

晶 体 管 译 丛

第 四 集

莫梧生 刘锦棠 于清汶等 編譯

人 民 邮 电 出 版 社

本书选译了俄、英、法、日文的晶体管论文19篇，内容侧重于讨论放大器、振荡器、混频器、脉冲形成电路以及触发电路，此外，也对中和与单向化以及瞬变响应作了分析。

晶体管译丛（第四集）

編譯者：莫 梧 生 刘 錦 棠 于清汶等

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四6条13号

（北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八号）

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发行者：新 华 书 店

开本 850×1168 1/32

1959年7月北京第一版

印张 11 页 176

1963年6月北京第二次印刷

印刷字数 295,000 字

印数 4,201—6,700 册

統一书号：15045·总1044—无275

定价：(10)1.85 元

目 录

第四集編者序

1. 晶体管的重要特性	J. M. 姆龙
2. 中和与單向化	成众志 65
3. 晶体管放大器的内部回授和中和 A. P. 斯特恩, C. A. 阿耳德里德吉, W. F. 乔伍	84
4. 高频时結型晶体管放大器的單向化	朱健裕 106
5. 晶体管功率放大器	R. F. 謝 118
6. 用在音频輸出电路中的晶体功率管	L. J. 吉訶里多 124
7. 耗电低的晶体管放大器	C. 汉納斯堡 136
8. 單調諧与双調諧晶体管中頻放大器 R. C. 萊恩德, J. B. 欧克斯	163
9. 結型晶体管的高频功率增益	R. L. 普列查德 180
10. 表面阻擋層晶体管在电路中的应用 J. B. 恩格尔和 F. P. 凱潑尔	206
11. 負載阻抗很小的共基極晶体管放大器的瞬态响应 J. S. 沙福奈, J. J. 苏蘭	213
12. 晶体管放大器的瞬态分析	W. F. 周和 J. J. 苏蘭 220
13. 結型晶体管的大信号性能	J. J. 依勃斯, J. L. 莫尔 227
14. 結型晶体三極管大信号瞬变响应	J. L. 莫尔 252
15. 面接触式半导体三極管脉冲形成电路	J. 欧克斯 277
16. 結型晶体管在触發电路中的应用	J. E. 富罗特 284
17. 半导体三極管間歇振盪器中物理过程的分析 K. Я. 謝拿托諾夫 Г. H. 別列斯托夫斯基	302
18. 結型晶体三極管混頻器的分析	岡部丰比古 垂井忠明 322
19. 小型晶体管調頻發射机	D. E. 湯姆士 339

1. 晶体管的重要特性

J. M. 姆龙

緒 言

最初的晶体管是在1948年左右出現的，此后，应用晶体管作放大器便成为許多国家迫切研究的对象；但可以認為1954年才开始生产一系列实用的晶体管。初期的晶体管虽有許多缺点，但漸漸地随着制造質量的改进而改进，在1954年末，某些型式的晶体管已經可以用于大部分的試驗中了。晶体管的寿命是重要的質量之一，为此必須有完善的密封及制造中的严格管理，几年来在这方面的期望已經实现了。但要保証十几年的寿命，現在还不敢断言，至于效率已接近理論值，在甲級中为50%，在乙級中为78%。机器要縮小体积就要求大大縮小零件的尺寸，这些零件必須与晶体管的大小相适应。背景噪声是最紧要的，現在已显著减低，并且为其他許多用途打开了道路。溫度稳定度及頻率响应这两方面的进步是值得庆賀的。应用各种質料的半导体，在實驗室中已經得到的效果說明溫度影响可显著减低，使用極限可从 80° 提高到 150° ；同样，在电极間采用某种工艺也正在提高最大可用頻率，其現象与三极管中引入一个帘栅極的結果相仿。

即使在低頻的情况下，晶体管在綫路中的应用也比真空管需要更多的注意，因为晶体管需要考虑好几个参数。然而还是可以从这两种放大元件中找出共同之点，其不同之点主要是在輸入电极上所發生的現象：栅極的輸入阻抗高，电压起信号的作用；与此相反，晶体管的基極輸入阻抗低，而电流起着信号的作用。相似处乃是用处相同，見圖1-1。

