

Last update : Apr 19, 2019

Radio Shack of BV3FG

認識電晶體 Datasheet 及電晶體代換

前言

電晶體 (Transistor) 一詞是好幾種放大元件的泛稱，包涵 BJT, J-FET, MOSFET, IGBT 等等。而 BJT (Bipolar Junction Transistor, 雙極電晶體) 是最早被發明出來的電晶體，習慣上，如果不特別說明，『電晶體』一詞就是指雙極電晶體，這也是本所要介紹的標的。

早年我完全不懂電子電路，總認為一定要使用電路圖中相同型號的電晶體才能 DIY 成功，隨著知識的增長，網路也發達，絕大部份都可以找到 datasheet 評估使用替換品。現在更瞭解到只需要幾種通用型的電晶體，就能滿足絕大部份電路的需求。如何選擇代換的電晶體有兩個關鍵，其一是對電路的基礎認識，另一個則是看得懂 datasheet，這就是本文的主要目的。

電晶體的型號

日規：

2SA+數字, 2SB+數字：PNP 電晶體，2SA 為高頻電晶體，2SB 為低頻電晶體

2SC+數字, 2SD+數字：NPN 電晶體，2SC 為高頻電晶體，2SD 為低頻電晶體

美規：2N+數字。例如 2N2222, 2N3904，要注意的是 2N 泛指三支腳的電晶體，所以看到 2Nxxxx 的編號，不代表它一定是雙極電晶體，例如 2N7000 是 MOSFET，2N5459 是 JFET。

歐規：BC+數字

廠商代碼+數字：早年有些知名的電子大廠開發的電晶體使用的是自己的命名方式，例如 MPSAxx, MJxxxx (Motorola)，TIPxxx (德州儀器)，Sxxxx (Samsung)。

其他：很多被廣為使用的電晶體過了專利期限，目前有很多廠商在製造，所以可能的狀況如下

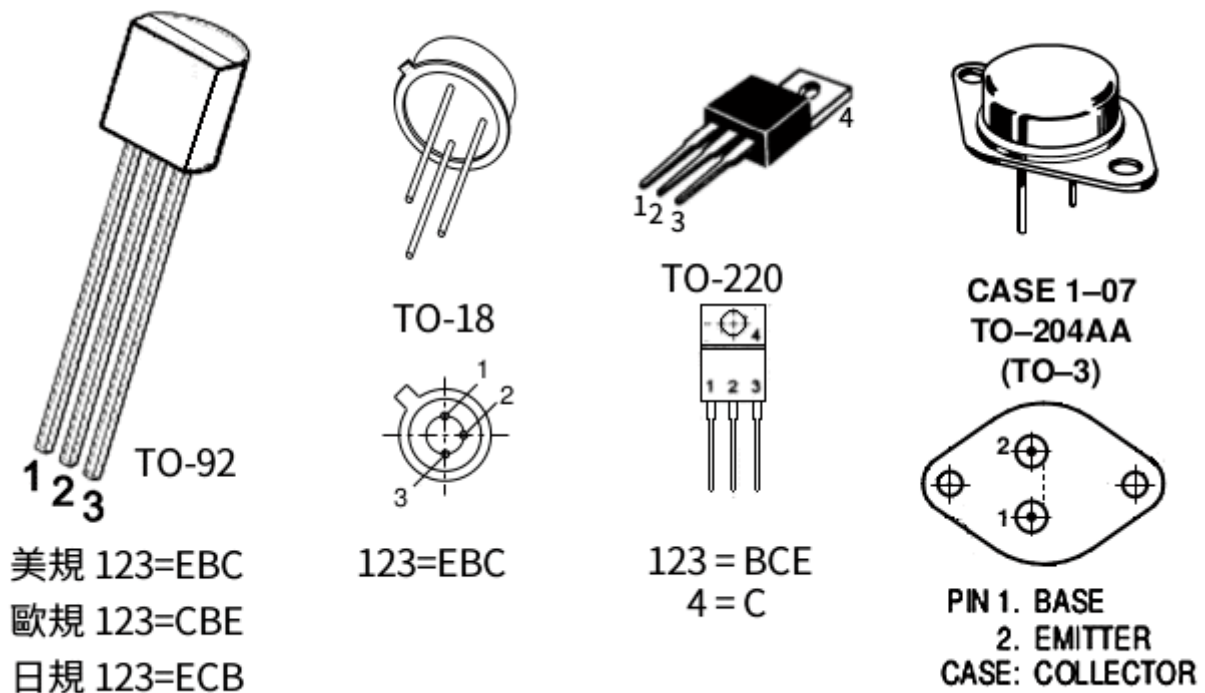
- 不同的製造商仍使用相同的編號，例如 TIP41C。
- 或是只留下具有特徵的編號，例如 A92 = MPSA92
- 封裝型式, Ic(max) 或 Pd 不同，但其他電性與知名電晶體型號相同，就在自行定義的產品型號加上具有特徵的數字，例如 PN3904 (2N3904), MMBT2222 (2N2222)，使用這些類似型號的電晶體，有必要先查 datasheet 確認 Ic(max) 及 Pd。

電晶體的包裝

電晶體包裝的型式，主要取決於工作時散熱的需求，最常見的不外乎以下四種

- TO-92：塑料包裝，可承受的功率約 600mW，小訊號電晶體一般不會有太多功率消耗，大部份都使用這種包裝。
- TO-18：圓筒型封裝外加一個圓筒金屬罩以方便加上圓型散熱片，可承受的功率消耗約為 1W。因為成本偏高，近年已經很少看到這種封裝的電晶體了。
- TO-220：中功率電晶體最常見的包裝，若有適當的散熱，可承受功率在 100W 左右
- TO-3：大功率電晶體，若有適當的散熱，可承受功率在 250W 左右。

為電晶體安裝散熱片時，散熱片的厚度要儘量厚，如此才能很快的將熱往外擴散，而散熱鰭片遠端的邊際效應降低很快，所以鰭片多而短勝過少而長。



電晶體腳位與判定方法

如上圖所示，依封裝型式，一般有固定的腳位指定。對於沒有接觸過的電晶體，自己使用電表確認一遍有其必要，先依上圖試量，命中率應該有 90% 以上。

注意：使用指針三用電表的歐姆檔時，電表的 - 插座其實是輸出正電壓，電表的 + 插座其實是負電壓。為了表示實際的電壓以及與數字電表統一，下面相關的文字敘述，+ 端是指數字電表的 + 插座，指針電表的 - 插座；- 端則是指數字電表的 - 插座，指針電表的 + 插座

首先，請自行定義電晶體 3 支腳的編號為 1, 2, 3。

1. 先判斷是 NPN 或是 PNP，以及找出 B 極

將數字電表切到二極體檔，指針電表切到 1K 檔，將探棒與電晶體的腳兩兩接觸，可能得到以下兩種組合其中的一種，如果不是，代表這個元件不是雙極電晶體，或者是個損壞的雙極電晶體。

NPN	1+ 2- 不通	1- 2+ 不通	2+ 3- 不通	2- 3+ 導通	1+ 3- 不通	1- 3+ 導通
PNP	1+ 2- 不通	1- 2+ 不通	2+ 3- 導通	2- 3+ 不通	1+ 3- 導通	1- 3+ 不通

簡言之，某兩腳交換正負電壓量測都不導通，表示這兩腳是 C 及 E，但哪個腳是 C 哪個是 E 還不知道，如上例的腳 1, 2，但是其餘剩下的那支腳就是 B 極，如上例的腳 3。如果 B 極接 + 端 另兩腳接 - 端皆導通，那麼是 NPN，如果 B 極接 - 端，另兩腳接 + 端皆導通，那麼是 PNP。

2. 判斷 C, E 腳

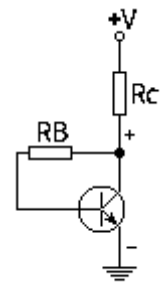
方法有以下三種

2.1 使用具有 h_{FE} 功能的數字電表

因為已經知道是 NPN 或 PNP 及 B 極，將電表切到適合的量測檔位，將 B 腳插入對應的插孔，另兩腳任意插入 C 和 E 插孔，量得一個放大倍率，記錄之。再將 C, E 腳對調插入插孔，量得另一個放大倍率。兩次的量測值差異應該很大，例如大於 50 vs 小於 10，那麼，量到數值較大的組合即為正確接腳位置。

