) 裂解沉積法

1. 氫化矽氣體與空氣接觸會自燃，它必須經由氫氣稀釋後儲存於鋼瓶。
2. 氫化矽在反應器中的工作溫度 為正 1000°C 至正 1100°C。
3. 氫化矽的生長率與工作溫度是函數關係，與溫度呈正比。
4. 氫化矽製程的化學反應式：



16.4 磊晶生長沉積的製程

16.4.1. 清洗晶圓

使用酸洗法清洗晶圓，清洗晶圓常用化學品如下述。

- (1). 硫酸 [Sulfuric Acid ; H_2SO_4]
- (2). 硝酸 [Nitric Acid ; HNO_3]
- (3). 鹽酸 [Hydrochloric Acid ; HCl]
- (4). 氫氟酸 [Hydrofluoric ; HF]

晶圓清洗完畢，置入磊晶反應器。

16.4.2. 預熱

- (1) 反應器灌入氮氣，將雜質氣體排出反應器。
- (2) 反應器加熱至 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 。
- (3) 溫度達到 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 再灌入氮氣，一會兒關閉氮氣，換氫氣。

16.4.3. 鹽酸蝕刻

- (1) 反應器加熱至工作溫度。
- (2) 使用鹽酸 (HCl) 清洗晶圓，消除晶圓表面的雜質微粒及缺陷。

16.4.4. 沉積

從主氣流（氫氣）添加需要摻雜的雜質元素（磷氣或硼氣）磊晶層的摻雜濃度是摻雜物原子與矽原子比例的函數。

16.4.5. 冷卻

磊晶層沉積完畢，關閉摻雜元素氣體，保持主氣流（氫氣）並降低反應器溫度至 500 °C，將氫氣換成氮氣，繼續完成降溫程序。

第十七章 磊晶沉積設備

17.1 磊晶反應器設備

磊晶反應器的外罩係由石英（Quartz）製成，型狀共計四種。

- (1) 鐘型（Bell Jar）。
- (2) 管狀型（Horizontal Tube）。
- (3) 柱型（Cylinder Tube）。
- (4) 旋轉木馬型（Carousel）。

磊晶反應器內部放置由石墨（Graphite）製成，表面塗佈一層碳化矽（Silicon Carbide）的晶圓吸附座，其表面設有一些細孔

與抽真空管線系統連接，可將晶圓緊密吸附。

石墨製成的晶圓吸附座，設計當作品圓的加熱器，利用射頻能源產生的磁場，將晶圓加熱至符合製程的工作溫度。

另外一種加熱方法是使用紫外線能源（Ultraviolet Energy；紫外線燈泡），輻射的紫外線熱能照射晶圓，將晶圓加熱至需求的工作溫度。

17.2 磊晶沉積層的重要參數

磊晶沉積層的三個重要參數如下：

1. 磊晶沉積層厚度及厚度變量。
2. 摻雜元素之濃度及濃度變量。
3. 磊晶沉積層中，不良磊晶的分佈及密度。

第十八章 測試磊晶層厚度的方法

18.1. 凹槽染色法（Angle Lap and Strain）

在晶圓表面磨一道凹槽，用染色劑染色，P 型及 N 型材料會顯示不同深度的顏色，使用單色光源覆蓋一片玻璃以產生干涉條紋藉以測量接合面的深度。

接合面深度與干涉條紋的關係如下列公式。

(1) $D = \text{接合面深度} = (\lambda n / 2)$ 。

(2) $\lambda = \text{單色光源的波長}$ 。

(3) $n = \text{干涉條紋的數量}$ 。

18.2. 凹槽深度測量法

磊晶層與晶圓的介面之間會存在不良的磊晶結晶物，它會沿著晶圓的結晶軸方向生長，傳佈到磊晶層表面，在磊晶表面形成一道凹槽。

凹槽深度如下列公式。

$$D = \text{磊晶表面凹槽深度} = 0.816 \times \text{凹槽長度}。$$

18.3. 紅外線干涉條紋測量法

磊晶層與晶圓的邊界之間會產生一個光線折射面，使用一已知波長之紅外線所產生之折射光，可檢測磊晶沉積層的厚度。

第十九章 測試磊晶層的摻雜濃度

19.1. 切片法

測試切片的表面層之電阻值，可藉以計算摻雜元素之濃度。

19.2. 逆向偏壓法

在磊晶層表面沉積一層金屬使其形成一只蕭克萊障壁二極體，對蕭克萊障壁二極體施以逆向偏壓，使其成爲一個等效電容器，再使用儀器測試繪製電容值對應電壓的曲線，可藉以計算摻雜元素之濃度。