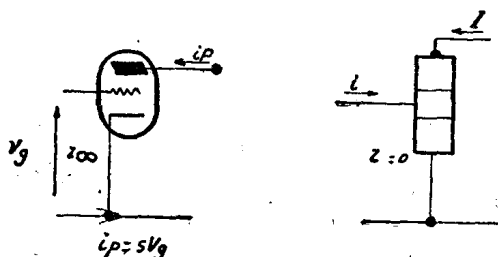


圖 1-1 線路上的相似，但往往可看作真空管与理想晶体管实际上的相似

真空管中所發生的物理現象与晶体管中所發生的有很大的區別，在研究晶体管的工作原理之前（即使是初級的原理）必須复習一下半导体及二極管的某些基本特性。

I. 半导体概論

一个本征半导体，就是絕對純粹的并从晶体点陣中去除一切雜質的半导体，乃是一个很不良的导体，与絕緣体相近，在很寬的溫度範圍內都是如此。若加入另一物質，即使是碰一碰，就会显著地增加半导体的导电率，那时就称它为非本征半导体。雜質根据其性質能成为电子的施主，这种电子类似自由电子；或者成为电子的受主，在后一种情况，雜質从半导体的晶体結構中夺取一个或几个电子，这样就出現了空穴（即缺乏电子的意思），空穴像一个自己能够移动的正电荷；一个电子来充滿空穴 A 而在它后面产生一个新的空穴 B ，这正如一个正电荷从 A 过渡到 B 。电子与空穴有同样数量級的移动性，因此似乎存在着一个双重型式的导电。

一个半导体，其施主的数目超过受主的数目，且其导电主要由負电子作媒介，这种半导体称为 N 型半导体。

一个半导体，其受主的数目超过施主的数目，且导电主要由正穴作媒介，这种半导体称为 P 型半导体。

同样的半导体，根据其所含雜質的性質，可能是 N 型的，也可能是 P 型的。

当非正常型电荷的通量进入一个半导体时，例如空穴进入一个

N 型半导体时，这些电荷有与大量存在着的正常电荷相混合的趋势，因此可以用平均寿命及扩散长度来表示半导体的特性。

当杂质增加时电阻率减低，寿命不是直接与电阻率有关系的。

表面上的现象是相当复杂的，虽然经常遇到的是小段的半导体，但为了简单起见，我们讨论整块半导体中的现象。

从某一温度起(此温度是杂质百分数的函数)，半导体的特性开始消失。

结

杂质的性质或者杂质的集合的突然间断称为结。图 1-2 所示的是 NP 结。在静止时，大量的电子存在于 N 区域，而大量的空穴存在于 P 区域，它们之间是在热平衡的状态。

当一个正电压加到 P 区域时，多数电子从两方面通过结处并产生相应的电流，此电流称为直流；反之，如果以负电压加到 P 区域时，多数电子离开结处，产生了一个隔离区域；

因此只有一个很弱的电流 I_{C0} ，这个电流是由少数载流子 P 区域的电子以及 N 区域的空穴所引起的。从图 1-3 可以很明显地看出其整流作用，此图所表示的两极管的理论特性为：

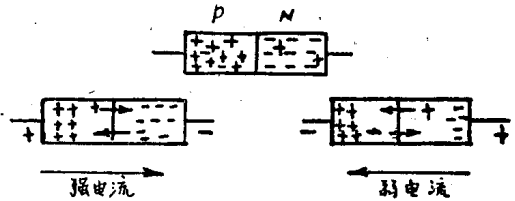


图 1-2 NP 结的整流作用

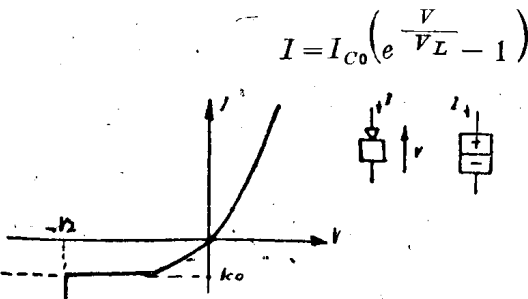


图 1-3 结型二极管的理论特性

在某一反向极限电压 V_e 下，出现一个突然的弯角(Zeener 效应)，此反向极限电压通过分解足以使电子空穴对出现。电流 I_{C0} 称为饱和

电流，它是随温度而指数上升的函数。

II. 四端網絡概論

晶体管不是一个不可逆的元件，加于输出电极的一个信号会较弱地重新出现于输入电极。为了熟悉晶体管这个可逆的有源元件的特性，并且为了很好地应用它，必须对于四端网络具有足够的知识。本节的目的就在于彙集一组研究晶体管所必须的公式。

