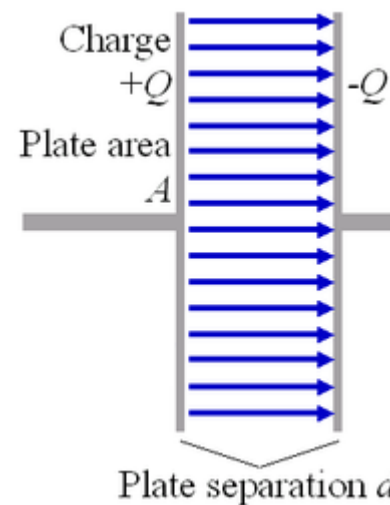


# 類比電子電路簡介

# 電容 (Capacitor)

- 給定電壓後，具有儲存電荷的能力。當電源的電壓大於電容兩端的電壓時，電容會充電，反之則放電，因此一般常用來濾波

- 單位：法拉 (F) = 庫倫 (C) / 伏特 (V)
- $I = C V' \text{ (} V' = dV/dt \text{)}$
- 若將三個電容串聯在一起，則  **$1/C = 1/C1 + 1/C2 + 1/C3$**
- 若將三個電容並聯在一起，則  **$C = C1 + C2 + C3$**



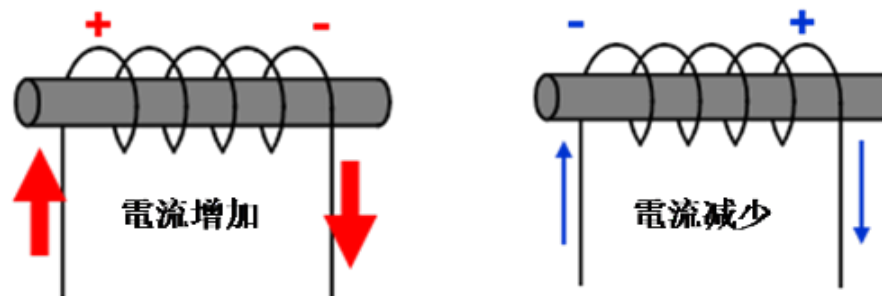
兩平行金屬板電容器是最簡單而且實用的電容器，中間會隔一層介質。假設兩者之間距離  $d$ ，且面積等於  $A$ ，介質之介電係數為  $e$ ，則電容值  $C = e * A / d$

# 電感 (Inductance)

- 電流隨著時間的改變，所產生的磁場變化，會誘發電動勢，因此而抵抗電流的改變

- 單位： H( 亨利 )

- $V = -L * I'$  ( $I' = di/dt$ )

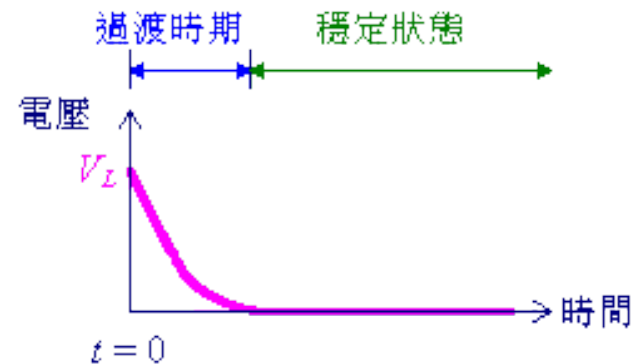
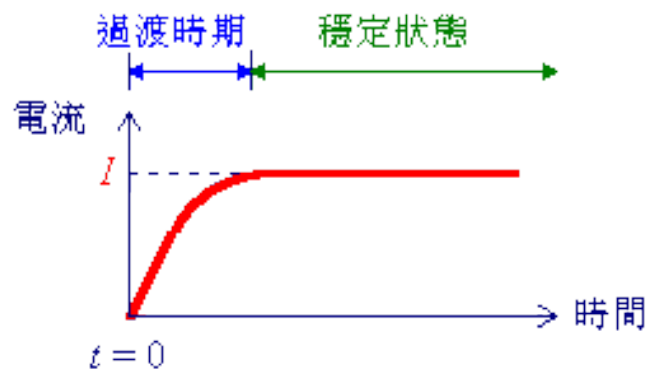
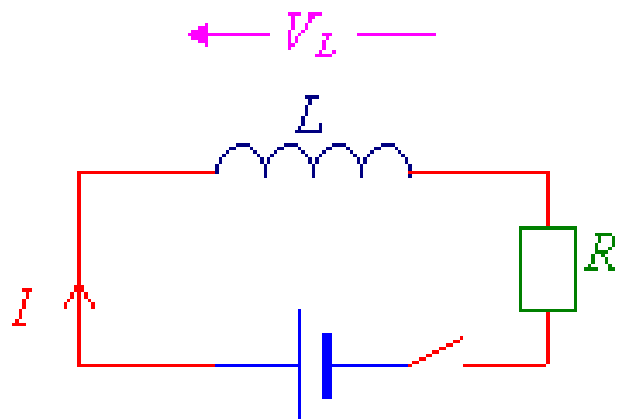


- 電感的電磁感應分為自感應和互感應，自身磁場在線圈內產生磁通量變化導致的電磁感應現象，稱為「自感應」現象；外部磁場在線圈裡磁通量變化產生的電磁感應現象，稱為「互感應」現象。

- 在忽略電磁感應影響的情況下，串聯電感值  $L = L1 + L2 + L3$ ，並聯電感值  $1/L = 1/L1 + 1/L2 + 1/L3$

# RL 電路

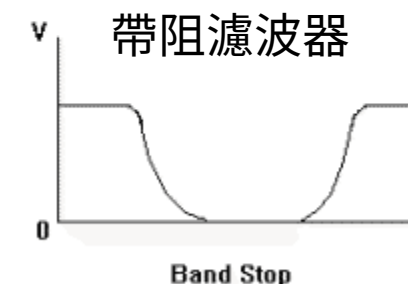
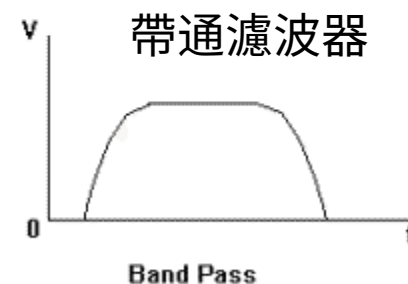
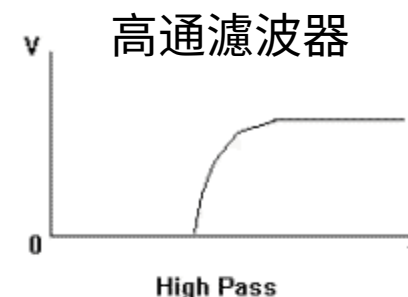
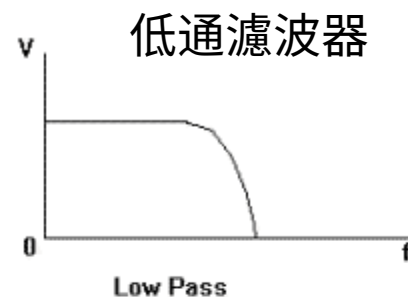
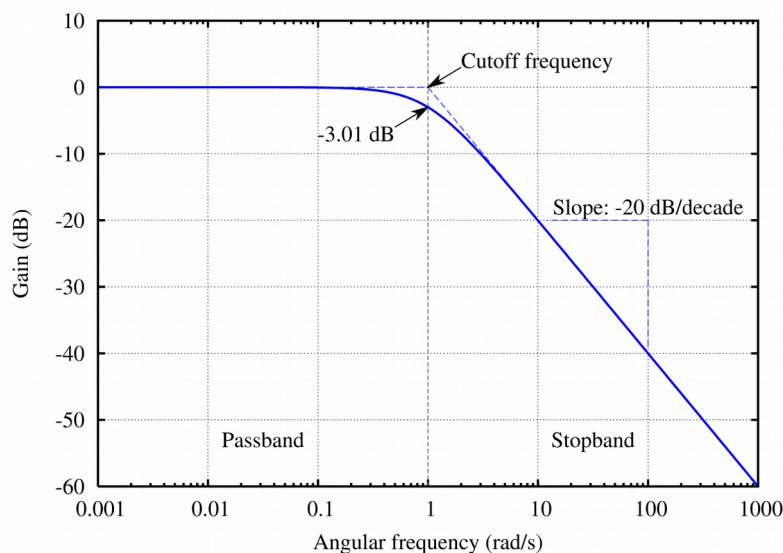
- 當電源啟動時，電流會逐漸提升，此時電感會產生反抗電壓，直到電流趨於穩定後，反抗電壓才會漸漸消失
- 穩定後的電流  $I = V / R$



# 濾波器 (Filter)

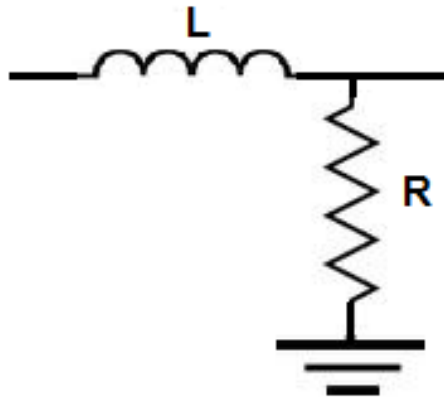


- 一種用來將訊號的特定頻域區段能量消滅的電路
- 輸出訊號的相位 (phase) 相對於輸入訊號會發生改變
- 截止頻率 (cut off frequency)：輸出和輸入能量比值等於 -3dB 的頻率，大約等於  $(1/2)^{0.5}$ ，又稱為半功率頻率 (Half-power Frequency)，一般簡寫為  $f_c$

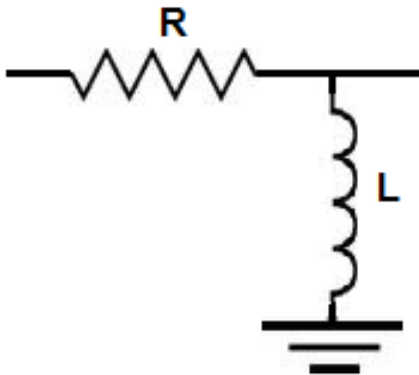
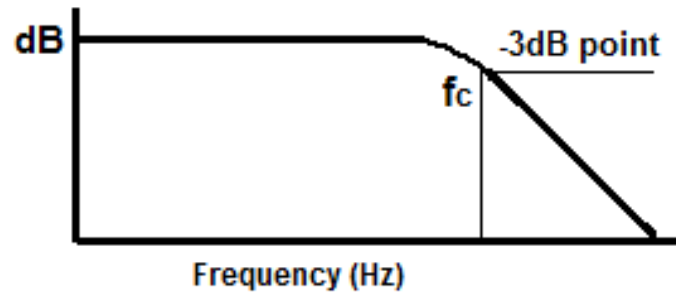


# RL 電路：

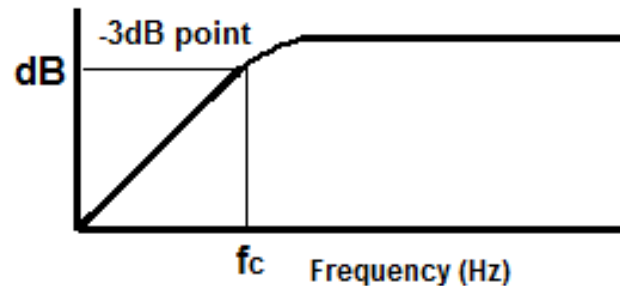
## 一階被動濾波器 (Passive First Order Filter)



低通濾波器



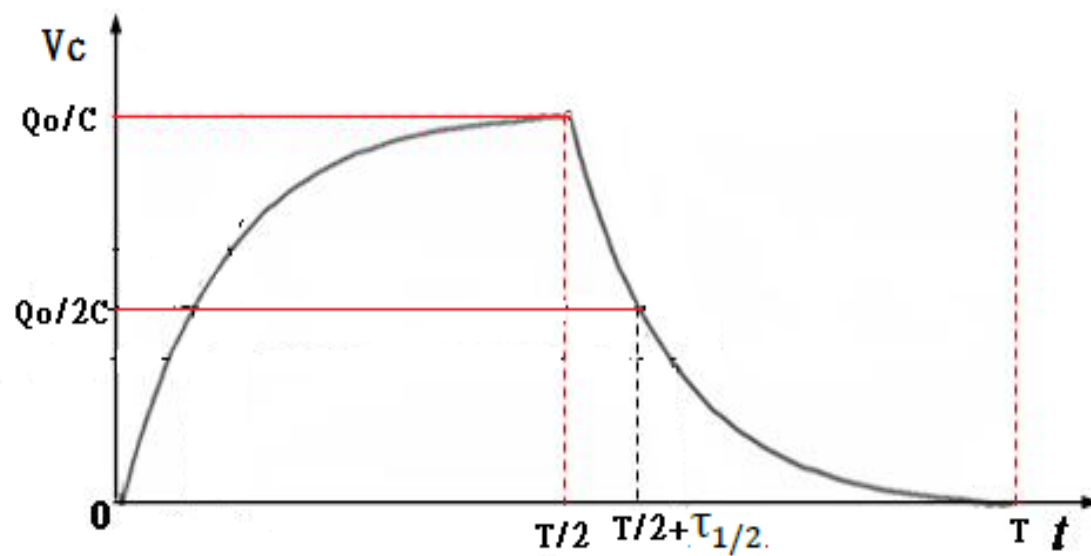
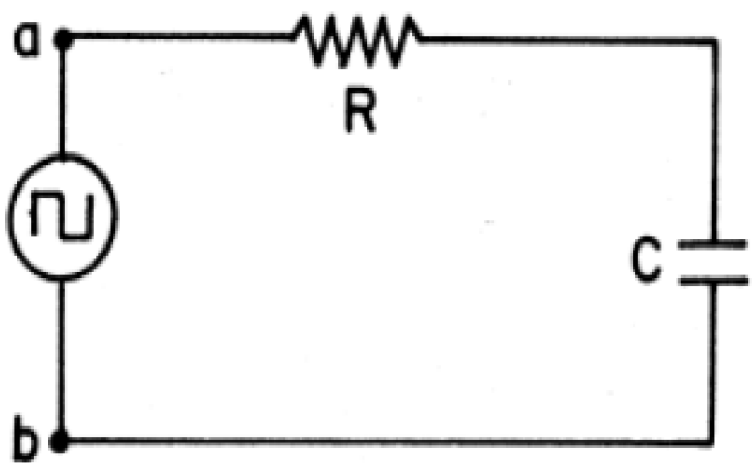
高通濾波器



