

高等学校試用教科書



工业电子学

GONGYE DIANZIXUE

下 册

(修訂本)

华中工学院、西安交通大学等校編
沈尙賢主編

人民教育出版社

高等学校試用教科书



工 业 电 子 学

GONGYE DIANZIXUE

下 册

(修訂本)

华中工学院、西安交通大学等校編

人 民 教 育 出 版 社

本书分为上、下册。上册包括緒論和第一至第三章，下册包括第四至第八章和附录。

书中着重阐述工业电子学的基本理論，把元件(电子管、离子管和半导体器件)、电路(整流器、放大器、振荡器等)和应用(各种电子设备及装置等)联系在一起討論。具体内容除緒論外，包括不控整流器、可控整流器和逆换流器、电子管放大器、晶体管放大器、正弦波振荡器、調制器和解調器、脉冲电路、电子仪器等八章，并有附录。

本书可作高等工业学校电机制造类、动力类电力方面各专业“工业电子学”課程的試用教科书，也可供其他专业师生和从事工业电子学的工作人員参考。

本书原稿主要取自华中工学院和西安交通大学的讲义。初版經清华大学童詩白、南京工学院李士雄、华中工学院康华光、哈尔滨工业大学李青山、上海交通大学沈杏苓、西安交通大学沈尙賢、蔣大宗、蔡元龙、唐立森等集体选編，并分工作部分改写而成。此次修訂再版时，先由沈尙賢、童詩白、李士雄、吳存亚、湯之璋、康华光、蔣大宗、蔡元龙等共同討論修訂方案，然后按上、下册分別由华中工学院和西安交通大学的有关教师进行具体修改，最后由沈尙賢負責定稿。

工业电子学

下 册

(修訂本)

华中工学院、西安交通大学等校編

沈尙賢主編

北京市书刊出版业营业許可証出字第2号

人民教育出版社出版(北京景山东街)

人 民 教 育 印 刷 厂 印 装

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 經 售

统一书号K15010·1038 开本 850×1168 $1/32$ 印张 10 $3/16$ 插页 3

字数 312,000 印数 42,001—52,000 定价(7) ¥1.30

1961年8月第1版 1962年10月第2版 1963年5月北京第5次印刷

下册目录

第四章 晶体管放大器(选编者: 蔡元龙、叶德璇 修订者: 蔡元龙)	421
4.0 概述	421
4.1 晶体三极管的工作原理和特性曲线	422
4.1.1 工作原理	422
4.1.2 晶体三极管的静态特性曲线	428
4.2 晶体三极管的参数、等效电路和放大器的基本组态	435
4.2.1 晶体管的T形等效电路及其微变参数	435
4.2.2 晶体管参数受工作条件的影响	438
4.2.3 晶体管放大器的基本组态	441
4.2.4 晶体管的 h 参数及等效电路	446
4.3 晶体管放大器的直流偏置电路	449
4.3.1 用固定偏流来建立工作点	450
4.3.2 带电压负反馈的偏流稳定电路	451
4.3.3 带电流负反馈的偏流稳定电路	453
4.4 阻容耦合放大器	455
4.5 低频功率放大器	459
4.5.1 功率晶体管的特点	459
4.5.2 单管甲类功率放大级	460
4.5.3 推挽式功率放大器	463
4.6 直流放大器	464
4.6.1 温度补偿电路	465
4.6.2 并联平衡电路	467
复习思考题	467
习 题	467
参考书目	471
第五章 正弦波振荡器(选编者: 沈尚贤 修订者: 沈尚贤)	472
5.0 概述	472
5.1 电子管振荡器	473
5.2 LC振荡器	476
5.2.1 基本原理	476
5.2.2 LC调谐放大器	478

5.2.3 LC 振荡器	482
5.2.4 影响振荡频率的因素	485
5.2.5 振荡幅度	486
5.2.6 振荡的建立	488
5.3 LC 振荡器的实际电路	489
5.3.1 自给栅偏压	489
5.3.2 阳极电路的供电方法	490
5.3.3 其他基本电路	493
5.4 振荡器举例	496
5.4.1 感应加热用高频振荡器	496
5.4.2 仿苏МРМДР-54型电子温度调节器中的振荡器	499
5.5 RC 振荡器原理	501
5.5.1 文氏电桥式振荡器	501
5.6 RC 振荡器举例	508
5.6.1 音频信号发生器	508
5.6.2 超声波清洗机中的电振荡发生器	510
复习思考题	513
习 题	514
参考书目	515
第六章 调制器和解调器(选编者: 蒋大宗 修订者: 蒋大宗)	516
6.0 概述	516
6.1 一般信号的调制和解调	518
6.1.0 调制的基本概念	518
6.1.1 调幅原理	519
6.1.2 产生调幅信号的电路	521
6.1.3 调幅信号的解调(检波器)	523
6.1.4 差拍和变频原理	525
6.1.5 超外差式接收机	528
6.1.6 变频和调相原理	528
6.1.7 调频波的产生方法	530
6.1.8 调频波的解调器(鉴频器)	532
6.1.9 调频法的工业应用举例	535
6.2 工业信号的调制和解调	537
6.2.0 工业控制中常用的调制系统	537
6.2.1 直流信号对交流载波的调幅	540
6.2.2 直流信号对交流载波的调相	544
6.2.3 直流信号的解调·相敏整流器	545