阻抗矩陣

将一个放大器画成图 II-1 的样子。与信号相应的电流 i_1 及 i_2 和电压 V_1 及 V_2 都重叠于极化及供电的电流及电压上。

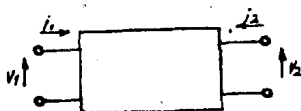


圖 II-1 四端網絡

这里信号假定是足够弱的，所以可将放大器看作是线性的，同时可建立以下代数关系：

$$V_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2$$

$$V_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2$$

在选定的极化情况下，放大器的特性可以下式表示：

$$\begin{vmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{vmatrix}$$

这个公式称为四端网络的阻抗矩陣。在放大器的情况下，表中各项的意义如下：

Z_{11} 及 Z_{22} 表示另一端开路时该端的端阻抗。

Z_{21} 表示从输入至输出的传输项，它概略地表示了放大器的物理现象。

Z_{12} 表示输出对输入的影响，这是四端网络的反作用项。

一般公式

圖 II-2 表示一个接于發生器 (E, z_g) 及接收机 (z_r) 之間的放

大器。

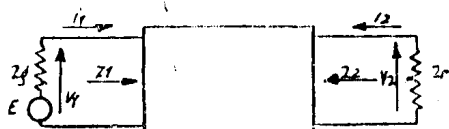
应用克希荷夫定律可得

下列关系:

$$E - z_g i_1 = Z_{11} i_1 + Z_{12} i_2$$

$$-z_r i_2 = Z_{21} i_1 + Z_{22} i_2$$

由此得到电流与电压值为:



11-2.

圖 II-2

$$i_1 = E \frac{Z_{22} + z_r}{\Delta}; \quad V_1 = E \frac{z_{11}(Z_{22} + z_r) - Z_{12}Z_{21}}{\Delta}.$$

$$i_2 = -E \frac{Z_{21}}{\Delta}; \quad V_2 = E \frac{Z_{21}z_r}{\Delta}.$$

式中 $\Delta = (Z_{11} + z_g)(Z_{22} + z_r) - Z_{12}Z_{21}$.

阻抗

从輸入端向內看的阻抗为 $z_1 = \frac{V_1}{i_1}$, 即:

$$z_1 = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22} + z_r}$$

从輸出端向內看的阻抗 z_2 可假設將發生器接至輸出端而得到, 其形式为脚註 1 与 2 的对換,

$$z_2 = Z_{22} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11} + z_g}.$$

假象阻抗 Z_1 及 Z_2 起了很重要的作用, Z_1 及 Z_2 的定义是这样的: 如果以 Z_2 代替 z_r , 即可認為 $z_1 = Z_1$, 同样, 如果 $z_g = Z_1$, 則得到 $z_2 = Z_2$, 即:

$$Z_1 = Z_{11} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{22} + Z_2},$$

及

$$Z_2 = Z_{22} - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11} + Z_1}.$$

由此得 Z_1 及 Z_2 的值

$$Z_1 = Z_{11} \sqrt{1 - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11}Z_{22}}},$$

$$Z_2 = Z_{22} \sqrt{1 - \frac{Z_{12}Z_{21}}{Z_{11}Z_{22}}}$$

电流放大

我們先应用 $\varepsilon_i = -\frac{i_2}{i_1} = \frac{Z_{21}}{Z_{22} + z_r}$; 当其各项均为实数时, ε_i

当 $z_r = 0$ 时达最大值, $\alpha = \frac{Z_{21}}{Z_{22}}$ 称为电流增益。

电压放大

电压放大的定义为:

$$\varepsilon_v = \frac{V_2}{V_1} = \frac{Z_{21}z_r}{Z_{11}(Z_{22} + z_r) - Z_{12}Z_{21}},$$

