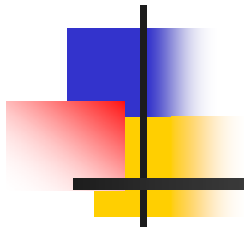


半導體單晶矽棒材料及製程



作者：蘇漢儒



單晶矽棒化學反應式

- 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。



單晶矽棒化學反應式

- 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** (CO₂) ，排出
坩鍋，留下**純矽** (Silicon) 。
- 化學式 $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightleftharpoons \text{Si} + \text{CO}_2$



單晶矽棒化學反應式

- 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 (Si HCL_3) ，剩下的*氫氣* (Hydrogen) 排出*坩鍋*。



單晶矽棒化學反應式

- 反覆精煉製程，化學反應式：





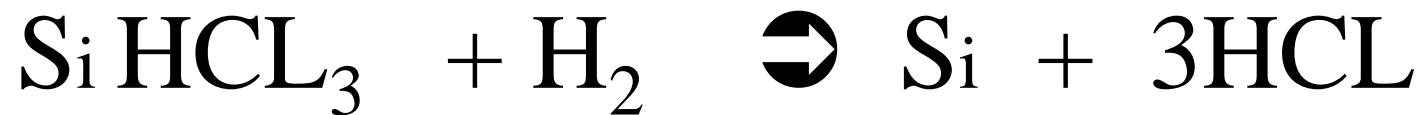
單晶矽棒化學反應式

- *坩鍋* 中留下之 *三氯氫化矽* 添加 *氫氣*，反應變成 *純矽* 及 *三氯化氫*。



單晶矽棒化學反應式

- 反覆精煉製程，化學反應式：

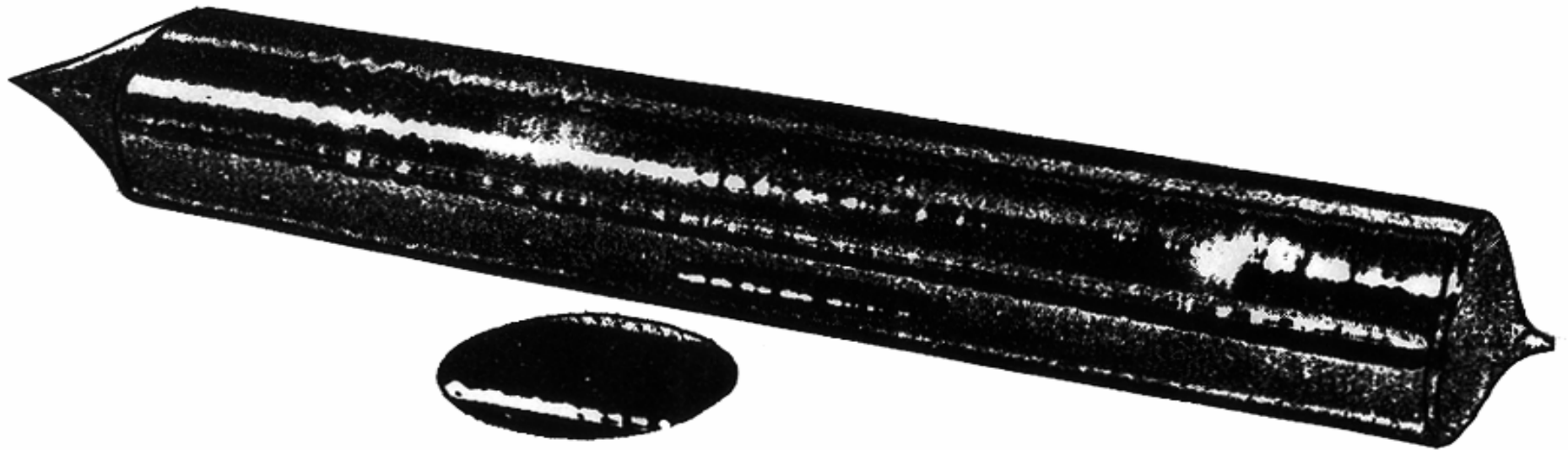




單晶矽棒化學反應式

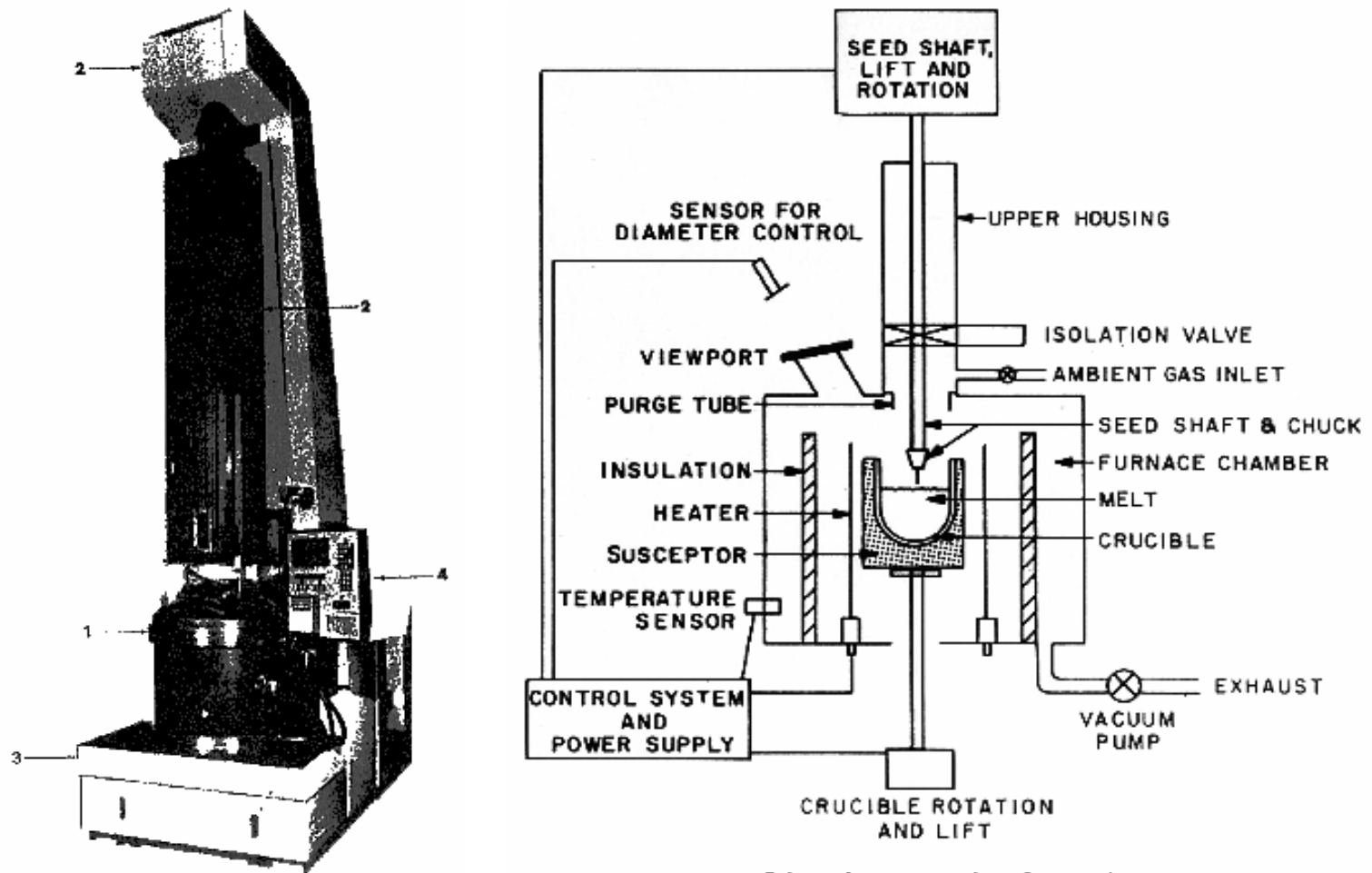
- 經過精煉製程，獲得之*純矽*屬四族之元素，可提供製作半導體單晶矽棒的原料。

5 英寸直徑單晶矽棒



Silicon crystal grown by the Czochralski method. This large single crystal, weighing 20 kg, provides 12.5-cm(5-in.)-diameter wafers such as the one shown here. For size comparison, the ingot and wafer are shown here alongside a meter stick. (Photograph courtesy of Monsanto Company.)

拉單晶矽棒設備 (Czochralski Method Grower)



Schematic representation of a crystal grower.

半導體材料（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 |



半導體材料（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 | | | |
| 鎵 Gallium(Ga) | 31 | 2 | 8 | 18 | 3 | |
| 銦 Indium (In) | 49 | 2 | 8 | 18 | 18 | 3 |

半導體材料（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 | |



半導體材料（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 |



半導體材料（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 |



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) 。



三五族半導體元件

- 光偵檢器 (Light Detector) :
 銾 (Indium) + 銻 (Antimony)
- 雷射半導體
 (Semiconductor Lasers) :
 鎵 (Gallium) + 砷 (Arsenic) 。



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) ◦



二六族半導體元件

- 電視螢光幕：
(Television Screen)。
鋅 (Zinc) + 硫磺 (Sulfur)。
- 光偵檢器 (Light Detector)：
鎘 (Cadmium) + 硒 (Selenium)。

材料的電阻值

| 材料名稱 | 歐姆 / 立方公分 | 類別 |
|------|--------------------------|-----|
| 銀 | 10^{-6} | 導體 |
| 鋁 | 10^{-5} | 導體 |
| 鍺 | 50 ~ 60 | 半導體 |
| 矽 | 50 k ~ 60 k | 半導體 |
| 雲母 | $10^{-12} \sim 10^{-13}$ | 絕緣體 |
| 聚乙稀 | $10^{-15} \sim 10^{-16}$ | 絕緣體 |



鍺及矽的物理特性

- 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**。



鍺及矽的物理特性

- 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 eV = 一電子伏特**
= 1.6×10^{-19} 焦耳 (Joules)