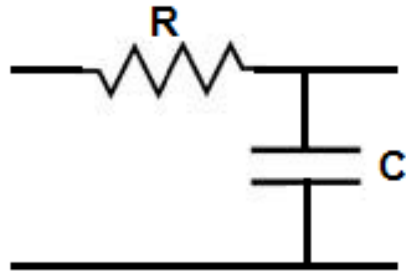
Cutoff frequency =  $2 \cdot \pi \cdot R / L$

# RC 電路

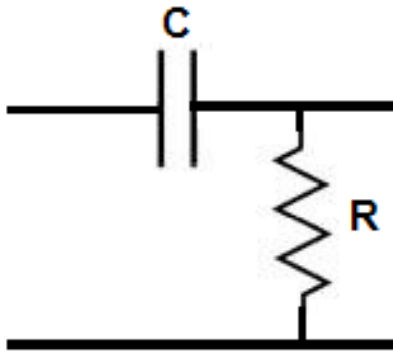
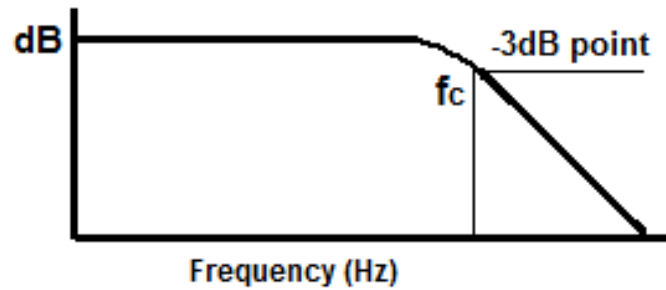
輸入一個方波，所觀察到的電容充放電現象



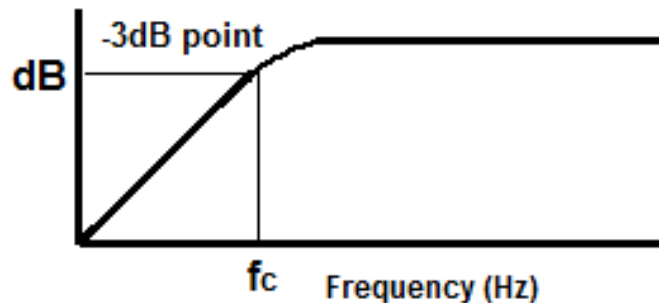
# RC 電路： 一階被動濾波器 (Passive First Order Filter)



低通濾波器



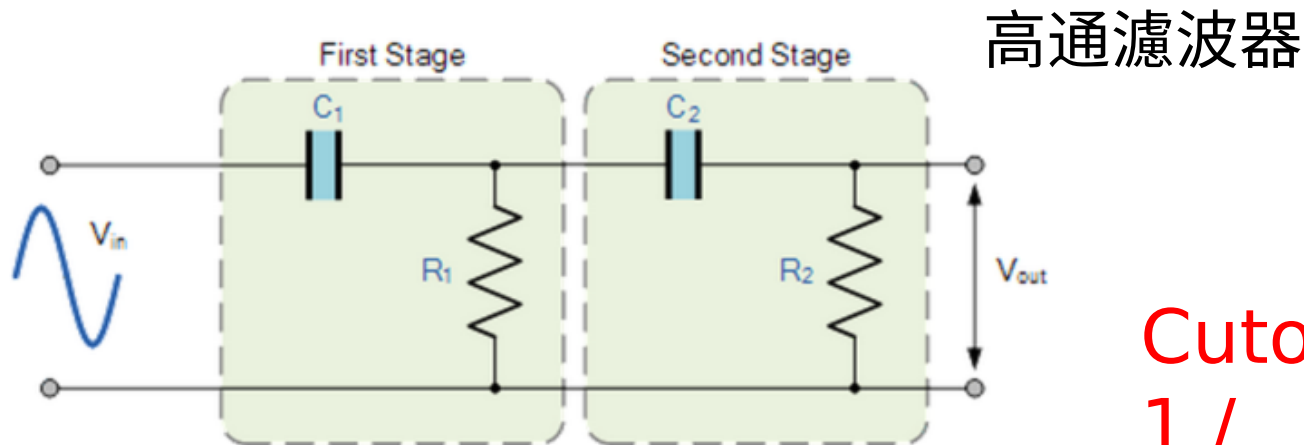
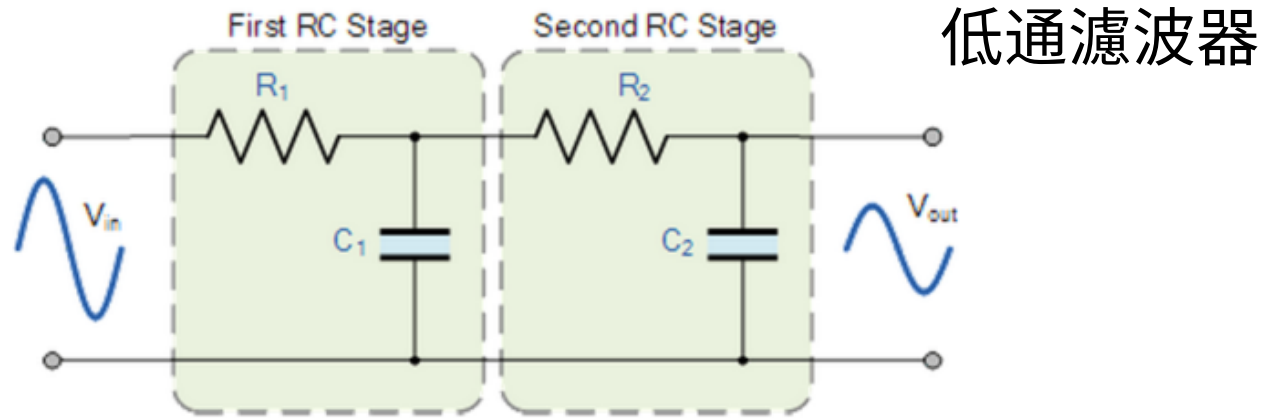
高通濾波器



Cutoff frequency =  $1 / (2 * \pi * R * C)$



# 二階被動濾波器 (Passive Second Order Filter)

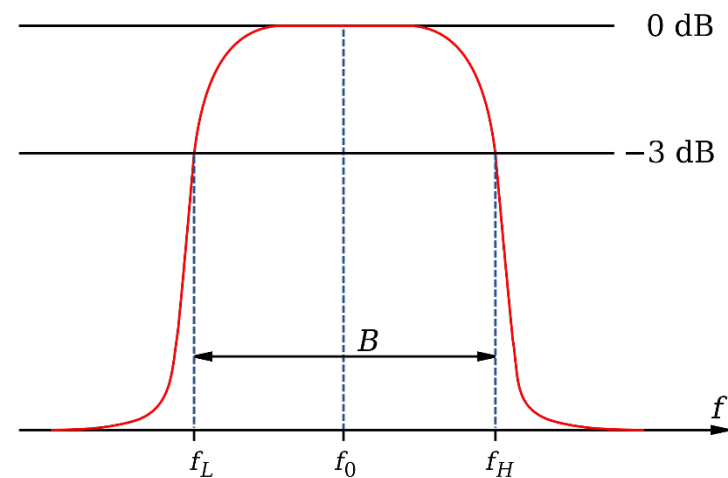
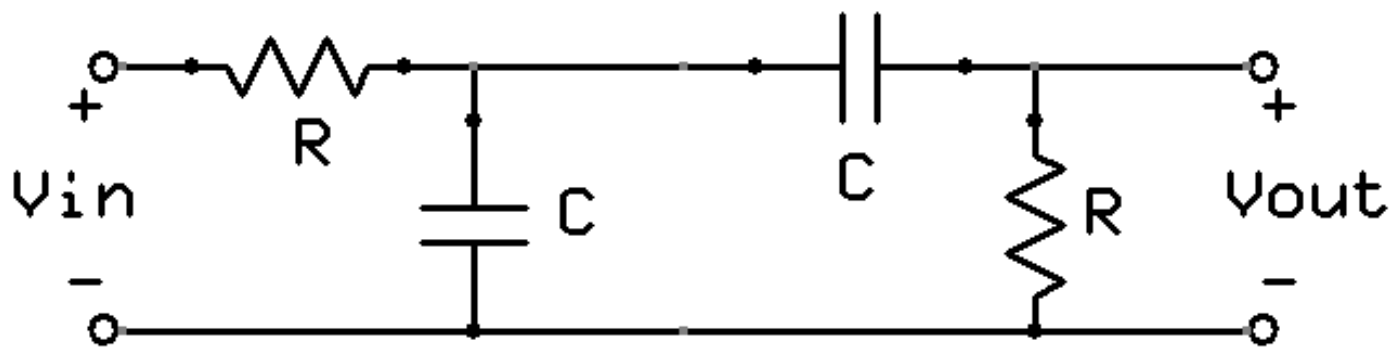


Cutoff frequency =

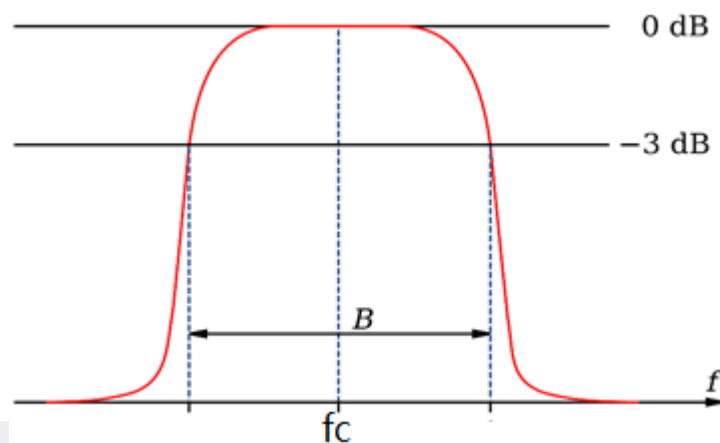
$$\frac{1}{(2\pi)(R_1 R_2 C_1 C_2)^{0.5}}$$

# 帶通濾波器 (Bandpass Filter)

- 將低通濾波器和高通濾波器串聯可成一個帶通濾波器

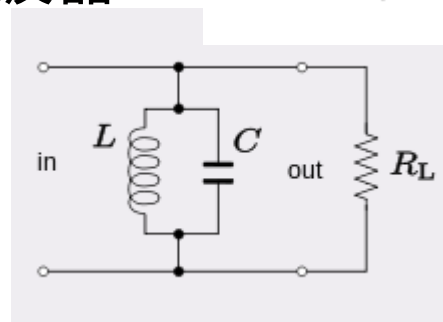
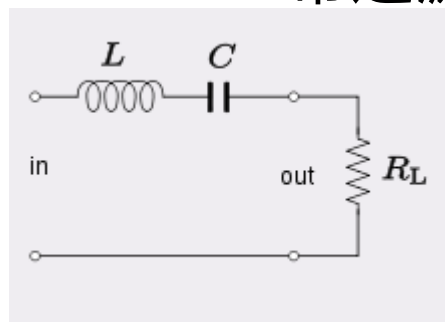


# RLC 電路

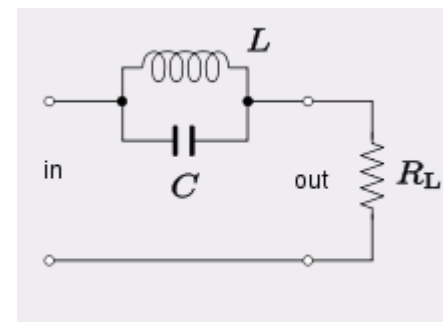
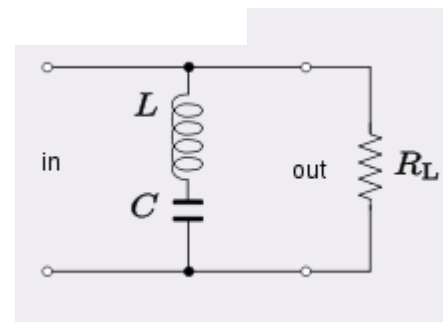


$$B = L / ( 2 * \pi * (R)^{0.5} )$$

帶通濾波器

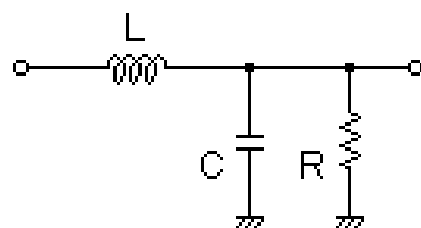
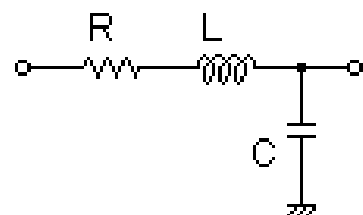