一般說来, 当 $z_r = \infty$ 时, ε_v 达最大值, $\beta = \frac{Z_{21}}{Z_{11}}$ 称为电压增益。

功率放大

功率放大的定义可以用好几个方法来说明; 这里我們只考虑内部阻抗及外部阻抗等效于純电阻时的复合增益:

$$G_c = \frac{\frac{V_2 i_2}{E^2}}{4r_g} = \frac{4r_g r_r R_{21}^2}{\Delta^2}$$

这个复合增益是从放大器输出的功率与發生器可能給出的最大功率之比, 它在 $r_g = Z_1$ 及 $r_r = Z_2$ 时达最佳值, 即:

$$G_m = \frac{R_{21}^2}{R_{11}R_{22} \left[1 + \sqrt{1 - \frac{R_{12}R_{21}}{R_{11}R_{22}}} \right]^2}$$

实用的公式及参数

在計算中, 阻抗矩陣的各项是成組应用的, 所以最好給它一个特殊的符号。根据所遇到問題的类型, 可以选择四个参数的組或者另一种为了(定义)晶体管的組(阻抗矩陣, 导納矩陣, 鏈矩陣, H 矩陣)。在本文中以后將应用下列定义参数, 这种参数在使用中証明是适用的;

$$\left. \begin{matrix} Z_{11} \\ Z_{22} \end{matrix} \right\} \text{阻抗项}$$

$$\alpha = \frac{Z_{21}}{Z_{22}} \text{电流增益}(C/C)$$

$$\tau = 1 - \frac{Z_{12}}{Z_{11}} \alpha \left\} \text{这一项给出了线路本身反作用的概念}$$

$$\left[\beta = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} \text{电压增益}(C/O) (\text{附属项}) \right]$$

因此在前节中所得出的公式变成:

$$z_1 = Z_{11} \frac{\tau + \frac{z_r}{Z_{22}}}{1 + \frac{z_r}{Z_{22}}} \quad z_2 = Z_{22} \frac{\tau + \frac{z_g}{Z_{11}}}{1 + \frac{z_g}{Z_{11}}}$$

$$Z_1 = Z_{11} \sqrt{\tau} \quad Z_2 = Z_{22} \sqrt{\tau}$$

$$g_i = \frac{\alpha}{1 + \frac{z_r}{Z_{22}}} \quad g_v = \frac{\beta}{1 + \tau \frac{Z_{22}}{z_r}}$$

$$G_c = \frac{4 \frac{r_g}{R_{11}} \frac{r_r}{R_{22}} \alpha \beta}{\left[\frac{r_g}{R_{11}} + \frac{r_r}{R_{22}} + \frac{r_g r_r}{R_{11} R_{22}} + \tau \right]^2} \quad G_m = \frac{\alpha \beta}{[1 + \sqrt{\tau}]^2}$$

III. 应用于低頻的結型晶体管

III-1 結構—物理現象

結型晶体管(圖 III-1)在同一个晶体中有二个結合处, 因为晶体是被一層薄的称为基極的区域分割开来的。晶体的一端区域中富

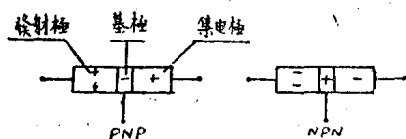


圖 III-1 結型晶体管圖

有杂质，能发射許多电荷，如同电子管中的陰極一样，另一端区域能集合上述端区域所发射出来的电子，并担负着板極的任务；这些区域

都相应地称为发射極及集電極。从发射極出来的电荷要通过基極才能达到集電極，基極这个中間区域起控制電極的作用；它相当于栅。由此可见晶体管有兩種可能型式：NPN型及PNP型。晶体管的特点可以根据它們的制造方式来区别，在研究这些問題(这些問題將在Ⅱ-3节談到)。以前先来看一下晶体管的一般特性。

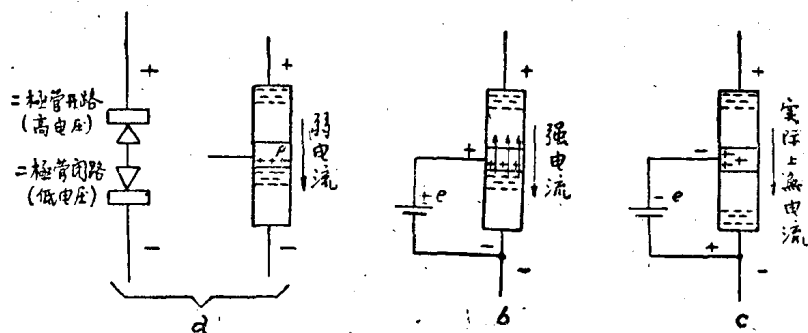


圖 III-2 NPN 結型晶体管的工作原理

假定一个NPN型晶体管接到两个电源，如圖 III-2 所示。加在发射極与集電極之間的电动势將发射極的許多电子，穿过基極帶至集電極。發生影响的电流方向閉塞了由集電極作用構成的二極管，并过渡到发射極接合的直接方向中。

