

實驗九 電晶體 BJT 基本介紹及相關實驗

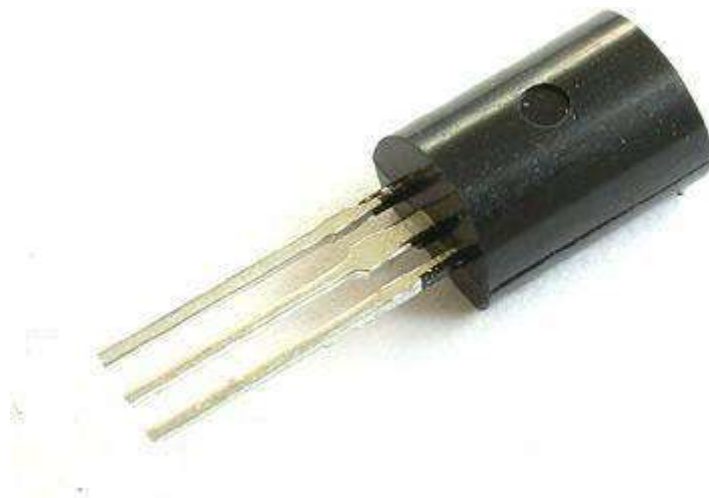


Figure 9-1 電晶體

最初研究電晶體的目的是想取代耗電而且笨重的真空管，以作為一個信號放大器(Signal Amplifier)，後來經過不斷的發展，並配合積體電路 (Integrated Circuit, I_C) 的出現，電晶體已經成為二十世紀最重要的科技發明，推動整個半導體產業的發展，成為我們日常生活中不可缺少的一部份。

9-1 實驗目的：

本實驗的目的有二：(1).介紹雙極接面電晶體(Bipolar Junction Transistor, BJT)的構造、特性、與基本工作原理，並以實驗量測其電氣特性；(2).介紹如何利用電晶體設計電路開關。

9-2 實驗基本原理：

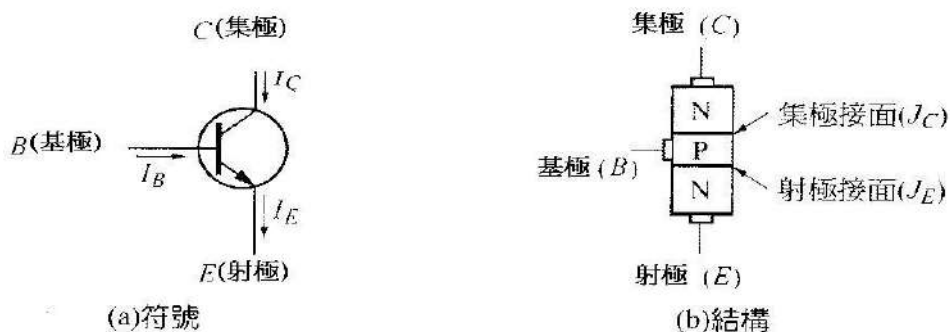
電晶體可以分成二大類：雙極接面電晶體 (Bipolar Junction Transistor, BJT) 與場效電晶體 (Field Effect Transistor, FET)，二者的結構與功能均不相同，因此將分別討論。本實驗是討論雙極接面電晶體。

電晶體的結構與符號：

雙極接面電晶體(BJT)是由三片半導體以夾心餅乾的方式構成，又可以區分為pnp與npn二種型式，這二種電晶體除了因為使用的半導體型態不同，因此主要載子與偏壓的方向不同外，其它的結構與功能特性均非常接近，因此可以一併介紹。

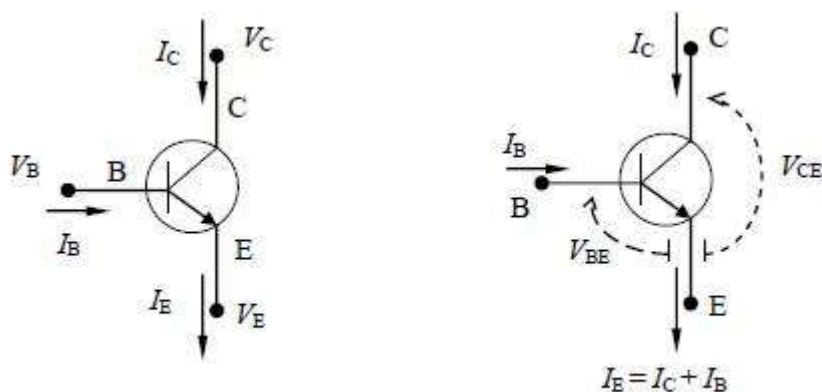
首先介紹npn雙極接面電晶體，如下圖，由二個n型半導體與一個p型半導體以夾心餅乾的方式構成。其中，中間的P型半導體非常薄，而且其摻雜量(doping)甚少。三個半導體分別以電線接出，形成三個接腳或接點，中間接點稱之為“基極”(Base, B)，二個外側的接點中有一個為“射極”(Emitter, E)，另外一個為“集極”(Collector, C)，其名稱來源在解釋完其工作原理後即可非常容易理解。請記住，在n型半導體中(npn電晶體的E極與C極)其主要導電的載子是電子，在p型半導體中(npn電晶體的B極)其主要導電載子則是電洞，在pn接面上加上正向偏壓，可以驅使電子與電洞在接合介面結合，造成類似導體中的電流流動，因為此一導通現象利用到帶負電的電子與帶正電的電洞二種不同極性的導電載子，因此稱之為“雙極性”(bipolar)接面(juncture)電晶體(transistor)，簡稱BJT。相對而言，場效電晶體(FET)的工作原理只使用到一種載子(電子或電洞)。