2.2 使用指針電表

以量測 NPN 電晶體為例，將電表切到 1K 歐姆量測檔，+ 端及 - 端分別接在未知的兩腳，然後用手指同時接觸 B 極與 + 端，觀察指針擺動幅度，再將 + 端與 - 端的接腳對調，再用手指同時碰觸 B 極與 + 端，觀察指針擺動幅度，兩次量測中，指針擺動幅度較大(即電阻較低)的組合表示電晶體得到正確的偏壓，CE 間開始導通，所以電阻較小。此時，+ 端所接的為 C 極，- 端所接的為 E 極。這個量測的原理是電晶體的集極回饋偏壓方式，如下圖，+V 是電表內部電池的電壓， R_c 是電表內部的電阻，我們用手指同時碰觸 + 端與 B 極只是借用手指的電阻做為 R_B (只是求方便)，如果手指太乾燥，可以沾點水降低電阻或直接用一個電阻 (數十 K 歐姆)做為 R_B 。



2.3 使用數字電表的二極體偏壓量測

由於電晶體的 BE 與 BC 間的 PN 介面濃度不相同，所以 BE 與 BC 二極體的障壁電壓也不同，一般 BE 二極體的障壁電壓略高於 BC 二極體的障壁電壓。但是這個差異不大，大約只有數 mV，如果你使用的數字電表並沒有 h_{FE} 量測 (例如袖針型的簡易電表)，則可以使用此法，不過要注意電表探棒與電晶體的腳接觸要相當良好，以免誤判。

實際量測多顆電晶體 BE, BC 二極體的障壁電壓，BE 二極體的障壁電壓略高於 BC 二極體的障壁電壓，可做為判定 C, E 腳位的參考。

電晶體	BE	BC	差異	電晶體	BE	BC	差異
2N2222	910	901	9	2N2907	952	945	7
2N2222	913	902	11	2N2907	950	945	5
2N2222	898	885	13	2N2907	947	942	5
2N3904	918	865	53	2N3906	993	986	7
2N3904	924	869	55	2N3906	945	920	25
2N3904	980	969	11	2N3906	992	986	6
2SC1815	968	960	8	2SA1015	963	954	9
2SC1815	1004	998	6	2SA1015	948	937	11
2SC1815	960	953	7	2SA1015	947	937	10
2SC945	969	960	9	2SA733	940	927	13
2SC945	957	949	8	2SA733	948	939	9
2SC945	957	950	7	2SA733	963	954	9
2N3055	671	655	16	MJ2955	731	724	7
2N3055	682	676	6	MJ2955	698	683	15

2N3055	708	700	8	2SB863	634	612	22
TIP41C	711	698	13	TIP41C	698	689	9

更換故障電路板上面的電晶體，有一點要特別注意：某些電器製造商會要求電晶體製造商供應腳位不同於規格書的電晶體，原因有可能是電路更版後換用另一型號的電晶體，但是不想更改 Layout 以節省成本，於是訂製特殊腳位的電晶體。因為故障品沒辦法用量測正確判斷腳位，所以最好還是要從電路板上的佈線反推電路來判斷腳位。在我的經驗中，美規及日規電晶體不曾出現這種狀況，但是 9011 ~ 9016 及 8050, 8550 確實出現過特殊腳位的狀況。小心！小心！

Absolute Maximum Ratings

Absolute Maximum Ratings* $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
V_{CEO}	Collector-Emitter Voltage	40	V
V_{CBO}	Collector-Base Voltage	75	V
V_{EBO}	Emitter-Base Voltage	6.0	V
I_C	Collector Current - Continuous	1.0	A
T_J, T_{stg}	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +150	$^\circ\text{C}$

說明電晶體的最大耐壓、電流、功率。這些參數一般是在環境溫度為 25°C 所測得的靜態最大值，如果電晶體的應用是快速的開關 (脈衝或很短的 Duty Cycle)，它的實際耐壓會比上表所列的值還低。

V_{ceo} (Maximum Collector-Emitter Voltage, C to E 的最大電壓)

當電晶體不導通時，CE 間可承受的電壓，超過此電壓時，CE 間可能會崩潰擊穿損壞。一般電晶體 V_{ceo} 大於 20V，常見的在 30~60V 間。

V_{cbo} (Maximum Collector-Base Voltage, E 極開路時，CB 間最大的逆向電壓)

這個電壓是三個電壓中最高的，在單電源的電路中，因為 V_{ceo} 不應該超出額定值， V_{cbo} 也不會超出額定值，所以在電晶體代換時不會去注意這個值。

V_{ebo} (Maximum Emitter-Base Voltage, C 極開路時，EB 間最大的逆向電壓)

每種電晶體的 V_{ebo} 大約都是 5~6V。而電晶體正常工作時，BE 間是順向偏壓，只有在電路設計不當或操作不當才可能發生從 B 極輸入過大的 AC 訊號，導致 BE 逆偏。電晶體代換時一般不會注意這個值。

$I_C(\text{max})$: Continuous Collector Current, 集極最大的連續工作電流

過大的電流會使電晶體過度發熱而燒燬，所以這是代換電晶體時第二個要注意的參數。要注意的是：這個最大電流值是建立在有辦法將電晶體的溫度控制在它可以承受溫度以下的前提下。實務上，是從消耗的功率來決定所選用的電晶體能承受多大的電流。例如 最大功率為 0.625W ， $V_{ce}=5\text{V}$ ，所以電流必須小於 $0.625\text{W}/5\text{V} = 0.125\text{A}$ 。

T_{stg} (Storage Junction Temperature Range) : 儲存溫度

T_J (Operating Junction Temperature Range) : 電晶體內部可承受最大溫度，換言之如果環境溫度接近或高於 T_J ，就不能選用此電晶體。除非是用在極端環境，例如太空中、烤箱內等等，大部份不需要考慮這兩個參數。

Thermal Characteristics

Thermal Characteristics

$T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted

Symbol	Characteristic	Max			Units
		PN2222A	*MMBT2222A	**PZT2222A	
P_D	Total Device Dissipation Derate above 25°C	625	350	1,000	mW
		5.0	2.8	8.0	mW/ $^\circ\text{C}$
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3			$^\circ\text{C/W}$
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	357	125	$^\circ\text{C/W}$

說明可承受功率及散熱特性，這是代換電晶體第三個要考慮的參數。

P_D (Power Dissipation)：有的資料表寫為 P_{tot} (Total Power Dissipation)，即總消耗功率，就是 CE 間消耗的功率加上 BE 間消耗的功率。

P_C (Collector Power Dissipation)：集極消耗功率，也就單獨指 CE 間的消耗功率而已。

資料表的標題旁邊有一行小字『 $T_A = 25^\circ\text{C}$ 』，是標明測試時的溫度條件。

$T_A = 25^\circ\text{C}$ ：Ambient Temperature，有的寫為 T_{Amb} ，指環境維持在 25°C 且沒有散熱裝置的狀況下。

$T_C = xx$ ：Case Temperature，指透過散熱裝置使電晶體的封裝維持在 25°C 。

小訊號電晶體因為放大率很大，BE 二極體的功耗相較於集極的功耗非常小，通常的條件為 $P_D = xx @ T_A = 25^\circ\text{C}$ ，功率電晶體實務上都會使用散熱裝置，且放大率一般只有 25~50，所以 BE 二極體也有某種程度的功耗，大部分條件是 $P_D = xx @ T_C = 25^\circ\text{C}$ 或 $P_C = xx @ T_C = 25^\circ\text{C}$ ，在這種狀況下通常能有很大的 $I_C(\text{max})$ 及功率。少部分的資料表會提供 $P_D = xx @ T_A = 25^\circ\text{C}$ ，這種條件下可承受的功率及電流會大幅縮水是不難想像的。

