

# 第 1 章 5：二極體 (Diode)

二極體是最簡單的「半導體元件」，是進入主動元件世界的第一站。理解二極體，是理解所有半導體元件的基石。

## 一、什麼是二極體？

### 定義

二極體是「單向導電」的元件：電流只能從一個方向流過。

電路符號：

→ | —    anode → cathode  
    ↑  
    bar    cathode

### 物理結構：PN 接面

二極體 = 一片 P 型半導體 + 一片 N 型半導體 接在一起。

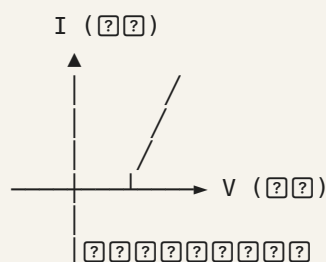
- P 型：摻雜「電洞」（正載子）
- N 型：摻雜「自由電子」（負載子）
- 接面（Junction）：兩種型半導體相接處

(完整理論在 02-半導體篇/02-PN接面.md)

### 工作原理

順向偏壓（Forward Bias）：陽極接正、陰極接負 → 載子越過接面，電流流動

逆向偏壓（Reverse Bias）：陽極接負、陰極接正 → 載子被推離接面，電流幾乎為零



## 二、二極體的伏安特性 (V-I Curve)

### 蕭基方程式 (Shockley Equation)

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

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

### 重要特徵點

#### 1. 順向壓降 ( $V_F$ )

順向導通時的近似電壓：

| 二極體類型         | 典型 $V_F$        |
|---------------|-----------------|
| 矽 PN (一般)     | 0.6-0.7 V       |
| 鍺             | 0.2-0.3 V (較少用) |
| 蕭基 (Schottky) | 0.2-0.4 V       |
| 紅光 LED        | 1.8-2.2 V       |
| 黃綠 LED        | 2.0-2.4 V       |
| 藍/白光 LED      | 3.0-3.4 V       |
| 紅外 LED        | 1.2-1.4 V       |

#### 2. 反向擊穿電壓 ( $V_{BR}$ )

反向電壓超過  $V_{BR}$  時，電流暴增（崩潰）。 - 一般二極體：燒毀 - Zener 二極體：刻意利用

#### 3. 反向飽和電流 ( $I_S$ )

逆向時的微小漏電 (pA-nA 級)，隨溫度上升每  $10^\circ \text{C}$  約倍增。

## 三、二極體的種類

### 1. 一般整流二極體 (General Purpose / Rectifier)

用途：將 AC 整流為 DC

經典型號：- 1N4001–1N4007：50V–1000V，1A - 1N5400–1N5408：50V–1000V，3A

特性： $V_F \approx 0.7V$ ，反向恢復時間慢 ( $\mu s$  級)，不適合高頻

## 2. 蕭基二極體 (Schottky Diode)

結構：金屬-半導體界面 (無 PN)

特性：- 低  $V_F$  (0.2–0.4 V) → 高效率 - 反向恢復時間極快 (ns 級) → 高頻能用 - 反向漏電大 - 反向耐壓較低 (一般  $< 100V$ )

應用：- 高效率整流 (開關電源) - 邏輯電路高速箝位 - 低壓電源 (lithium-ion 充電輸入)

經典型號：1N5817 (20V/1A), 1N5819 (40V/1A), SS34 (40V/3A SMD)

## 3. 快速恢復二極體 (Fast Recovery / Ultra Fast)

特性：反向恢復時間 50–500 ns

應用：高頻整流、FlyBack snubber、IGBT 驅動

經典型號：UF4007, MUR460

## 4. 齊納二極體 (Zener Diode)

結構：高摻雜 PN，刻意利用反向擊穿

特性：- 反向操作於擊穿區，電壓「穩定」 -  $V_Z$  從 1.8V 到 200V 都有 - 動作機制： $< 5V$  是齊納擊穿， $> 5V$  是雪崩擊穿