帶阻濾波器

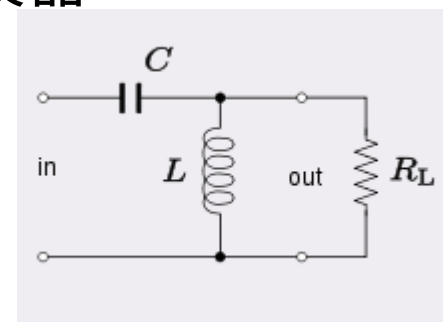
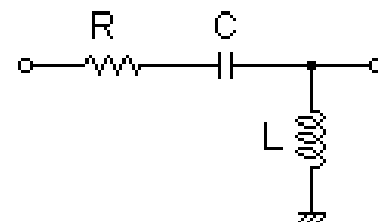


$$f_c = 1 / ( 2 * \pi * (L * C)^{0.5} )$$

低通濾波器



高通濾波器

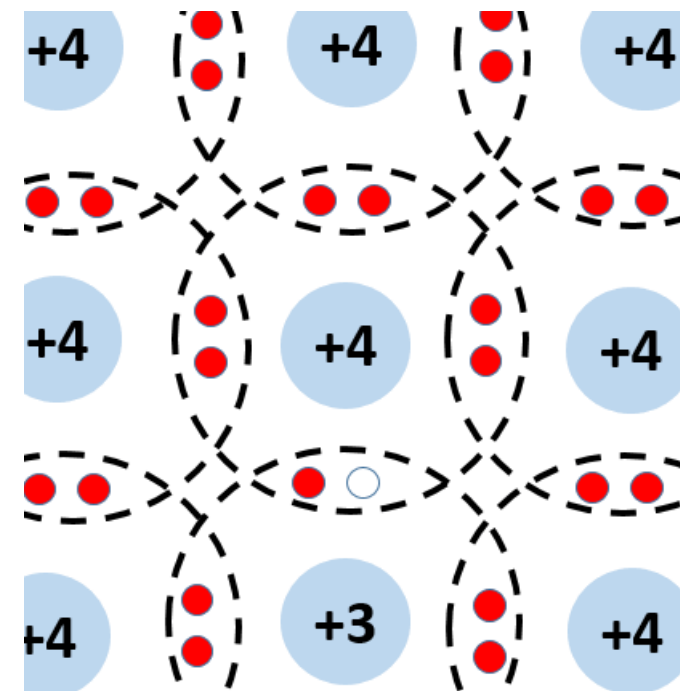


# 半導體

- 一種介於導體和非導體之間的材料
- 藉由通電與否可以改變成導體或非導體
- 有 N 型半導體和 P 型半導體兩種類型

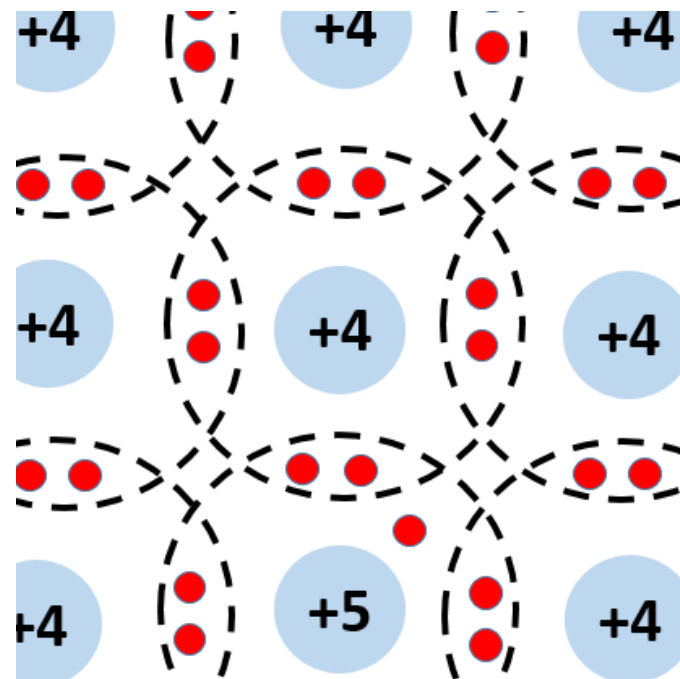
# P 型半導體

- 主要由四價原子 ( 例如：矽 Si, 非導體 ) 構成
- 參雜三價原子 ( 例如：硼 B 或鎵 Ga) 後，會產生出電洞，因而增加少許導電性
- 加入三價原子的比例多寡決定導電性



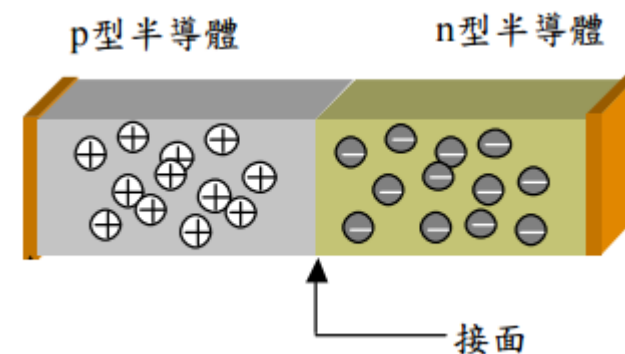
# N 型半導體

- 主要由四價原子 ( 例如：矽 Si, 非導體 ) 構成
- 參雜五價原子 ( 例如：砷 As 或磷 P ) 後，會多出自由電子，因而增加少許導電性
- 加入五價原子的比例多寡決定導電性



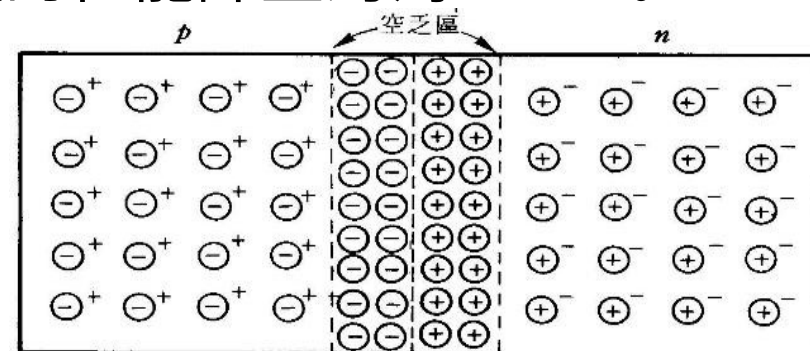
# PN 二極體 (Diode)

- 若在四價原子 (Si) 的一邊注入三價原子 (B) ，另一邊則注入五價原子 (As) ，則 P 型和 N 型的相接處就會形成 PN 接面
- 室溫下， n 型半導體中的電子會向 p 型半導體中擴散，電子電洞中和消失，但由於帶電載體的移動， n 型半導體中會帶正電 ( $1+$  離子 ) ， p 型半導體則會帶負電 ( $1-$  離子 ) ，並集中在接面處
- 穩定後， PN 接面兩側只剩下不可移動的施體離子及受體離子。



# PN 二極體：位能障壁

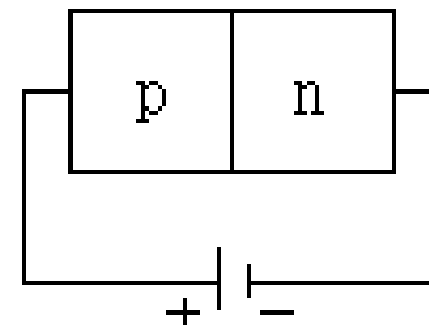
- 靠近接面的區域形成沒有可移動載子的區域，此區域稱為空乏區 (depletion region)
- 由於接面兩側有相異的離子，在接面處會有一個電場存在。離子間的電場相當於兩者間的位能差。
- 因為 n 型電位高於 p 型而形成電位障壁 (potential barrier)，可以阻止任何流往另一邊的多數載子。常溫時，矽 (Si) 二極體的位能障壁約為 0.7V。





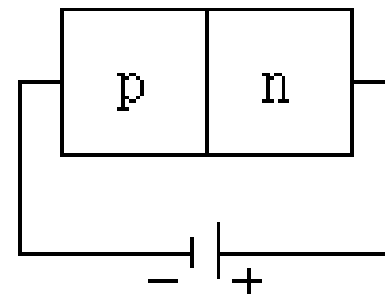
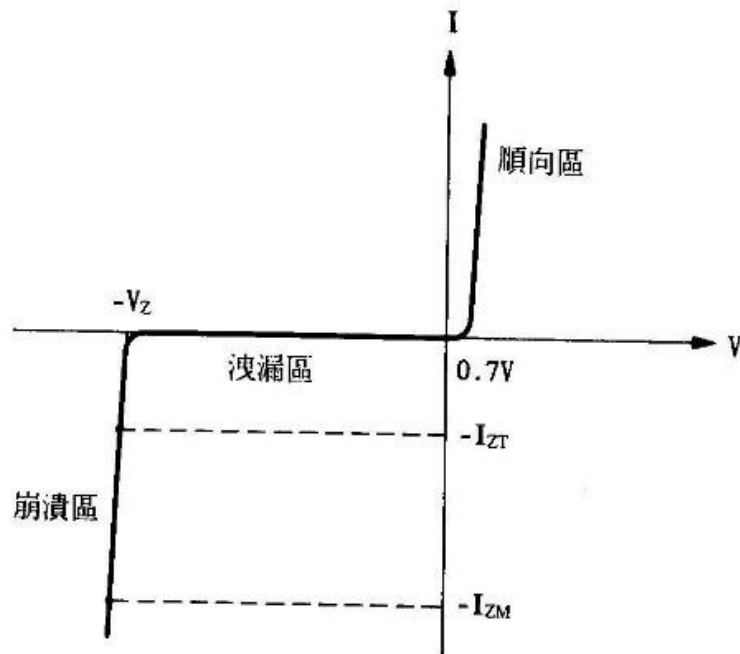
# PN 二極體：順向偏壓 (Forward bias)

- 若 p 側相對於 n 側的電位為正，則稱此接面為順向偏壓
- 若順向偏壓上升，則電位障壁減小，所以大量的電洞會從 p 側流到 n 側；同樣的，大量的電子也會從 n 側流到 p 側，造成二極體電流上升
- 當電位能可以完全克服 PN 接面的電位障壁時，則電流會明顯上升



# PN 二極體： 逆向偏壓 (Reverse bias)

- 若 n 側相對於 p 側的電位為正，則稱此接面為逆向偏壓。若逆向偏壓上升，則電位障壁會增加，P 側的電洞和 N 側的電子無法越過接面，電流幾乎為零
- 二極體的逆向偏壓達到某個值時 此時會產生崩潰現象，會永久損壞



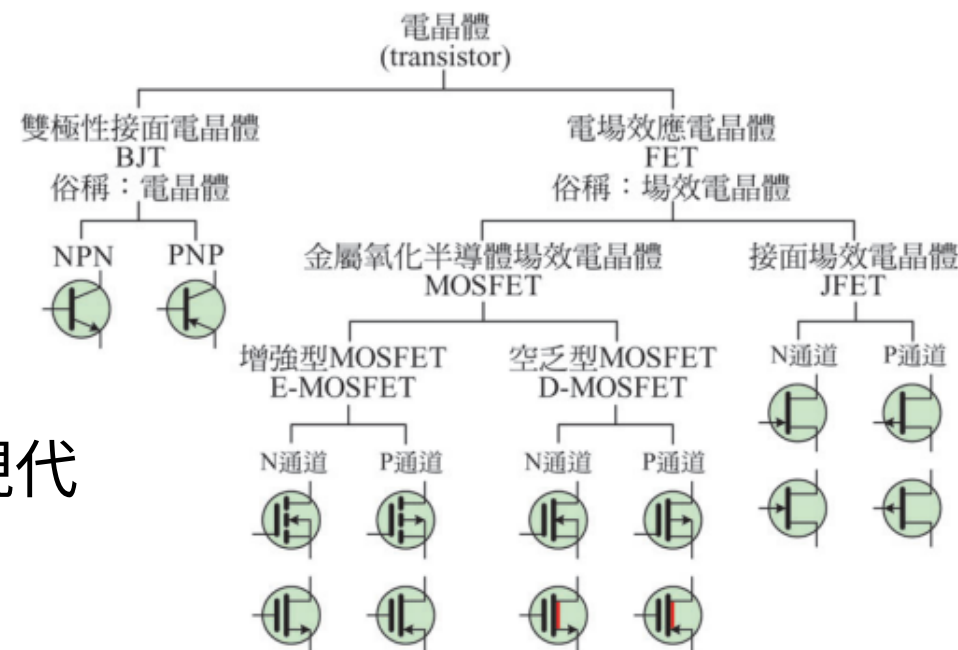
# 電晶體 (Transistor)

- 一般而言至少要有三隻外接腳，故又稱三極體，其中包含一隻控制訊號的接腳。主要功能是用來做電流的開關和放大電流

- 主要分成兩類：

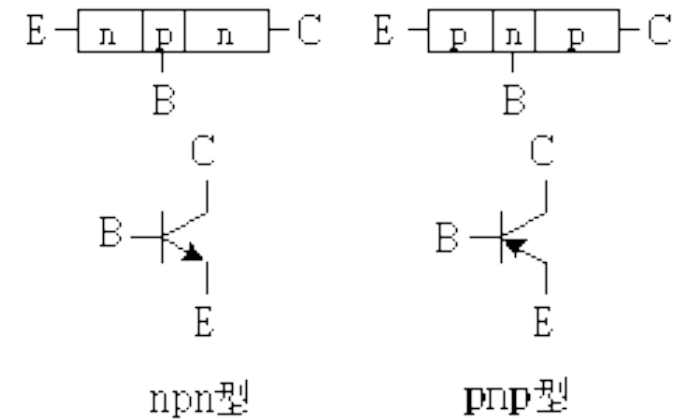
- BJT( 雙極性電晶體 , Bipolar Junction Transistor)
- FET( 場效電晶體 , Field Effect Transistor)

- 早期的固態電子電路發展是以 BJT 為主，在現代的電腦中的積體電路則是以 FET 為主要元件。



# BJT( 雙極性電晶體 )

- 依結構分，有 npn 型及 pnp 型兩種
- 雙極性電晶體由三部分摻雜程度不同的半導體製成，其中 E 表示射極 (emitter)、B 表示基極 (base)、C 表示集極 (collector)
- 射極 (E) 是一個具高摻雜濃度的區域，主要將自由電子射入基極
- 基極 (B) 的摻雜濃度較低而且很薄，負責將射極注入的電子傳送到集極，然後以價電子的形式，到輸入電壓的正端
- 集極 (C) 的摻雜濃度介於射極與基極之間，它收集由基極送來的大部分電子。

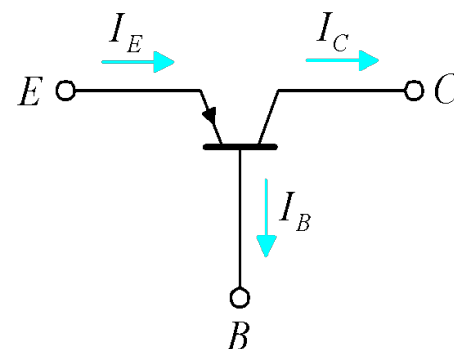
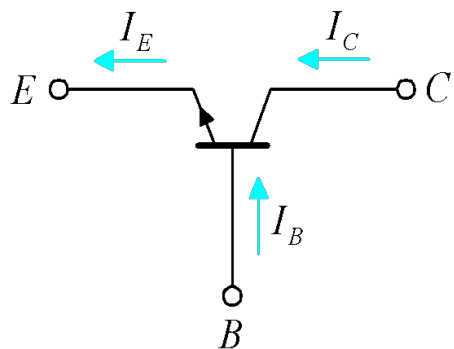
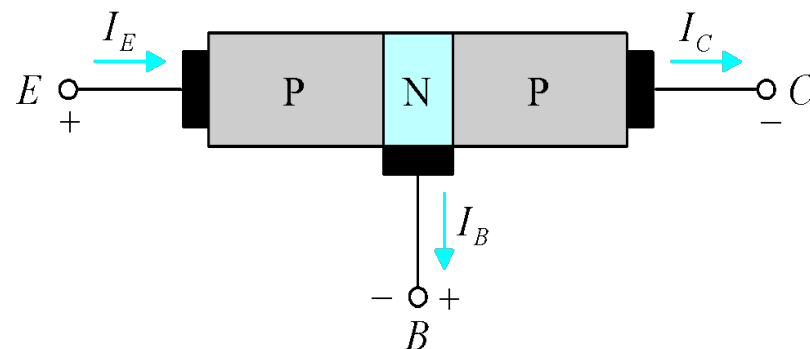
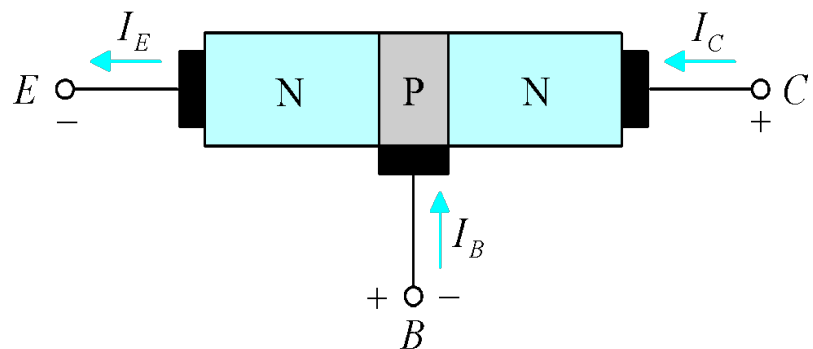