当基極綫路开路时(圖 a)，降压实际上产生在集電極結；在发射極結兩端电位差很小，只讓很弱的电子流流向基極。这些电子穿过基極繼續到达集電極。

如果改变发射極結兩端电位差 e ，則通过这个結的电流也随之变化。更准确地說，当加于基極与发射極之間的电压为正时(圖 b)，对发射極結的电子通过有利；后者被集電極結的强大电

位差所吸引。电流随着 e 增加。反之，当电压 e 为负时（圖 c ），發射極結的电流会减低，以致切断，也就是說总的电流会减低，以致切断。

發射極——集電極綫路所吸取的功率变化可能比加于基極与發射極之間的功率大 1000 至 10000 倍。

正如真空管的情况，加于輸入端的一个正电压將使进入輸出電極的电流增加（NPN型），或者必然使負載阻抗兩端的电压减低（圖 III-3）。晶体管將訊号相移 π 度。

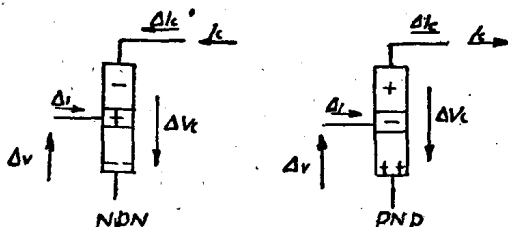


圖 III-3 結型晶体管將訊号移相 π 度

电压 e 在控制集電極电流 I 时耗去一个很弱的电流 i 。如果穿过發射極結的电子全部到达集電極而不互相复合，并且对于电流沒有任何漏洞則这个电流等于零。对于制作优良的晶体管，發射極电流与集電極电流之間的差別是很小的，因此比例 $\frac{\Delta I_c}{\Delta i}$ 甚大，当集電極短路时，这个比例为最大，可認為

$$b = \left(\frac{\Delta I_c}{\Delta i} \right) V_c \quad \text{为常数}$$

b 的值在 10 至 150 的範圍內。

III-2 特性曲綫族

与真空管的情况相同，可以建立一个極化直流电压与电流之間的近似綫性关系；在發射極接地綫路中，此关系式为：

$$I = I_0 + bi + \frac{V}{\rho_c}$$

圖 III-4 是一个 PNP 晶体管的电流与电压关系；如所周知，参数 I_0 , b 及 ρ_c 不是完全与 V 及 I 無关的，但是上面的关系有很大用处，尤其对于确定極化时用处更大。应用这个关系可以在 $V-I$ 圖

