

第 2 章 3：二極體深入

本章以 PN 接面物理為基礎，深入分析各類特殊二極體。

一、整流二極體：物理層面

整流的核心需求

- 順向：低 V_F 、高 I_F 、低 R_S
- 反向：高 V_{BR} 、低漏電、快速恢復

V_F 與摻雜濃度的取捨

- 重摻雜： V_F 低、漏電大、 V_{BR} 低
- 輕摻雜： V_F 高、漏電小、 V_{BR} 高

實際整流二極體常用「PIN」結構（P+ / Intrinsic / N+）：- P+ N+ 重摻雜降低 V_F - 中間 I 層提供高擊穿電壓

V_{BR} 與漂移區寬度

漂移區寬度決定耐壓：

$$V_{BR} \approx E_{crit} \times W_{drift}$$

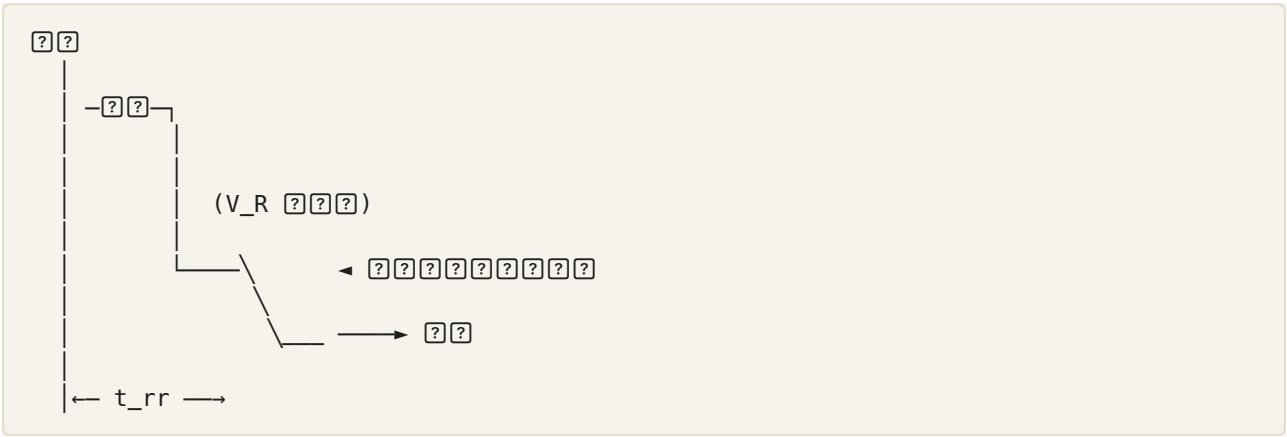
矽 $E_{crit} \approx 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。

→ 1000V 二極體需要漂移區 $\approx 33 \mu\text{m}$ 。

二、快速恢復二極體（FRD）

反向恢復過程

順向時接面附近有大量少數載子。切換到反向時，這些載子需要時間「排空」：



t_{rr} 由： - 少數載子壽命 τ - 反向電壓 V_R - 切換時的 di/dt 決定。

縮短 t_{rr} 的技術

- 1. 生命時間殺手：摻雜金 (Au) 或鉑 (Pt) 製造復合中心 → 但 V_F 會增加
- 2. 電子輻照：可控的辦法
- 3. 表面 N^+ buffer 層：吸收電場
- 4. 改用蕭基二極體：徹底消除 t_{rr}

t_{rr} 等級

類型	t_{rr}
一般整流	1–5 μs
快速整流 (FR)	200–500 ns
超快速 (UF)	50–100 ns
蕭基	< 10 ns (接近 0)
GaN	< 1 ns

三、蕭基二極體 (Schottky)

結構：金屬-半導體界面

Diagram illustrating the structure of a Schottky diode (Metal-Semiconductor Junction):

- Anode
- Metal Layer —
- N-type Semiconductor
- N+ Substrate
- Cathode

蕭基障壁

$$\Phi_B = \Phi_M - \chi_S$$

- Φ_M ：金屬功函數
- χ_S ：半導體電子親和力

V_F 計算

$$I = A^* T^2 e^{-\Phi_B/kT} \cdot (e^{V/V_T} - 1)$$

A^* ：理查森常數，矽 $\approx 110 \text{ A}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$