# BJT( 雙極性電晶體 )

- BJT 有兩個接面： B-E 接面和 B-C 極接面，由接面所受的偏壓方式不同，可得到四種工作模式

□ □ □ □	$B-E$ □ □ □ □ □ □ □ $J_E$ □	$B-C$ □ □ □ □ □ □ □ $J_C$ □	□ □
□ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □ □
□ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □ ( ON )
□ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □ ( OFF )
□ □ □ □ □	□ □ □ □	□ □ □ □	-

# 電晶體的電流分量



$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_E > I_C \gg I_B$$

# 電晶體的 $\alpha$ 、 $\beta$ 參數

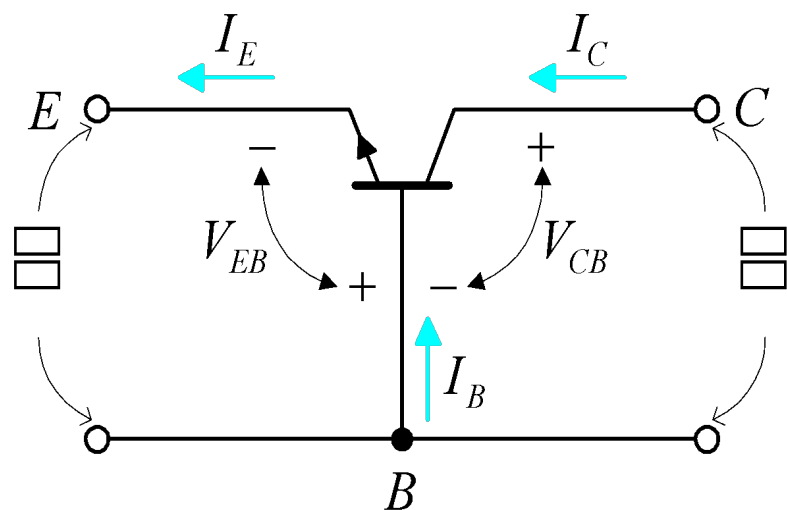
- 我們定義
  - 共基極電流增益  $\alpha = I_C / I_E$
  - 共射極電流增益  $\beta = I_C / I_B$
- 因為  $I_E = I_B + I_C$ ，可得
  - $\alpha = \beta / (1 + \beta)$
  - $\beta = \alpha / (1 - \alpha)$

# BJT 特性曲線

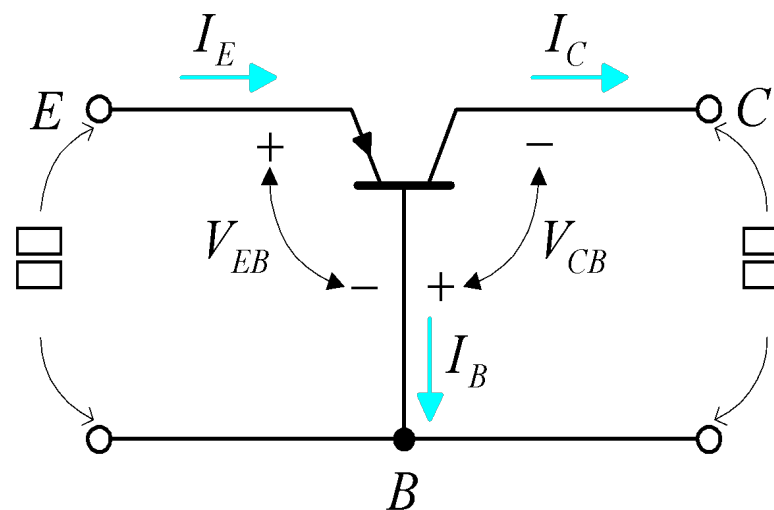
- 電晶體的三端 (E、B、C) 中，先以一端為參考端，另外兩端分別為輸入端及輸出端
- 如果以射極 (E) 為參考端，基極 (B) 則為輸入端，集極 (C) 為輸出端。這種組態稱為共射極組態 (CE 組態)
- 如果以基極 (B) 為參考端，射極 (E) 則為輸入端，集極 (C) 為輸出端。這種組態稱為共基極組態 (CB 組態)
- 如果以集極 (C) 為參考端，基極 (B) 則為輸入端，射極 (E) 為輸出端。這種組態稱為共集極組態 (CC 組態)



# 共基極（CB）組態



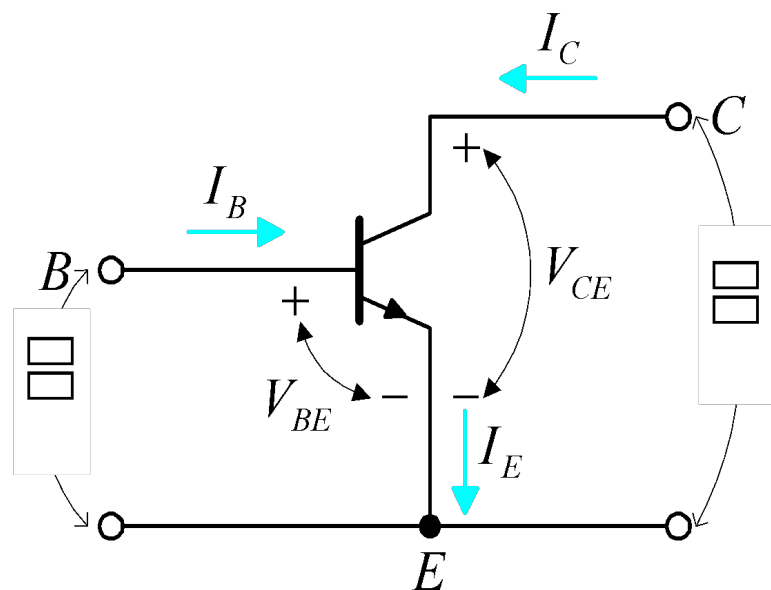
(a) NPN 型電晶體



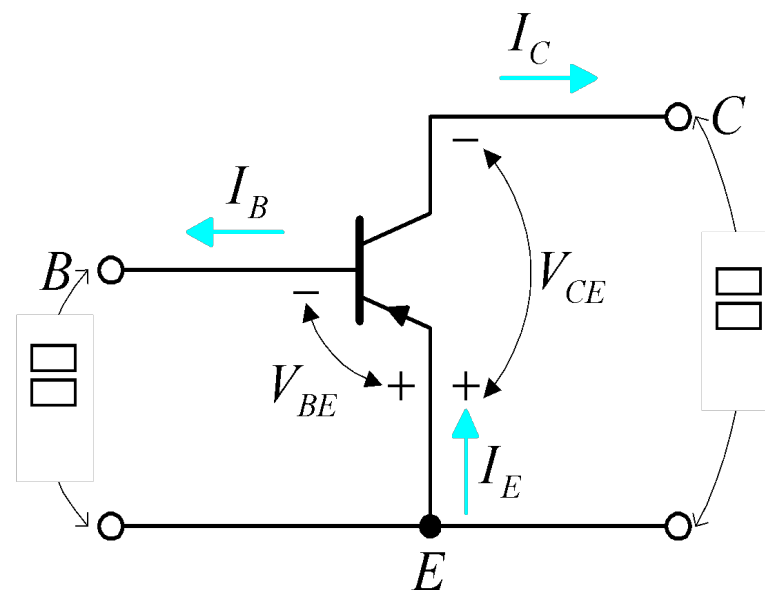
(b) PNP 型電晶體

共基極組態的连接及偏壓

# 共射極（CE）組態



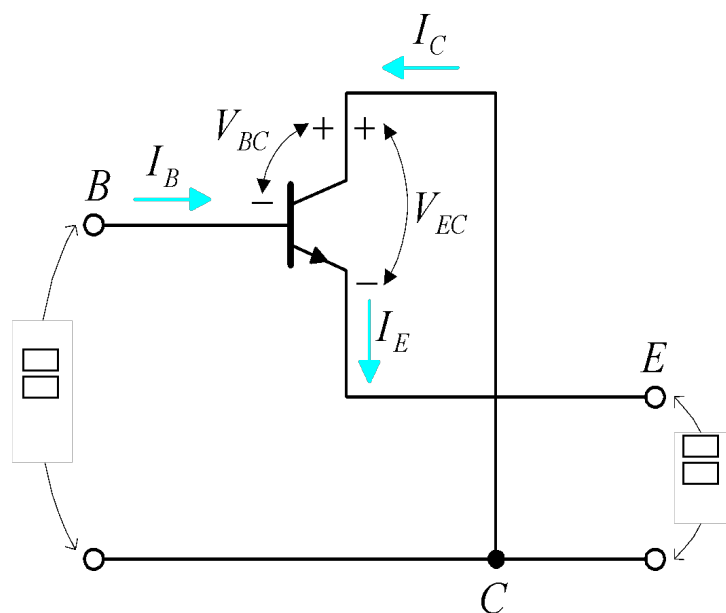
(a) NPN 型電晶體



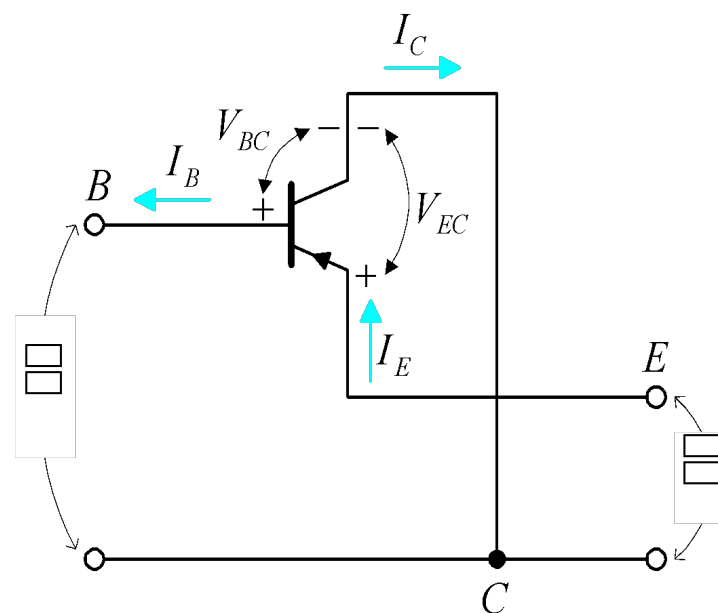
(b) PNP 型電晶體

共射極組態的连接及偏壓

# 共集極（CC）組態



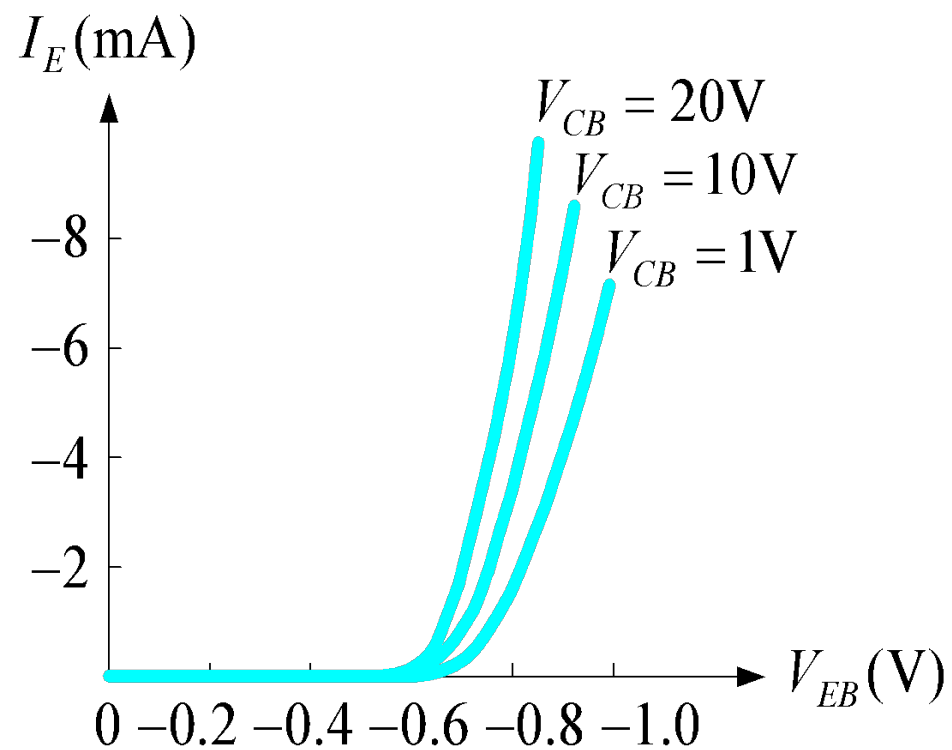
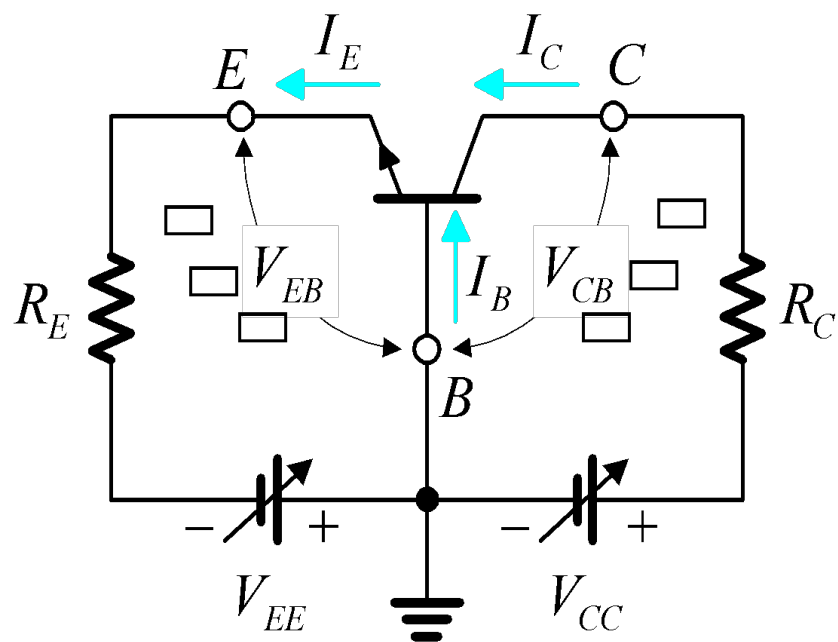
(a) NPN 型電晶體