應用：- 簡易電壓穩壓 - 過壓保護 (與 TVS 類似) - 提供基準電壓

範例選用：5.1V Zener 1W (1N4733A)

## 5. 變容二極體 (Varactor Diode)

特性：反向偏壓時的界面電容隨電壓變化 (C-V 曲線)

應用：VCO 振盪器、頻率合成器、收音機自動調諧

## 6. 發光二極體 (LED)

特性：順向時發出特定波長的光

(詳見 02-半導體篇/08-光電元件.md)

## 7. 光電二極體 (Photodiode)

特性：受光時產生電流 (光電效應)

應用：光感測、光纖通訊接收端、太陽能電池（大面積版）

## 8. PIN 二極體

結構：P 型 / 本質 (Intrinsic) / N 型

特性：- 大面積、低電容 - 適合射頻開關、衰減器 - 用於可變衰減、相位偏移

## 9. TVS 二極體 (Transient Voltage Suppressor)

特性：反向擊穿後快速箝位電壓，吸收 ESD/突波能量

應用：USB、HDMI、外接介面的 ESD 保護

規格：-  $V_{RWM}$ ：工作電壓 -  $V_{BR}$ ：擊穿電壓 -  $V_C$ ：箝位電壓（瞬態時的最高電壓） - 峰值脈衝功率 (W) - 單向 / 雙向（雙向用於 AC 訊號線）

## 10. SiC（碳化矽）/GaN 二極體

特性：寬能隙半導體，耐高溫、高壓、高頻

應用：高效率電源（電動車、太陽能逆變器）、5G

---

## 四、二極體的關鍵規格

---

datasheet 必看項目：

### 1. 平均整流電流 ( $I_F(AV)$ )

連續可承受的順向電流。

### 2. 峰值順向電流 ( $I_{FSM}$ )

短時間（如 8.3 ms）可承受的瞬間電流。

### 3. 反向耐壓 ( $V_{RRM}, V_R$ )

反向工作時不會崩潰的最大電壓。設計準則：實際電壓  $< V_{RRM} \times 60\text{--}70\%$ （降額）。

### 4. 反向恢復時間 ( $t_{rr}$ )

從順向轉到反向時，電流停止流動所需時間。高頻整流 ( $> 100\text{ kHz}$ ) 必須用快恢復或蕭基。

## 5. 順向壓降 ( $V_F$ at 特定電流)

影響耗能： $P = V_F \times I$

## 6. 接面電容 ( $C_J$ )

高頻時影響很大，蕭基二極體一般  $C_J$  較大。

## 7. 工作溫度與熱阻

$$T_J = T_A + R_{\theta JA} \times P_D$$

接面溫度 = 環境 + 熱阻 × 耗散功率

二極體有最高接面溫度限制（一般 125–175° C）。

# 五、實務應用範例

## 例 1：LED 限流（最常見）

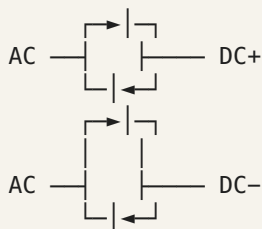
5V 驅動藍色 LED ( $V_F = 3.2V, I_F = 20\text{ mA}$ )：

$$R = \frac{V_{CC} - V_F}{I_F} = \frac{5 - 3.2}{0.02} = 90\Omega$$

選 100  $\Omega$  或 91  $\Omega$ 。功率  $P = (1.8)^2/100 = 32\text{ mW} \rightarrow 0805$  即可。

