

內建電場 (Built-in Field)

固定雜質離子產生內建電場，方向：N → P

內建電位 (Built-in Potential, V_{bi})

$$V_{bi} = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

其中：- N_A ：P 側受體濃度 - N_D ：N 側施體濃度 - $V_T = kT/q \approx 25.85 \text{ mV @ } 300\text{K}$

範例計算

P 側 $N_A = 10^{16}$, N 側 $N_D = 10^{16}$, 矽 $n_i = 1.5 \times 10^{10}$:

$$V_{bi} = 0.0259 \times \ln\left(\frac{10^{32}}{2.25 \times 10^{20}}\right) \approx 0.696\text{V}$$

→ 約 0.7V，這就是矽 PN 二極體的「典型 V_F 」由來！

空乏區寬度

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V)}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

V ：外加電壓（順向為正）

兩側寬度反比於摻雜濃度：

$$\frac{x_p}{x_n} = \frac{N_D}{N_A}$$

重摻雜一側空乏區窄（如 N^+ 側），輕摻雜一側空乏區寬。

三、PN 接面的偏壓

1. 平衡（無偏壓）

擴散電流 = 漂移電流，淨電流為零。

2. 順向偏壓 ($V > 0$)

P 接 +、N 接 -：- 外加電場「抵消」內建電場 - 空乏區變窄 - 載子越過接面，電流流動

3. 逆向偏壓 ($V < 0$)

P 接 -、N 接 + : - 外加電場「加強」內建電場 - 空乏區變寬 - 載子被推離接面，幾乎無電流（僅有少量漏電）

四、蕭基方程式 (Shockley Equation)

理想 PN 二極體的 I-V 方程式：

$$I = I_S(e^{V/(nV_T)} - 1)$$

- I_S : 反向飽和電流 (pA-nA 級)
- n : 理想因子 (1-2, 理想為 1)
- $V_T = 25.85 \text{ mV} @ 300\text{K}$

順向偏壓 ($V > 4V_T \approx 100 \text{ mV}$) :

$$I \approx I_S e^{V/V_T}$$

關鍵性質：V 變化 60 mV，I 變 10 倍！

反向偏壓 ($V < 0$) :

$$I \approx -I_S$$

漏電流，量級 pA-nA。

I_S 的物理意義

$$I_S = qA\left(\frac{D_p p_{n0}}{L_p} + \frac{D_n n_{p0}}{L_n}\right)$$

- A : 接面面積
- D : 擴散係數
- L : 擴散長度
- p_{n0}, n_{p0} : 少數載子平衡濃度

I_S 與少數載子相關，因此對溫度極敏感：

$$I_S \propto T^3 e^{-E_g/kT}$$

每升 10°C ， I_S 增加約 2 倍 → 反向漏電顯著增加。

五、二極體的擊穿 (Breakdown)

反向電壓夠大時，會發生「擊穿」：

1. 齊納擊穿 (Zener Breakdown)

低電壓擊穿 (< 5V)，重摻雜接面，量子穿隧效應。 - 電壓溫度係數：負值 (+0V/°C 趨近 0)

2. 雪崩擊穿 (Avalanche Breakdown)

高電壓擊穿 (> 5V)，少數載子被加速到足夠能量，撞擊產生新的 e-h 對，連鎖反應。 - 電壓溫度係數：正值

兩者過渡區 (~ 5-6V)

5-6V 的 Zener 二極體溫度係數最低，常作為「參考電壓」。經典：1N821 系列 (高精度 Zener)。

六、空乏區電容 (Junction Capacitance)

空乏區像一個「平板電容」：

$$C_j = \frac{\epsilon A}{W}$$

W 隨外加電壓變化，因此 C_j 也變化：

$$C_j = \frac{C_{j0}}{(1 - V/V_{bi})^m}$$

m：1/2 (突變接面) 或 1/3 (漸變接面)

應用：變容二極體 (Varactor)

利用 C_j 隨電壓變化的特性，做電壓控制電容： - VCO (電壓控制振盪器) - AM/FM 收音機調諧 - PLL 頻率合成

高頻時的影響

C_j 與 R 形成 RC 時間常數，限制二極體高頻能力。高頻二極體要： - 小面積 (C_j 小) - 重摻雜 (W 小 → L_S 小但容易擊穿)

七、擴散電容 (Diffusion Capacitance)