$R_{\theta JC}$, R_{thJC} (Thermal Resistance, Junction to Case)：內部元件與封裝之間的散熱特性

如果使用溫度偵測元件來啟動散熱器 (風扇、冷卻水閥等)，可依此計算觸發溫度或計算散熱的能力。以上列資料表為例，最大電流為 1A，如果 V_{ce} 為 1V，即功率為 1W，會造成電晶體元件與封裝有 83.3 度的溫差，而電晶體最大可承受 150°C ，即至少要使封裝維持於 $150 - 83.3 = 66.7$ 度以下。

$R_{\theta JA}$, R_{thJA} (Thermal Resistance, Junction to Ambient)：

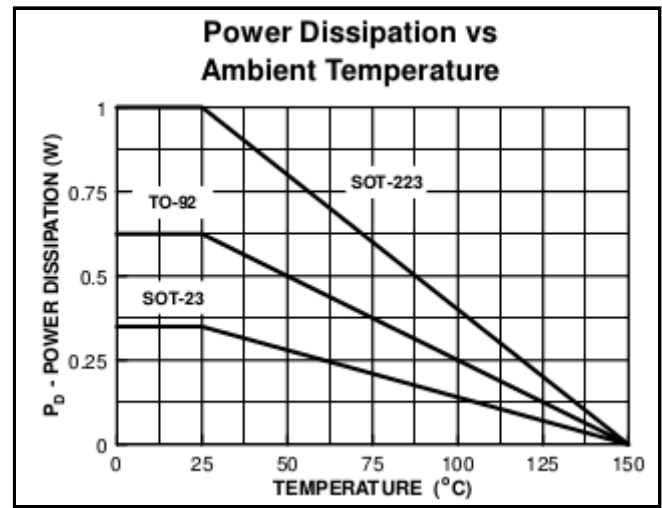
在沒有散熱裝置的狀況下，內部元件與環境之間的散熱特性。

其實一個電子零件可以承受多少功率是從這個參數計算出來的。以上面為例，電晶體元件最大溫度 150°C ，若環境溫度 25°C ，則溫差為 125°C ，而每瓦會造成 200°C 的溫差，所以此電晶體只能承受 $125/200 = 0.625\text{W}$ 。假設預估其他元件也會發熱使得機箱內溫度為 60°C ，那麼 $(150 - 60)/200 = 0.45$ ，設計電路時就不能使這個

電晶體的功率超過 0.45W。再者，如果 $V_{ce}=5V$ ，那麼 I_c 就不能超過 0.09A。

大部份的小訊號電晶體是應用於信號放大，工作電流通常很小 (mA 等級)，不消耗大功率，所以資料表一般不會列出 $R_{\theta JA}$ 或 $R_{\theta JC}$ ，因此沒有 Thermal Characteristic 這一項，而直接把 Pd 列到 Maximum Rating。

OFF CHARACTERISTICS



電晶體可承受的功率極限會隨環境溫度上升而下降，大部份資料表沒有提供 $R_{\theta JA}$ 而提供這張圖，更方便使用者查閱。此圖取自 Fairchild 的 PN2222A 資料表，Pd=0 對應的溫度是 150°C，其實就是代表 $T_J=150^\circ C$ 。

Electrical Characteristics

$T_A = 25^\circ C$ unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min	Max	Units
OFF CHARACTERISTICS					
$V_{(BR)CEO}$	Collector-Emitter Breakdown Voltage*	$I_C = 10\text{ mA}, I_B = 0$	40		V
$V_{(BR)CBO}$	Collector-Base Breakdown Voltage	$I_C = 10\text{ }\mu A, I_E = 0$	75		V
$V_{(BR)EBO}$	Emitter-Base Breakdown Voltage	$I_E = 10\text{ }\mu A, I_C = 0$	6.0		V
I_{CEX}	Collector Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{ V}, V_{EB(OFF)} = 3.0\text{ V}$		10	nA
I_{CBO}	Collector Cutoff Current	$V_{CB} = 60\text{ V}, I_E = 0$ $V_{CB} = 60\text{ V}, I_E = 0, T_A = 150^\circ C$		0.01 10	μA μA
I_{EBO}	Emitter Cutoff Current	$V_{EB} = 3.0\text{ V}, I_C = 0$		10	nA
I_{BL}	Base Cutoff Current	$V_{CE} = 60\text{ V}, V_{EB(OFF)} = 3.0\text{ V}$		20	nA

主要是電晶體 off 時的耐壓及漏電流。

BV_{ceo} , BV_{cbo} , BV_{ebo} (或 $V_{(BR)ceo}$, $V_{(BR)cbo}$, $V_{(BR)ebo}$)：與 Absolute Maximum Rating 的定義相同，且數值相同，但在此是寫在 Min 欄位 (最小值)，或是寫為 >xx，這意思是說 Absolute Maximum Rating 標示的是保證安全的極限工作條件，而產品的能力其實高於極限值，不過使用者如果超越極限值，廠商並不做任何保證。

V_{ces} ：當 $V_{eb}=0$ 的時候，C to E 的最大電壓。

V_{cex} ：當 E, B 逆偏的時候，C to E 的最大電壓

以上幾個電壓的關係為 $V_{cbo} > V_{ces} > V_{cex} > V_{ceo}$ ，所以一般規格書很少列出 V_{ces} 及 V_{cex} 。

I_{cbo} ：Collector Cutoff Current, 在 $V_{cb}=V_{ceo}$ $I_e=0$ (射極開路) 的狀況下，CB 間的漏電流

I_{ebo} ：Emitter Cutoff Current， $I_c=0$ (集極開路)且 V_{eb} 逆偏的的狀況下，EB 間的漏電流。

I_{cex} ：Collector Cutoff Current，在 $V_{ce}=V_{ceo}$, V_{eb} 逆偏的的狀況下，CE 間的漏電流。

I_{BL} ：Base Cutoff Current，在 $V_{ce}=V_{ceo}$, V_{eb} 逆偏的的狀況下，EB 間的漏電流。

由於 EB 逆偏過大易傷及電晶體特性，由規格書的測試條件大概可看出廠商的測試取樣量。如果 $V_{eb}=V_{ebo}$ ，可能是抽樣測試，如果是 $V_{eb}=0.5V_{ebo}$ 或更低，比較有可能是全測。

如果以電池供電且電晶體長時間處於不工作的狀態下才會注意漏電流的大小 (影響到電池的待機時間)，電晶體代換時，一般不會注意這些漏電參數。

ON CHARACTERISTICS

ON CHARACTERISTICS					
h_{FE}	DC Current Gain	$I_C = 0.1 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 1.0 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}$ $I_C = 10 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}, T_A = -55^\circ\text{C}$ $I_C = 150 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}^*$ $I_C = 150 \text{ mA}, V_{CE} = 1.0 \text{ V}^*$ $I_C = 500 \text{ mA}, V_{CE} = 10 \text{ V}^*$	35 50 75 35 100 50 40	300	
$V_{CE(sat)}$	Collector-Emitter Saturation Voltage*	$I_C = 150 \text{ mA}, I_B = 15 \text{ mA}$ $I_C = 500 \text{ mA}, I_B = 50 \text{ mA}$		0.3 1.0	V V
$V_{BE(sat)}$	Base-Emitter Saturation Voltage*	$I_C = 150 \text{ mA}, I_B = 15 \text{ mA}$ $I_C = 500 \text{ mA}, I_B = 50 \text{ mA}$	0.6	1.2 2.0	V V