(b) PNP 型電晶體

共集極組態的連接及偏壓

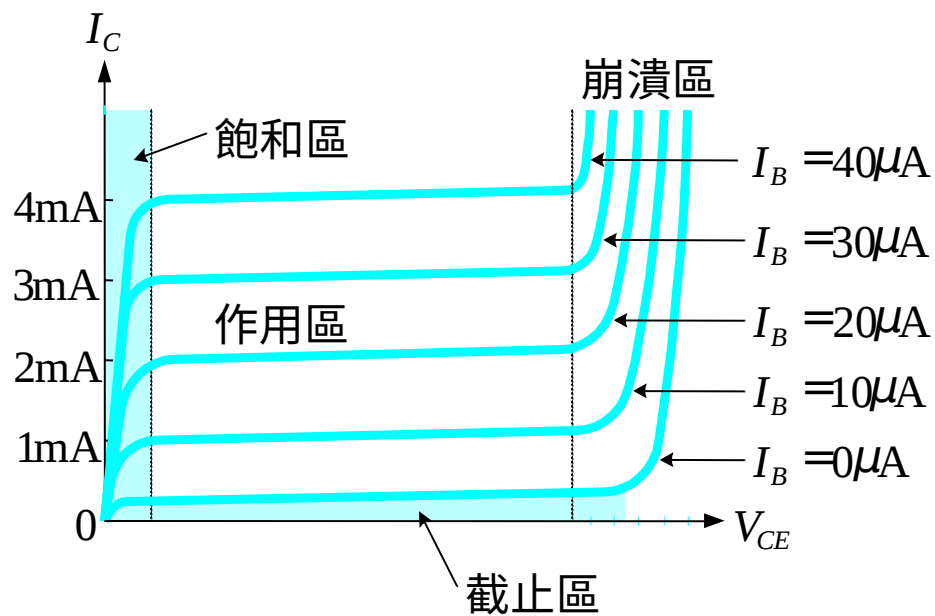
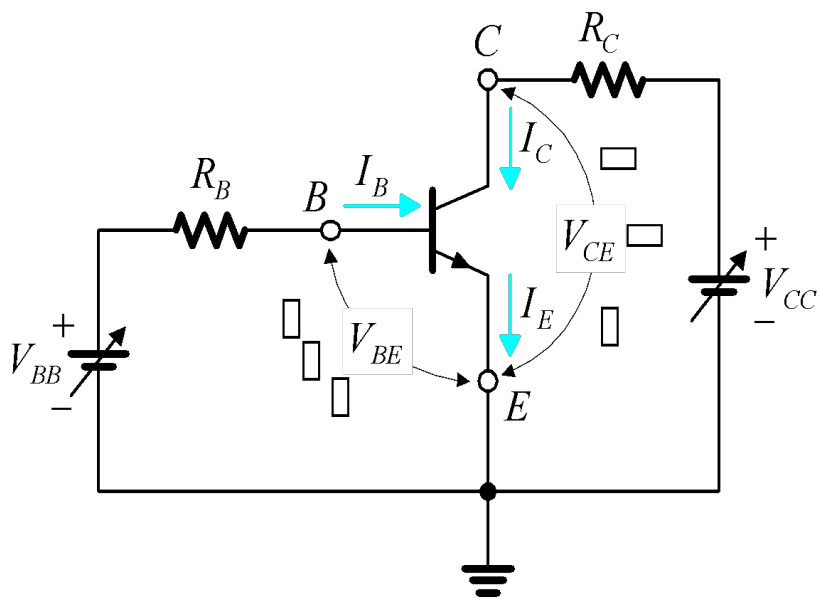
# 輸入特性曲線



輸入特性曲線

# 輸出特性曲線

- 當電晶體作為放大器使用時，必須在作用區內



輸出特性曲線

# CB CE CC 用途比較

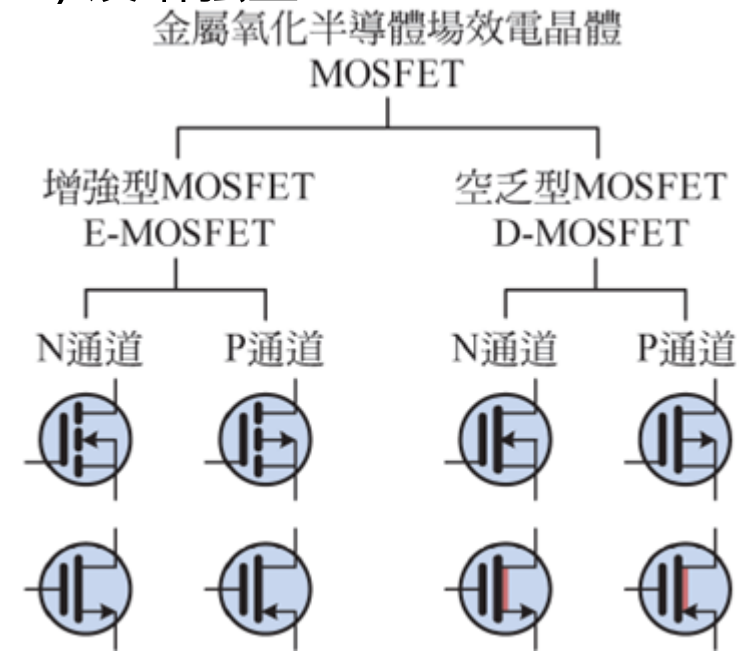
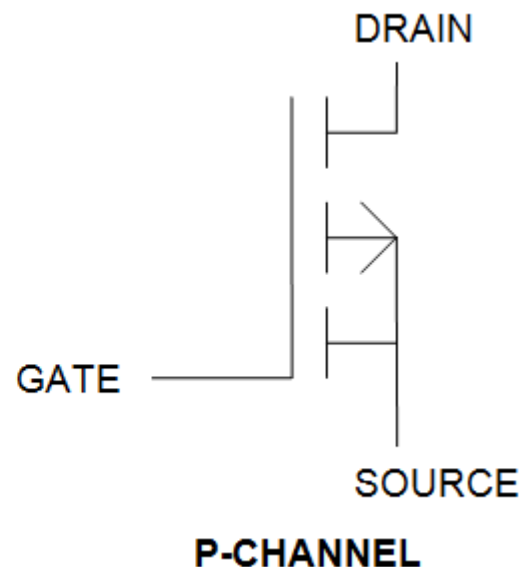
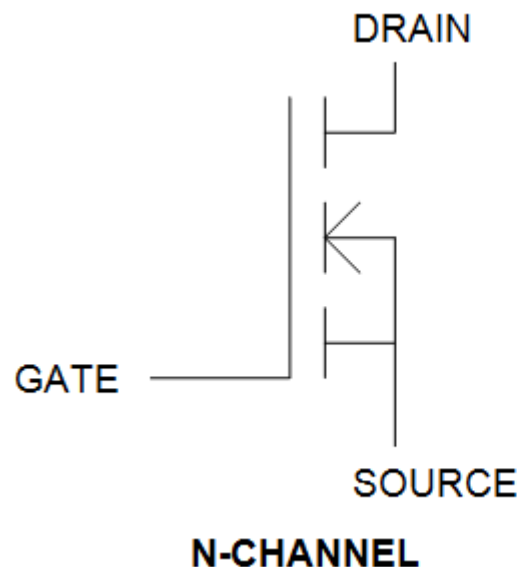
- CB( 共基極組態 )：高頻響應較佳，故常用於射頻電路或振盪電路。
- CE( 共射極組態 )：因功率增益最大，故常用於線性放大電路，應用最為廣泛。
- CC( 共集極組態 )：具有高輸入阻抗低輸出阻抗之特性，故用於阻抗匹配。

# FET( 場效應電晶體 )

- FET 利用電子 (N 通道 FET) 或是電洞 (P 通道 FET) 導通電流。場效應電晶體都有閘極 (gate)、汲極 (drain)、源極 (source) 三個極，某些種類還會有第四個極：體極 (body)
- FET 為單極性元件 (N 通道 FET 為電子的流動； P 通道 FET 為電洞的流動)，BJT 為雙極性元件 (不論是 npn 或 pnp 都有電子及電洞的流動)
- FET 為壓控電流源，BJT 為流控電流源
- FET 的熱穩定性較佳，且製造較簡單，面積較小，因此適於 IC 製造；但操作速率較慢
- FET 可分為 JFET 和 MOSFET 兩大類

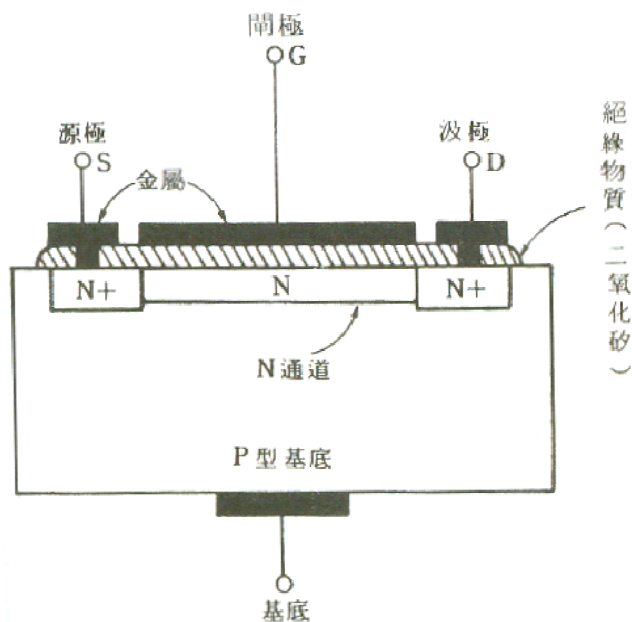
# MOSFET(Metal Oxide Semiconductor FET)

- MOSFET 是 FET 的一種，為人類使用最多的電晶體種類，由於 MOSFET 的結構特別適合被縮小化，而且功率需求也小，被廣泛使用在電腦及通訊相關的電子設備中
- MOSFET 依通道種類可分為 NMOS(N-channel MOSFET) 及 PMOS (P-channel MOSFET)，依在  $V_{GS}=0$  有無通道可分為空乏型 (depletion type) 及增強型 (enhancement type)

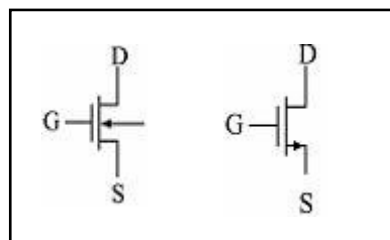




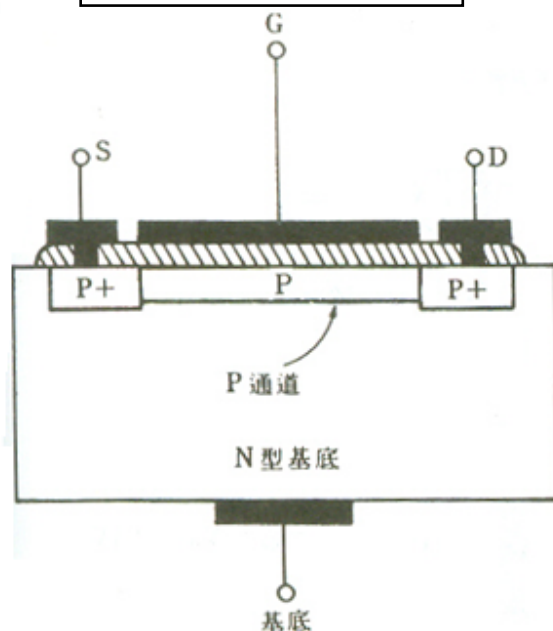
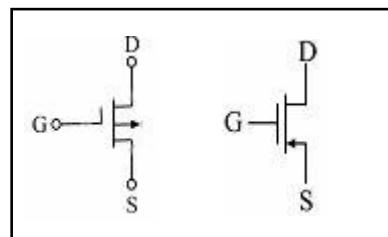
# MOSFET 種類與符號



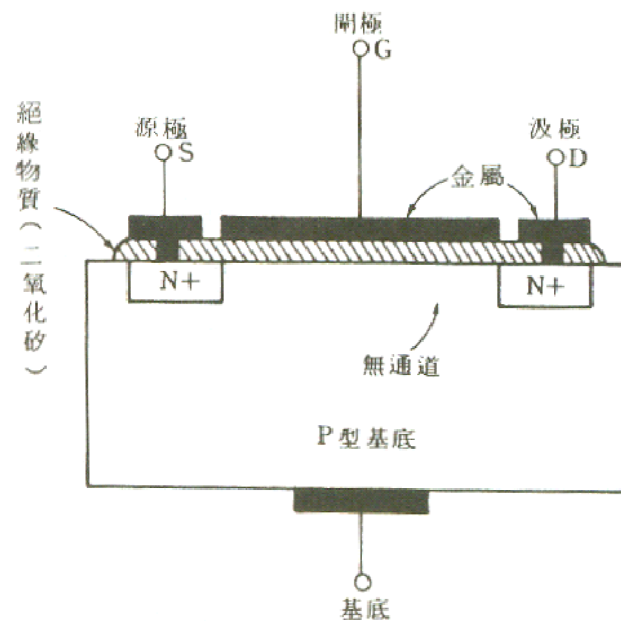
(a) N通道空乏型 MOSFET



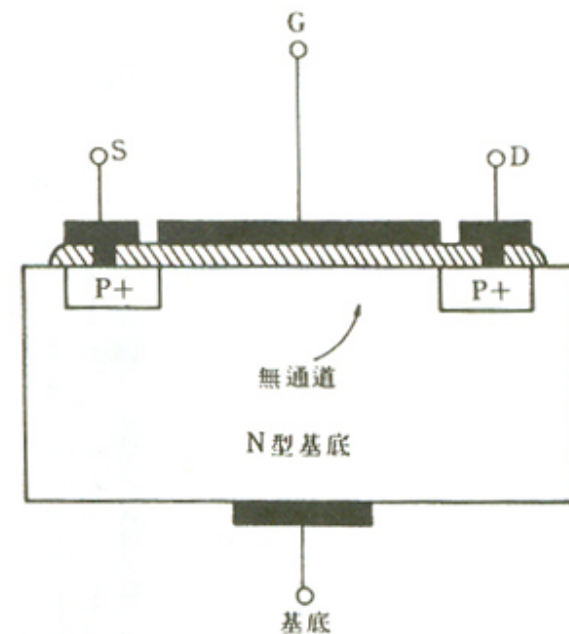
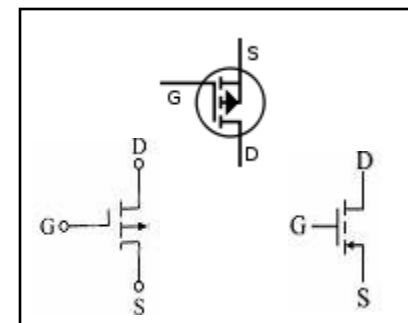
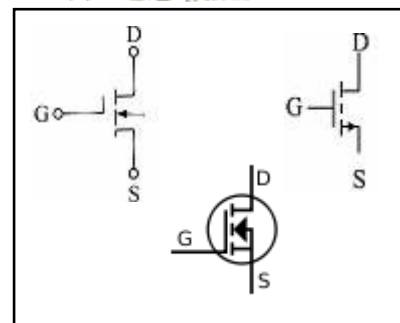
絕緣物質 (二氧化矽)