順向偏壓時，接面附近有「儲存的少數載子」：

$$C_d = \tau \cdot g_d = \tau \cdot \frac{I_D}{V_T}$$

其中 τ 是少數載子壽命， g_d 是動態電導。

順向時 $C_d \gg C_j$ ，是高頻整流時「反向恢復時間」的根源。

反向恢復時間 (t_{rr})

順向 → 反向切換時，儲載子需要時間排空： - 一般 PN 二極體： μs 級（如 1N4001） - 快速二極體（FRD）： $50\text{--}500\text{ ns}$ - 蕭基二極體： ≈ 0 （金屬-半導體無少數載子儲存）

八、高溫對 PN 接面的影響

參數	溫度上升的變化
n_i	急增（指數）
V_{bi}	下降（每 K 約 -1 mV ）
I_S	倍增（每 10° C ）
V_F	每升 1° C 降低 $\sim 2\text{ mV}$ @ 固定 I
反向漏電	倍增
反向擊穿電壓	Zener 區降低、雪崩區升高

→ V_F 的負溫度係數： $-2\text{ mV}/^\circ\text{ C}$ 。 → 兩個一起串聯後可作粗略「溫度感測器」。

九、PN 接面的能帶圖

平衡態



E_F 整體水平（熱平衡時），但 E_C, E_V 在接面區「彎曲」，這就是內建電位。

順向偏壓

加 V_F 後，能帶彎曲減少：

P E_F V_F N E_F
 $\rightarrow q(V_{bi} - V_F)$
 $\rightarrow$

逆向偏壓

加 V_R 後，彎曲量增加為 $q(V_{bi} + V_R)$ ，障礙更高，載子幾乎無法越過。

十、實際 PN 接面的偏離理想

1. 高注入效應

當順向電流很大，少數載子變多到接近多數載子，蕭基方程式不再準確 ($n \rightarrow 2$)。

2. 串聯電阻

實際接面有「塊電阻」 (bulk resistance)：

$$V = V_{junction} + IR_S$$

大電流時 V 不再呈指數，而是線性增加。

3. 表面/介面復合

接面表面缺陷造成額外漏電。

4. 通道漏電

某些製程結構有「邊緣漏電」。

十一、PN 接面的應用回顧

PN 接面是以下元件的核心：

- 二極體：直接利用 PN 接面
- BJT：兩個 PN 接面（基極為共用層）
- JFET：通道上下夾兩個 PN 接面
- MOSFET：源/汲的 PN 接面、體二極體
- Thyristor：四層 PNP 結構（多個 PN 接面）
- 太陽能電池：PN 接面 + 光生載子
- LED：PN 接面 + 直接能隙材料
- 變容二極體：利用 C_j 變化
- Zener / TVS：刻意利用反向擊穿

十二、本章總結

✅ 您應該掌握：

- [x] 空乏區的形成與物理意義
- [x] 內建電位 V_{bi} 公式與計算
- [x] 順向、逆向偏壓下的行為
- [x] 蕭基方程式 $I = I_S(e^{V/V_T} - 1)$
- [x] V_F 約 0.7V 的由來
- [x] 反向擊穿：Zener vs 雪崩
- [x] 接面電容 (C_j, C_d) 的影響
- [x] 反向恢復時間
- [x] 溫度的影響 ($-2 \text{ mV}/^\circ \text{C}$)

自我檢測

1. P 側 $N_A = 10^{17}$, N 側 $N_D = 10^{15}$ 的接面，空乏區主要在哪一側？
2. 順向 0.7V 的二極體，溫度升 50°C 後 V_F 變多少？
3. 為什麼蕭基二極體沒有「反向恢復時間」問題？
4. 反向漏電與接面面積有什麼關係？
5. 5V Zener 二極體的擊穿機制可能是？

解答

1. 主要在 N 側（輕摻雜側空乏區較寬）。 $x_p/x_n = N_D/N_A = 10^{-2}$
2. 大約 -100 mV，新 $V_F \approx 0.6\text{V}$
3. 蕭基是金屬-半導體接面，無少數載子儲存，因此無反向恢復延遲
4. 正比。漏電是面積上的少數載子擴散電流， $I_S \propto A$
5. 5V 是過渡區，可能是齊納為主、雪崩為輔。低於 5V 多為齊納，高於 6V 多為雪崩

下一章

03-??????.md — 各類二極體的深入分析。