鍺及矽的物理特性

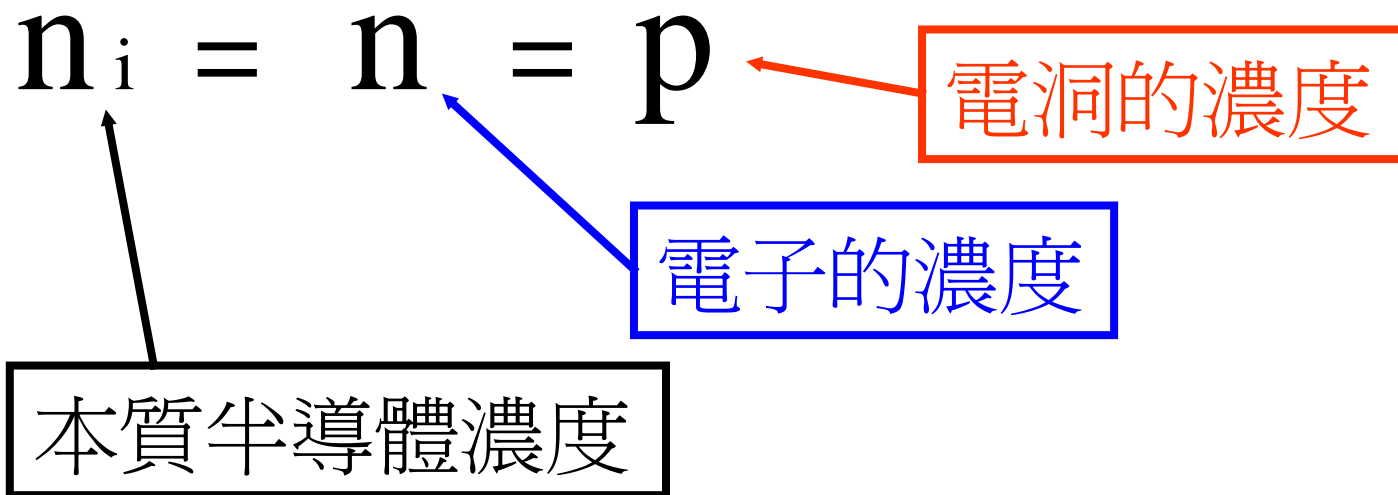
- 本質半導體 (Intrinsic Semiconductor) 的自由電子及電洞的數量是相同。

$$n_i = n = p$$

本質半導體濃度

電子的濃度

電洞的濃度





鍺及矽的物理特性

- 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 。
- 質量動作定律：

$$n_i^2 = n p$$



鍺及矽的物理特性

■ N_D = 施體離子 (Donor Ions) m^3

總正電荷密度 = $N_D + p$ ◦

■ N_A = 受體離子 (Acceptor Ions) m^3

總負電荷密度 = $N_A + n$ ◦



鍺及矽的物理特性

- 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。

$$N_D + p = N_A + n$$



N型半導體材料

- 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 ($n = N_D$)。



P型半導體材料

- 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 ($P = N_A$)。



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）。



半導體的電流密度

- 半導體電流密度：

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

μ_n = 電子的移動率。

μ_p = 電洞的移動率。

σ = 導電率。



本質半導體的特性參數

| 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 $\times 10^{22}$ | 5 $\times 10^{22}$ |



本質半導體的特性參數

| 參數名稱 | 鍺 | 矽 |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|
| E_{Go} , eV 在 $0^\circ K$ | 0.785 | 1.21 |
| E_{Go} , eV 在 $300^\circ K$ | 0.72 | 1.1 |
| n_i 在 $300^\circ K$, cm^{-3} | 2.5×10^{13} | 1.5×10^{10} |
| 電阻值在 $300^\circ K$, Ω /cm | 45 | 230K |



本質半導體的特性參數

| 參數名稱 | 鍺 | 矽 |
|---|------|------|
| μ_n , $\text{cm}^2 / \text{v-s}$ 在 300°K | 3800 | 1300 |
| μ_p , $\text{cm}^2 / \text{v-s}$ 在 300°K | 1800 | 500 |
| D_n , $\text{cm}^2 / \text{s} = \mu_n V_T$ | 99 | 34 |
| D_p , $\text{cm}^2 / \text{s} = \mu_p V_T$ | 47 | 13 |

驗證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：查表如下
 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 。

驗證矽本質半導體原子的濃度

■ 3. Avogadro's Number

= **6.02** $\times 10^{23}$ Molecules Per Mole

4. 矽本質半導體原子的濃度

= **6.02** $\times 10^{23}$ (Atoms / Mole) \times
(Mole / **28.1** Grams) \times **2.33**
(Grams / cm^3) \circ

驗證矽本質半導體原子的濃度

5. 矽本質半導體原子的濃度

$$= 4.99 \times 10^{22} \text{ (Atoms / cm}^3 \text{)}$$
$$\cong 5 \times 10^{22} \text{ (Atoms / cm}^3 \text{)}$$

與本質半導體的特性參數吻合



驗證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： 1. $n_i = n = p$

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



驗證矽本質半導體的電阻值

$$\begin{aligned} \blacksquare \text{ 3. } \sigma &= n_i q (\mu_n + \mu_p) \\ &= 1.5 \times 10^{10} \times 1.6 \times 10^{-19} \\ &\quad \times 1800 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &[(\text{cm}^{-3} \times \text{Coulomb} \times \text{cm}^2) / \text{v-s}] \\ &= 0.00000432 (\Omega - \text{cm})^{-1} \end{aligned}$$

驗證矽本質半導體的電阻值

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

5. 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



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：

$$1. \quad n_n \approx N_D = 5 \times 10^{12}$$

(Atoms / cm³)



驗證N型矽半導體的電阻值

- 2. $P_n = n_i^2 / N_D$
 $= (1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})^2 /$
 $5 \times 10^{12} \text{ (Atoms / cm}^3 \text{)}$
 $= 0.45 \times 10^8 \text{ (Holes / cm}^3 \text{)}$



驗證N型矽半導體的電阻值

- 3. $n_n \gg P_n$ 故可不計 P_n 的濃度來計算導電率。

$$\begin{aligned}\sigma &= n q \mu_n = 5 \times 10^{12} \times \\ &\quad 1.6 \times 10^{-19} \times 1300 \\ &= 0.00104 \text{ (}\Omega\text{-cm)}^{-1}\end{aligned}$$



驗證N型矽半導體的電阻值

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

- 5. 電阻值 = $\rho = 1 / \sigma$

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

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



驗證N型矽半導體的電阻值

- 6. 未加入雜質前的 $\rho_1 = 233 \text{ K } \Omega - \text{cm}$
加入雜質的 $\rho_2 = 961.5 \text{ } \Omega - \text{cm}$ 。

- 7. 導電率因數：

$$\begin{aligned}\sigma_2 / \sigma_1 &= 0.00104 / 0.00000432 \\ &= 242.3\end{aligned}$$

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



驗證矽本質半導體的導電率

- 計算半導體的導電率？

解：

1. 假設每一矽原子，其施體
供應一粒自由電子。

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

驗證矽本質半導體的導電率

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

■ 4. $\sigma = n_n q \mu_n = 5 \times 10^{22} \times$
 $1.6 \times 10^{-19} \times 1300$

[(Electrons / cm^3) \times Coulomb

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

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

驗證矽本質半導體的導電率

- 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

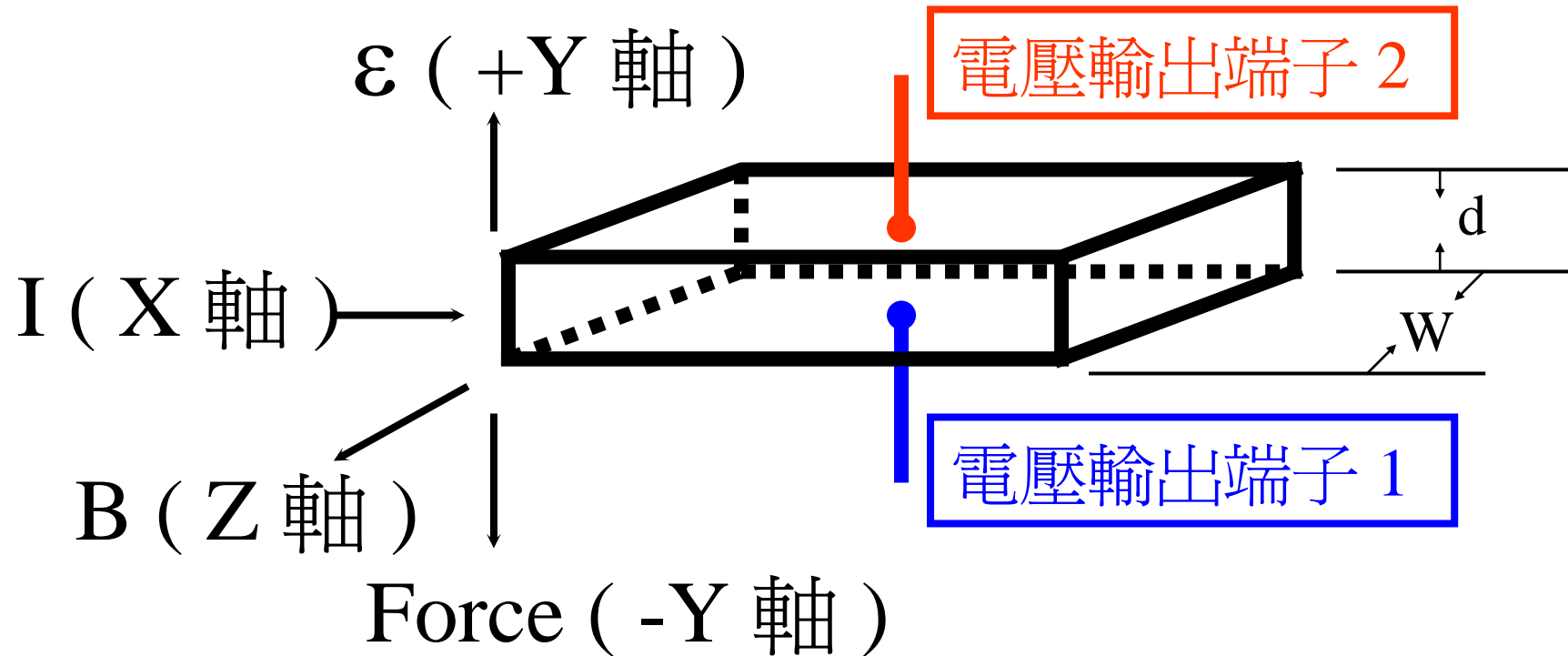


測試半導體材料之型式

- 藉由**霍爾效應** (Hall Effect) 之理論，可應用來測試半導體材料 (晶圓 ; Wafer) 之型式是 P 型晶圓或 N 型晶圓。

測試半導體材料之型式

- 霍爾效應 (Hall Effect) 。





測試半導體材料之型式

- 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*。



測試半導體材料之型式

- 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。



測試半導體材料之型式

- 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*。



測試半導體材料之型式

- 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**。



霍爾效應 (Hall Effect) 公式

- 電場強度作用力 = 磁場密度作用力， $(\epsilon q = B q v)$ 。
 - 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)