## 例 2：橋式整流（半波/全波）

AC 110V 整流到 DC：



- 半波：1 顆二極體，效率低，輸出脈動大
- 全波（橋式）：4 顆二極體，效率高
- 中心抽頭：2 顆二極體 + 中心抽頭變壓器

整流後電壓：

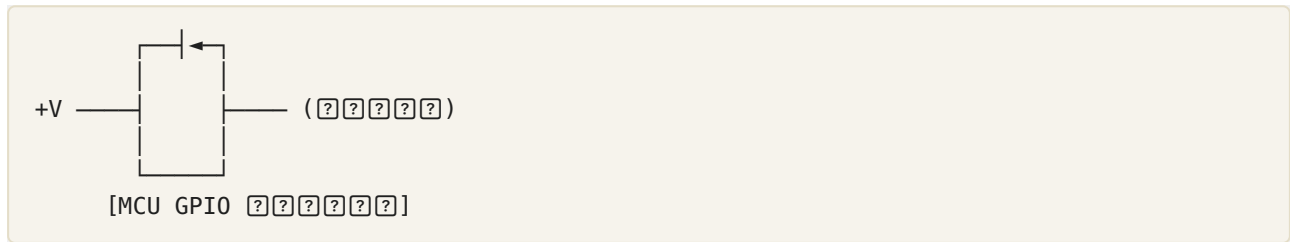
$$V_{DC} \approx V_{peak} - 2V_F$$

(橋式時減 2 個壓降)

要加平滑電容濾除紋波。

### 例 3：飛輪二極體 (Flywheel Diode)

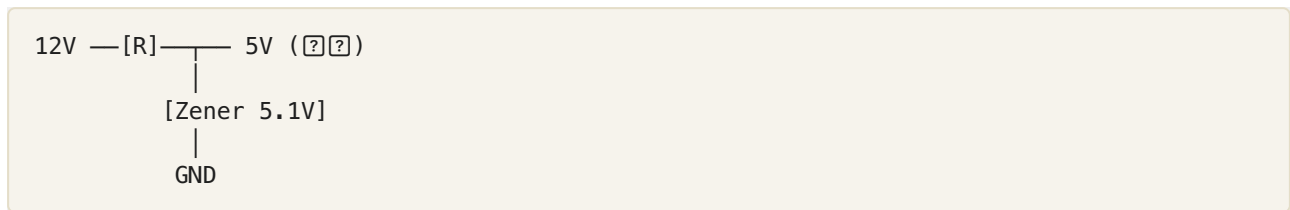
繼電器、電感負載斷電時，電感儲能釋放會產生高壓尖峰。



二極體並聯於電感兩端（反向接），讓電流續流，避免高壓尖峰。

### 例 4：Zener 簡易穩壓

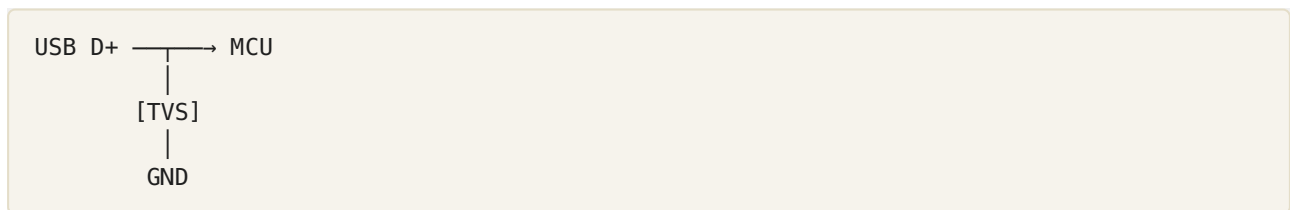
12V → 5V 簡易穩壓（負載電流小時使用）：



設計：選 R 使得通過 Zener 的電流在 1–10 mA 之間，要考慮 Zener 功率上限與最壞情況（負載最輕）。

### 例 5：ESD 保護 (TVS)

USB 介面的 D+/D- 線：



選  $V_{RWM} = 5V$ ,  $V_C = 8V$ , 低電容 ( $< 1 \text{ pF}$  for USB 高速) 的 TVS。

### 例 6：反接保護 (Reverse Polarity Protection)

外接電源時防止用戶接反：

方法 1：串聯一顆二極體 - 簡單但有  $V_F$  損耗 - 適合大電壓系統

方法 2：P-MOSFET 配合 - 損耗小 - 適合電池供電（節能）

(詳見 04-高級篇/05-EMI-EMC設計.md)