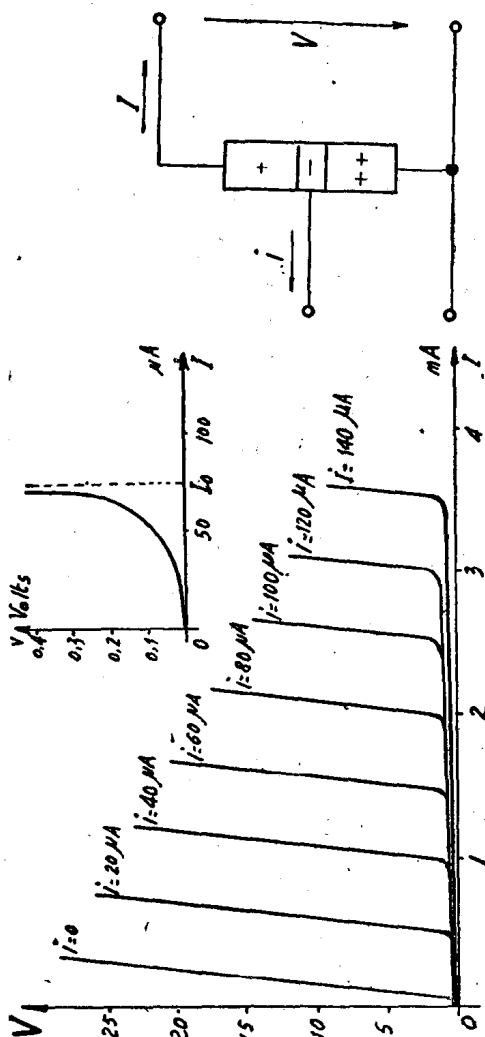


圖 III-4 PNP 晶体管的电流与电压的关系曲线

上画出 i_b 等于常数的特性曲线族。这种特性曲线族的理想情况如图 III-4 所示；在输入阻抗与 ρ_c 比较很小，可忽略不计时，这种特性曲线族可以解决许多问题。

ρ_c 为特性曲线的斜率。

b 为电流增益（短路时），以特性曲线之间的间隔表示。

I_0 为 $i=0$ 的一条特性曲线的原点处的电流。

还有 i 为负值的特性曲线，这将在第 III-7 节讨论。

电极的功用是可以变化的，如发射极可看作输入极，正如激励可加到真空管的阴极一样；基极接地线路所得出的特性曲线往往有

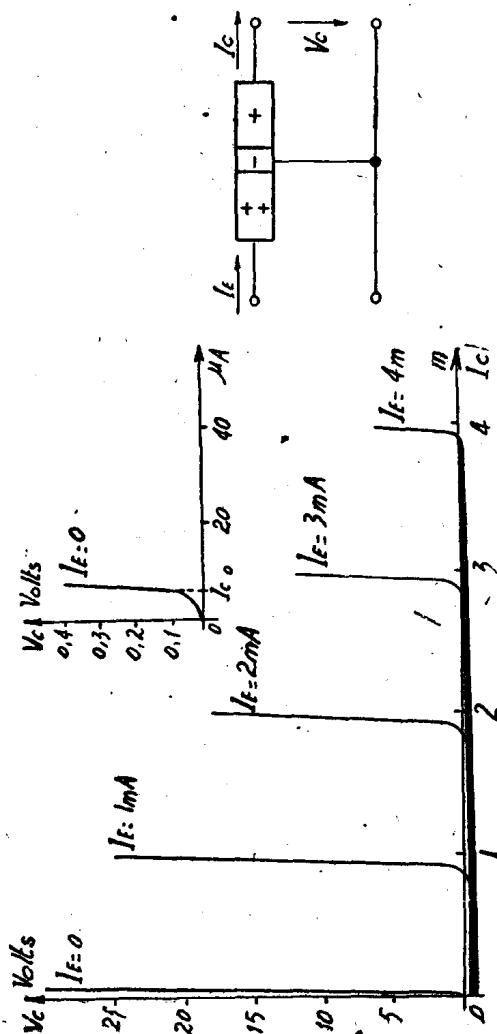


圖 III-5 基極接地线路的特性曲线

某些优点，其形状如图 III-5 所示。从一种线路的曲线族变换成另一线路的曲线族是很容易的，只要假定输入电压可忽略不计，且电压 V 及 V_C 是相当接近的，就可得到下列对应关系：