霍爾效應 (Hall Effect) 公式

- $V_H =$ 霍爾電壓 (Hall Voltage)
 $= \varepsilon d = B v d = B J d / \rho$
 $= BI / \rho W$ (伏特)
- $\rho =$ 電荷密度 (庫侖 / 立方公尺)
- $J =$ 電流密度 $= \rho v$
 $= I$ (安培) / $W d$ (平方公尺)



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



霍爾係數 (Hall Coefficient)

- R_H = 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。



半導體材料主載子之移動速率

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



半導體材料主載子之移動速率

- 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：

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



半導體材料主載子之移動速率

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



驗證矽半導體的擴散係數

- $D_n =$ 擴散係數
(Diffusion Coefficient)

$$= \frac{\bar{l}^2}{2 \bar{t}} = \frac{K T \mu_n}{q}$$

驗證矽半導體的擴散係數

- \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
= $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV / K}$ 。



驗證矽半導體的擴散係數

- $T = 300^{\circ} \text{K}$ (Kelvin 絕對溫度)
- $\mu_n =$ 主載子的之移動速率
($\text{cm}^2 / \text{v-s}$)
- $q =$ 主載子的電荷 = $1e$



驗證矽半導體的擴散係數

- $D_n = (K T \mu_n / q)$
 $= [(8.62 \times 10^{-5} \text{ eV} / ^\circ\text{K} \times 300^\circ\text{K} \times 1300 \text{ cm}^2 / \text{v-s}) / 1\text{e}]$
 $= 33.6 = 34 (\text{cm}^2 / \text{sec})$
- $K T / q = 0.026 \text{ Volt}$



驗證矽半導體的擴散係數

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

與本質半導體的特性參數吻合

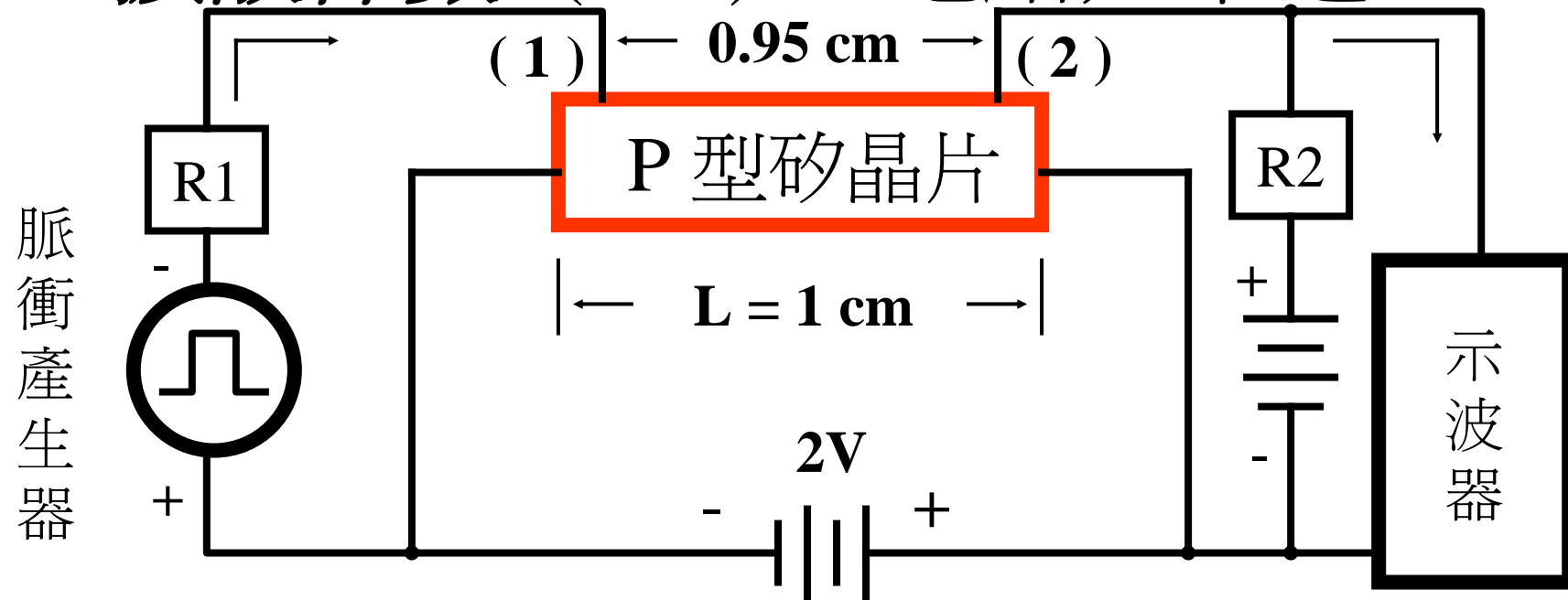


The Hayness – Shockley Experiment

- 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 。

The Hayness – Shockley Experiment

- 計算主載子的移動速率 (μ_n) 及擴散係數 (D_n)，電路如下述：





The Hayness – Shockley Experiment

- 計算步驟如下述：

1. $v = L / t$

$$= 0.95 \text{ cm} / 0.365 \text{ m sec}$$

$$= 2.6 (\text{ cm} / \text{ m sec})$$



The Hayness – Shockley Experiment

- 計算步驟如下述：

$$2. \mu_n = v / \varepsilon$$

$$= 2.6 (\text{cm} / \text{m sec}) / 2 (\text{v} / \text{cm})$$

$$= 1300 (\text{cm}^2 / \text{v-s})$$

與本質半導體的特性參數吻合

The Hayness – Shockley Experiment

- 計算步驟如下述：

$$\begin{aligned} 3. D_n &= (\Delta t L)^2 / 16 t^3 \\ &= \frac{(170 \mu \text{ sec} \times 0.95 \text{ cm})^2}{16 \times (0.365 \text{ m sec})^3} \\ &= 33.5 (\text{cm}^2 / \text{s}) = 34 (\text{cm}^2 / \text{sec}) \end{aligned}$$