NPN 型 BJT



電晶體的特性分析

以npn電晶體為例，如下圖，可以清楚的定義出六個物理量： V_E 、 V_B 、 V_C 、 I_E 、 I_B 、 I_C ，分別代表E、B、C三極的電位(相對於某一參考點或Ground)與流經E、B、C三極的電流(電流方向如圖所示)。但其實電晶體只有四個獨立的物理量，因為



npn 電晶體的物理量與特性分析

(1). $I_E = I_C + I_B$ (電荷不減或科希荷夫電流定律)，因此 I_E 、 I_C 、 I_B 三者中，只有二個電流是獨立變數。

(2). 電位的絕對值並不重要，電位差才是真正影響電子元件的物理量；因此如果在E、B、C三的接腳或端點中，選定一者為參考點 (Reference Point) 或共同點 (Common Point)，則只剩下二個電位差是有意義的物理量，例如選擇E極為參考點，則影響電晶體行為的電壓為 V_{BE} 與 V_{CE} ，分別代表B極對E極與C極對E極的電位差。

在釐清電晶體的四個物理量之後，可以開始探討電晶體的特性，也就是四個物理量之間的關係，但是這仍然會非常複雜，因為在探討任意二個物理量的關係時，必須先說明並且固定另外二個物理量的值。實際應用與分析上，電晶體可以應用一些簡單的“模型”，以簡化其行為，避免作過度複雜化的分析，敘述如下；假定選定的四個物理量分別為： I_B 、 I_C 、 V_{BE} 、與 V_{CE} (共射極，Common Emitter)。

(a). $I_E = I_C + I_B$ 代表電荷不減

(b). I_C 與 I_B 的比值稱為 $\beta_{DC} = I_C / I_B$ ， β_{DC} 稱為電晶體的「電流增益

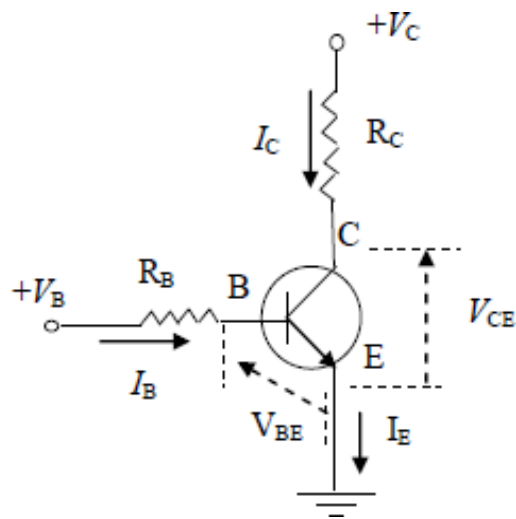
比」，為電晶體最重要的參數之一。 β_{DC} 的大小一般約在數十到數百之間(例20~200)。 β_{DC} 的大小與電晶體的結構與材料有關，可以視為是電晶體的本質特性，但是 β_{DC} 的大小明顯的受溫度影響。

(c). 理論上，除了溫度之外， β_{DC} 應該是 V_{BE} 與 V_{CE} 的函數，或者說 β_{DC} 應該受 V_{BE} 與 V_{CE} 的大小而改變。實際上 β_{DC} 受 V_{BE} 的影響非常有限，大部分的情況下可以忽略； β_{DC} 受 V_{CE} 的影響較明顯一些，但是在一般的電路分析中，如果是作初步的近似分析，也可以忽略，因此可以視 β_{DC} 為一個定值，這樣將大幅度地降低電路分析的難度與複雜性。

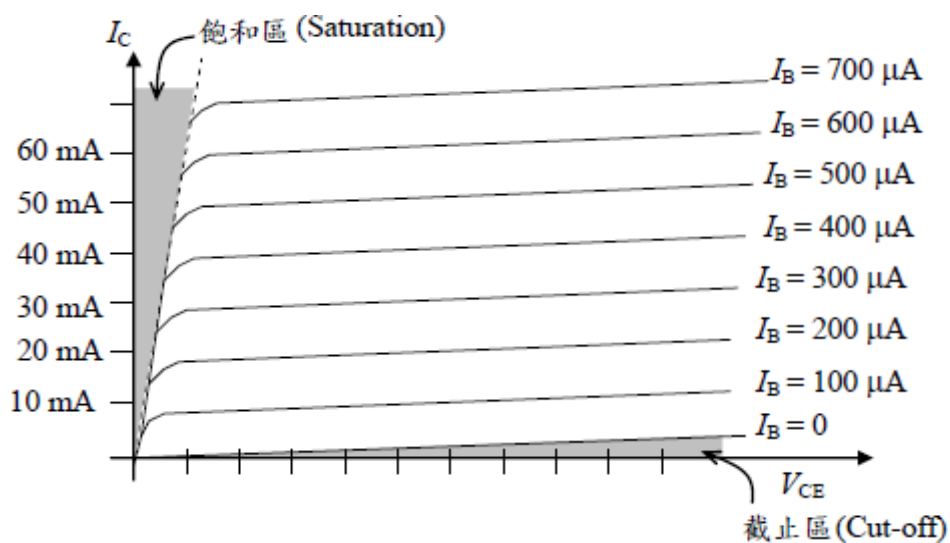
(d). 另外，電晶體還有一個常用的參數 α_{DC} ，定義為 $\alpha_{DC} = I_C / I_E$ ，因為 I_C 略小於 I_E 但是二者的值非常接近(這是因為 β_{DC} 相當大)，因此 α_{DC} 的值略小於1，可以很容易證明 α_{DC} 與 β_{DC} 具有下列關係，