電晶體工作時的一些特性，主要為直流放大倍率 (h_{FE})、 $V_{ce(sat)}$ 、 $V_{be(sat)}$

$V_{ce(sat)}$ Collector-Emitter Saturation Voltage：飽和時， V_{ce} 的電壓

$V_{be(sat)}$ Base-Emitter Saturation Voltage：飽和時， V_{be} 的電壓

這兩個項目的測試條件一般是令 I_B 為 I_C 的十分之一或二十分之一，以確保電晶體會進入硬性飽和的狀態。

以上兩項是電晶體在飽和區的特性，將電晶體做為開關時需要參考這項參數，一般會希望這兩個電壓低一點比較好，因為這代表電晶體開關的電阻較小且發熱較少。

h_{FE} (DC Current Gain)：直流放大倍率

直流放大倍率的 FE 兩個字母一般為大寫，如 H_{FE} 或 h_{FE}

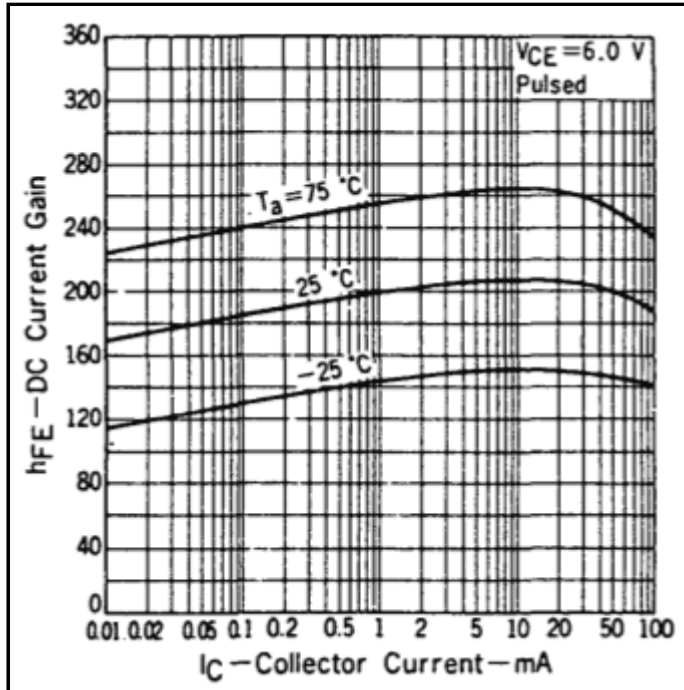
交流放大倍率的 fe 兩個字母一般為小寫，如 H_{fe} 或 h_{fe}

h_{FE} Classification： h_{FE} 是電晶體重要的電性參數，在製造過程中需要極良好的控制基極厚度才能有穩定的放大率。早年半導體製造設備不如現在穩定，偶有變異較大產品，所以製造商將 h_{FE} 劃定幾個族群及售價，方便製造商及使用者依需求追求最大的利潤。雖然現在已經很少看到特性偏移較大的電晶體，但是規格書還是保留了以前的分級表。電晶體的 h_{FE} 如果落在典型值附近，某種程度上代表這個電晶體是製程中的良品。如果需要高放大率的電晶體，應該選用典型值高的電晶體，而不是從同一型號中挑放大率偏高的電晶體。電子材料行面對用途不特定的客

戶，販賣特性落於典型值的零件最保險，所以我們應該也不需要擔心買到特性偏移太多的零件。

小訊號電晶體一般都會提供 $I_c=1\text{mA}$ 狀況下的 h_{FE} ，依照用途不同，有的還會提供 $I_c=0.1\text{mA}$, 10mA 甚至是 100mA 狀況下的 h_{FE} ，大部份的資料表都提供最大、最小值，少部份會提供典型值 (Typ)，有的會提供圖表。

以下由圖表來看一些電晶體特性。右圖取自 NEC 的



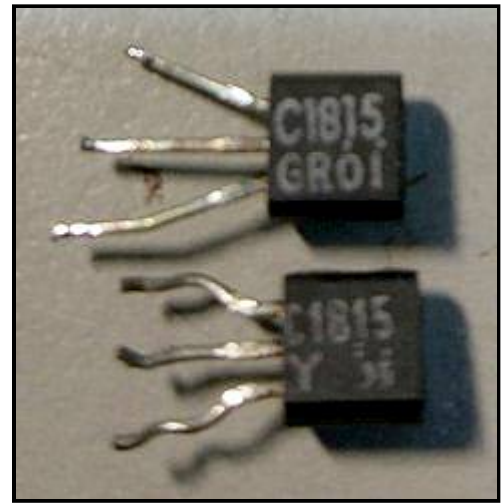
此圖為 NEC 2SC945 在不同溫度的 h_{FE} vs I_c 作圖。

2SC945，它說明

- 溫度愈高 h_{FE} 愈大，這是電晶體的通性，所以要注意如果電晶體的散熱不足以將熱傳走，一旦越過平衡點，電晶體變得更熱，放大率變得更大，電流就會更大，於是又更熱，結果形成惡性循環讓電晶體很快的燒燬，這個現象稱為 Thermal Run Away。
- 大部份電晶體的放大率會隨 I_c 變大而變大，放大率在某個電流值達到最大，然後快速下降。以 2SC945 而言， $I_c=15\text{mA}$ 有最大的 h_{FE} 。少部份的電晶體與此相反，即電流越大放大率越小，例如 PN2222A $h_{FE}=210 @ I_c=0.1\text{mA}$ ，但是 $h_{FE}=190 @ I_c=20\text{mA}$ 。
- 如果看 25°C 這條線， $h_{FE}=185 @ I_c=0.1\text{mA}$, $h_{FE}=200 @ I_c=1\text{mA}$, $h_{FE}=210 @ I_c=10\text{mA}$ $185/200=0.925$, $200/210=0.952$ ，這說明 I_c 每變化 10 倍， h_{FE} 變化不超過 10%，算是線性良好 (Good Linearity)。放大倍率的線性越好，代表 h_{FE} 不會隨著輸入訊號改變太多，所以因放大率改變所造成的失真越小。

右圖說明

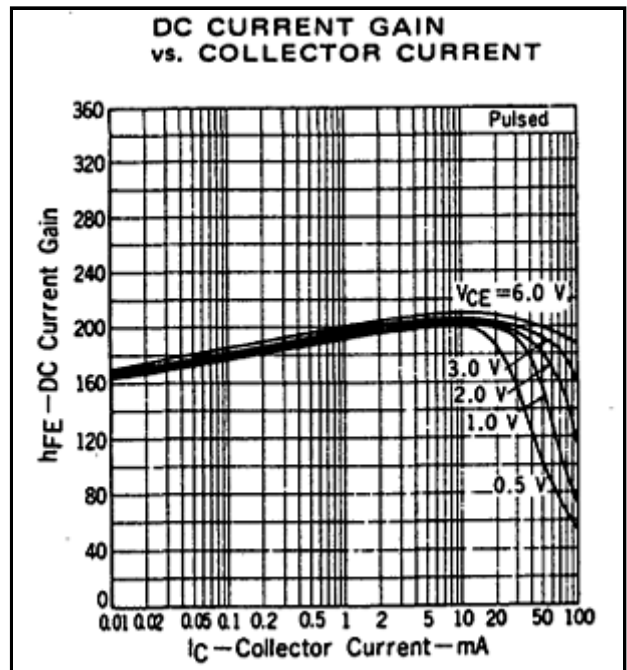
- I_c 相同的狀況下， V_{ce} 愈大， h_{FE} 愈大。
- 2SC945 的 I_c 在小於 10mA 的狀況下，不同 V_{ce} 對應的 h_{FE} 差異不大， I_c 大於 10mA h_{FE} 開始下降，而且 V_{ce} 愈小， h_{FE} 下降愈快。
- 由此可知 2SC945 適合在 I_c 小於 10mA 的狀況下工作，當輸入交流訊號時， V_{ce} 變動



兩顆 2SC1815 電晶體，上面的 h_{FE} 分類為『GR』，下面分類為『Y』。資料表上的分類為 O:70~140, Y:120~240, GR:200~400, BL:350~700。習慣上，如果 h_{FE} 落在兩個等級重疊的部份，會把它歸類在放大率較大的那個等級。

不會使放大率明顯變動，可以預期失真也比較小。

SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS



此圖為 NEC 2SC945 在不同 V_{CE} 的 h_{FE} vs I_C 作圖。

SMALL SIGNAL CHARACTERISTICS

f_T	Current Gain - Bandwidth Product	$I_C = 20\text{ mA}, V_{CE} = 20\text{ V}, f = 100\text{ MHz}$	300		MHz
C_{obo}	Output Capacitance	$V_{CB} = 10\text{ V}, I_E = 0, f = 100\text{ kHz}$		8.0	pF
C_{ibo}	Input Capacitance	$V_{EB} = 0.5\text{ V}, I_C = 0, f = 100\text{ kHz}$		25	pF
$r_b'C_C$	Collector Base Time Constant	$I_C = 20\text{ mA}, V_{CB} = 20\text{ V}, f = 31.8\text{ MHz}$		150	pS
NF	Noise Figure	$I_C = 100\text{ }\mu\text{A}, V_{CE} = 10\text{ V}, R_S = 1.0\text{ k}\Omega, f = 1.0\text{ kHz}$		4.0	dB
$Re(h_{ie})$	Real Part of Common-Emitter High Frequency Input Impedance	$I_C = 20\text{ mA}, V_{CE} = 20\text{ V}, f = 300\text{ MHz}$		60	Ω