與本質半導體的特性參數吻合

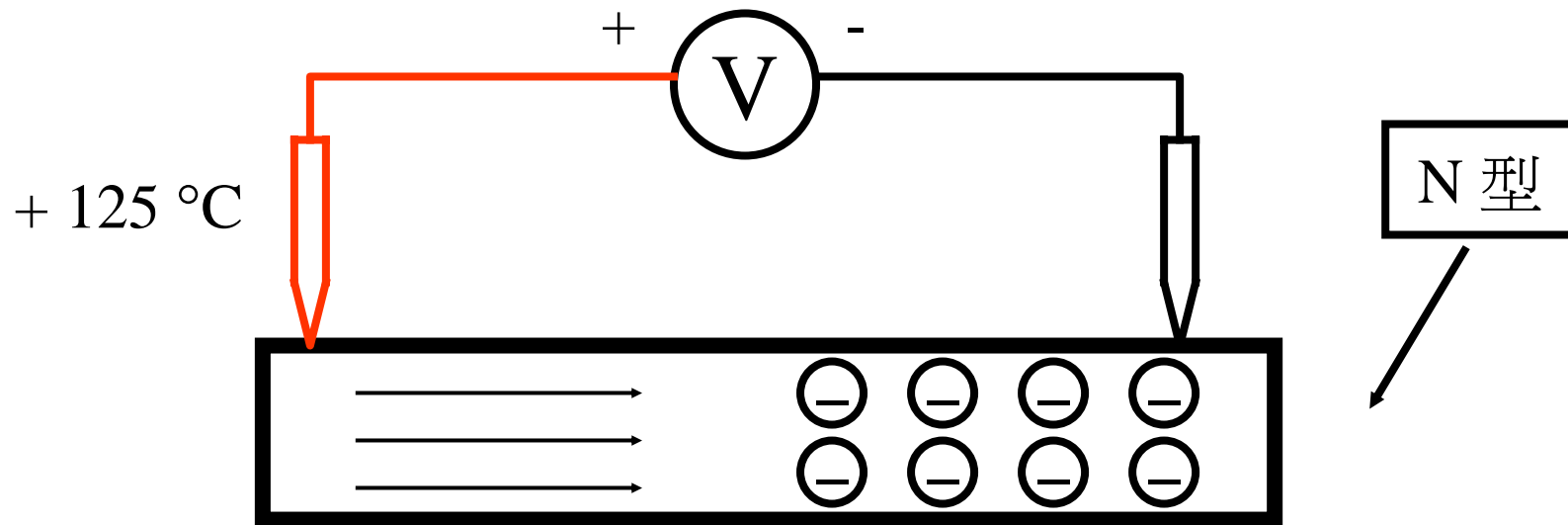


Majority Carrier Transport

- 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。

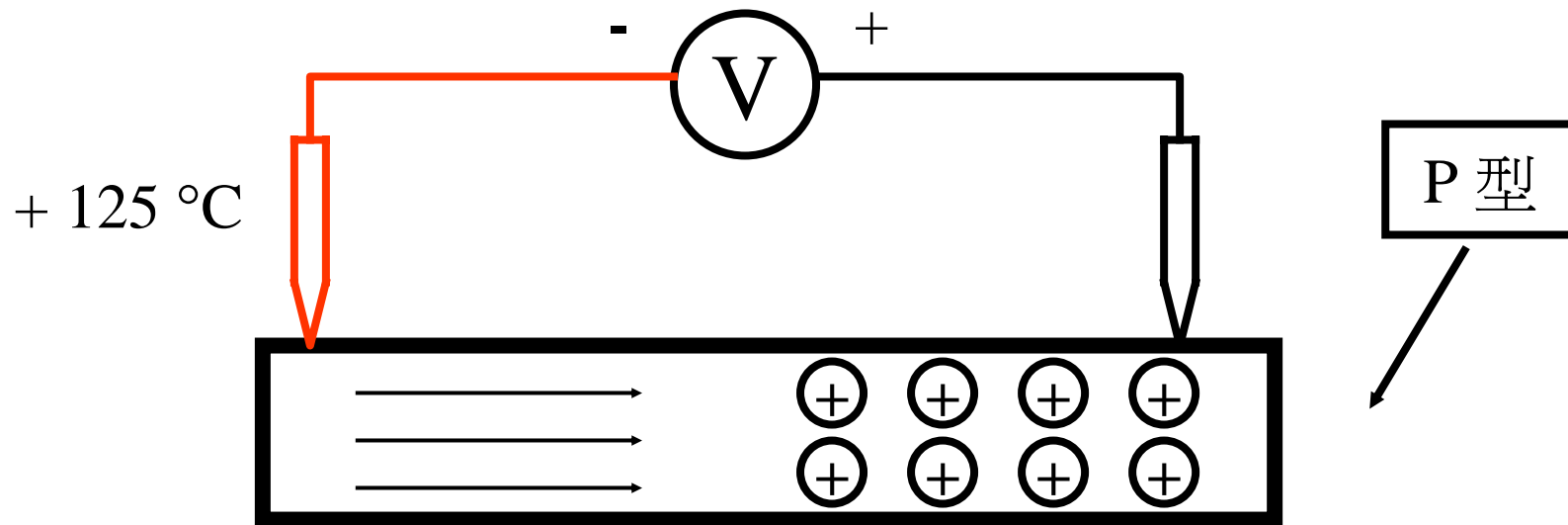
Majority Carrier Transport

- N 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法：



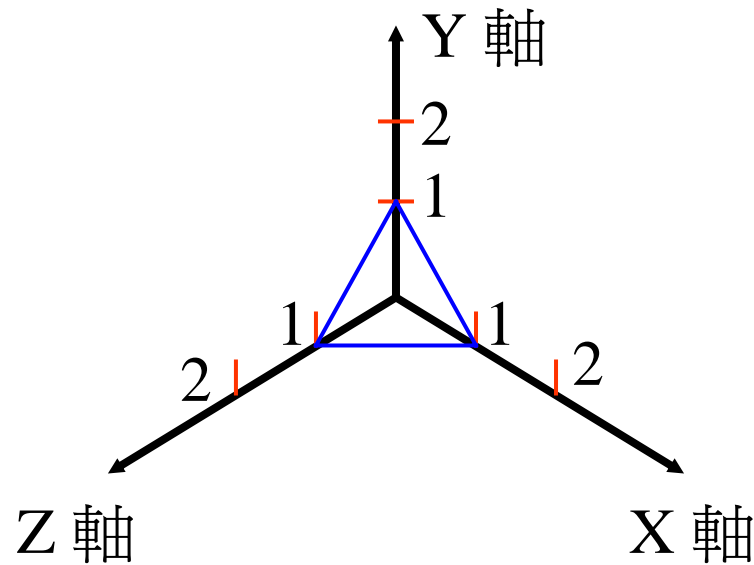
Majority Carrier Transport

- P 型半導體材料主載子的擴散移動方向測試方法：



Crystal Orientation

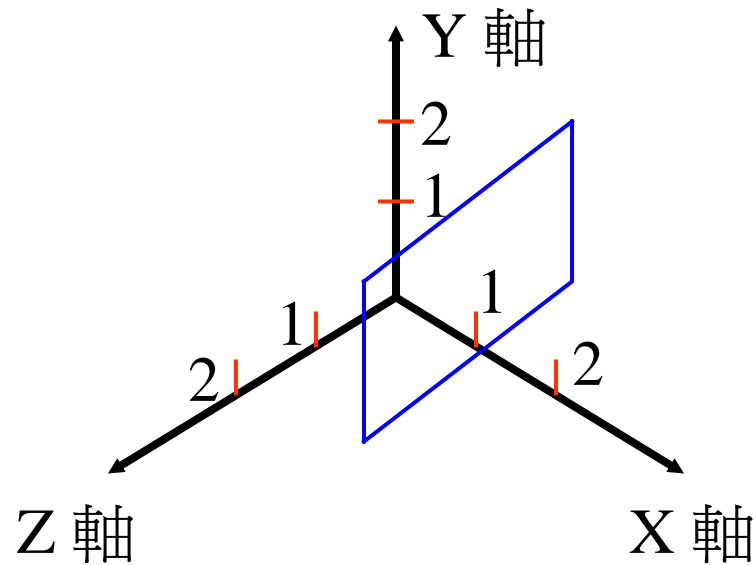
- 單晶矽結晶的座標： $\langle 111 \rangle$



座標 $\langle 111 \rangle$
形成三角型
結晶體。

Crystal Orientation

- 單晶矽結晶的座標： $\langle 100 \rangle$



座標 $\langle 100 \rangle$
形成四角型
結晶體。



Crystal Orientation

- 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。



矽晶片添加五價磷元素

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



矽晶片添加五價磷元素

- 計算 N_A 之數值？

$$N_A = 0 \text{。}$$

- 計算 N_D 之數值？

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



矽晶片添加五價磷元素

- 計算 n 之數值？

$$n = N_D = 10^{15} / \text{cm}^3。$$

- 計算 p 之數值？

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



矽晶片添加五價磷元素

- ρ 之數值？

查詢**載子濃度**對應**電阻值**

(ρ)

之圖表得知 $\rho = 5 \text{ (}\Omega\text{-cm)}$



矽晶片添加三價硼元素

- 一塊矽晶片添加濃度 2×10^{16} Atoms / cm³ 三價硼元素，計算 N_A 、 N_D 、 n 、 p 及 ρ 之數值？



矽晶片添加三價硼元素

- 計算 N_A 之數值？

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

- 計算 N_D 之數值？

$$N_D = 0 \circ$$



矽晶片添加三價硼元素

- 計算 p 之數值？

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

- 計算 n 之數值？

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



矽晶片添加三價硼元素

- ρ 之數值？

查詢**載子濃度**對應**電阻值**(ρ)

之圖表得知 $\rho = 1$ ($\Omega - \text{cm}$)

矽晶片添加三價硼元素及五價砷元素

- 一塊矽晶片添加濃度 5×10^{17} Atoms / cm³ 三價硼元素及 3×10^{17} Atoms / cm³ 五價砷元素，計算 N_A 、 N_D 、 n 及 p 之數值？

矽晶片添加三價硼元素及五價砷元素

■ 計算 NA 及 ND 之數值？

已知添加受體濃度 (NA) 5×10^{17}
Atoms / cm³ 及施體濃度 (ND) 3×10^{17}
Atoms / cm³，受體及施體互相抵消，
剩餘之主載子為受體，其濃度如下：
 $P = NA - ND = 2 \times 10^{17}$ Atoms / cm³。

矽晶片添加三價硼元素及五價砷元素

■ 計算 p 、 N_A 及 N_D 之數值？

$$P = N_A = 2 \times 10^{17} \text{ Atoms / cm}^3 \circ$$

$$N_D = 0 \circ$$

■ 計算 n 之數值？

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

計算矽晶片電阻值

■ 一塊矽晶片其長度為 $100\ \mu$ 、寬度為 $5\ \mu$ 、高度為 $2\ \mu$ ，計算其電阻值？

(解)： $L = 100\ \mu$ 、 $W = 5\ \mu$

$H = 2\ \mu$ 、 $\rho = 2\ \Omega\text{-cm}$

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

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 |



摻雜元素分佈係數

- 摻雜元素分佈係數 (K)

$$= C_s / C_l \circ$$

C_s = 摻雜元素的*固態相*濃度。

C_l = 摻雜元素的*液態相*濃度。

Epitaxial Deposition

- 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。

Epitaxial Deposition

- 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。

Epitaxial Deposition

- 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。

Epitaxial Deposition

- 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。

Epitaxial Deposition

- 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。

Epitaxial Deposition Theory

- 兩項條件必須滿足，才會啓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**。

Epitaxial Deposition Theory



- 兩項條件必須滿足，才會啓動

結晶附著沉積的作用：

(續 1) . 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* 。

Epitaxial Deposition Theory



- 兩項條件必須滿足，才會啓動結晶附著沉積的作用：
 2. 沉積原子必須進入基材的晶格 (Lattice) 位置，結合成爲一體。

Epitaxial Deposition Theory

- 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。

Common Silicon Etchant



- 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。



單晶矽結晶沉積方法

- 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。



單晶矽結晶沉積方法

- 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 (SiHCl_3)
4. 二氯氫化矽 (SiH_2Cl_2)



單晶矽結晶沉積方法

- 蒸氣生長沉積法：

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。



單晶矽結晶沉積方法

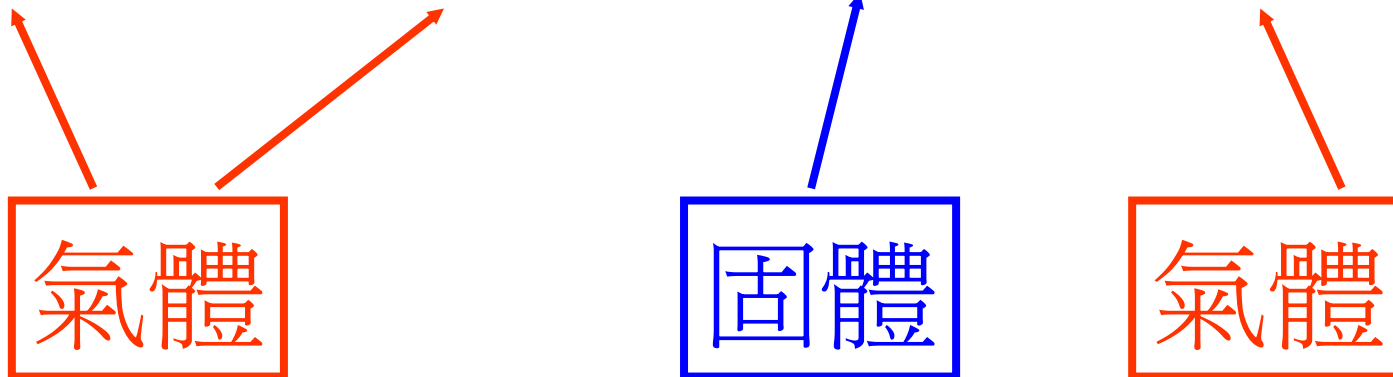
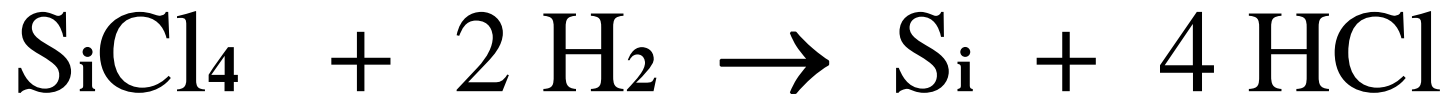
- 蒸氣生長沉積法：