19.3. 凹槽及展佈探針法

在晶圓表面研磨一道凹槽，使用極細小的探針，直接測量晶圓及磊晶層的電阻值，然後計算摻雜雜質元素的濃度。

第二十章 二氧化矽製程

晶圓表面有一層由二氧化矽沉積的保護層，共計有三種二氧化矽製程。

1. 氣泡法 (Bubble)。
2. 熱氫法 (Burnt Hydrogen)。
3. 閃光法 (Flash System)。

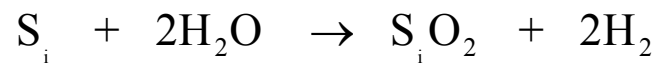
製造二氧化矽的製程參數：

1. 溫度：900 °C 至 1300 °C。
2. 壓力：大氣壓力。

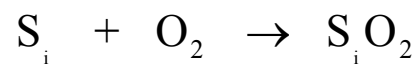
3. 材料：水蒸氣或氧氣。

20.1. 二氧化矽的化學反應式

1. 矽 + 水蒸氣 → 二氧化矽 + 氫氣



2. 矽 + 氧氣 → 二氧化矽



20.2. 二氧化矽的顏色

二氧化矽（Silicon Dioxide）在白色燈光照射之下，依其厚度不同呈現不相同顏色，如表 20.1 所示。

表 20.1 二氧化矽顏色表

二氧化矽厚度 (micro)	顏色
0.05	褐色
0.1	紫至紅紫
0.15	淺藍色

0.2	淺金至黃
0.3	藍至紫藍
0.39	黃 色
0.502	藍至綠色
0.6	粉 紅 色
0.72	藍綠至綠
0.8	橘 色
0.92	藍 綠 色
1.0	粉 紅 色
1.1	綠 色
1.2	紫至紅色
1.32	藍至綠藍
1.4	橘 色
1.5	藍 色

