

第 2 章 6：IGBT 與功率元件

功率半導體是電力電子的核心：從手機充電器到電動車、太陽能、工業傳動。

一、功率半導體的需求

設計目標（互相衝突）

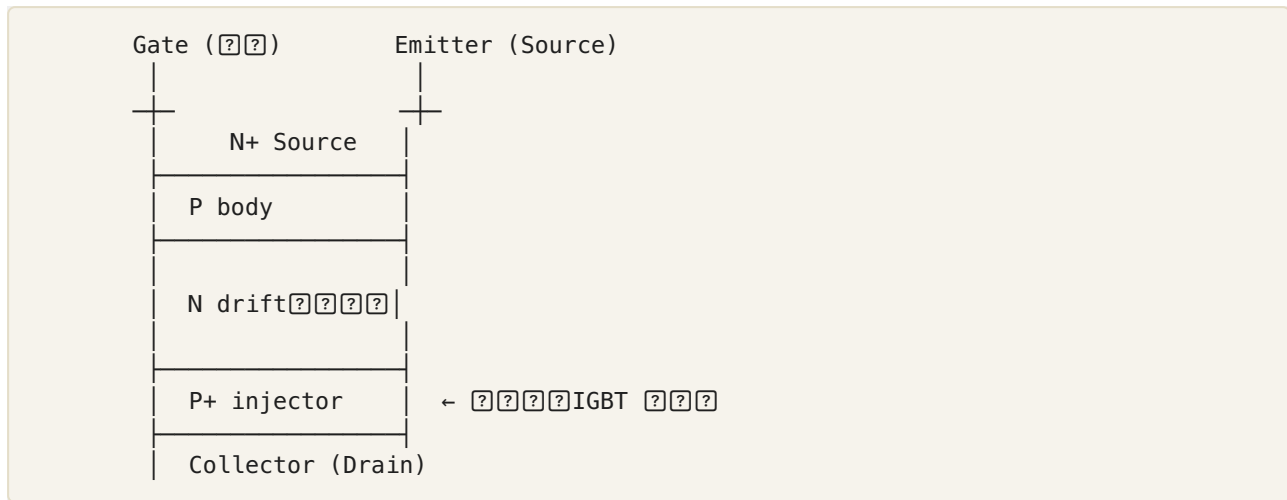
- 1. 高耐壓 (V_{BR})
- 2. 大電流 (I_{max})
- 3. 低導通損耗 (R_{on} 小)
- 4. 高速切換（小寄生電容）
- 5. 大 SOA（不易燒）
- 6. 低成本

不同元件的取捨

元件	耐壓	速度	適合
功率 BJT	中	中	已少用
MOSFET	中 (< 1kV)	高	中低壓、高頻
IGBT	高 (> 600V)	中	中壓、中頻
Thyristor (SCR)	極高	低	大功率、低頻
GTO	高	中	工業驅動
SiC MOSFET	高	高	新世代電動車
GaN HEMT	中	極高	高頻電源

二、IGBT（絕緣閘極雙極性電晶體）

結構：MOSFET + BJT 的混血兒



為什麼結合 MOSFET + BJT？

- MOSFET 的閘極：高輸入阻抗、易驅動
- BJT 的雙極性導通：低 $V_{CE(sat)}$ ，大電流時優於 MOSFET

工作原理

1. Gate 加正電壓 → 形成 N 通道（像 NMOS）
2. 電子流入 N drift 區
3. P+ injector 注入電洞 → 雙極性導通（少數載子注入）
4. 等效是「MOSFET 控制 PNP BJT」

$V_{CE(on)}$ 比 MOSFET 低？

對 1200V 級元件：- IGBT $V_{CE(sat)} \approx 1.5\text{--}2.5\text{ V}$ （接近常數） - 同等級 MOSFET $R_{DS(on)} \times I$ 可能 5–10 V（隨電流線性增加）

→ 大電流時 IGBT 損耗低。 → 小電流時 MOSFET 較好。

IGBT 的缺點

1. 拖尾電流（tail current）：關閉時 N drift 中累積的少數載子（電洞）需時間排除
2. 切換速度有限：100 kHz 以下
3. 無體二極體（需外接 fast recovery diode 並聯）
4. 闕鎖（latch-up）風險（內含寄生 PNP）