矽蕭基典型 V_F ：0.2–0.4V（依金屬選擇）

為什麼蕭基沒有 t_{rr} ？

金屬中沒有「少數載子」概念，純粹是多數載子（電子）流動，因此切換瞬間結束。

蕭基的缺點

1. 反向漏電大：障壁低， T 上升漏電倍增
2. V_{BR} 較低：一般 $< 100\text{V}$ ，現代有 SiC 蕭基可達 1700V
3. 熱失控傾向：高溫下漏電增大 $\rightarrow$ 發熱 $\rightarrow$ 漏電更大

SiC 蕭基

碳化矽蕭基大幅突破限制：- V_{BR} ：650V–1700V - 高溫工作 ($200^\circ \text{C}+$) - 用於電動車、太陽能

四、Zener 二極體深入

工作機制

- < 5V：齊納擊穿（量子穿隧）
- 5–6V：兩種共存（過渡區）
- > 6V：雪崩擊穿

溫度係數

V_Z	溫度係數
< 4V	強負 ($-mV/^{\circ}C$)
~ 5V	接近 0
~ 6V	接近 0 (最佳)
> 7V	正 ($+mV/^{\circ}C$)

經典：1N4734 (5.6V)、1N4735 (6.2V) 有最低溫度係數，常作精密參考。

動態電阻 r_z

實際 Zener 不是理想電壓源，有「動態電阻」：

$$r_z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z}$$

典型 5–50 Ω （小電流時更大）。影響：負載電流變化時輸出電壓會變化 $\Delta V = \Delta I \times r_z$

Zener 簡易穩壓設計

要點：1. 最小工作電流 $\geq I_{Z(\min)}$ (datasheet 規定) 2. 最大功耗 $\leq 0.5 P_{Z(\max)}$ 3. 取最壞情況：負載最輕時 Zener 電流最大

溫度補償

V_F 二極體（負溫度係數 $-2 mV/^{\circ}C$ ）+ 6.2V Zener ($+2 mV/^{\circ}C$) 串聯 → 溫度係數抵消。

精密參考 IC 用此技術，達到 ppm/ $^{\circ}C$ 級穩定度。

五、PIN 二極體

結構：P+ / I / N+

中間是「本質 (intrinsic)」層，極輕摻雜或無摻雜。

特性

- 順向時：I 區充滿載子，等效電阻變化大
- 用作「可變電阻」（射頻控制）
- 大面積 / 低電容
- 高耐壓

應用

A. RF 開關 / 衰減器

順向偏壓控制 I 區的「儲存電荷」量，等效電阻可從 Ω 到 $k\Omega$ 變化。用於：射頻訊號路徑切換、可變衰減器、限幅器。

B. 高功率整流

I 層提供大耐壓，常見於高壓直流 (HVDC)、雷射驅動。

C. 光電二極體

PIN 結構的本質區作為「光吸收區」，可達 ns 級反應速度。

六、變容二極體 (Varactor / Varicap)

利用 C_j 隨 V_R 變化

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

- $m = 1/2$ ：突變接面 (abrupt)
- $m = 1/3$ ：漸變接面 (linearly graded)
- 超突變 (hyperabrupt)： $m > 1$ ，更靈敏

應用

A. VCO (Voltage Controlled Oscillator)

LC 振盪器中用 Varactor 取代固定電容，控制電壓 → 改變頻率。

B. PLL (Phase Locked Loop) 頻率合成

PLL 的核心 VCO。

C. 自動頻率調諧

汽車收音機、舊式類比 TV。

D. 參量放大器

低雜訊射頻放大（衛星通訊）。

經典型號

- BB910, MV209：FM 調諧
- SMV1232：高頻 VCO

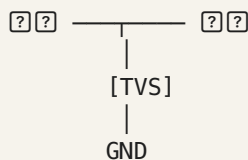
七、TVS (Transient Voltage Suppressor)