$$\beta_{DC} = \frac{\alpha_{DC}}{1 - \alpha_{DC}}, \alpha_{DC} = \frac{\beta_{DC}}{1 + \beta_{DC}}$$

當電晶體中的 β_{DC} 參數被視為是一個定值時，代表一個重要的物理現象：那就是 I_B 的大小可以完全決定 I_C 的大小，因此控制 I_B (小電流)即可控制 I_C (大電流)，此時電晶體可以視為是一個控制電流的閥門，閥門的開關可以控制電流(I_C 與 I_E)的大小，而閥門的開關則是由另一個小電流(I_B)控制，因此雙極接面電晶體(BJT)可以視為電流控制器或電流放大器(當然經過一些電路設計後，也可以作為電壓放大器)，相對的，場效電晶體(Field Effect Transistor, FET)則可以視為電壓控制器或電壓放大器。

電晶體之 I_C - V_{CE} 特性曲線與電晶體

V_{BE} 為B極對E極之偏壓，事實上也就是pn介面的順向偏壓，根據二極體的分析，只要順向偏壓大於pn介面能階障礙，二極體視同導通，此時 V_{BE} 可視為是0.7 Volt的定值，因此 $I_B = (V_B - 0.7) / R_B$ ，亦即 I_B 之大小可以由 V_B 或 R_B 控制。在控制 I_B 之為一定之電流值大小的條件下，可以探討 I_C 與 V_{CE} 與之間的關係，並將一連串不同之固定 I_B 電流值下的 I_C - V_{CE} 曲線關係作圖如下，即可得到電晶體之 I_C - V_{CE} 特性曲線。



電晶體之 I_C - V_{CE} 特性曲線圖包含三的區塊，分別為：截止區(Cut-Off Region)、飽和區(Saturation Region)、以及夾在其中工作區 (Active Region)，其重要意義說明如下：

- (1). 截止區 (Cut-Off): 此區之 I_B 電流在 $I_B = 0$ 曲線之下，意味偏壓電壓 V_B 太小時， V_{BE} 小於0.7 V，射極(Emitter)與基極 (Base) 之間無法形成順向偏壓，電晶體無法導通，因此即使 V_{CE} 的電壓持續加，所能得到的 I_C 或 I_E 電流大小均甚微小；基本上，射極(Emitter)與集極 (Collector) 之間可以視為

是一個不能導通的“斷路”。亦即，當 V_{BE} 正向偏壓不足時，射極(Emitter)與集極(Collector)之間的電流通路是“截止”的，即便外加的電壓 V_{CE} 非常大。

(2). 飽和區 (Saturation): 與截止區恰好相反，如果 V_B 的正向偏壓夠大，因而引起非常大的 I_B 電流時，則非常小的 V_{CE} 電壓即可以導致非常顯著的 I_C 或 I_E 電流；因此電晶體的射極(Emitter)與集極 (Collector) 之間的電流通路是“導通”的。

(3). 工作區 (Active): 前述的截止區與飽和區，是電晶體在“數位電子”中的工作區，利用 V_B 的電壓大小控制射極 (E) 與集極 (C) 之間的“開”與“關”的狀態；相對的，在截止區與飽和區之外，電晶體處於“工作區”，此時電晶體可以作為“類比電子”的放大器 (Amplifier)。

電晶體在工作區時，在一定之 I_B 電流值下， V_{CE} 由0開始增加時， I_C 大致以線性的方式同步增加，此時電晶體的射極 (E) 與集極 (C) 之間類似一歐姆電阻，但是很快的，當 V_{CE} 增加後不久， I_C 即會趨於飽和，之後 V_{CE} 繼續增加時， I_C 近乎於維持一個定電流值。並且，此一定電流之 I_C 值與對應之 I_B 電流值保持一定之比值關係，其 I_C/I_B 比值即為 β_{DC} 。在這個例子中， I_C 飽和電流大約為當時 I_B 電流的100倍，因此 $\beta_{DC} \approx 100$ 。

由於 $\beta_{DC} = I_C / I_B$ ，因此 I_C 的大小可以由 I_B 決定(放大 β_{DC} 倍)。因為 I_B 遠小於 I_C (大部分的 β_{DC} 介於20~200)，因此等於是利用一個小電流 (I_B) 控制一個大電流 (I_C)，因此雙極接面電晶體 (BJT)可以視為一電流放大器。