這個部份說明電晶體的交流訊號特性，主要為 f_T (Transition Frequency)、NF (noise figure) 及潛佈電容，通常是射頻電路才會注意這部份的規格。

f_T (Current Gain - Bandwidth Product, 或稱 Transition Frequency)

這個參數說明電晶體的交流放大率，使用者必須知道以下規則才能利用 f_T 推算電晶體在各頻率的交流放大率。

1. 定義電晶體在 1KHz 所測得的交流放大率為 h_{fe0} ，而這個放大率其實與直流放大率很相近，原則上可視為相同。 $(h_{fe0} \approx h_{FE})$
2. 隨著頻率上升， h_{fe} 會下降，小訊號電晶體從 DC 到 300~500KHz 間， h_{fe} 和 h_{FE} 差異還不會太大，之後開始明顯下降。
3. 當上升到某個頻率，放大功率相較於 h_{fe0} 下降 3db，即電壓下降 6dB，即 h_{fe} 變為原來的 0.707 倍時，稱這個頻率為頻寬 (f_β)。此時我們定義 $f_T = h_{fe0} * f_\beta$ 。
4. 在頻寬 2 倍的頻率 ($2f_\beta$)， $h_{fe} = 0.5 * h_{fe0} = f_T / (2f_\beta)$
5. 之後的頻率， $h_{fe} = f_T / \text{頻率}$ ，(這也等於頻率每升高一倍， h_{fe} 就砍半)。

以 2SC945 為例， $h_{FE} = 210 @ I_C = 10\text{mA}, V_{CE} = 6\text{V}$, $f_T = 250 @ I_E = 10\text{mA}, V_{CE} = 6\text{V}$

所以 -3db 的 $h_{fe} = 210 * 0.707 = 148.5$

-3dB 的頻率 $f_\beta = f_T / h_{fe0} = 250 / 210 = 1.19\text{ MHz}$

$2f_\beta = 1.19 * 2 = 2.38\text{ MHz}$

$h_{fe} @ 2.38\text{MHz} = 250 / 2.38 = 210 / 2 = 105$,

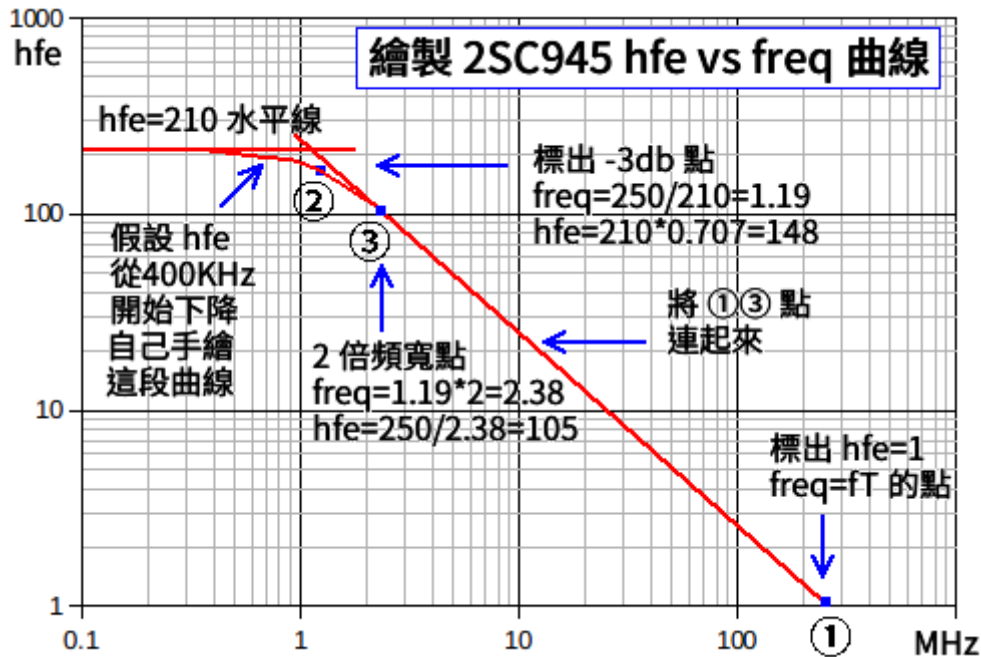
$$h_{fe} @ 4.76\text{MHz} = 250/4.76 = 105/2 = 52.5,$$

$$h_{fe} @ 9.52\text{MHz} = 250/9.52 = 52.5/2 = 26.25$$

$$h_{fe} @ 100\text{MHz} = 250/100 = 2.5$$

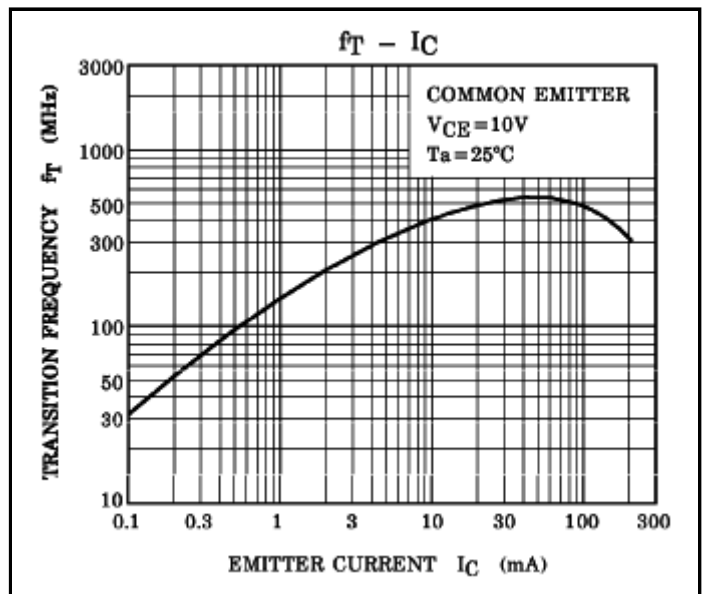
以上的說明，會有兩個區間的 h_{fe} 不明確，即 $300\text{KHz} \sim f_{\beta}$ 及 $f_{\beta} \sim 2f_{\beta}$ ，因為這個區間 h_{fe} 是弧線式的下降，我們可以使用以下 3 種方法粗估，實用上不會有問題。

1. 利用 $(0.3\text{MHz}, h_{FE})$, $(f_{\beta}, 0.707 \cdot h_{FE})$, $(2f_{\beta}, 0.5 \cdot h_{FE})$ 這三個點做線性內插
2. 300KHz (或 500KHz) $\sim f_{\beta}$ ：一律當做 $0.85 \cdot h_{fe0}$ 即可，承上例，即為 $210 \cdot 0.85 = 178$
 $f_{\beta} \sim 2f_{\beta}$ ：一律當做 $0.6 \cdot h_{fe0}$ 即可，承上例，即為 $210 \cdot 0.6 = 126$
3. 利用試算表做出一張空白對數座標稿紙，然後在上面做圖。如下圖



左圖是 2SC1815 f_T 與 I_e 的曲線圖，看來簡潔卻透露不少訊息。

- 資料表寫 f_T 最小值為 $80 @ I_e=1\text{mA}$, $V_{ce}=10\text{V}$ ，實際上曲線圖上的典型值為 140
- 隨著 I_e 上升到 50mA ，有最大的 $f_T=540$ ，但是 $50\text{mA} \cdot 10\text{V}=500\text{mW}$ ，而 2SC1815 在不加散熱片的狀況下只能承受 400mW ，因此這只是極短時間的測試值，不適合以此條件長時間工作。
- $I_e=4\text{mA}$, $f_T=300$ ，這似乎是個合理的工作點，如果買到的電晶體特性略差， f_T 或許還有 150。
- 由上可知，資料表所列的上下限雖然顯示出產品的能力，但它主要的功能是為了出貨規格，數據傾向於保守。商用的設計自然要保守一點，以確保使用不同批次的零件都能組裝成合格成品。但對於 DIY 的人來