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。

單晶矽結晶沉積方法

■ 蒸氣生長沉積法：

7. 四氯化矽製程的化學反應式：





單晶矽結晶沉積方法

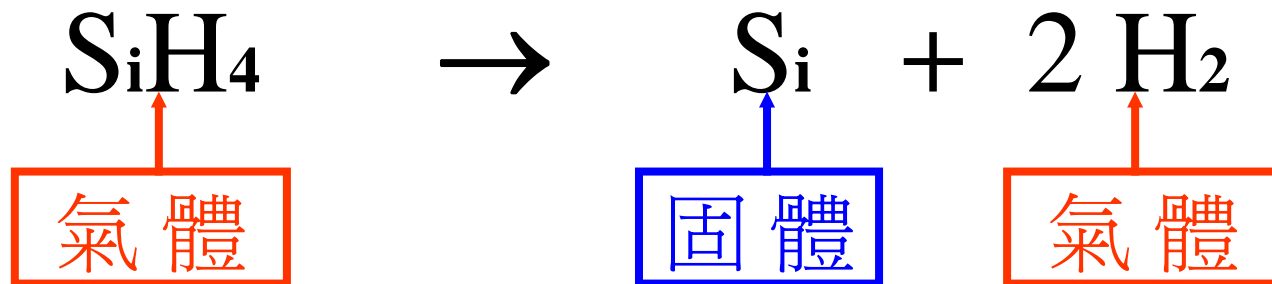
- 氫化矽 (Silane) 裂解沉積法：
 1. 氫化矽氣體與空氣接觸會自燃，它必須經由氫氣稀釋後儲存於鋼瓶。
 2. 氫化矽在反應器中的工作溫度為正 1000°C 至正 1100°C 。

單晶矽結晶沉積方法

■ 氫化矽 (Silane) 裂解沉積法：

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：



結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

- 1. **清洗晶圓**：使用**酸洗法**清洗晶圓，常用化學品如下述。
 - 💣 **硫酸** [Sulfuric Acid ; H_2SO_4]
 - 💣 **硝酸** [Nitric Acid ; HNO_3]

結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

- 清洗晶圓 (續) :

-  鹽酸 [Hydrochloric Acid ; HCl]

-  氫氟酸 [Hydrofluoric ; HF]

清洗完畢，置入磊晶反應器。

結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

■ 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。

結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

■ 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。

結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

■ 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。

結晶 (磊晶) 生長沉積的製程

■ 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。

結晶（磊晶）沉積設備

- **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 ）。

結晶（磊晶）沉積設備

- **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。

結晶（磊晶）沉積設備



- 石墨製成的晶圓吸附座，設計當作晶圓的加熱器，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。

結晶（磊晶）沉積設備

- 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，將晶圓加熱至工作溫度。

結晶（磊晶）沉積參數

- 磊晶沉積層的三個重要參數。
 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**。

測試磊晶層厚度的方法

- 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。

測試磊晶層厚度的方法

■ 凹槽染色法：(續)

接合面深度與干涉條紋的關係。

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

(2) λ = 單色光源的波長。

(3) n = 干涉條紋的數量。

測試磊晶層厚度的方法

■ 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**。

測試磊晶層厚度的方法

- **凹槽深度測量法：**

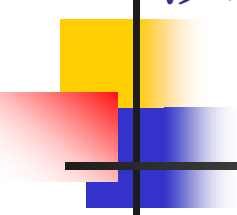
(續)

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

測試磊晶層厚度的方法

- 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。

測試磊晶層的摻雜濃度



- 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。

測試磊晶層的摻雜濃度

■ 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它施以逆向偏壓，使其成爲等效電容器，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。

測試磊晶層的摻雜濃度

■ 3. 凹槽及展佈探針法：

在晶圓表面磨一道*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。

二氧化矽製程

- 晶圓表面有一層由二氧化矽製造的保護層，共計有三種製程。
 1. 氣泡法 (Bubble) 。
 2. 熱氫法 (Burnt Hydrogen) 。
 3. 閃光法 (Flash System) 。

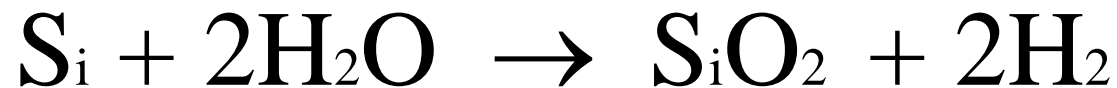
二氧化矽製程

- 製造二氧化矽的條件：
 1. 溫度：900 °C 至 1300 °C 。
 2. 壓力：大氣壓力。
 3. 材料：水蒸氣或氧氣。

二氧化矽製程

- 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



二氧化矽顏色

- 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，如下述：

| 二氧化矽厚度 (micro) | 顏 色 |
|------------------|------|
| 0.05 | 褐 色 |
| 0.1 | 紫至紅紫 |

二氧化矽顏色

| 二氧化矽厚度 (micro) | 顏 色 |
|------------------|-------|
| 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 |

二氧化矽顏色

| 二氧化矽厚度 (micro) | 顏 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 |

二氧化矽顏色

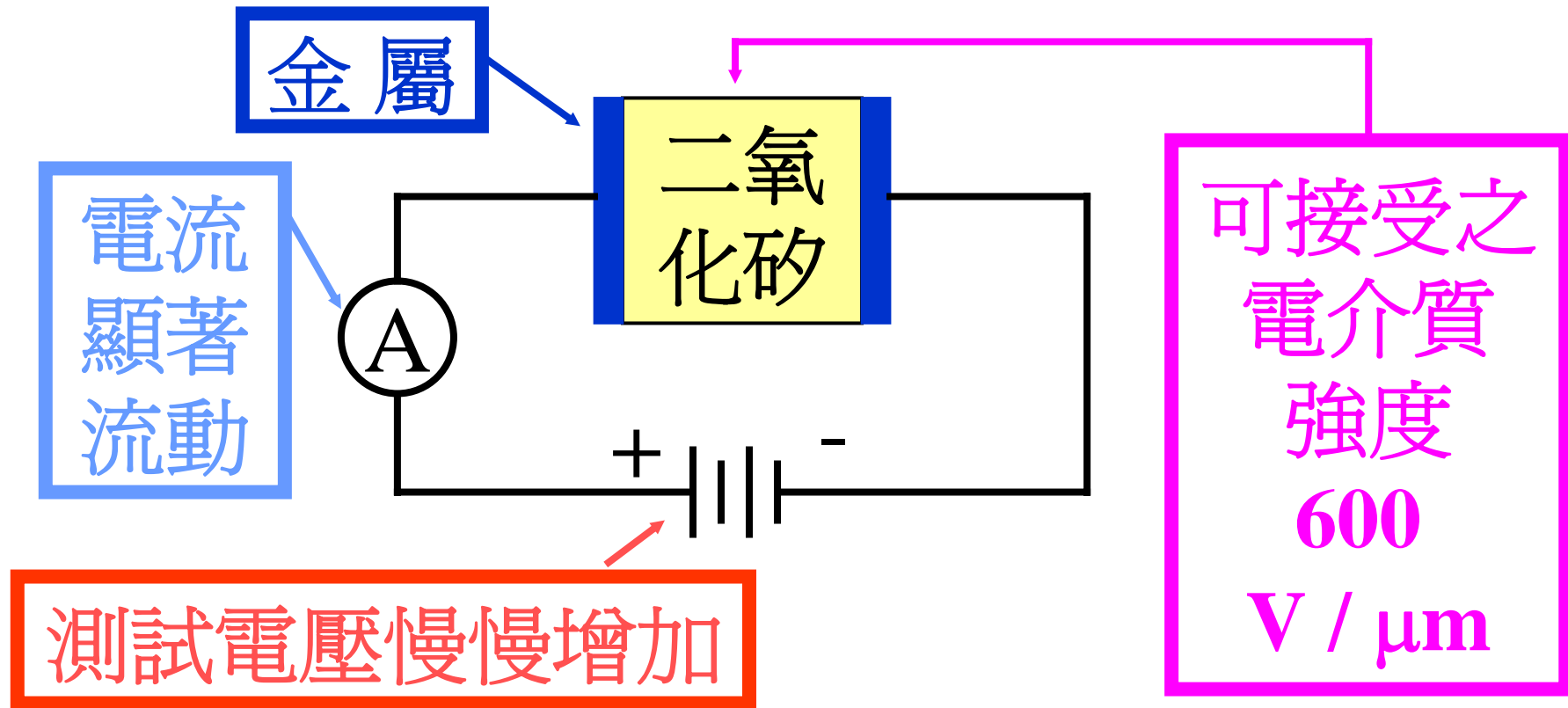
| 二氧化矽厚度 (micro) | 顏 色 |
|------------------|------|
| 1.1 | 綠 色 |
| 1.2 | 紫至紅色 |
| 1.32 | 藍至綠藍 |
| 1.4 | 橘 色 |
| 1.5 | 藍 色 |