結構

實際是「快速 Zener」+ 大面積 + 低電感封裝。

功能

吸收瞬態能量（雷擊、靜電、開關 spike）：



平時：截止（極小漏電） 雷擊：擊穿並箝位電壓在 V_C ，吸收能量

規格

- V_{RWM} （反向工作電壓）：平時不導通的最高電壓
- V_{BR} （擊穿電壓）：開始導通

- V_C （箝位電壓）：吸收最大瞬態時的最高電壓
- I_{PP} （峰值脈衝電流）
- 電容：影響高速訊號（USB 3.0、HDMI 要選低電容）

單向 vs 雙向

- 單向：用於 DC 電源線
- 雙向：用於 AC 訊號線（D+/D-、RS-485）

應用範例

A. USB 介面保護

每對 D+/D- 加一顆超低電容 TVS（< 1 pF for USB 3.0）。

B. 電源輸入

12V 電源輸入加一顆 $V_{RWM} = 14V$ 的 TVS，防止汽車環境的 -100V/+200V 瞬變。

C. 乙太網路

每對信號線都有 TVS 保護。

八、特殊二極體一覽

1. 隧道二極體（Tunnel Diode）

利用量子穿隧的「負微分電阻」區域。 - 高頻特性極佳（GHz） - 但小電流，難用於大功率 - 已被其他元件取代

2. IMPATT 二極體

利用雪崩 + 渡越時間的負電阻，產生微波振盪。 - 雷達、毫米波應用 - 高雜訊

3. Gunn 二極體

GaAs 中的負電阻效應。 - 微波振盪源（汽車雷達早期、自動門感測）

4. 快速恢復磊晶二極體（FRED）

磊晶製程，高速 + 低 V_F 。

5. 雪崩二極體 (Avalanche Diode)

設計成可重複進入雪崩區，用作微波雜訊源、TVS。

九、二極體選用實務

整流：選誰？

應用	推薦類型
60 Hz 整流	一般 1N400x、橋式整流模組
100–500 kHz 開關電源	蕭基 (< 100V) 或快恢復 (> 100V)
1 MHz+	蕭基或 SiC 蕭基
高壓 (kV)	高壓整流模組 (內含多串聯)
大電流 (> 50A)	TO-247 / TO-264 封裝

保護：選誰？

場景	推薦
ESD (< 30 kV 短脈衝)	低電容 TVS
雷擊 (kV 級長脈衝)	大功率 TVS + GDT 配合
反電動勢 (電感負載)	一般二極體 (1N4148/1N4007)
高速數位 ESD	內含 PIN diode 陣列 (如 USBLC6)

訊號：選誰？

場景	推薦
小信號開關	1N4148 (低 C_j 、快速)
微弱訊號偵測	鍺二極體 (V_F 0.2V) 或 zero-bias 蕭基
射頻偵測	蕭基
雙向訊號	雙向 TVS

十、本章總結

✓ 您應該理解：

- [x] 整流二極體的內部結構與耐壓設計
- [x] 反向恢復時間的物理本質與縮短方法
- [x] 蕭基二極體的金屬-半導體機制
- [x] Zener 的兩種擊穿機制與溫度補償
- [x] PIN 二極體的可變電阻特性
- [x] Varactor 的電壓控制電容
- [x] TVS 的瞬態保護機制
- [x] 各類二極體的選用情境

自我檢測

1. 為什麼一般 PN 二極體不能用在 1 MHz 開關電源？
2. 蕭基二極體的反向漏電比一般 PN 大還小？
3. Zener 5.6V 與 3.3V 在溫度係數上有何不同？
4. PIN 二極體中間的 I 層作用？
5. 選 USB 3.0 的 TVS 時，最重要的規格是？

解答

1. 反向恢復時間 μs 級，每個切換週期 1 μs 中有大半時間在反向恢復，效率劇降且發熱嚴重
2. 大很多。蕭基障壁低，溫度敏感，漏電可達 mA 級
3. 5.6V 接近零（過渡區）；3.3V 是純齊納，溫度係數負（約 $-2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ ）
4. 提供大空乏區（高耐壓）、儲存載子（射頻可變電阻）、光吸收區（PIN 光電二極體）
5. 接面電容（ $< 0.5\text{ pF}$ ），太大會嚴重影響高速訊號完整性

下一章

04-BJT[?][?][?][?].md — BJT 內部物理與精確模型。