(b) P通道空乏型 MOSFET



(c) N通道增強型 MOSFET

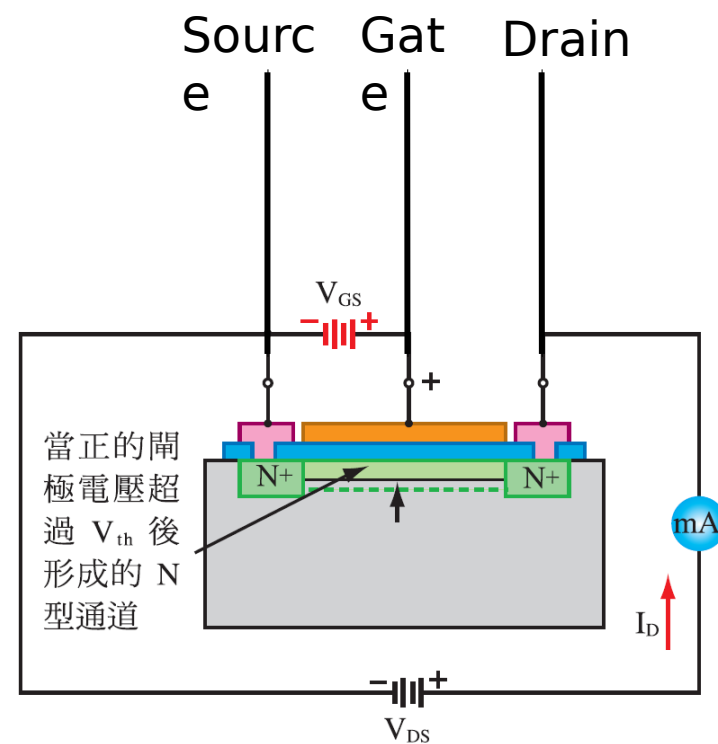


(d) P通道增強型 MOSFET

# 增強型 MOSFET 工作原理

- 當  $V_{GS} = 0$  時，MOSFET 處於截止狀態，Gate 與 Source 之間無通道
- 當  $V_{GS} > 0 (V_{GS} < 0)$  時，Gate 下方形成空乏區
- 當  $|V_{GS}| > V_t$  ( 臨界電壓 ) 時，電子 ( 電洞 ) 被引進空乏區，Source 和 Drain 之間形成 N 型 ( P 型 ) 通道，並產生電流

※ 以上為 N 通道，括號內為 P 通道

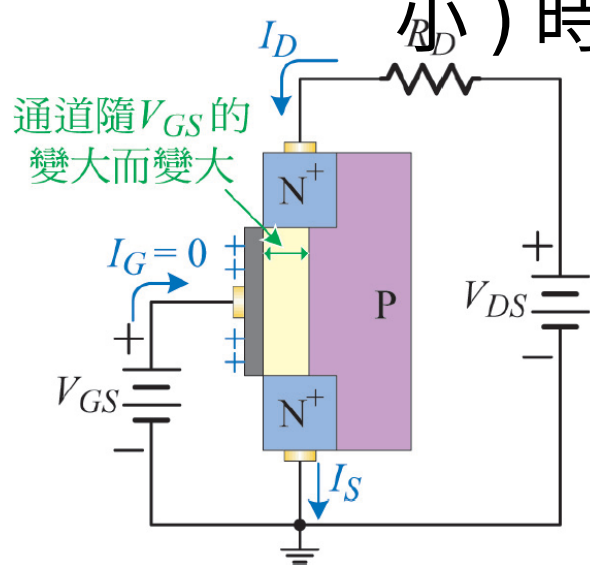


N 通道增強型  
MOSFET

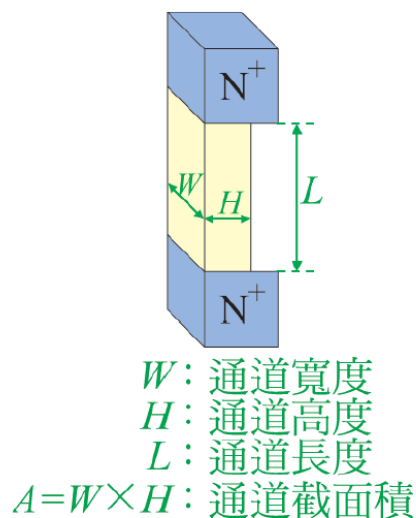
# 增強型 MOSFET 特性： 歐姆區 (Ohmic Region)

※ 又稱 Linear Region 或 Triode Region

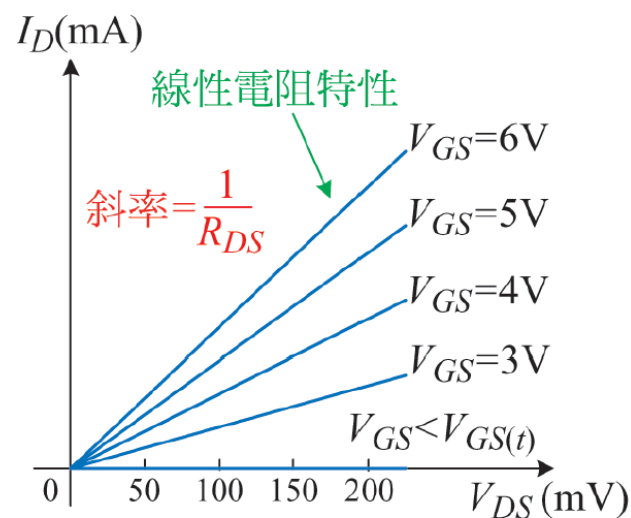
當  $V_{GS} > V_t$  且  $V_{DS} < V_{GS}$  ( $V_{DS}$  極小) 時



(a) 等高的 N 通道



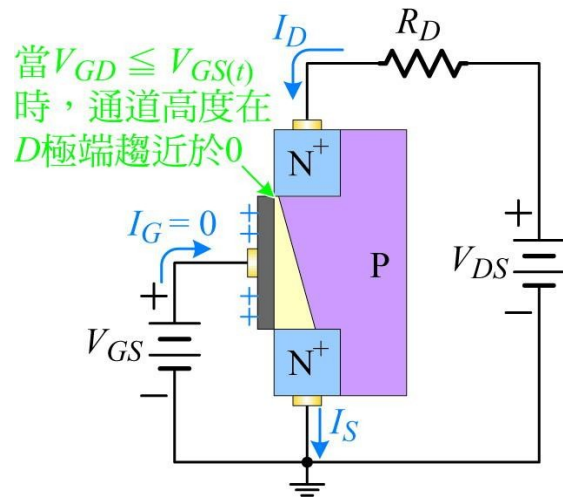
(b) 通道立體圖



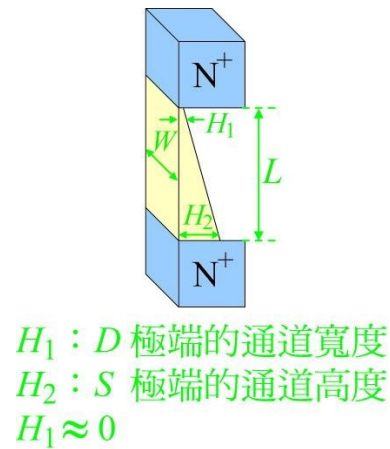
(c)  $V_{DS}$ - $I_D$  輸出特性曲線

# 增強型 MOSFET 特性： 飽和區 (Saturation Region)

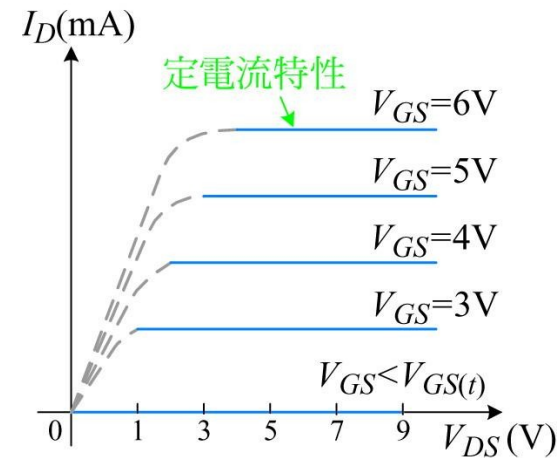
當  $V_{GS} > V_t$  且  $V_{DS} > V_{GS}$  時



(a) D 極端夾止的 N 通道



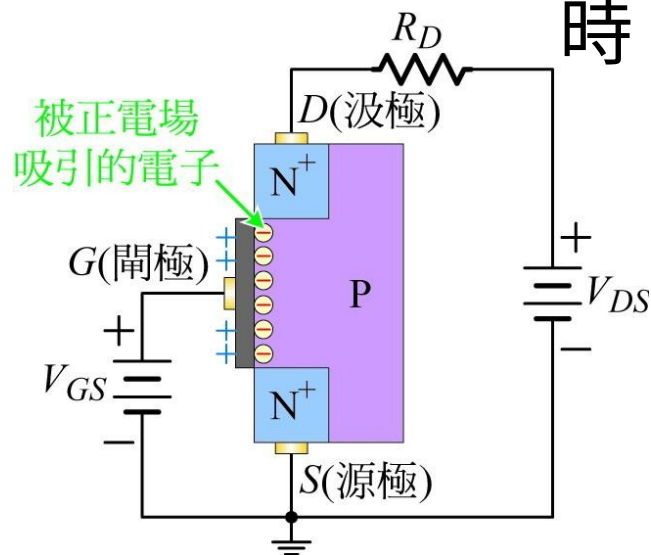
(b) 通道立體圖  
曲線



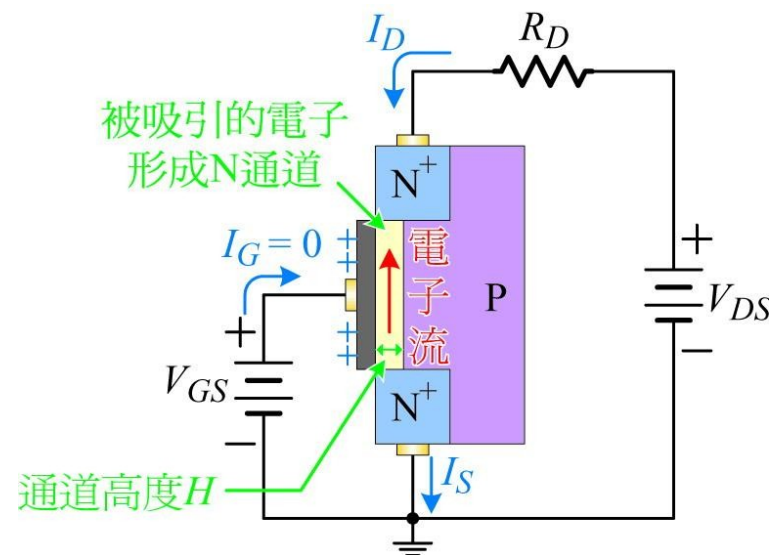
(c) 輸出特性

# 增強型 MOSFET 特性： 截止區 (Cut-Off Region)

當  $V_{GS} < V_t$   
時



(a) 電子被吸引聚集在二氧化矽層下  
成

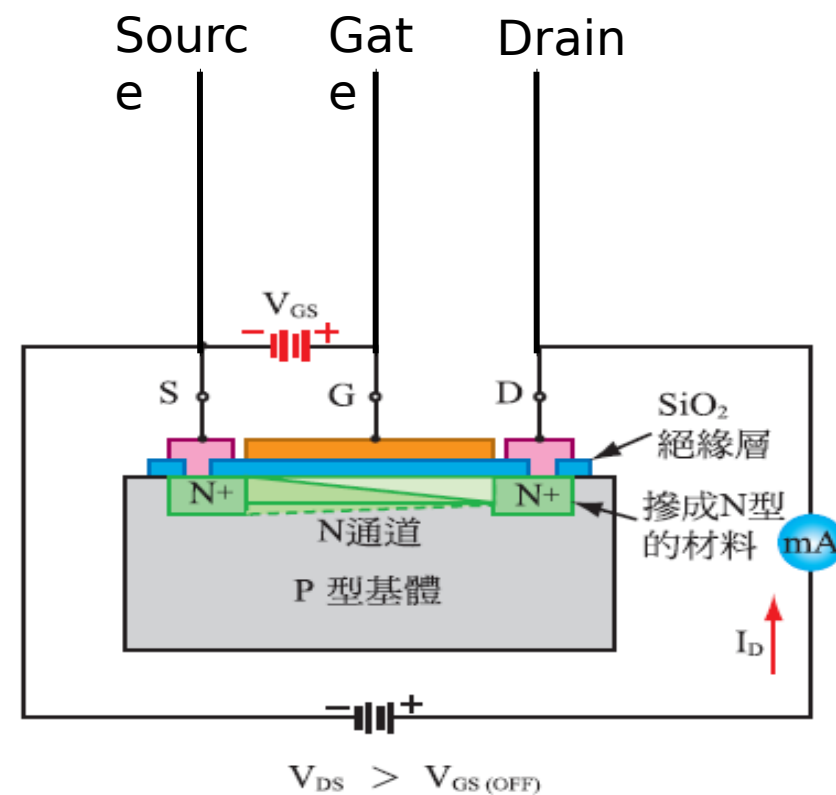


(b)  $N$  通道的形

# 空乏型 MOSFET 工作原理

- 當  $V_{GS} = 0$  時，加入少許  $V_{DS}(V_{SD})$ ，便可產生電流
- 當  $V_{GS} < 0$  時，N 通道 (P 通道) 會感應正電荷 (負電荷)，使得 Drain 電流減少
- 當  $V_{GS} > 0$  時，N 通道 (P 通道) 會感應負電荷 (正電荷)，使得 Drain 電流增加