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，其內含漂移的污染物質的總量。

二氧化矽電介質

- 二氧化矽層**崩潰強度**的測試法：

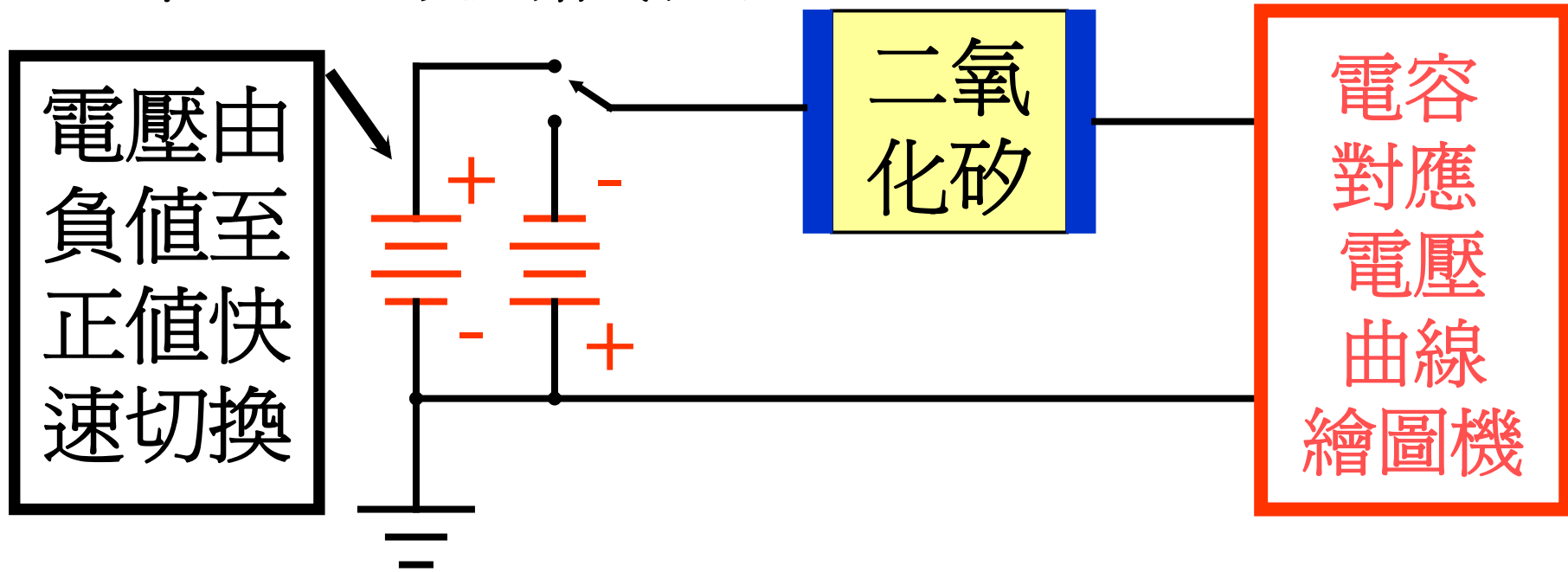


二氧化矽電介質

■ 二氧化矽層中漂移的污染物質

總量的測試法：

← 金屬



摻雜元素擴散原理

- 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。

摻雜元素擴散原理

■ 擴散物理現象：(續)

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）。

摻雜元素擴散速率

- 雜質元素的**擴散速率**依賴**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。

半導體元件擴散製程

- 半導體元件製程，需要對晶片的特定區域作**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**。

半導體元件擴散製程

- 兩種擴散製程：
 1. 預先沉積法 (Pre-deposition) 。
 2. 推入擴散法
(Drive-in Diffusion) 。

半導體元件擴散製程

- 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。

半導體元件擴散製程

- 預先沉積法 (Pre-deposition) : (續)
參閱*固態摻雜雜質元素溶解度*對應*爐管溫度*的曲線表，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。

半導體元件擴散製程

- 預先沉積法 (Pre-deposition) : (續)
 摻雜雜質元素的型態，如下：
 - (1) 固態雜質元素。
 - (2) 液態雜質元素。
 - (3) 氣態雜質元素。

半導體元件擴散製程

■ 預先沉積法 (Pre-deposition) :

(續) (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。

半導體元件擴散製程

- 預先沉積法 (Pre-deposition) : (續)
 - (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。

半導體元件擴散製程

■ 預先沉積法 (Pre-deposition) : (續)

(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。

半導體元件擴散製程

- 2. **推入擴散法** (Drive-in Diffusion) :
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**。

半導體元件擴散製程

■ 2. 推入擴散法 (Drive-in Diffusion) :

(續) : 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。

半導體元件擴散製程

- 2. **推入擴散法** (Drive-in Diffusion) :
(續) : **溫度、氣體、時間**三種參數決定下述製程結果：
 - (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。

半導體元件擴散製程

■ 2. 推入擴散法 (Drive-in Diffusion) :

(續) :

(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。

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。

離子佈植原理

- 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。

離子佈植原理

- 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。

離子佈植原理

- 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*。

離子佈植機的可控制參數

- 5. 兩項**離子佈植機**的可控制參數：
 - (1) **離子的劑量**。
 - (2) 每單位晶片面積，到達的**離子數量**。

離子佈植機應用領域

- 6. **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。

預先沉積法摻雜元素計算式

- 擴散進入晶片 X 深度之摻雜元素
濃度之計算式：

$$C(x) = C_s \operatorname{erfc} \frac{X}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

查 固態摻雜雜質
元素溶解度 對應
爐管溫度的曲線表

預先沉積法摻雜元素計算式

(續)

$C(x)$ = 擴散進入晶片 x 深度之
摻雜元素濃度。

- C_s = 晶片表面的摻雜元素濃度，
符合固態摻雜雜質元素溶解
度對應爐管溫度的曲線表。

預先沉積法摻雜元素計算式

- $x = x_j =$ 摻雜元素從晶片表面擴散進入晶片至 x 深度之距離。
- $D_1 =$ 擴散係數，查表可得數據，擴散係數由 $10^{-14} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 至 $10^{-9} \text{ cm}^2/\text{sec}$ ，溫度範圍由 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

預先沉積法摻雜元素計算式

■ (續)

$t_1 =$ 沉積製程法之製程時間。

- **erfc** 是 **誤差補償函數** 的縮寫
(**Complementary Error Function**)
- **erfc** (Z) = 1- **erf** (Z)

預先沉積法摻雜元素計算式

■ (續)

$$\mathbf{erf} (Z) = \frac{2}{\pi} \int_0^Z e^{-\alpha^2} d\alpha$$

$$\mathbf{erfc} (Z) = 1 - \mathbf{erf} (Z) = \frac{C_B}{C_S}$$

■ $C_B = C(x) =$ 背景濃度。

預先沉積法摻雜元素計算式

■ (續)

$$C_B = C_s \operatorname{erfc} \frac{X_j}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

$$Z = \frac{X_j}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

預先沉積法摻雜元素計算式

(續)

$$Z = \frac{X_j}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

■ $X_j =$ 接合面深度 $= Z \sqrt{4 D_1 t_1}$

查 誤差補償函數表 可得 Z 之數值

預先沉積法摻雜元素計算式

■ (續)

$Q =$ 摻雜雜質元素總數量

$$= C_s \sqrt{\frac{4 D_1 t_1}{\pi}}$$

推入擴散法摻雜元素計算式

- 由晶片表面推入晶片，至 X 深度之摻雜元素濃度之計算式：

$$C(x) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \right) e^{-x^2 / (4D_2 t_2)}$$

推入擴散法摻雜元素計算式

■ (續)

$C(x) =$ 由晶片表面推入晶片，至
X 深度之摻雜元素濃度。

■ $Q =$ 預先沉積法之摻雜雜質元素
總數量。

推入擴散法摻雜元素計算式

- $D_2 =$ 擴散係數，查表可得數據，擴散係數由 10^{-14} cm^2 / sec 至 10^{-9} cm^2 / sec ，溫度範圍由 1000 $^{\circ}\text{C}$ 至 1400 $^{\circ}\text{C}$ 。
- $t_2 =$ 推入擴散法之製程時間。

預先沉積法計算實例

- (例)：在晶片表面，使用預先沉積法製程，擴散磷摻雜元素其溫度為 $975\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，製程時間為30分鐘，決定磷摻雜元素之濃度當作深度函數，如下述之求解：