20.3. 二氧化矽電介質

兩項重要的參數決定二氧化矽的電介質品質：

1. 二氧化矽層的崩潰強度。
2. 二氧化矽層中，在某一電壓數值之下，其內含漂移污染物質的總量。

20.3.1. 二氧化矽層崩潰電壓強度的測試法

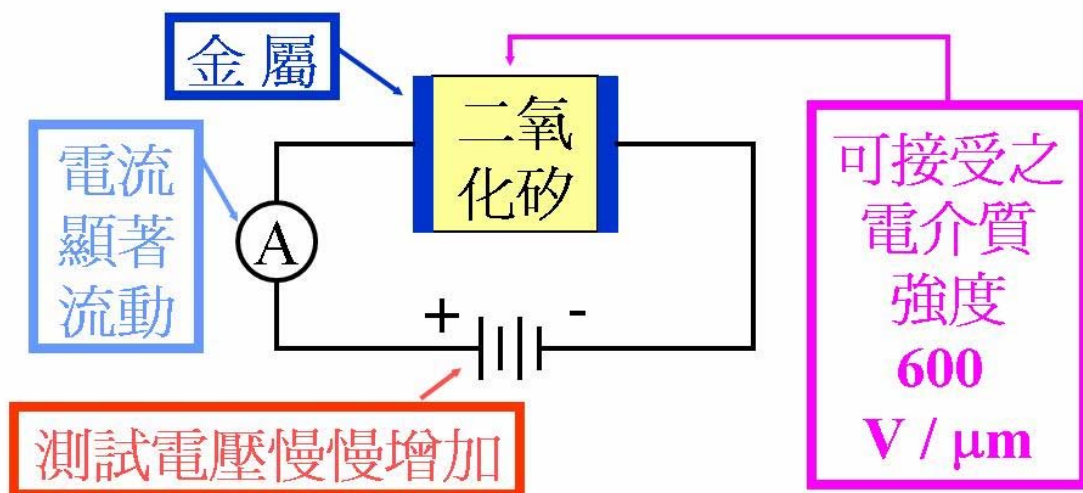


圖 20.1 二氧化矽層崩潰電壓強度的測試法

20.3.2 二氧化矽層中漂移污染物質總量的測試法

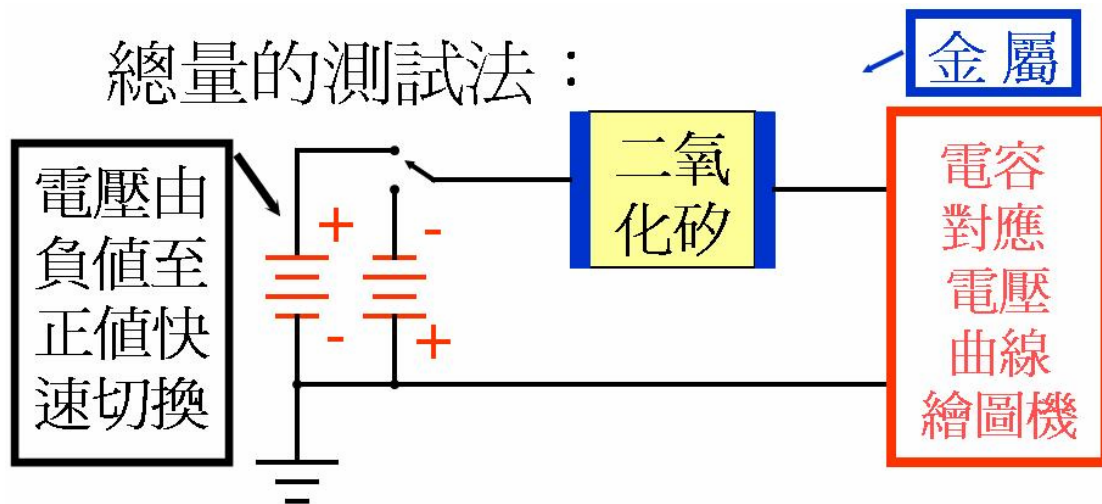


圖 20.2 二氧化矽層中漂移污染物質總量的測試法

第二十一章 摻雜元素擴散原理

21.1. 摻雜雜質元素的擴散物理現象

擴散物理現象，區分為三階段。

1. 初始時間：

摻雜的雜質元素的濃度在中心點 最高。

2. 開始擴散：

摻雜的雜質元素由中心點向兩邊開始擴散。

3. 最終時間：

經過很長的時間，摻雜的雜質元素平均擴散在矽晶片的內部（晶格）。

21.2. 摻雜元素擴散速率

雜質元素的擴散速率依賴石英爐管的製程溫度，因為雜質元素的原子微粒，在高溫時其飄移速度比較快，查飄移速度對應溫度曲線表可得知其對應的數據。

21.3. 半導體元件擴散製程

半導體元件製程，需要對晶片表面的特定區域作摻雜雜質元素的製程，使用擴散法控制一定數量的雜質元素進入晶片表面的某些特定區域。

兩種擴散製程，說明如下述：

1. 預先沉積法 (Pre-deposition)。
2. 推入擴散法 (Drive-in Diffusion)。

21.3.1. 預先沉積法 (Pre-deposition)

將晶片置於石英爐管中，溫度設定範圍 800 °C 至 1200 °C，加入高濃度的摻雜雜質元素使其進入晶片的表面晶格中。參閱固態摻雜雜質元素溶解度對應爐管溫度的曲線表，如圖 21.1 所示 [xx]，以矽晶片為基材，磷的最佳固