---

## 六、常見錯誤

### 1. 二極體裝反

特別是 SMD 封裝，方向標識小，容易裝錯。PCB 設計時 silkscreen 要清楚標 K (Cathode)。

### 2. 反向耐壓不夠

整流橋接電動機反電動勢時，瞬間反向電壓可能很高。

### 3. Schottky 反向漏電被忽略

高溫下 Schottky 漏電顯著 ( $\mu A \rightarrow mA$ )，可能影響低耗系統的待機電流。

### 4. 整流二極體用於高頻

1N400x 反向恢復  $\mu s$  級，用在 100 kHz 開關電源  $\rightarrow$  嚴重損耗、發熱。

### 5. LED 沒限流電阻

「直接接 5V 看看」 $\rightarrow$  LED 燒毀。

### 6. Zener 功率算錯

需考慮負載輕時 Zener 承擔全部電流： $P_Z = V_Z \times I_{max}$ 。

### 7. TVS 選擇錯誤

$V_{RWM}$  要  $>$  系統最高工作電壓，但  $V_C$  要  $<$  IC 耐壓。

---

## 七、二極體模型（給設計用）

### 1. 理想模型（最簡單）

- 順向：短路 ( $V_F = 0$ )
- 反向：開路

用於概念分析。

## 2. 定電壓降模型

- 順向： $V = V_F$  (如 0.7V)
- 反向：開路

手算電路常用。

## 3. 線性模型

- 順向： $V_F + I \times r_d$  ( $r_d$  為動態電阻)
- 反向：開路 +  $I_S$  漏電

## 4. 完整模型（蕭基方程式）

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

SPICE 模擬使用。

## 動態電阻

工作點處的小信號電阻：

$$r_d = \frac{V_T}{I_D}$$

範例：在 1 mA 工作的二極體  $r_d \approx 26 \, \Omega$ 。

## 八、本章總結

✅ 您應該掌握：

- [x] 二極體的單向導電特性
- [x] PN 接面的物理基礎概念
- [x] 順向壓降、反向擊穿、反向漏電
- [x] 各類二極體：整流、Schottky、Zener、LED、TVS、PIN、Varactor
- [x] datasheet 關鍵參數



- [x] 常見應用：整流、限流、保護、穩壓、ESD
- [x] 設計時的取捨： $V_F$ 、 $t_{rr}$ 、 $V_R$  之間的權衡

## 自我檢測

1. 為什麼 Schottky 比一般 PN 二極體  $V_F$  低？
2. 開關電源 100 kHz 用 1N4001 整流會有什麼後果？
3. 5V 系統的 USB 線要用什麼規格的 TVS？
4. Zener 二極體的工作模式是順向還是反向？
5. 一個 1A 通過的整流二極體  $V_F = 0.7V$ ，每秒消耗多少能量？

## 解答

1. Schottky 是金屬-半導體接面，沒有 PN 結合的 0.7V 內建電位
2. 反向恢復太慢 ( $\mu s$  級)，高頻時反向時持續導通造成大量損耗，二極體會發熱嚴重甚至燒毀
3.  $V_{RWM} \geq 5V$ ， $V_C \leq$  MCU 耐壓（如 6V），低電容 ( $< 1pF$  for USB 2.0 HS,  $< 0.5pF$  for USB 3.0)，雙向 (D+/D- 是訊號)
4. 反向（操作於擊穿區）
5.  $P = V \times I = 0.7 W = 0.7 J/s$

---

## 下一章

06--BJT.md 一 BJT 雙極性接面電晶體。