$$V \approx V_C$$

$$i = I_E - I_C$$

$$I = I_C$$

对于发射极接地的线路，就变为下列关系：

$$I_C = \frac{I_0}{b+1} + \frac{b}{b+1} I_E + \frac{V}{(b+1)\rho_C}$$

可以认为特性曲线 $I_E = 0$ 是单独考虑的集电极二极管的特性曲线，因此有下列关系：

$$\frac{I_0}{b+1} = I_{C0} \text{ 集电极的饱和电流。}$$

$(b+1)\rho_C = r_C$ 集电极的反电阻。

另一方面，基极接地线路的电流增益 $\frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$ 等于：

$$a = \frac{b}{b+1}$$

此增益略小于 1，所以可把它当作 1，因为从发射极出来的电荷均为集电极所吸收。

因此基极接地线路的特性关系必然可写成：

$$I_C = I_{C0} + a I_E + \frac{V}{r_C}$$

此外，下面关系仍然成立：

$$I_0 = (b+1)I_{C0} (I_0 \text{ 远大于 } I_{C0})$$

$$\rho_C = \frac{r_C}{b+1} (\rho_C \text{ 远小于 } r_C)$$

$$a = \frac{b}{b+1} (a \text{ 甚近似于 1, 但小于 1})$$

图 III-6 的照片是中央通信研究所制造的晶体管特性曲线描繪器(見 VII-1 节)；图中可看到一个基极接地的晶体管的特性曲线族。

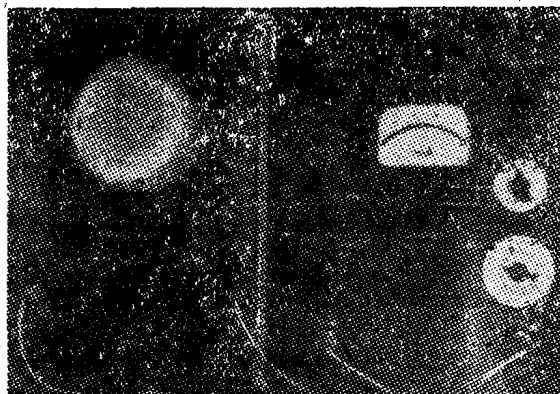


圖 Ⅲ-6. 中央通信研究所的特性曲綫描繪器

Ⅲ-3. 等效电路

我們可以假設几个包含电阻，电动势或电流注入器的網絡，在小訊号时，这些網絡具有与晶体管相类似的特性。对于这样的綫路可以建立一系列与晶体管有关的克希荷夫公式。所有这些綫路中都有下列同样的元件：

r_e (正向極化的發射極結的电阻。) 正向極化的發射極結的微分电阻。

r_c (反向極化的集電極結的电阻。) 反向極化的集電極結的微分电阻。

r_b 晶体管的基極欧姆电阻。

b 电流增益。

与物理現象最相符的并且在实际中非常有用的等效电路要算圖Ⅲ-7的那种。在那里电阻 r_b 及 r_c 不变，但發射極电阻 r_e 乘了 $(b+1)$ ，这是为了計入同时流过發射極結的輸入电流及輸出电流所起的負回授效应。最后，所謂放大現象是由發射極与集電極之間的电流 $\mathcal{I} = -b\mathcal{I}_e$ 的注入器所表示。

輸入电阻 $r_e(b+1)$ 及 r_b 的数量級一般为数个欧姆，而电阻 r_c 往往超过一兆欧姆。

这样一个三端网络的阻抗矩阵的表示式为：

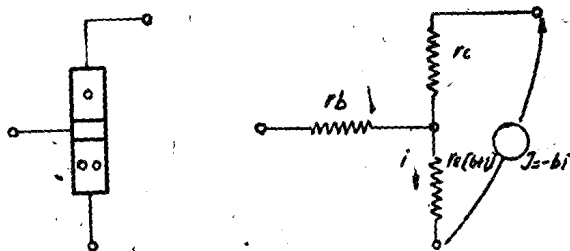


圖 Ⅲ-7 一个結型晶体管在低頻时的等效电路（对物理現象而言）

$$\begin{vmatrix} r_e + r_b & r_e \\ r_e + \beta r_c & r_e + r_c \end{vmatrix} \quad \left[\rho_c = \frac{r_c}{\beta + 1} \right]$$

根据这个矩陣的形狀可引伸出另一个等效电路，此等效电路在低頻时頗有意义，見圖Ⅲ-8。

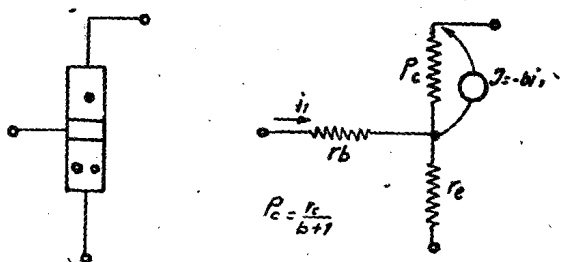


圖 Ⅲ-8 一个低頻結型晶体管的另一种有趣的等效电路

圖Ⅲ-7及圖Ⅲ-8中的等效电路的三端网络对于激励任何一个电极的情况都是有效的，但对發射極接地的情况尤为实用；在基極接地綫路的情况中常乐于用輸入电流即發射極电流的参数来表示放大量；因此可得到圖Ⅲ-9的等效电路，此电路的阻抗矩陣为：

$$\begin{vmatrix} r_e + r_b & r_b \\ r_b + \alpha r_c & r_b + r_c \end{vmatrix}$$