經典 IGBT 模組

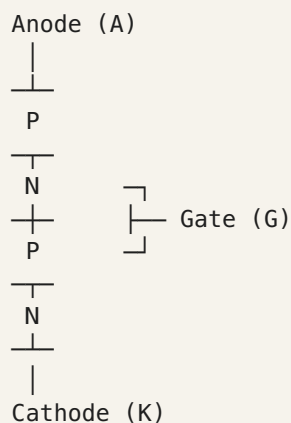
- 600V/30A 級：IRG4PC50UD（單管 TO-247）
- 1200V/300A 級：Infineon FF300R12KE3（模組）

IGBT 應用

1. 馬達驅動（變頻器，VFD）
2. 太陽能逆變器（中等功率）
3. 電動車主驅動（部分車款，逐漸被 SiC 取代）
4. 不斷電系統 UPS
5. 電磁感應加熱

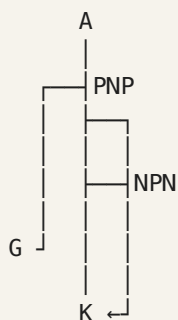
三、Thyristor / SCR（矽控整流器）

結構：4 層 PNPN



工作原理

可看作「互鎖的 PNP + NPN BJT」：

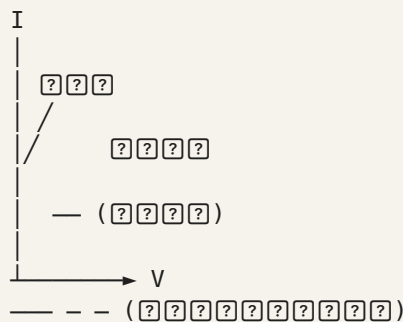


正反饋：PNP 的 Collector 進 NPN 的 Base，NPN 的 Collector 進 PNP 的 Base。

觸發

1. Gate 給一個正脈衝 → NPN 開始導通 → 觸發 PNP 也導通 → 正反饋鎖定
2. 即使 Gate 信號移除，仍持續導通 (latching)
3. 只有當 A-K 電流降到「保持電流 (Holding Current)」以下才關閉

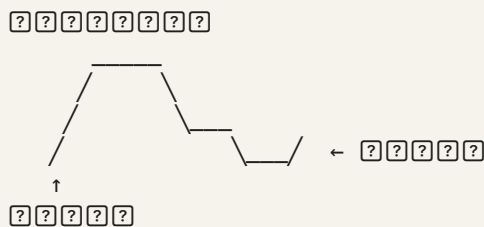
V-I 特性



應用

A. AC 相位控制（調光器、調速器）

每個半週由 Gate 觸發，控制觸發角度 → 控制平均功率：



B. 大功率整流

工業整流（焊接機、電解、直流馬達）。

C. 過壓保護（Crowbar）

當電壓異常升高時，觸發 SCR 短路電源 → 燒保險絲保護下游 IC。

TRIAC（雙向矽控整流器）

兩個反向並聯的 SCR：可雙向控制 AC。- 應用：家用調光器、馬達調速器

DIAC

雙向觸發二極體，常與 TRIAC 搭配做觸發電路。

GTO (Gate Turn-Off)

可由 Gate 主動關閉的 SCR。用於：大功率變頻器（漸被 IGBT 取代）。

IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor)

GTO 改良，更快、更可靠。用於：HVDC 輸電、大型工業驅動。

四、SiC（碳化矽）MOSFET

為什麼 SiC 革命性？

屬性	Si	4H-SiC
E _g (eV)	1.12	3.26
E _{crit} (V/cm)	3×10^5	3×10^6
熱導率 (W/cm·K)	1.5	4.9
載子飽和速度	1×10^7 cm/s	2×10^7 cm/s

→ 同耐壓下 SiC 的漂移區厚度只需 Si 的 1/10 → 同 R_{DS(on)} 下 SiC 元件面積小、容量大 → 高溫工作（200° C）、高頻切換

SiC MOSFET 應用

1. 電動車主逆變器（特斯拉 Model 3 開創）
2. 快充樁（350 kW DC 快充）
3. 太陽能逆變器（更高效率）
4. 資料中心電源（伺服器 PSU）
5. 離岸風電（HVDC）

SiC 二極體

- 蕭基結構，無反向恢復
- 用於 IGBT 的並聯 freewheel
- 大幅改善整體效率

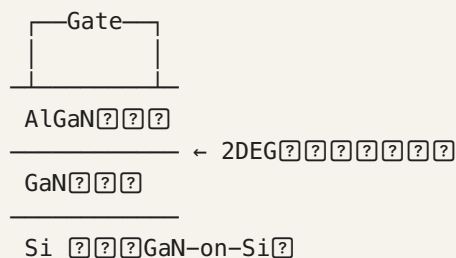
SiC 的缺點

- 價格較高（仍在下降）
- V_{TH} 較大（4-5V）需專用驅動 IC
- 製造良率仍是挑戰
- 6 吋到 8 吋晶圓轉換中

五、GaN（氮化鎵）HEMT

HEMT (High Electron Mobility Transistor)