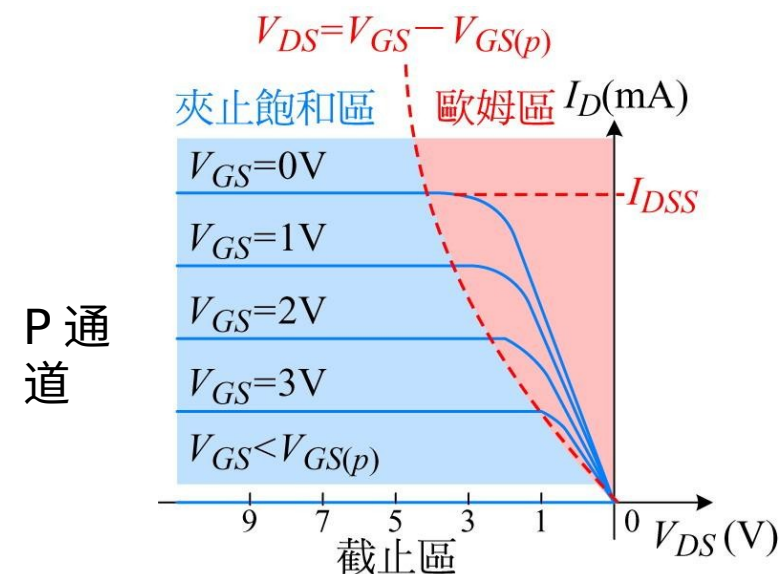
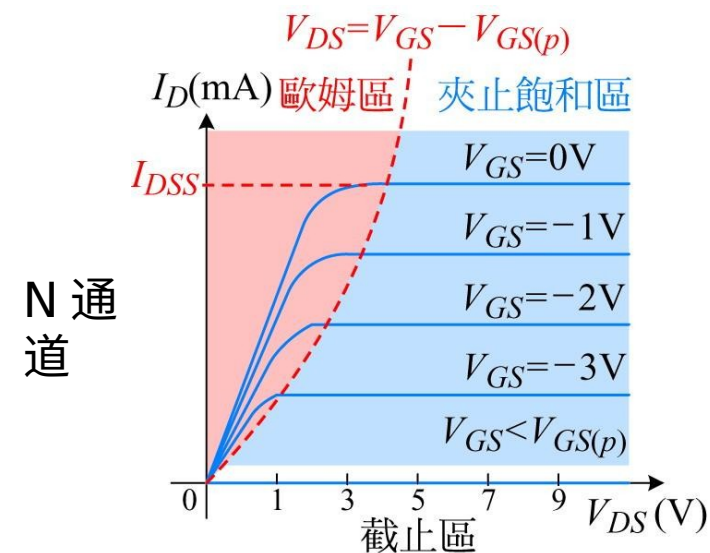
※ 以上為 N 通道，括號內為 P 通道



N 通道空乏型  
MOSFET

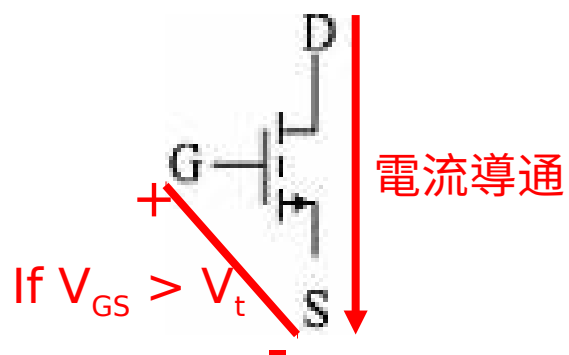
# 空乏型 MOSFET 特性：

- 與增強型一樣有截止區、三極體區、飽和區
- 對 N 通道空乏型來說，因為有通道， $V_{GS}=0$  時仍有電流，隨著  $V_{GS}$  漸漸減小，電流會逐漸變小，直到小於臨界電壓 ( $V_t$ ) 時，電晶體才會進入截止區
- P 通道亦同，但是隨著  $V_{GS}$  漸漸變大，電晶體才會進入截止區

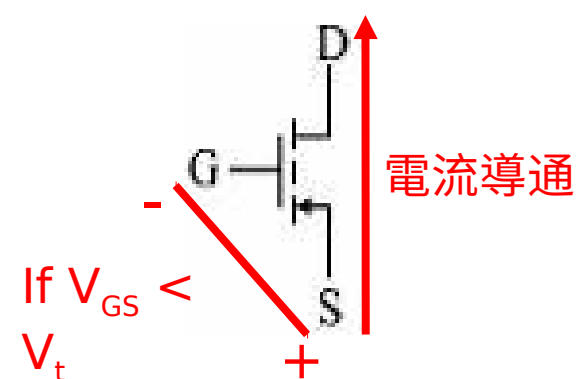


# MOSFET 種類比較

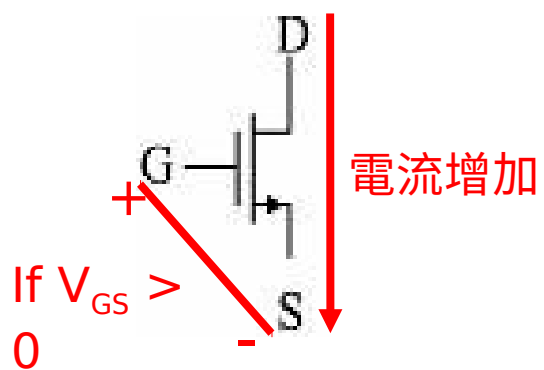
N 通道增強型



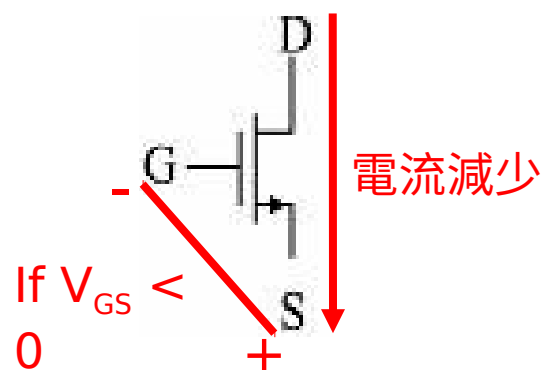
P 通道增強型



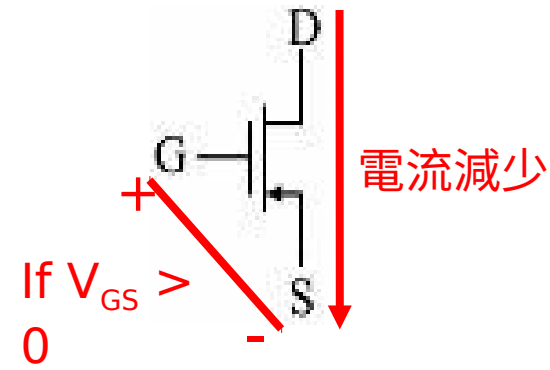
N 通道空乏型



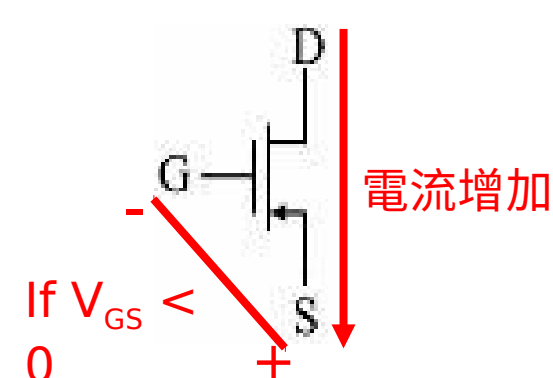
N 通道空乏型



P 通道空乏型



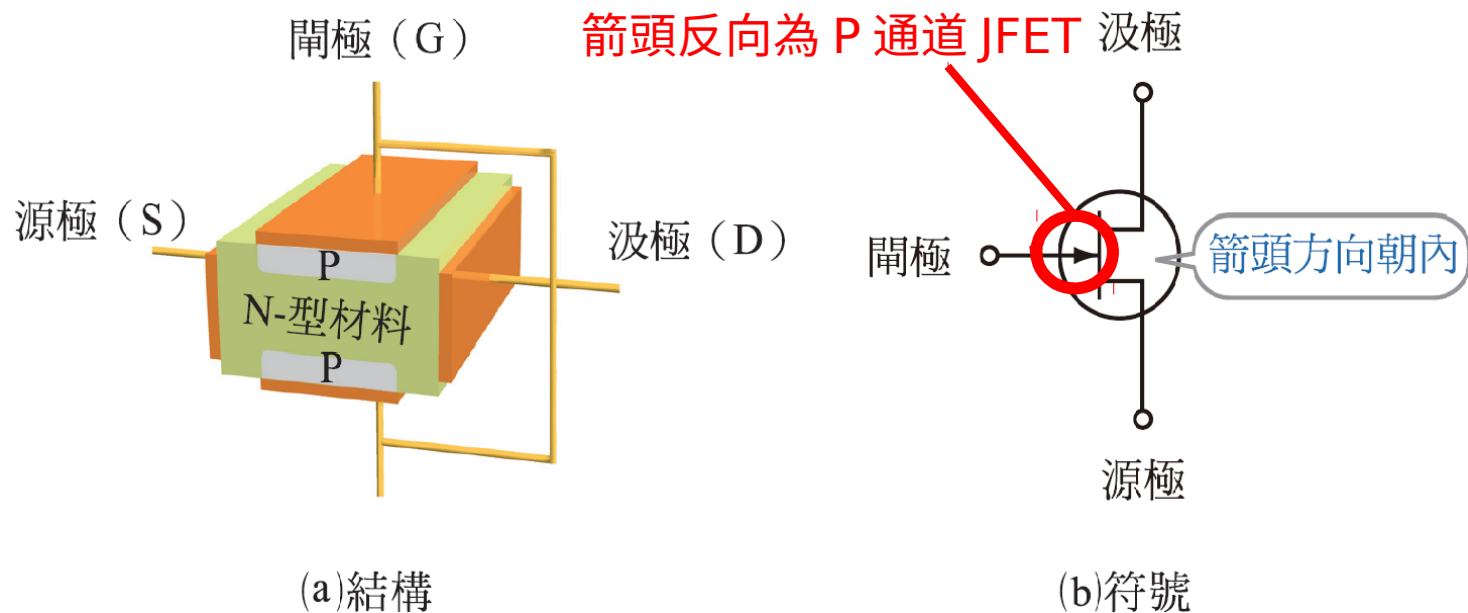
P 通道空乏型





# JFET(Junction FET)

- V-I 特性與空乏型 MOSFET 幾乎完全相同， $V_{GS}$  為 0 時即存在通道



▲圖 8-1 N 通道 JFET 的結構與符號

# JFET 與空乏型 MOSFET 的差別

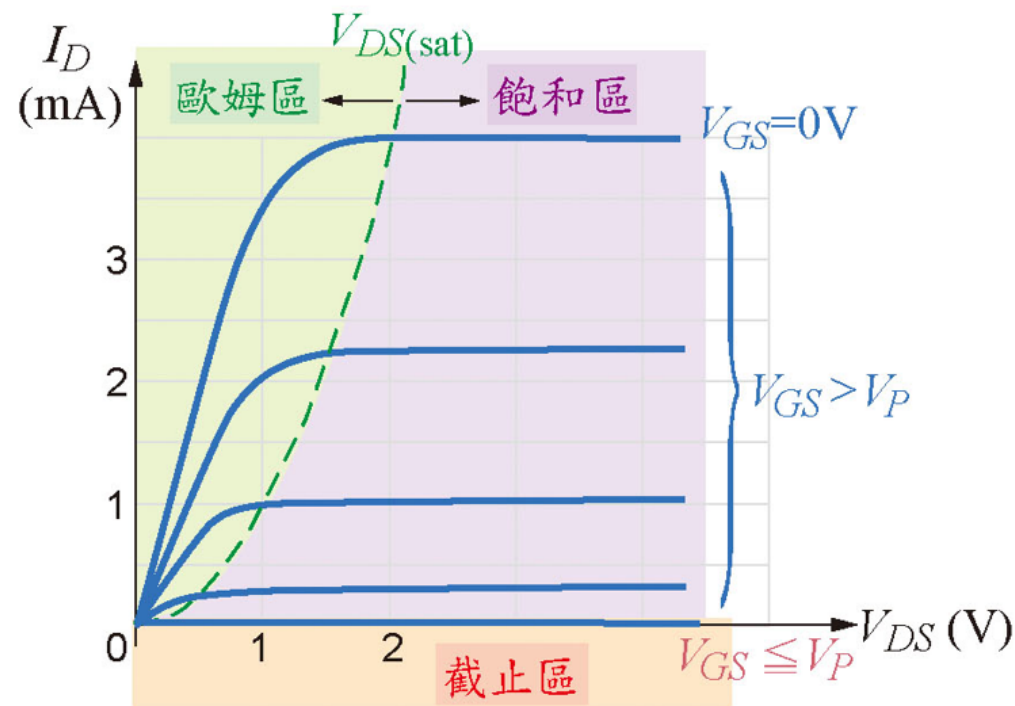
- 相比空乏型 MOSFET 可透過給予閘源極 (G,S) 正偏壓和負偏壓來改變電流大小，JFET 只能給予負偏壓。
- 在給予正偏壓時，會無法控制通道電流大小，並且使閘極 (Gate) 電流為 0
- 因此對 N 通道 JFET 來說， $V_{GS}$  須小於 0；而對 P 通道來說，須大於 0

# JFET 的歐姆區 (Ohmic Region, Triode Region, Linear Region)

- 當  $V_{DS}$  很小時 ( $|V_{DS}| < |V_{GS} - V_P|$  , 且  $|V_{GS}| < |V_P|$  ,  $V_P$  為夾止 pinch off 電壓 ) , JFET 處於歐姆區

- 在歐姆區時, 通道的電阻為定值

- 且  $I_D$  會與  $V_{DS}$  近乎成等比例成長

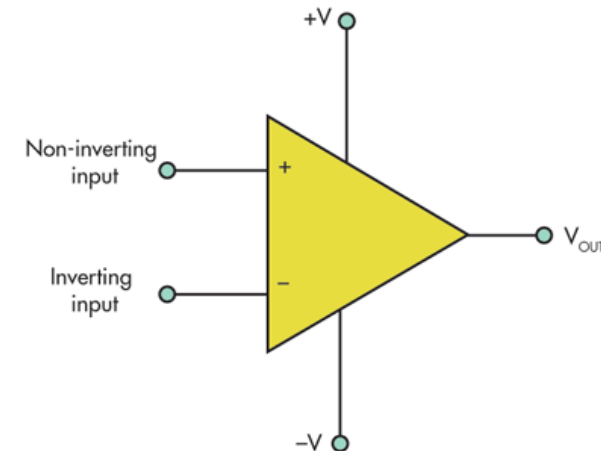


N 通道 JFET

# JFET 的飽和區 (Saturation Region) 與截止區 (Cut-off Region)

- 當  $|V_{DS}| > |V_{GS} - V_P|$  , 且  $|V_{GS}| < |V_P|$  時, 則為飽和區
- 在飽和區時, 不論  $V_{DS}$  為多少,  $I_D$  皆為定值
- 當  $|V_{GS}| > |V_P|$  時, 則為截止區
- 在截止區時, 通道被完全夾止, 不在導通,  $I_D$  等於 0