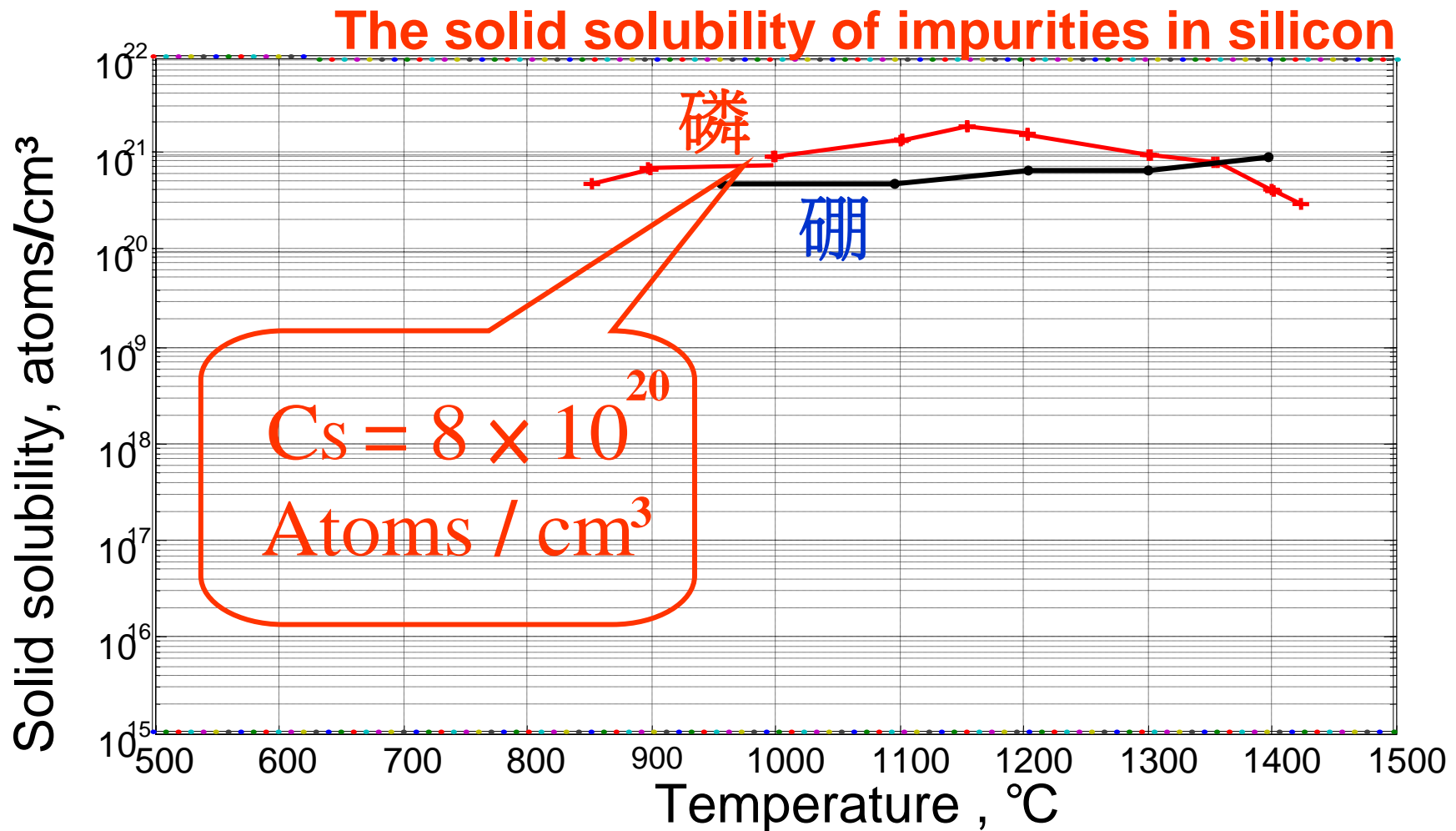
預先沉積法計算實例

■ (解)：

(1) 查閱*固態摻雜雜質元素溶解度*對應*爐管溫度*的曲線表得知

$$C_s = 8 \times 10^{20} \text{ Atoms / cm}^3 \text{ 。}$$

固態摻雜元素溶解度對應 爐管溫度的曲線表



預先沉積法計算實例

■ (解續)：

(2) 查閱擴散係數對應爐管溫度的曲線表得知

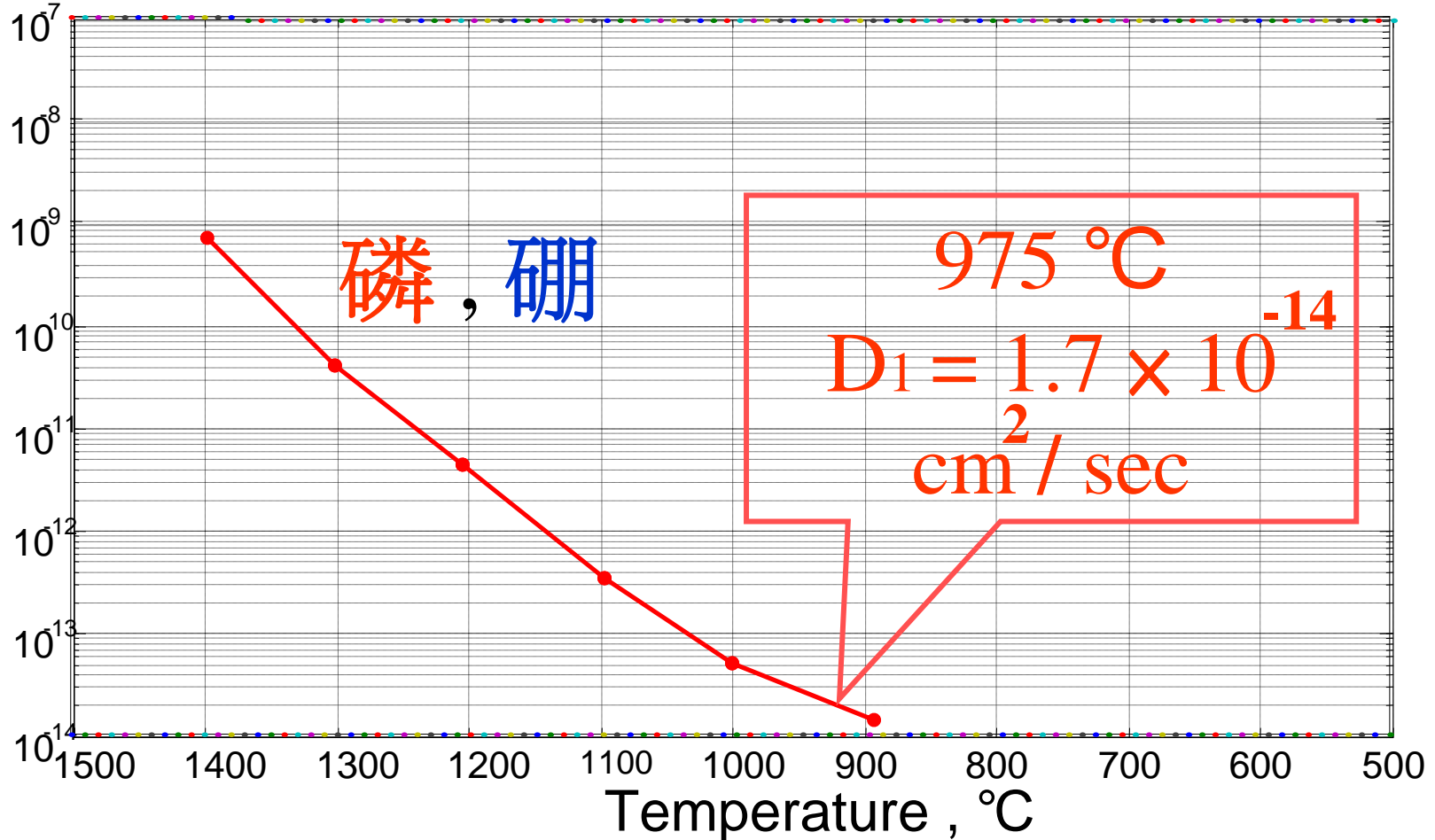
$$D_1 = 1.7 \times 10^{-14} \text{ cm}^2 / \text{sec} \circ$$

(3) $t_1 = 30$ 分鐘 = 1800 秒。

擴散係數對應爐管溫度曲線表

Diffusion coefficient D , cm^2/sec

Diffusion coefficients of substitutional diffusers



預先沉積法計算實例

■ (解續) :

$$(4) \sqrt{4 D_1 t_1} = 1.106 \times 10^{-5} \text{ cm} \\ \cong 0.11 \mu \circ$$

$$(5) \mathbf{C(x)} = \mathbf{C_s \operatorname{erfc}(Z)}$$

(6) 求解 Z 、 $\operatorname{erfc}(Z)$ 和 $\mathbf{C(x)}$ 。

預先沉積法計算實例

■ (解續) :

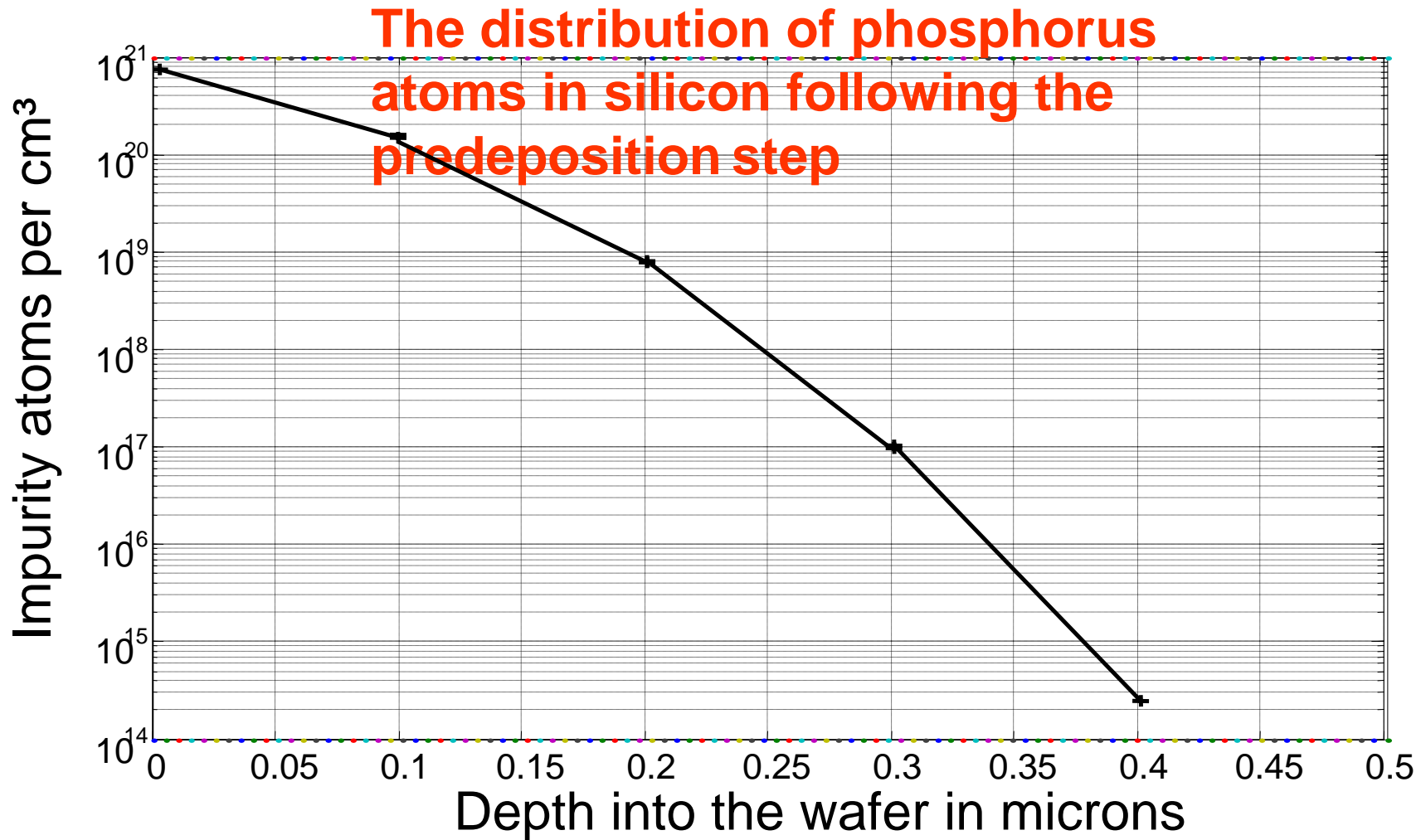
| X | Z | erfc (Z) | C(x) Atoms / cm ³ |
|-------|--------|-----------------------|------------------------------|
| 0 μ | 0 | 1 | 8×10^{20} |
| 0.1 μ | 0.9042 | 0.2 | 1.6×10^{20} |
| 0.2 μ | 1.8083 | 0.01 | 8×10^{18} |
| 0.3 μ | 2.7125 | 1.25×10^{-4} | 9.8×10^{16} |