態溶解度是 1000 °C，硼的最佳固態溶解度是 1200 °C。

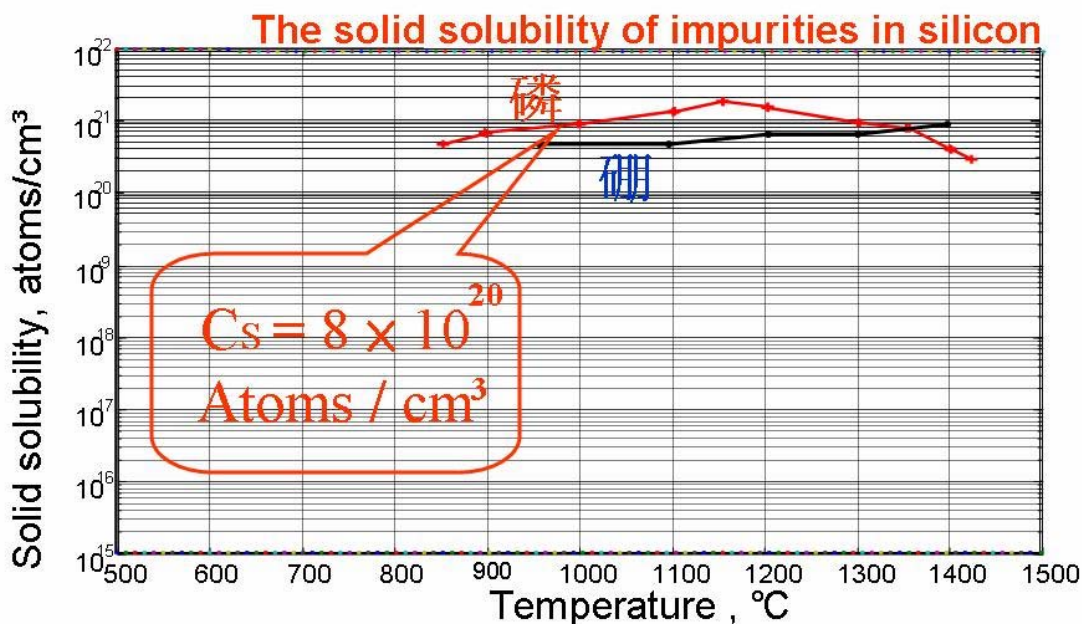


圖 21.1 固態摻雜雜質元素溶解度對應爐管溫度的曲線表

摻雜雜質元素的型態，共計三種，(1) 固態雜質元素、(2) 液態雜質元素、(3) 氣態雜質元素。

(1) 固態雜質元素：

呈粉末狀含飽和濃度的雜質元素需加溫並經由氮氣輸入石英爐管中，另外需輸入氧氣使其產生氧化作用。

(2) 液態雜質元素：

用容器盛裝，吹入氮氣使其產生氣泡，此氣泡變成含飽和雜質元素的氣泡然後輸入石英爐管中，另外需輸入氧氣使其產生氧化作用

(3) 氣態雜質元素：

具毒性，其化學性較不穩定，必須小心存放，若存放不妥會分解產生危害，製程中較難獲得最大飽和濃度的雜質元素，另外亦需輸入氧氣使其產生氧化作用。

21.3.2. 推入擴散法 (Drive-in Diffusion)

其作用等於熱處理，將作完預先沉積法的晶片放置於高溫之石英爐管中，輸入氧氣使晶片的表面氧化產生一層二氧化矽保護層。此二氧化矽保護層防止石英爐管中的飽和雜質元素繼續對晶片表面進行摻雜擴散作用，同時使已經進入晶片表面的摻雜雜質元素能更深入晶片內部。溫度、氣體、時間三項參數決定下列製程結果：

- (1) 元件最終的接合面擴散深度。
- (2) 覆蓋在晶片表面的二氧化矽保護層的厚度。
- (3) 元件中包含的摻雜雜質元素最終縱剖面結構的分佈狀態。

第二十二章 離子佈植原理

22.1. 離子佈植原理

1. 使用 20 KV 的電磁聚焦線圈將氣態離子源 (Gaseous Ion Source) 產生的離子聚焦，成為離子束 再經 180 KV 的加速器，將離子束加速。
2. 離子束經由中性束補捉器 (Neutral Beam Trap)，保留需要的離子，只將中性束導引至中性束閘門 (Neutral Beam Path Gate)，同時離子束經由偏向線圈將需要的離子束 偏向。
3. 偏向離子束再經 X 軸掃瞄器使離子束掃瞄撞擊晶片表面，施加於離子束的 180 KV 加速器的能量，決定離子植入晶片表面的深度。
4. 離子佈植完畢，晶片需置入高溫石英爐管中加熱，使植入晶片中的離子活化與晶格鍵結。

22.2. 離子佈植機的可控制參數

兩項離子佈植機的可控制參數，如下述：

- (1) 離子的劑量。

(2) 每單位晶片面積，到達的離子數量。

22.3. 離子佈植機應用領域

離子佈植機能精準的控制摻雜的離子濃度及植入晶片的深度，它常應用於場效應電晶體元件的啓始電壓製程及高精密電阻器製程。

參考文獻

- [1] J. Czochralski, “Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle”, Z. phys. Chemie 92 (1918) p.219 - 221.
- [2] Z. Galazka, D. Schwabe, H. Wilke, “Influence of internal radiation on the heat transfer during growth of YAG single crystals by the Czochralski method”, Cryst. Res. Technol. **38**, No. 10, (2003) P.859 - 867.
- [3] G.K. Teal and J.B. Little , “ Growth of Germanium Single Crystals ” ,Phys. Rev.,78 (1950) p.647.
- [4] G.K. Teal , “Single Crystals of Germanium and Silicon-Basic to the Transistor and Integrated Circuit” , IEEE Transactions on electron devices , Vol. ED-23, No.7, July 1976 p.624 - 639.
- [5] Ben G.Streetman . Solid State Electronic devices Second Edition. Prentice-Hall INC., 1980.
- [6] S.M.SZE .VLSI Technology. McGraw-Hill Book Company , July 1983.
- [7] Czochralski process from Wikipedia, the free encyclopedia. The Wikimedia Foundation, Inc.
- [8] Semiconductor and Integrated Circuit Fabrication Techniques, Fairchild Corporation, 1979, p.28 - 29.

(恆星科學圖書出版社總經銷。)

作者學經歷簡介：

1. 健行工專，電子工程科 (二專) 畢業。
2. 清雲科技大學，電機工程學系，工學學士。
3. 交通大學，管理學院科技管理研究所，碩士學分班結業。
4. 中原大學，電資學院電子工程研究所，工學碩士。
5. 台灣美商通用電子公司技術員。
6. 台灣美商 RCA 電子公司技術員。
7. 新竹科學園區大王電子公司半導體研發工程師。
8. 中山科學研究院資訊通信研究所技術員。
9. 行政院公共工程委員會，公共工程評審委員。
10. 行政院勞工委員會，職業訓練局桃園職業訓練中心，外聘講師。