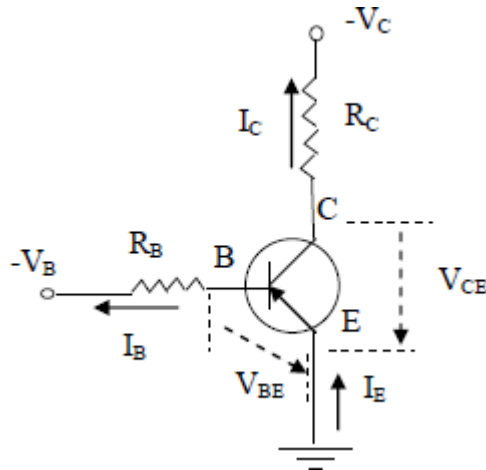
如前所述，電晶體的分析牽涉到四個獨立的物理量，如果選用共射極 (Common Emitter) 的偏壓或工作模式，則四個物理量分別為 I_B 、 I_C 、 V_{BE} 、與 V_{CE} (注意 $I_E = I_B + I_C$)；其中， V_{BE} 可以視為是定值(0.6~0.7V)，而且不會影響其他三個物理量之間的關係，因此電晶體的特性分析可以針對 I_B 、 I_C 、與 V_{CE} 三個變數；最有意義的方法是：在某一固定的 I_B 電流值之下，在平面座標中描繪出 I_C - V_{CE} 的關係曲線。

重複上述之npn電晶體的共射極偏壓電路，並分析如下：

1. V_{BE} 為B極對E極之跨壓或壓降，一般可視為0.6~0.7 Volt的定值；
2. $I_B = (V_B - 0.7)/R_B$ ，亦即 I_B 之大小可以由 V_B 或 R_B 控制；
3. 當 V_{CE} 夠大、電晶體處於工作區(Active)時， $I_C = \beta_{DC} I_B$ ，因此 I_C 的大小由 I_B 與電晶體的特性參數(β_{DC})決定
4. V_{CE} 為C極對E極之跨壓或壓降；由右邊迴圈之柯希赫夫電壓定律，可以得到 $V_{CE} = V_C - I_C R_C = V_C - \beta_{DC} I_B R_C$ ，此一關係顯示 V_{CE} 的值受 I_B 電流的控制，而 I_B 電流則受 V_B 電壓的控制；如果 V_B 電壓發生微小變化， V_{CE} 也會相對產生變化，此為電壓放大的原理，而其根本原理，則是電晶體中小電流(I_B)與大電流(I_C)的互制關係 $I_C = \beta_{DC} I_B$ 。