Toshiba 2SC1815 的 f_T vs I_e 曲線圖。

說，若能善於參考特性曲線圖，就有機會讓普通的零件發揮最佳效能，不見得非要尋覓高級零件。

NF (Noise Figure)

電晶體放大訊號時，自身產生的雜訊也會被放大，故定義輸出端的 (訊號+雜訊) 除以輸入端的訊號作為指標，即 $NF = (S+N)/S$

NF 自然是越小越好，但所謂的小依使用的場合而有所不同

- 使用於 HF 頻段的放大級：由於 HF 存在很多電離層擾動及天電雜訊，這些都會被天線接收進來，其強度大約比電路的雜訊多了 20 ~ 30 dB，難以感受到低雜訊電晶體的效用，所以 HF 放大電路中，單顆電晶體的 NF 在 4~6dB 應該就夠用了。
- 使用於 VHF 以上頻率的放大電路：電離層擾動及天電雜訊通常小於 10dB，所以要選用低雜訊的電晶體 (NF 1.5 ~ 2dB)
- 使用於聲頻：被動元件產生的雜訊相當相當低，主動元件的是否產生雜訊就很容易感受到，所以要儘量使用 NF 較低的電晶體。

寄生電容：

Cib, Ce, Ceb (輸入端寄生電容)：就是 BE 之間的寄生電容，

Cob, Cc, Ccb (輸出端寄生電容)：就是 BC 之間的寄生電容

CB 及 BE 二極體的 PN 介面其實就是一個隱藏版的電容，這個電容與二極體的等效電阻並聯，寄生電容越大，頻率變動時電容抗的變動也越大，輸入阻抗的變化動也越大。所以這兩個電容值越低越好。

hie (Input impedance)：BE 二極體的等效電阻，應用於高頻時須配合 Cib 及偏壓電阻計算輸入阻抗。

代換高頻應用的電晶體時，儘量選擇 Cib, Cob, hie 相近的電晶體，如果差異較大，可能就需調整偏壓電阻來達到最好的匹配。

SWITCHING CHARACTERISTICS

SWITCHING CHARACTERISTICS

t_d	Delay Time	$V_{CC} = 30\text{ V}, V_{BE(OFF)} = 0.5\text{ V},$ $I_C = 150\text{ mA}, I_{B1} = 15\text{ mA}$		10	ns
t_r	Rise Time			25	ns
t_s	Storage Time	$V_{CC} = 30\text{ V}, I_C = 150\text{ mA},$ $I_{B1} = I_{B2} = 15\text{ mA}$		225	ns
t_f	Fall Time			60	ns

*Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\text{ }\mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2.0\%$

說明輸入方波時，訊號延遲、上升、下降的時間、斜率等等，如果用來做開關時要注意這部份特性。若要控制燈光、馬達、繼電器等，電晶體的速度絕對夠快，所以大部份的 datasheet 都省略這個部份。

td, delay time：輸入訊號已由 0 上升到 1，與輸出訊號上升 10% 之間的差距。

tr, rise time：輸出訊號由 10% 上升到 90% 的時間，

ts, stroge time：輸入訊號已由 1 下降到 0，與輸出訊號由 1 下降到 90% 之間的差距。

tf, fall time：輸出訊號由 90% 下降到 10% 的時間

上述四個時間，通常 $t_d < t_r < t_f < t_s$

電晶體的代換

電路設計者在電路能達到設定功能的前提下，為何選用這個電晶體，而不是那個電晶體，原因不外乎地域、學習、商業考量等因素：

- 地域：在當地最容易取得那些型號的電晶體，例如美國系統的人習慣使用 2Nxxxx，而日本系統習慣使用 2Sxxxx，歐洲人就是 BCxxx 的電晶體。
- 學習背景：在學的時候老師教什麼；雜誌、網路別人的電路用些什麼；同好們耳濡目染等等。
- 商業考量：xx 知名廠牌電器要求使用自家生產的電子零件；基於成本選用最適宜的電晶體、套用既有的模組以節省開發時間等等。

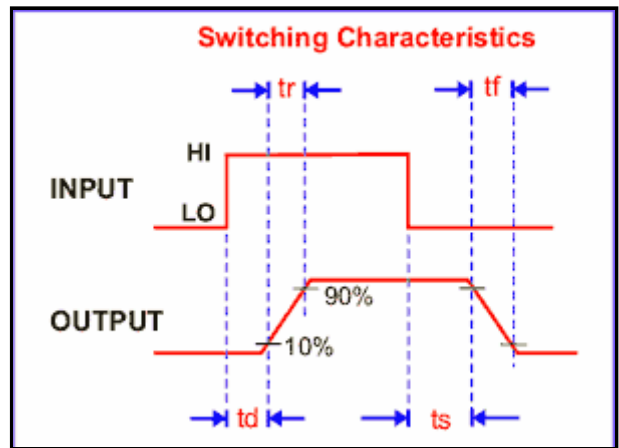
久而久之，使用哪些零件成了個人的喜好與習慣，換言之，不同設計者會選用不同的電晶體做出相同功能的電路，因此代換不同型號的電晶體並非冒險的事，在大部份的狀況下，掌握以下原則，成功率應該很高。

V_{ce0} , $I_c(\max)$, P_d 不要小於原電晶體的 Maximum Rating。

- h_{FE} ：對於小訊號電晶體， h_{FE} 大於 100 適用於絕大部份電路，除非原始電路是使用放大倍率超高的電晶體做單一級放大。對於功率晶體而言，因為不同型號之間放大率差異不小，建議其是要挑放大率相近的電晶體。
- f_T ：如果是應用於 HF 以下，一般不需要考慮 f_T 。頻率愈高就愈要挑 f_T 相近或 f_T 更高的電晶體，或是使用前面介紹的方法估算代換的電晶體的交流放大率是否合於電路需求。
- NF：NF 不同只會影響信號的品質，但電路一樣能工作，原則是選 NF 小一點或相近的代換品，如果找不到，用 NF 大一點的代換品先頂著用也 OK。
- Switching Time：當電晶體作為高速開關的時候才需考慮此項 (數十 KHz 以上)，原則上 Switching time 愈短信號愈不失真，但是代換的電晶體 switching time 太短有時候會可能造成電路的其他部份無法配合而動作異常，所以選擇相近的就好。
- 將電晶體並聯來加大功率的電路，不管是買相同型號或者代換品來更換其中一顆故障品，注意要挑選放大率與原機上的相近的電晶體以避免 Thermal Run Away (前面原有介紹過)。如果找不到放大率相近電晶體，就要將原機上的電晶體整組拆下，換上整組代換的電晶體。電晶體需配對使用的狀況(例如音響左右聲道的電晶體)，亦需考慮這個原則。

如果代換後電路動作不如預期，就有必要探究電路原理，看看是不是該要微調電路的其他地方。假設某電路利用電晶體在不同溫度放大倍率不同的特性，藉此觸發某裝置或某回授控制，現在代換不同電晶體，觸發點自然會不同，此時就需調整電路其他部份，例如分壓電阻等等。

有時候進行代換在邏輯上就是錯誤的，例如有一個看起來很典型的放大電路，但是標榜使用某 NF 超低且線性超良好的電晶體來達到音質純淨不失真的效果，因為主打的是元件特性，進行電晶體代換完全失去意義。