不像 MOSFET 那樣有反轉層，而是利用「二維電子氣」（2DEG）：



特性

- 載子遷移率高（2D 限制）
- 切換速度極快（GHz 級）
- 低 $R_{DS(on)} \times Q_g$ （FOM 優異）
- 耐壓高（650V 級主流）

GaN 應用

1. 手機快充（GaN 充電器體積小且強）
2. 筆電變壓器（USB-C PD 100W+）
3. 資料中心電源
4. 無線充電（接收端整流）
5. D 類音響（高效率、高保真）

經典 GaN IC

- GaN Systems：GS61008P
- EPC：EPC2050

- TI : LMG3525 (整合 GaN + 驅動)
 - Navitas : NV6125 (半橋 + 驅動 + 保護)
-

六、功率半導體封裝

通孔封裝

- TO-220 : 常見中功率 (< 100W)
- TO-247 : 中大功率 (100–500W)
- TO-264 : 大功率 (> 500W)

SMD 封裝

- DPAK / D2PAK : 表面貼裝中功率
- PowerPAK : 低 R_{th}
- Power QFN : 超薄高功率

模組封裝

- 半橋模組 : 兩顆內部互連
- 全橋模組 : 4 顆 + freewheel diode
- 6-pack : 三相逆變器 (馬達驅動)
- 隔離模組 : 基板隔離 (汽車、工業)

散熱基板

- DBC (Direct Bonded Copper) : 陶瓷 + 銅
 - AMB (Active Metal Brazed) : 類似但更可靠
 - AlN/Al₂O₃ : 陶瓷材料
-

七、功率半導體驅動

Gate Driver IC

驅動功率元件需要 : - 大電流 (瞬間 A 級) - 高速 (ns 級) - 隔離 (高壓側)

隔離方式

方式	優點	缺點
光耦 (Opto)	成熟、便宜	慢、老化
變壓器隔離	高速	體積大
電容隔離 (如 SiC 友善 IC)	快、小	共模抗擾度
數位隔離器 (Magiso)	多通道	較貴

經典隔離驅動 IC

- HCPL-3120：經典光耦驅動
- UCC21520：雙通道 SiC 友善
- SI8261：SiC/GaN 高速驅動
- 1ED020I12：Infineon 1200V IGBT 驅動

八、保護電路

短路保護 (Desaturation)

監測 V_{CE} ，飽和時電壓正常 ($< 2V$)；短路時電壓會升高 → 觸發保護快速關斷。

過電流保護

電流取樣 (shunt 或 hall) 超過閾值即關斷。

過溫保護

NTC 溫度感測 + 比較器，超過閾值關斷或降速。

雪崩能量處理

某些 MOSFET 標明 E_{AS} (雪崩能量)，可吸收一定能量不損壞。但盡量設計避免進入雪崩區。

九、本章總結

✅ 您應該理解：

- [x] 各種功率半導體的選用情境

- [x] IGBT 結構與工作原理（MOSFET + BJT 混血）
- [x] Thyristor 的門鎖特性
- [x] SiC MOSFET 的優勢與應用
- [x] GaN HEMT 的工作原理
- [x] 功率半導體封裝與散熱
- [x] Gate Driver 的角色與隔離方式
- [x] 保護電路類型

自我檢測

1. 為什麼大電流時 IGBT 損耗比 MOSFET 低？
2. SCR 一旦觸發後如何關閉？
3. SiC MOSFET 在 1200V 級的優勢有哪些？
4. GaN HEMT 的 2DEG 是什麼？
5. 為什麼高壓側 MOSFET 驅動需要隔離？

解答

1. IGBT 是雙極性導通（少數載子注入）， $V_{CE(sat)}$ 接近常數；MOSFET 是單極性，導通電壓隨電流線性增加
2. A-K 電流必須降到「保持電流」以下（如 AC 過零點），或使用 GTO 主動關閉
3. 漂移區更薄、 $R_{DS(on)}$ 更低、開關速度更快、可耐 200° C 高溫
4. AlGaIn/GaN 異質接面下的二維電子氣，遷移率極高，無需傳統 MOSFET 的反轉層
5. 高壓側 Source 電位浮動（如 400V），驅動信號參考點是地，需要電位轉換與電氣隔離

下一章

07-???? SCR.md 一 閘流體家族專章。