5. 上述的分析其實隱含一個假設： β_{DC} 不受 V_{CE} 的影響，這個假設是可以討論修正的，但是在初步的近似分析中，是可以接受的。

以上敘述係針對npn雙極接面電晶體；如果是pnp雙極接面電晶體，則其的共射極偏壓電路如下圖所示；



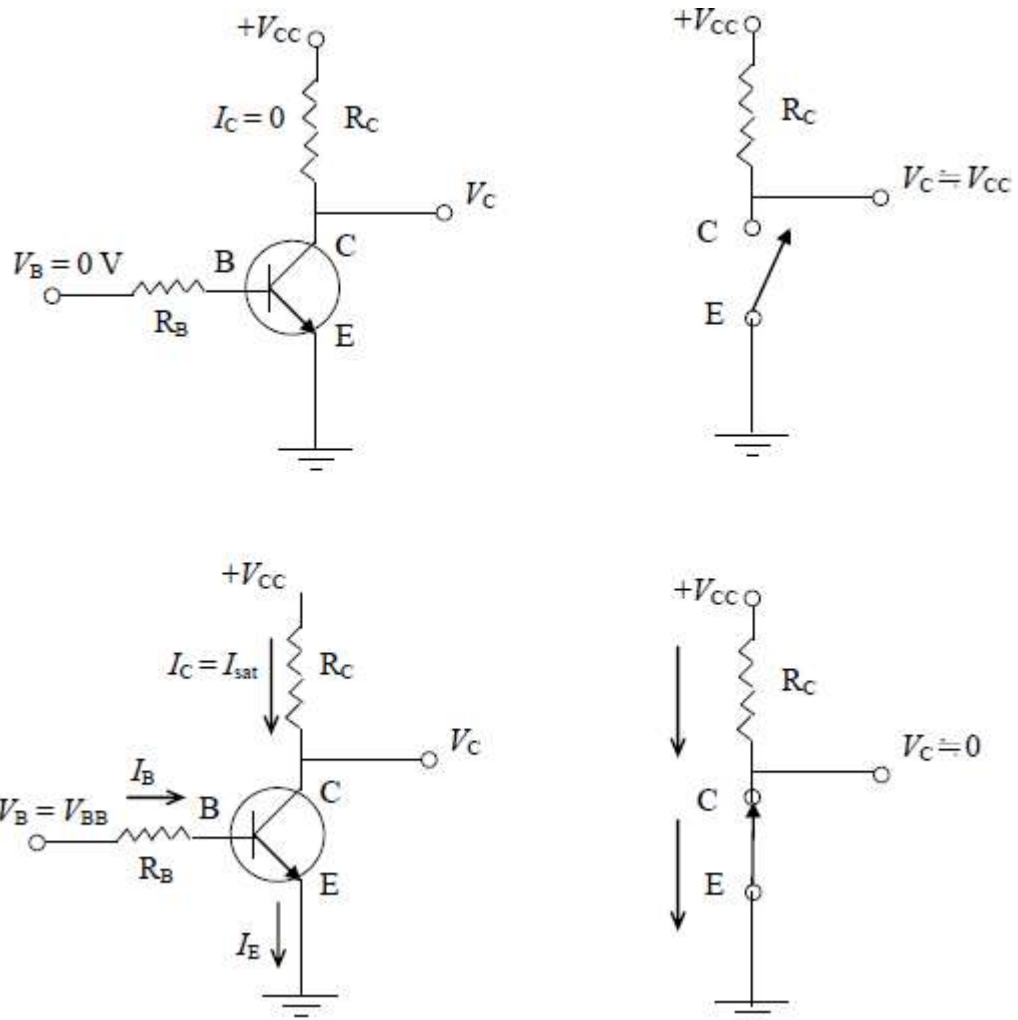
電晶體開關

以電晶體作為一個開關，進行ON-OFF的切換，其原理非常接近電晶體放大器，仍然以共射極為例，如下圖。

當 V_B 為0時（或小於B-E之間的能階障礙時），無法驅動射極（E）的電子流向基極（B），因此 I_B 為0，連帶的也使得 I_C 的電流為0，此時，無論如何增加 V_{CC} 的值，均無法產生 I_C 的電流，電晶體處於截斷區（Cut-off Region），電晶體的C-E之間為開路，或者是一個非常大的電阻。同時因為 $I_C = 0$ ， V_C 的電位等於 V_{CC} 。

當 V_B 為正值且大於B-E之間的能階障礙時（0.6~0.7 V），將驅動射極（E）的電子流向基極（B），因此產生電流 I_B 與 I_C （ $= \beta_{DC} I_B$ ）。如果增加 V_B 與 I_B ，最後可以使 I_C 達到飽和值（ V_{CC}/R_C ），此時電晶體處於飽和區（Saturation Region），同時 V_{CE} 的壓降最小，接近0電壓；因為C-E之間為小電壓但是大電流，因此C-E之間視為通路，或者是一個非常小的電阻。同時因為 V_C 的電位等於 V_{CE} ，在飽和區內是一接近0的電位。

由以上的分析可知：一個小的 V_B 電壓，可以控制電晶體C-E之間的“開”與“關”，或者將 V_C 的電壓在0~ V_{CC} 之間擺盪（Swing）。



9-3 電晶體 BJT 的電流電壓放大特性實驗

基本原理：

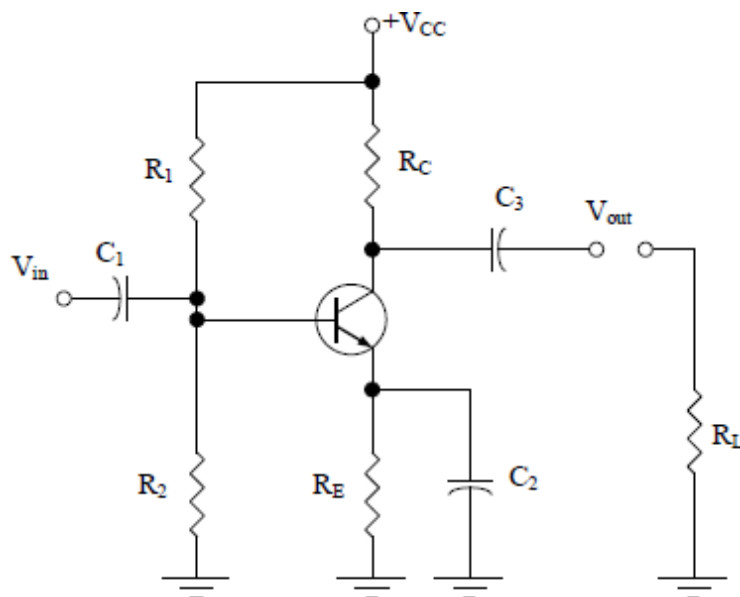
電晶體在類比電路中最主要的功能為放大器(電壓或電流)，並且是對交流信號(AC signal)的放大；由於電晶體有三個接腳：射極(Emitter, E)、基極 (Base, B)、與集極(Collector, C)，因此可以選定其中之一作為其它 AC 電壓信號的相對參考點，稱之為共同接地端(共地，Common Ground)，然後再將剩餘的二個接腳分別當作 AC 信號的輸入端與輸出端，即可形成放大器；因此，電晶體放大電路可以有三種不同的型態，表列如下；每一種型態的放大電路有不同的電氣特性，包括電壓增益、電流增益、輸入阻抗(或輸出阻抗)，這些電氣特性是設計與使用電晶體放大電路最重要的考量；另外，放大電路的穩定性、線性度、工作範圍也是考量重點。