常見的通用型電晶體

如果你喜歡電子電路的 DIY，以下常見的電晶體應該可以滿足九成以上電路的需求，NPN PNP 各挑個幾樣放在手邊就不用常跑材料行，相當實用。

下列規格表的說明

- 為了精簡，以下規格表的電壓及電流都捨去正負符號。
- 如果原規格書有附特性曲線圖而可以查到對應的值，就使用括號代表此值並將它當做典型值。
- h_{FE} 的寫法為 min~typ~max (最小值~典型值~最大值) @ 測試條件，大部份規格表都會列出最小值，而沒有典型值及最大值，為了格式統一，只要原規格書沒有的數值就保留英文字不動，例如 100~(150)~max 表示大於 100，由特性圖查出 150 做為典型值，原規格書沒有最大值。
- $V_{ce(sat)}$, $V_{be(sat)}$ ：列出 typ~max，有打 * 的為最小值，少部份規格書沒有 $V_{be(sat)}$ 就仍然留著 typ~max 填補位置。
- f_T 通常只列最小值，如果特性圖可查到最高的 f_T ，會將其值及條件列出。
- 腳位僅供參考，某些製造商會製造與規格書不同腳位的電晶體以供應特定客戶使用。
- h_{FE} 分級如果有標粗字，表示這是最常見的等級。
- 一組特性相近的 NPN, PNP 電晶體彼此稱為互補型，電路中如有 NPN, PNP 需搭配使用時，通常會使用廠商建議的互補電晶體。
- 其餘更多的資訊請看對應的備註編號。

型號	V_{ce0} V I_c mA P_d mW	h_{FE} min~typ~max @ I_c mA, V_{ce} V	$V_{ce(sat)}$ mV $V_{be(sat)}$ mV @ I_c , I_b mA	f_T (MHz) @ I_c , V_{ce}	N_f (dB)	腳位 備註 互補型
NPN 2N2222	30 800 500	35~typ~max @ 0.1, 10 50~typ~max @ 1, 10 75~typ~max @ 10, 10 100~typ~300 @ 150, 10 40~typ~max @ 500, 10	< 400 < 1300 @ 150, 15 < 1600 < 2600 @ 500, 50	250~typ~max @ 20mA, 20V	< 4.0	EBC (1) 2N2907
NPN 2N2222A	40 800 625	35~typ~max @ 0.1, 10 50~typ~max @ 1, 10 75~typ~max @ 10, 10 100~typ~300 @ 150, 10 40~typ~max @ 500, 10	(0.13)~0.3 0.6*~1.2 @ 150, 15 (0.28)~1.0 (1.2)~2.0 @ 500, 50	300~typ~max @ 20mA, 20V	< 4.0	EBC (1) 2N2907A
PNP 2N2907	40 600 400	35~typ~max @ 0.1, 10 50~typ~max @ 1, 10 75~typ~max @ 10, 10 100~typ~300 @ 150, 10 30~typ~max @ 500, 10	typ~400 typ~1300 @ 150, 15 typ~1600 typ~2600 @ 500, 50	200~typ~max @ 50mA, 20V		EBC (2) 2N2222
PNP 2N2907A	60 600 400	75~typ~max @ 0.1, 10 100~typ~max @ 1, 10 100~typ~max @ 10, 10 100~typ~300 @ 150, 10 50~typ~max @ 500, 10	typ~400 typ~1300 @ 150, 15 typ~1600 typ~2600 @ 500, 50	200~typ~max @ 50mA, 20V		EBC (2) 2N2222A
NPN 2N3904	40 200	60~typ~max @ 0.1, 1 80~typ~max @ 1, 1	(40)~200 650*~850	300~typ~max @ 10mA, 20V	< 5.0	EBC (3)

	500	100~typ~300 @ 10, 1 60~typ~max @ 50, 1 30~typ~max @ 100, 1	@ 10, 1 (130)~200 (900)~950 @ 50, 5			2N3906
PNP 2N3906	40 200 500	50~(75)~max @ 0.1, 1 70~(110)~max @ 1, 1 100~(130)~300 @ 10, 1 60~(100)~max @ 50, 1 30~(43)~max @ 100, 1	(110)~250 typ~850 @ 10, 1 (140)~400 typ~950 @ 50, 5	250~typ~max @ 10mA, 20V	< 5.0	EBC (4) 2N3904
NPN 2N4401	40 600 625	20~typ~max @ 0.1, 1 40~typ~max @ 1.0, 1 80~typ~max @ 10, 1 100~typ~300 @ 150, 1 40~typ~max @ 500, 2	(130)~400 750*~950 @ 150, 15 (320)~750 (1000)~1300 @ 500, 50	250~typ~max @ 20mA, 10V	< 4.5	EBC (5) 2N4403
PNP 2N4403	40 600 625	30~typ~max @ 0.1, 1 60~typ~max @ 1.0, 1 100~typ~max @ 10, 1 100~typ~300 @ 150, 2 20~typ~max @ 500, 2	(130)~400 750*~950 @ 150, 15 (320)~750 (1000)~1300 @ 500, 50	200~typ~max @ 20mA, 10V		EBC (5) 2N4401
NPN BC547	(6) 100 500	110~(200)~800 @ 2, 5 min~(200)~max @ 10, 5 min~(200)~max @ 50, 5 min~(180)~max @ 100, 5	90~250 750~max @ 10, 0.5 250~600 900~max @ 100, 5	min~300~max @ 10mA, 5V	(6)	CBE (6) BC557
PNP BC557	(6) 100 500	110~(300)~800 @ 2, 5 min~(300)~max @ 10, 5 min~(250)~max @ 50, 5 min~(210)~max @ 100, 5	90~300 700~max @ 10, 0.5 250~650 900~max @ 100, 5	min~150~max @ 10mA, 5V	(6)	CBE (6) BC547

- (1) NPN 2N2222 的 switching 參數 : $t_d=10\text{ns}$, $t_r=25\text{ns}$, $t_s=200\text{ns}$, $t_f=60\text{ns}$
(2) PNP 2N2907 的 switching 參數 : $t_d=45\text{ns}$, $t_r=35\text{ns}$, $t_s=250\text{ns}$, $t_f=50\text{ns}$
(3) NPN 2N3904 的 switching 參數 : $t_d=35\text{ns}$, $t_r=35\text{ns}$, $t_s=200\text{ns}$, $t_f=50\text{ns}$
(4) PNP 2N3906 的 switching 參數 : $t_d=35\text{ns}$, $t_r=35\text{ns}$, $t_s=225\text{ns}$, $t_f=75\text{ns}$
(5) NPN 2N4401/PNP 2N4403 的 switching 參數 : $t_d=15\text{ns}$, $t_r=20\text{ns}$, $t_s=225\text{ns}$, $t_f=30\text{ns}$
(6) 這是一個系列的歐規電晶體，彼此的差異為 V_{ce0} 及 NF，最常用的為 BC547/BC557
NPN BC546 / PNP BC556, $V_{ce0}=65\text{V}$, NF=2.0~10 @ 1 KHz
NPN BC547 / PNP BC557, $V_{ce0}=45\text{V}$, NF=2.0~10 @ 1 KHz
NPN BC548 / PNP BC558, $V_{ce0}=30\text{V}$, NF=2.0~10 @ 1 KHz
NPN BC549 / PNP BC559, $V_{ce0}=30\text{V}$, NF=1~4 @ 1 KHz
NPN BC550 / PNP BC560, $V_{ce0}=45\text{V}$, NF=1~4 @ 1 KHz
NF @ 30~1500 MHz : BC549=1.4~4, BC559=1.2~4
NF @ 30~1500 MHz : BC550=1.4~3, BC560=1.2~2
 h_{FE} 分級 : A=110~220, B=200~450, C=420~800

型號	V_{ce0} V I_c mA P_d mW	h_{FE} min~typ~max @ I_c mA, V_{ce} V	$V_{ce(sat)}$ mV $V_{be(sat)}$ mV @ I_c , I_b mA	f_T (MHz) @ I_c , V_{ce}	Nf (dB)	腳位 備註 互補型
----	-------------------------------------	---	--	-----------------------------------	------------	-----------------