預先沉積法計算實例

(解續) :

| X | Z | erfc (Z) | C(x) Atoms / cm ³ |
|-------|--------|-----------------------|------------------------------|
| 0.4 μ | 3.6166 | 3.1×10^{-7} | 2.48×10^{14} |
| 0.5 μ | 4.5208 | 1.6×10^{-10} | 1.28×10^{11} |

預先沉積法之磷原子分佈圖



預先沉積法計算實例

(解續)：接合面深度是由 N 型到 P 型之間的轉變而決定，查表得知一片 $0.3 \Omega - \text{cm}$ 的 P 型晶片其 $C_B = 10^{17} \text{Atoms} / \text{cm}^3$ ，對應之 X_j 深度為 0.3μ ，計算式如下述。

預先沉積法計算實例

(解續) :

$$C_B = C_s \operatorname{erfc} \frac{X_j}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

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

$$C_B / C_s = \operatorname{erfc} \frac{X_j}{\sqrt{4 D_1 t_1}}$$

預先沉積法計算實例

■ (解續) :

$$C_B / C_s = \text{erfc} (1.25 \times 10^{-4})$$

查 **Page 175** 之表，得知

$$X_j = 0.1106 \times 2.7125 = 0.3 \mu$$

預先沉積法計算實例

■ (解續) :

$$\begin{aligned} Q &= C_s \sqrt{(4 D_1 t_1 / \pi)} \\ &= 5 \times 10^{15} \text{ Atoms / cm}^2 \end{aligned}$$

每單位面積之摻雜
雜質元素總數量

推入擴散法計算實例

- 做完預先沉積法製程之晶片必須做推入擴散法製程，將已經擴散進入晶片表面之摻雜元素繼續推入，至符合製程規格之接合面深度。

推入擴散法計算實例

- (例)：使用推入擴散法製程，
每單位面積之雜質元素總數量
為 5×10^{15} Atoms / cm² ，其溫度
為 1100 °C ，製程時間為 50分鐘
接合面深度，如下述之求解：

推入擴散法計算實例

■ (解)：

(1) 查閱擴散係數對應爐管溫度的曲線表得知

$$D_2 = 3.3 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 / \text{sec} \circ$$

(2) $t_2 = 50$ 分鐘 = 3000 秒。

推入擴散法計算實例

■ (解續) :

$$(3) \quad C(x) = \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi D_2 t_2}} \right) e^{-(x^2) / (4D_2 t_2)}$$

$$= \left(\frac{9 \times 10^{19}}{\text{cm}^3} \right) e^{-(x^2) / (4D_2 t_2)}$$

推入擴散法計算實例

■ (解續)：

(4) 解算 X 、 X^2 、 $-(X^2) / (4D_2t_2)$ 、 $e^{-(X^2) / (4D_2t_2)}$ 和 $C(x)$ ，如下列表。

推入擴散法計算實例

(解續) :

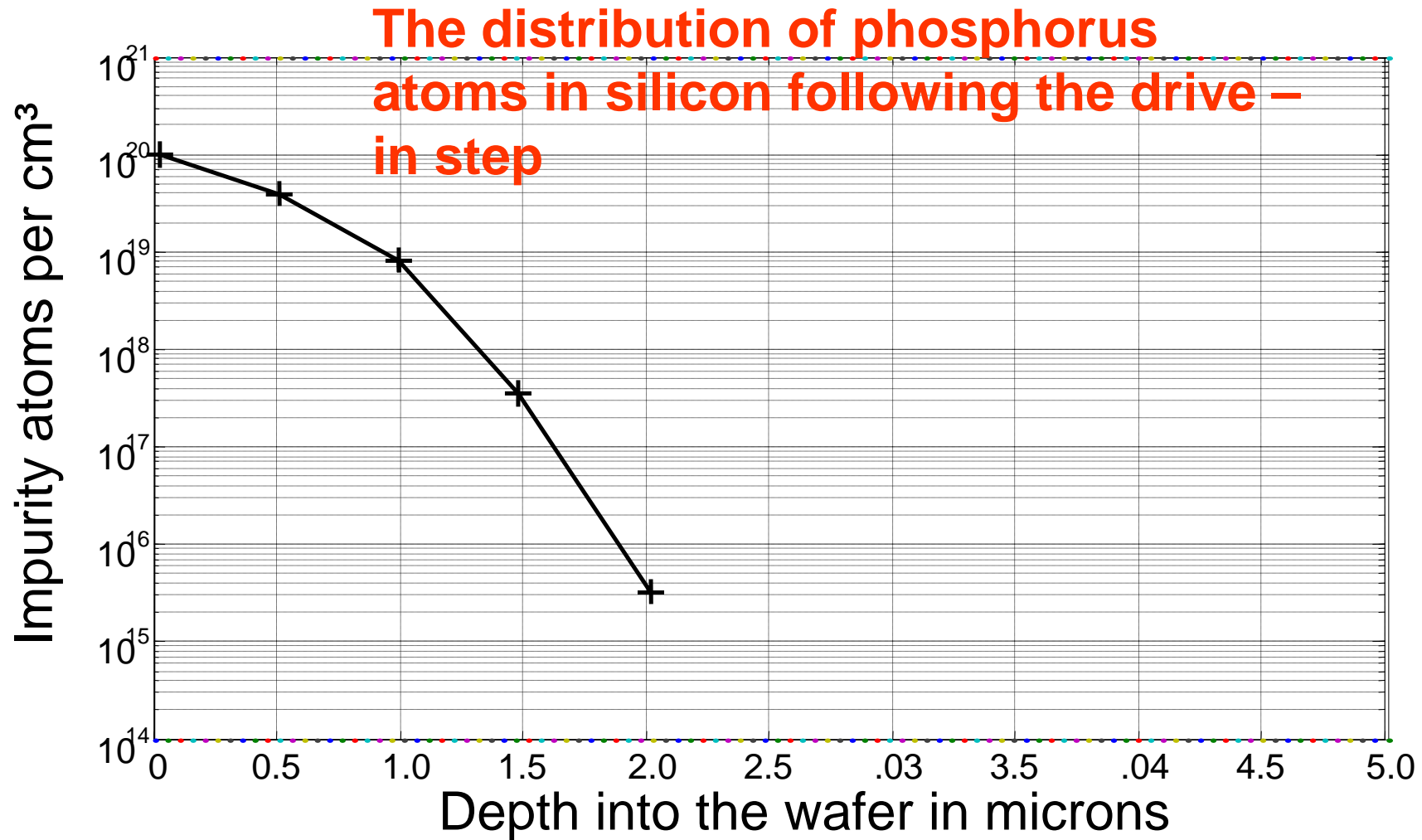
| $X(\mu)$ | $X^2(\mu)$ | $-(X^2)/(4D_2t_2)$ | $e^{-(X^2)/(4D_2t_2)}$ | $C(x) (/ \text{cm}^3)$ |
|----------|------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 1 | 9×10^{19} |
| 0.5 | 0.25 | 0.63 | 0.53 | 4.77×10^{19} |
| 1.0 | 1.0 | 2.5 | 0.0821 | 7.34×10^{18} |
| 1.5 | 2.25 | 5.63 | 3.54×10^{-3} | 3.23×10^{17} |

推入擴散法計算實例

(解續) :

| $X(\mu)$ | $X^2(\mu)$ | $-(X^2) / (4D_2t_2)$ | $e^{-(X^2) / (4D_2t_2)}$ | $C(x) (/ \text{cm}^3)$ |
|----------|------------|----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2.0 | 4.0 | 10 | 4.54×10^{-5} | 4.05×10^{15} |
| 2.5 | 6.25 | 15.6 | 1.6×10^{-7} | 1.48×10^{13} |
| 3.0 | 9.0 | 22.5 | 1.69×10^{-10} | 1.52×10^{10} |

推入擴散法之磷原子分佈圖



Hen-Zu Su's Resume

E-mail : henzusu@ms57.hinet.net

Country : Taiwan

Education :

Hen-Zu Su was graduated from Electronic Engineering of CHIENHSIN Junior College of Technology (1980 Taiwan). Hen-Zu Su holds a Bachelor of Science in Electrical Engineering from Ching Yun University (2002 Taiwan) and a Master of Science in Electronic Engineering from Chung Yuan Christian University (2006 Taiwan).

Affiliation :

1. Hen-Zu Su is a permanent member of Chinese Institute of Electrical Engineering (CIEE), 2002 - present.
2. Hen-Zu Su is a permanent member of Chinese Institute of Engineers (CIE), 2003 – present.

Work experience :

1. June 1974 - March 1976 : Junior technician of electronic, television VHF/UHF tuner division, Taiwan General Electronic corporation.
2. March 1976 - April 1977 : Analyst, television division, Taiwan RCA Electronic corporation.
3. December 1977 - March 1979 : Technician of electronic, electronic organ division, Tafong music instrument corporation.
4. March 1979 - June 1981 : Technician leader of electrical & electronic, electrical & electronic facility maintenance division, Shinjon chemical textile corporation.
5. June 1981 - February 1984 : Research engineer of Semiconductor device, Dawong electronic devices corporation.
6. March 1984 - April 2005 : Senior technician of electrical & electronic, Data & Telecommunication research division, Chung-Shan Institute of Science & Technology Armaments Bureau, Ministry of National Defense.
7. 1996 - present : Vocational Training Tutor, Taoyan Training Center, Bureau of Employment and Vocational Training.
8. 1999 - 2000 : A public construction judge, Public Construction Commission Executive Yuan.