	共射極放大電路 (CE)	共集極放大電路 (CC)	共基極放大電路 (CB)
輸入端 V_i	基極	基極	射極
輸出端 V_o	集極	射極	集極
共用端 COM	射極	集極	基極
輸入阻抗 R_i	中 (β, r_e)	高 (β, R_e)	低 (r_e)
電流增益 A_i	大 (β)	大 ($1 + \beta$)	略小於 1 (α)
電壓增益 A_v	大 (R_C / r_e)	略小於 1 ($R_E / (R_E + r_e)$)	大 (R_C / r_e)
輸出阻抗 R_o	高 (R_C)	低 (r_e)	高 (R_C)
功率增益 A_p	最大	大	大
輸出入信號相位 關係	反相 (180°)	同相 (0°)	同相 (0°)
電路用途	電壓與電流放大	電流放大與阻抗 匹配	電壓放大與阻抗 匹配

備註: $r_e = \frac{25\text{mV}}{I_E}$

共射極電晶體放大電路

下圖為一個採用分壓偏壓電路(Voltage-Divider Biasing)的共射極電晶體放大電路，此一電路可以視為是二個電路的組合：直流偏壓電路與交流信號電路，二者之間以三個電容器 (C_1, C_2, C_3) 隔離，輸入信號(V_{IN})由電晶體的 B 極進入，輸出信號則在 C 極，利用 I_B 與 I_C 之間的電流放大關係(β_{DC} 與 β_{AC})，達到電壓放大的效果。此一電路的分析可以分成直流與交流二部分，分別敘述如下。



直流分析

電容器的阻抗為 $1/j\omega C$ ，在直流時， ω 趨近於0，電容器的阻抗趨近於無限大，電容器類似一開路(open)，因此上圖可以改成右圖，恰巧是一個分壓器偏壓電路(Voltage-Divider Biasing)，其操作點的狀態可以決定如下；

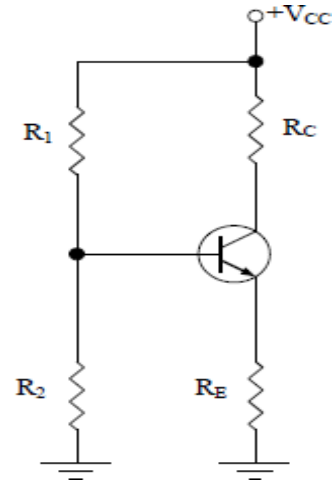
$$V_B = V_{CC} * (R_2 // \beta_{DC} R_E) / (R_1 + (R_2 // \beta_{DC} R_E))$$

$$I_B = V_B / R_{IN} = V_B / (\beta_{DC} R_E)$$

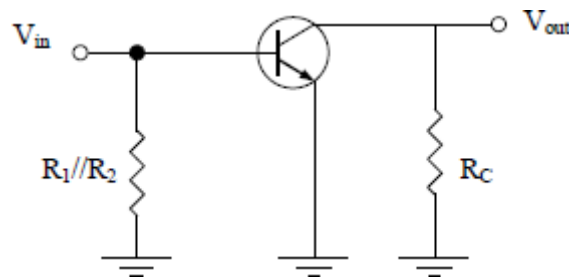
$$I_C \cong I_E = (V_B - V_{BE}) / R_E$$

$$V_{CE} \cong V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

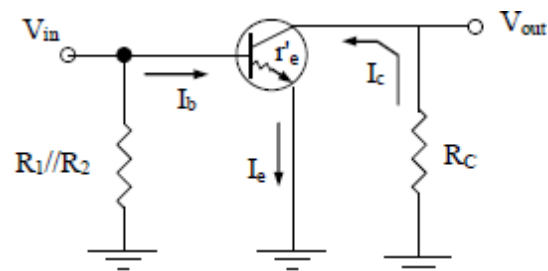
因此可以得到電晶體的操作點。

交流分析

電容器的阻抗為 $1/j\omega C$ ，在交流時且 ω 非常大時，電容器的阻抗趨近於零，電容器類似一短路(short)；另外，假設直流電源 $+V_{CC}$ 的內電阻為0，因此對交流信號而言，直流電源器上不會有交流的電壓差，因此直流電源也成為一個接地，稱之為交流接地(ac ground)，交流接地有別於真正的接地(actual ground)，但是在交流分析中，二者是一樣的；因此共射極電晶體放大電路在交流分析中可以改成下圖；



此時如果引進電晶體的 Ebers-Moll 電路模型，會有



可以得到

$$V_{IN} = V_B = I_E r'_e \approx I_C r'_e$$

$$V_{OUT} = I_C R_C$$

因此共射極電晶體放大電路的電壓增益或電壓放大率為，

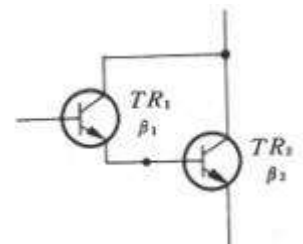
$$(\text{Gain})V = V_{OUT} / V_{IN} = R_C / r'_e$$