NPN 2SC945	50 100 250	50~185~max @ 0.1, 6 90~200~600 @ 1, 6 min~(210)~max @ 10, 6 min~(190)~max @ 100, 6	150~300 860~1000 @ 100, 10	150~250~450 @ 10mA, 6V (300) @ 30mA, 6V	0.8 ~15	ECB (7) 2SA733
PNP 2SA733	50 100 250	min~(160)~max @ 0.1, 6 90~200~600 @ 1, 6 min~(210)~max @ 10, 6 min~(70)~max @ 100, 6	180~300 (0.9)~max @ 100, 10	100~180~max @ 10mA, 6V (200) @ 30mA, 6V	6.0 ~20	ECB (8) 2SC945
NPN 2SC1815	50 150 400	70~(160)~700 @ 2, 6 25~100~max @ 150, 6	100~250 (950)~1000 @ 100, 10	80~(140)~max @ 1mA, 10V (540) @ 50mA, 10V	1.0 ~10	ECB (9) 2SA1015
PNP 2SA1015	50 150 400	70~(180)~400 @ 2, 6 25~80~max @ 150, 6	100~300 (850)~1100 @ 100, 10	80~(120)~max @ 1mA, 10V (400) @ 50mA, 10V	0.2 ~3.0	ECB (10) 2SA1815
NPN MPSA42	300 500 625	25~(72)~max @ 1, 10 40~(80)~max @ 10, 10 40~(67)~max @ 30, 10	(175)~500 (760)~900 @ 20, 2	50~typ~max @ 10mA, 20V (70) @ 5mA, 20V		EBC () MPSA92
PNP MPSA92	300 500 625	25~(170)~max @ 1, 10 40~(170)~max @ 10, 10 25~(160)~max @ 30, 10	(125)~500 (760)~900 @ 20, 2	50~(130)~max @ 10mA, 20V		EBC () MPSA42

(7) 2SC945

h_{FE} 線性：在 0.1 ~ 10mA 的範圍內， I_c 每上升 10 倍， h_{FE} 上升 1.087 倍

h_{FE} 分級：R=90~180, Q=135~270, **P=200~400**, K=300~600 (測試條件 $I_c=1mA$, $V_{ce}=6V$)

(8) 2SA733

h_{FE} 線性：在 0.1 ~ 20mA 的範圍內， I_c 每上升 10 倍， h_{FE} 上升 1.06 倍

h_{FE} 分級：R=90~180, Q=135~270, **P=200~400**, K=300~600 (測試條件 $I_c=1mA$, $V_{ce}=6V$)

(9) 2SC1815

h_{FE} 線性：在 0.1 ~ 30mA 的範圍內， I_c 每上升 10 倍， h_{FE} 上升 1.05 倍

h_{FE} 分級：O=70~140, Y=120~240, **GR=200~400**, BL=350~700 (測試條件 $I_c=2mA$, $V_{ce}=6V$)

(10) 2SA1015

h_{FE} 線性：在 0.1 ~ 40mA 的範圍內， I_c 每上升 20 倍， h_{FE} 上升 1.05 倍

h_{FE} 分級：O=70~140, Y=120~240, **GR=200~400** (測試條件 $I_c=2mA$, $V_{ce}=6V$)

型號	V_{ceo} V I_c mA P_d mW	h_{FE} min~typ~max @ I_c mA, V_{ce} V	$V_{ce(sat)}$ mV $V_{be(sat)}$ mV @ I_c , I_b mA	f_T (MHz) @ I_c , V_{ce}	Nf (dB)	腳位 備註 互補型
NPN SS9013	20 500 625	64~120~202 @ 50, 1 40~120~max @ 500, 1	160~600 910~1200 @ 500, 50	(200) @ 30mA, 6V		EBC (11) SS9012
PNP SS9012	20 500 625	64~120~202 @ 50, 1 40~90~max @ 500, 1	180~600 950~1200 @ 500, 50	(120) @ 30mA, 6V		EBC (11) SS9013
NPN SS9014	45 100 450	60~280~1000 @ 1, 5	140~300 840~1000 @ 100, 5	150~270~max @ 10mA, 5V (400) @ 40mA, 5V	0.9 ~10	EBC (12) SS9015

PNP SS9015	45 100 450	60~(400)~1000 @ 1, 5	(180)~700 (800)~1000 @ 100, 5	100~190~max @ 10mA, 5V	0.7 ~10	EBC (12) SS9014
NPN SS9016	20 25 400	28~90~198 @ 1, 5	100~300 (800)~max @ 10, 1	400~620~max @ 1mA, 5V	3.0 ~5.0	EBC (13) 無
NPN SS8050	25 1500 1000*	45~135~max @ 5, 1 85~160~300 @ 100, 1 40~110~max @ 800, 1	280~500 980~1200 @ 800, 80	100~190~max @ 50mA, 10V		EBC (14) SS8550
PNP SS8550	25 1500 1000*	45~170~max @ 5, 1 85~160~300 @ 100, 1 40~80~max @ 800, 1	280~500 980~1200 @ 800, 80	100~200~max @ 50mA, 10V		EBC (14) SS8050

(11) PNP SS9012 / NPN SS9013

h_{FE} 分級：D=64~91, E=78~122, F=96~135, G=112~166, **H=144~202** (測試條件 $I_c=50mA$, $V_{ce}=1V$)

(12) NPN SS9014 / PNP SS9015

h_{FE} 分級：A=60~150, B=100~300, **C=200~600**, D=400~1000 (測試條件 $I_c=1mA$, $V_{ce}=5V$)

(13) NPN SS9016

h_{FE} 分級：D=28~45, E=39~60, **F=54~80**, G=72~108, H=97~146, I=132~198 (測試條件 $I_c=1mA$, $V_{ce}=5V$)

(14) NPN SS8050 / PNP SS8550

h_{FE} 分級：B=85~160, C=120~200, **D=160~300** (測試條件 $I_c=100mA$, $V_{ce}=1V$)

所列的承受功率為 P_c · 推估不加散熱片的狀況下 P_d 約 625mW

型號	V_{ceo} V I_c A P_c W	h_{FE} min~typ~max @ I_c A, V_{ce} V	$V_{ce(sat)}$ mV $V_{be(sat)}$ mV @ I_c , I_b A	f_T (MHz) @ I_c , V_{ce}	Nf (dB)	腳位 備註 互補型
NPN TIP41*	(15) 6 65W	30~typ~max @ 0.3A, 4V 15~75~max @ 3A, 4V	(430)~1500 (1100)~2000 @ 6A, 0.6A	3~typ~max @ 0.5A, 10V		BCE (15) TIP42*
PNP TIP42*	(15) 6 65W	30~typ~max @ 0.3A, 4V 15~75~max @ 3A, 4V	(700)~1500 (1400)~2000 @ 6A, 0.6A	3~typ~max @ 0.5A, 10V		BCE (15) TIP41*
NPN 2N3055	60 15 115W*	20~70~max @ 4A, 4V 5~typ~max @ 10A, 4V	typ~1100 typ~max @ 4A, 0.4A typ~3000 typ~max @ 10A, 3.3A	2.5~typ~max @ 0.5A, 10V		TO-3 () MJ2955
PNP MJ2955	60 15 115W*	20~70~max @ 4A, 4V 5~typ~max @ 10A, 4V	typ~1100 typ~max @ 4A, 0.4A typ~3000 typ~max @ 10A, 3.3A	2.5~typ~max @ 0.5A, 10V		TO-3 () 2N3055

(15) NPN TIP41~41C / PNP TIP42~42C

這一系列電晶體彼此間的差異為 V_{ceo} 不同，如下：TIP41/42=40V, TIP41A/42A=60V, TIP41B/42B=80V, TIP41C/42C=100V

在不加散熱片的狀況下， $P_d=2W$ @ $T_A=25^\circ C$

此外，如果你有興趣製作 VHF 電路卻買不到適用的電晶體，可以考慮以 CA3046 或 MC3446 這兩顆 transistor array IC 取代。這兩顆 14pin IC，pin 腳定義相同，特性也相近，內含 3 顆獨立的電晶體及 2 顆 E 極連接的電晶體，這 5 顆晶體都在同一個 chip 上，所以電性幾乎完全相同。其 $f_T > 500\text{MHz}$ ，適用於 120MHz 以下的小訊號用途，一般會利用 3 顆獨立的電晶體分別做前級射頻放大、本地振盪、中頻放大，2 顆 E 極相連的電晶體則作為混波。

BV3FG / Robert Suen