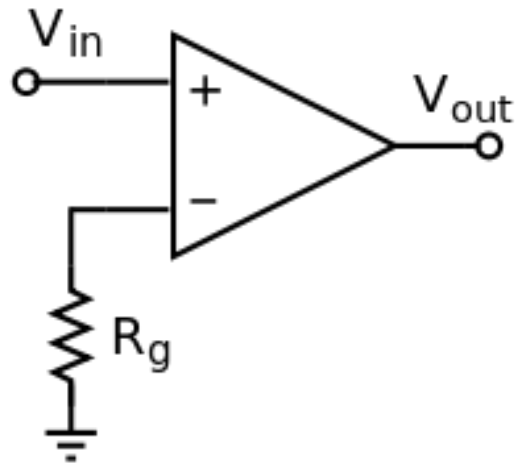
# 運算放大器



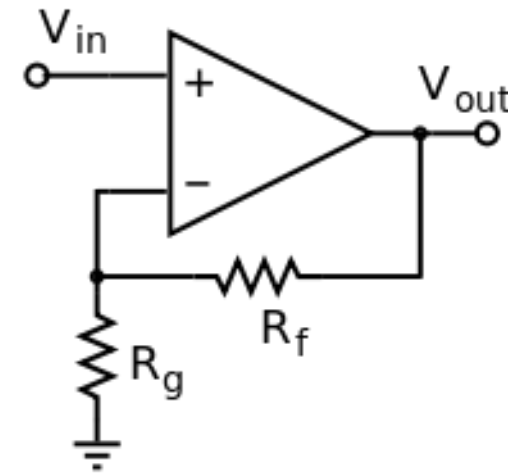
- Operational Amplifier ，可簡稱 OP, OPA, OP AMP
- 一種具有高增益 (gain) 的差動放大器 (Differential Amplifier) ，利用電壓回授來穩定電壓增益，可以用來放大電壓，以操作加減乘除、反向、微積分等數學運算
- 具有兩個電源端 ( $V_{CC}$  ,  $-V_{CC}$ ) ，但也可以只提供一個電源 ( $V_{CC}$  , Gnd)
- 具有兩個輸入端， + 為非反相輸入端 (Non-inverting Input) ， - 為反相輸入端 (Inverting Input) ，以及一個輸出端

# 閉迴路 / 開迴路 (Closed loop / Open loop)

- $V_{out} = (V_+ - V_-) * A_{OL}$  ( $A_{OL}$  : 開迴路差動增益)
- 由於運算放大器的開迴路增益 ( $A_{OL}$ ) 非常高，因此就算輸入端的差動訊號很小，仍然會讓輸出訊號飽和，導致非線性的失真出現。因此通常只有實作比較器時才會採用開迴路



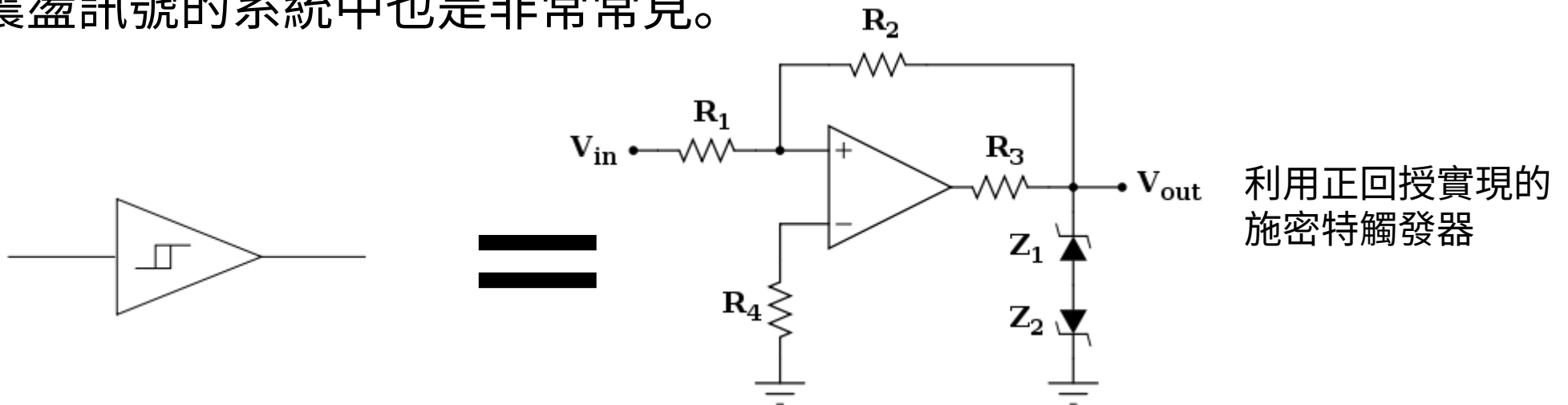
使用開迴路實作的比較器



使用閉迴路實作的放大器

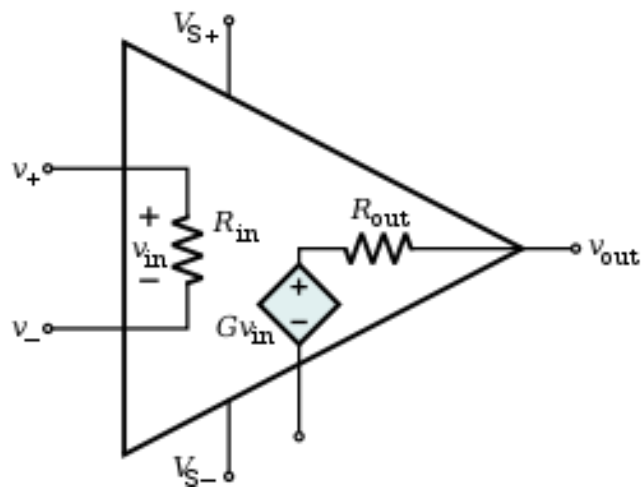
# 負回授 / 正回授 (Negative feedback / Positive feedback)

- 通常使用運算放大器時，會將輸出端與反相輸入端（inverting input node）連接，形成負回授。原因是運算放大器的電壓增益非常大，使用負回授才能保證電路的穩定運作。
- 因此會需要用到正回授的情況，通常是在需要產生震盪的系統中，比如需要遲滯現象的施密特觸發器 (Schmitt trigger) 就是採用正回授，以及其他需要震盪訊號的系統中也是非常常見。



# 虛接地

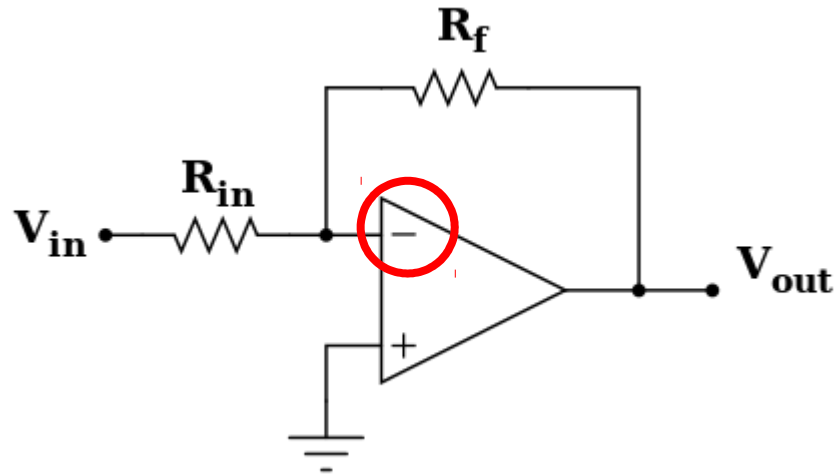
- 因為理想運算放大器的輸入阻抗 ( $R_{in}$ ) 是無限大，所以沒有電流流入，亦即兩輸入端之間沒有電位差，因此我們認為這兩端間的電位是相同的。此即為「虛接地」，就像有接地一樣





# 反相 / 非反相 (Inverting / Non-Inverting)

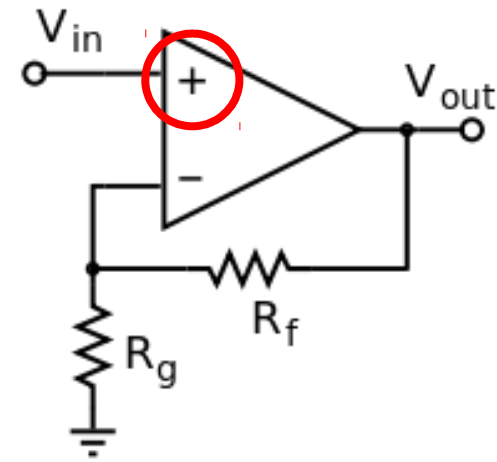
反相閉迴路負回授放大器



$$V_{out} = -V_{R_f} = -I \cdot R_f = -\frac{V_{in}}{R_{in}} \cdot R_f = -\frac{R_f}{R_{in}} \cdot V_{in}$$

$$\text{Gain} = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

非反相閉迴路負回授放大器

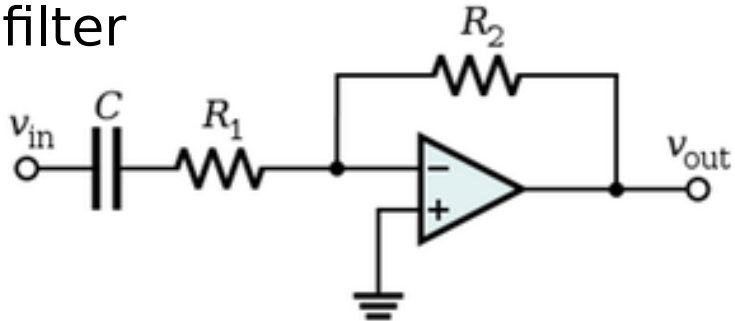


$$\begin{aligned} V_{out} &= V_{in} + i \times R_f = V_{in} + \left( \frac{V_{in}}{R_g} \times R_f \right) \\ &= V_{in} + \frac{V_{in} \times R_f}{R_g} = V_{in} \left( 1 + \frac{R_f}{R_g} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Gain} = 1 + \frac{R_f}{R_g}$$

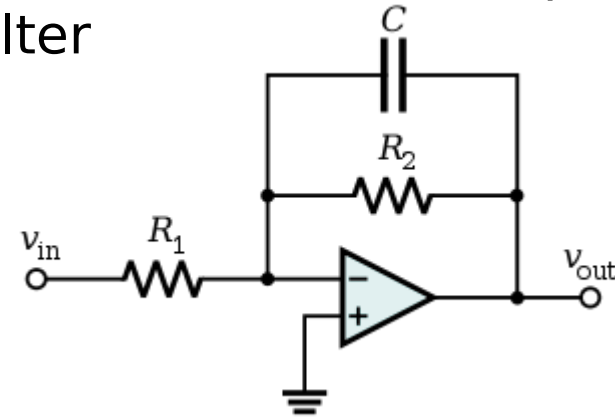
# 運算放大器：主動濾波器 (Active Filter)

Active first-order high-pass filter



$$\text{Gain} = -R_2/R_1$$
$$F_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot C)$$

Active first-order low-pass filter



$$\text{Gain} = -R_2/R_1$$
$$F_c = 1 / (2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C)$$

# 圖片出處

- <http://www.build-electronic-circuits.com/how-does-a-capacitor-work/>
- <http://www.murata.com/zh-cn/products/emiconfun-tw/inductor/2010/12/15/tw-20101215-p1>
- [https://en.wikipedia.org/wiki/RLC\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/RLC_circuit)
- <http://tymkrs.tumblr.com/post/8260166418/low-pass-filter-how-do-they-work-part-i>
- [http://www.play-hookey.com/ac\\_theory/filters/lo\\_pass\\_filters.html](http://www.play-hookey.com/ac_theory/filters/lo_pass_filters.html)
- [http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter\\_2.html](http://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Band-pass_filter)
- [https://en.wikipedia.org/wiki/RLC\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/RLC_circuit)

# 圖片出處

- <http://www.cnblogs.com/xuhongchuan/archive/2012/11/26/2789431.html>
- <http://140.120.11.150/~ael/lecturenote/PN.pdf>
- <http://sun.cis.scu.edu.tw/~lab/knowledge/2.htm>
- [http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public\\_html/\\_private/electronics/diode/junction.htm](http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public_html/_private/electronics/diode/junction.htm)
- <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%99%B6%E4%BD%93%E7%AE%A1>
- [http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public\\_html/\\_private/electronics/bjt/concept.htm](http://pub.tust.edu.tw/mechanic/mclab/public_html/_private/electronics/bjt/concept.htm)

# 圖片出處

- <http://web1.knvs.tp.edu.tw/group2/info/word/%E6%97%97%E7%AB%8B--%E9%9B%BB%E5%AD%90%E5%AD%B8%E2%85%A0/%E7%AC%AC%E5%9B%9B%E7%AB%A0%20%20%E9%9B%99%E6%A5%B5%E6%80%A7%E6%8E%A5%E9%9D%A2%E9%9B%BB%E6%99%B6%E9%AB%94.ppt>
- <http://www.electronic-products-design.com/geek-area/electronics/mosfets/using-mosfets-as-general-switches>
- [https://www.google.com.tw/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiP3q\\_UxaHJAWhppQKHVSZBMEQFggiMAE&url=http%3A%2F%2F203.72.198.200%2Fassets%2Fattached%2F16960%2Foriginal%2FMOSFET%25E5%25B7%25A5%25E4%25BD%259C%25E5%258E%259F%25E7%2590%2586NEW.ppt](https://www.google.com.tw/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwiP3q_UxaHJAWhppQKHVSZBMEQFggiMAE&url=http%3A%2F%2F203.72.198.200%2Fassets%2Fattached%2F16960%2Foriginal%2FMOSFET%25E5%25B7%25A5%25E4%25BD%259C%25E5%258E%259F%25E7%2590%2586NEW.ppt)

# 圖片出處

- [http://portal.ptivs.ptc.edu.tw/sys/lib/read\\_attach.php?id=4669](http://portal.ptivs.ptc.edu.tw/sys/lib/read_attach.php?id=4669)
- <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E8%BF%90%E7%AE%97%E6%94%BE%E5%A4%A7%E5%99%A8>
- [http://portal.ptivs.ptc.edu.tw/sys/lib/read\\_attach.php?id=4669](http://portal.ptivs.ptc.edu.tw/sys/lib/read_attach.php?id=4669)