因為 $r'_e = 25 \text{ mV} / I_E$ (in mA)，是一個小的電阻值，因此電壓放大倍率相當大。

達靈頓電晶體

電路需要非常高的輸入阻抗或很大的電流增益時，單一個電晶體很難滿足需求，此時可以使用兩個電晶體組成達靈頓電路。總電流增益約為兩個電晶體電流增益之成積，即

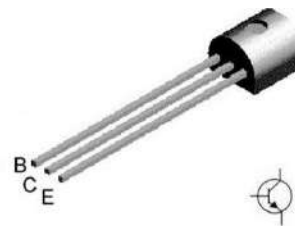
$$\beta = \beta_1 \times \beta_2$$



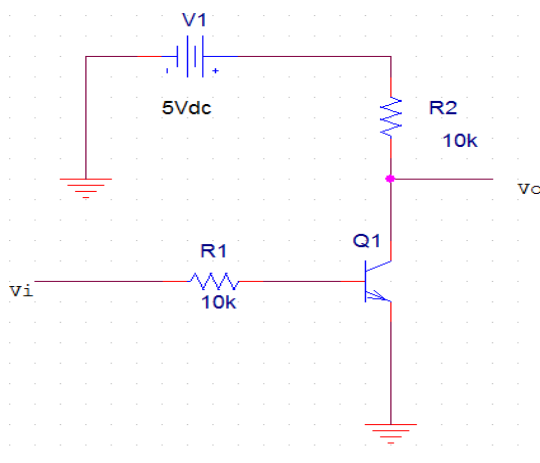
9-4 實驗練習

電晶體除了在對電壓電流放大的功用外,還有一個被普遍應用的特性,就是開關.此次實驗除了有對電晶體的基本認識的實驗外,還有兩個運用了開關特性的實驗.

(2SC1815 電晶體為 NPN, 腳位如右圖)



練習 9-4.1 電晶體 BJT 的數位開關實驗



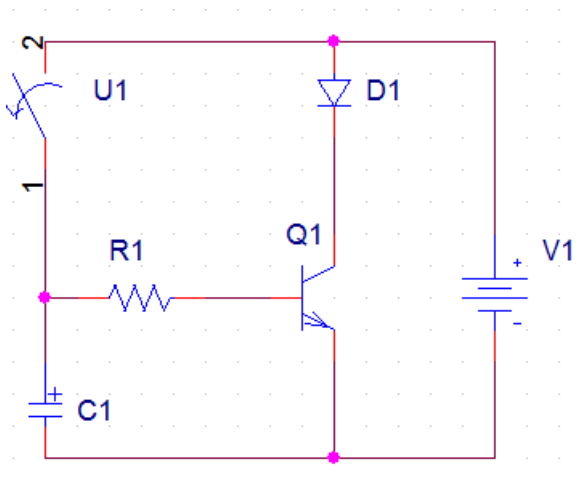
- 當 $V_i = 0 \text{ V}$ 時, $V_o = ?$; 當 $V_i = 5 \text{ V}$ 時, $V_o = ?$
- 調整 Function Generator, 輸出 10kHz, 5Vp-p 之方波, 由 V_i 輸入端接入. 並用示波器分別兩側 V_i (CH1) 與 V_o (CH2).

練習 9-4.1 BOM

符號	規格	型號
V1	5Vdc	
Q1		2SC1815
R1	10K Ω	
R2	10K Ω	

練習 9-4.2 電晶體 BJT 的延時燈實驗

以下這電路又名延遲熄滅燈,就是利用電容與 bjt 開關的特性,可使到 LED 在當開關已經 OFF 時還能持續亮一段時間。



- 嘗試改變電容值,並觀察 LED 發亮的時間,請敘述之。
- 請說明這電路的工作原理。
- 請舉例說明這電路設計可用在哪些電子產品。(LED 可由喇叭或其他元件取代)

練習 9-4.2 BOM

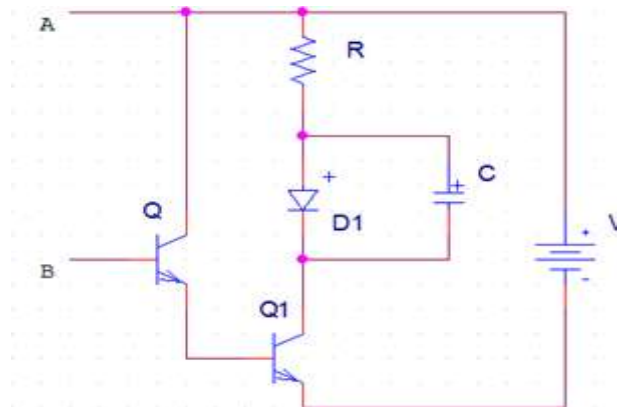
符號	規格	型號
V1	3V	
Q1		2SC1815
R1	47K Ω	
C1	220 μ F	
D1	LED 燈	
U1	按鈕開關	

9-5 實驗練習

這次實驗主要是介紹電晶體對電流電壓放大的特性,這放大特性在許多電路中非常實用。第一個實驗是利用達靈頓電路對電流增益的觸碰開關電路。第二個實驗則是共射極放大電路。

練習 9-5.1 觸碰開關

如下圖,這是一個利用雙手觸碰A,B端,即可讓電路導通,讓LED燈發亮的電路實驗。

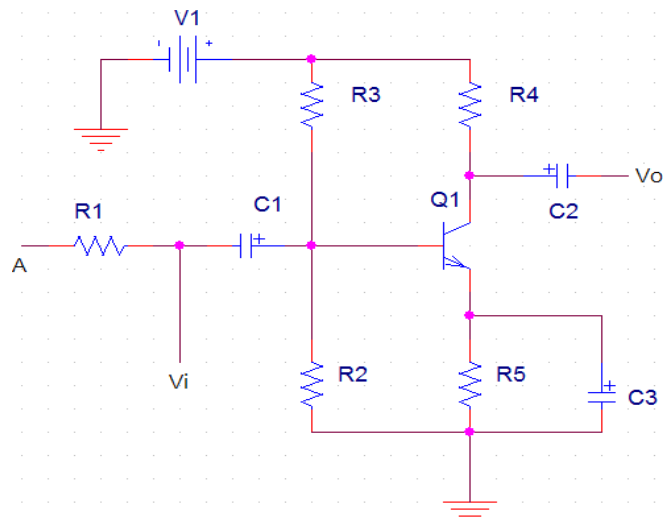


- 如上圖將電路接通後,先利用三用電表量測電流 I_{AB} ,確保電流是 (mA) 單位,且確保電壓設定在 3V。
- 利用雙手觸碰 A,B 端,觀察 LED 燈的亮度,並量測 Q1 的 I_C 。
- 試說明這電路的工作原理,及電晶體在這電路中扮演的角色。
- 量測電晶體 Q1 的 I_C ,與步驟(b) 做比較,並加以說明。
- 試舉例說明這電路可用於何種生活上的設計。

練習 9-5.1 BOM

符號	規格	型號
V	3V	
Q		2SC1815
Q1		2SC1815
R	100 Ω	
C	100 μ F	
D1	LED 燈	

練習 9-5.2 共射極放大電路



- 實際量測電晶體 Q1 的電壓 VCE 與電流 IE、IC、IB，並與預習報告中的理論值相比較。
- 調整 Function Generator，輸出 1kHz, 1Vp-p 之方波，由 A 輸入端接入，並用示波器分別兩側 Vi (CH1) 與 Vo (CH2)，解釋所得到的波形。
- 求電路增益
$$A_V = \frac{V_{o(p-p)}}{V_{i(p-p)}}$$
- 重複上圖之共射極電晶體放大電路，但是將電容器(C3)拿掉，成為一個 E 極電阻沒有旁支電容 (By-pass Capacitor) 共射極電晶體放大電路，利用 Function Generator 產生 1k Hz 的微小交流輸入信號，以量測共射極電晶體放大電路的電壓增益。解釋這個電路的電壓增益與得到的波形。

練習 9-5.2 BOM

符號	規格	型號
V1	12V	
Q1		2SC1815
R1	33kΩ	
R2	3.3kΩ	
R3	33kΩ	
R4	3.3kΩ	
R5	1kΩ	
C1	47 μF	
C2	47 μF	
C3	100 μF	

練習 總 BOM

元件名稱	規格	編號	數量
NPN 電晶體		2SC1815	3
LED			1
電解電容	47 μ F		2
電解電容	100 μ F		1
電解電容	220 μ F		1
電阻	100 Ω		1
電阻	1K Ω		1
電阻	10K Ω		2
電阻	3.3K Ω		2
電阻	33K Ω		2
電阻	47K Ω		1

9-6 預習作業：

1. 詳讀BJT 的放大特性原理及達林頓電路特性。
- 2.

右圖為一個採用分壓偏壓電路 (Voltage- Divider Biasing) 的共射極電晶體放大電路。

其中

Q1: 電晶體 BJT 2SC1815 ($\beta_{DC} = 150$),

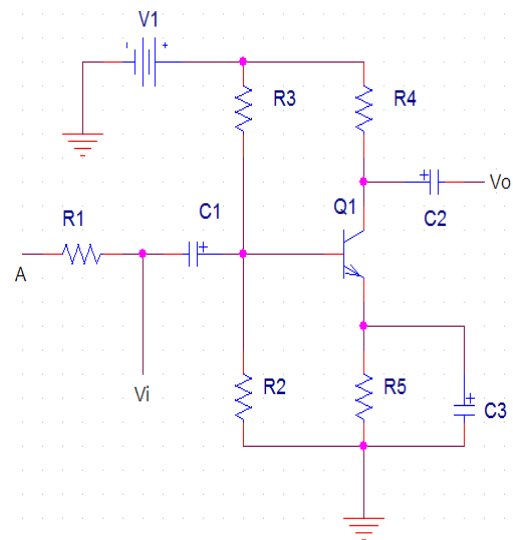
電阻器: $R_1=33k\Omega$; $R_2= 3.3k\Omega$;

$R_3=33k\Omega$; $R_4=3.3k\Omega$; $R_5=1k\Omega$

電解電容器: $C_1=47\mu F$ $C_2=47\mu F$

$C_3=100\mu F$

輸入電壓 $V_1=12V$



a) 求電晶體 Q1 的 I_c 、 I_b 、 I_E 、 V_{ce}

b) 求電路增 $A_V = \frac{V_o}{V_i}$