6.2.4 简单的相敏放大—整流器	549
6.2.5 差动相敏放大电路	555
6.2.6 交流输出的相敏放大器	559
6.2.7 调制原理在工业中应用举例	561
复习思考题和习题	563
参考书目	565

第七章 脉冲电路(选编者:童诗白、李青山 修订者:沈尚贤、蔡元龙)

7.0 概述	567
7.1 矩形脉冲的频谱	569
7.2 脉冲信号加于线性电路时的输出波形	572
7.3 阻容耦合放大器的暂态特性	577
7.4 箝位电路	586
7.5 限幅电路	588
7.6 多谐振荡器	595
7.6.1 多谐振荡器的振荡频率和振幅	597
7.6.2 具有正栅偏压的多谐振荡器	601
7.6.3 多谐振荡器的同步	603
7.6.4 多谐振荡器的应用	605
7.6.5 多谐振荡器计算举例	605
7.7 触发电路	607
7.7.1 单稳态触发电路	608
7.7.2 双稳态触发电路	609
7.7.3 阴极耦合式触发电路	610
7.7.4 触发信号的引入	611
7.7.5 触发电路计算举例	614
7.7.6 触发电路的应用	619
7.8 阻塞振荡器	622
7.9 锯齿波发生器	626
7.10 开关电路	636
7.11 晶体管脉冲电路	639
7.11.1 面结式晶体管工作在开关状态的特点	639
7.11.2 双稳态触发电路	642
7.12 脉冲调制	645
复习思考题	648
习 题	648

参考书目	650
第八章 电子仪器(选编者:李士雄;修订者:蒋大宗。)	662
8.1 直流电子稳压器	652
8.1.0 概述	652
8.1.1 辉光管稳压器	653
8.1.2 并联式电子稳压器	656
8.1.3 串联式电子稳压器	659
8.1.4 带有放大器的补偿式电子稳压器	660
8.1.5 电子稳压器的实用电路及使用时应注意事项	666
8.2 电子管电压表	670
8.2.0 概述	670
8.2.1 直流电子管电压表	671
8.2.2 直流微电流表	675
8.2.3 交流电子管电压表	676
8.2.4 工业产品电子管电压表举例	681
8.3 电子射线示波器	684
8.3.1 电子射线示波管的结构及工作原理	685
8.3.2 电子示波器的组成	688
8.3.3 示波器的同步	693
8.3.4 实用示波器举例	694
8.3.5 使用示波器应注意事项	697
8.3.6 脉冲示波器	698
8.4 电子继电器	701
8.4.1 交流时间继电器	702
8.4.2 光电继电器	703
复习思考题	704
参考书目	706
附录(选编者:沈尚贤、唐立森 修订者:秦祖蔭)	707
附录1 关于电流和电压符号的一些规定	707
附录2 关于电流和电压的方向及其正负值的一些规定	711
附录3 本书中常用的代用符号表	714
附录4 我国和苏联的电子管、离子管、半导体管的型号命名法	719
附录5 电子设备中常用电阻和电容的规格	723
附录6 放大倍数和分贝的关系	729
附录7 放大器的安装和调整	732
附录8 常用电子管、离子管和半导体管参数表	737

第四章 晶体管放大器

4.0 概 述

近年来,晶体管愈来愈广泛地被应用在各种不同的技术领域中。晶体管具有一系列独特的和有价值的特性。从1948年制成第一个晶体三极管放大器到现在虽只有十多年,但它发展迅速,在这一方面已形成了一门晶体管电子学。因此讨论了电子管放大器以后,有必要对晶体管放大器进行研究。

我们从前面一章的讨论中可以知道,在电子设备中使用电子管并非总能满意地解决现代技术发展所提出的一切问题,而晶体管却有許多在本質上胜过电子管的优点。首先应当提到的是它不需要灯絲,正常工作时所需的电源电压較低,因而使得供电功率减小。晶体管的尺寸也远小于电子管,如果与超小型的无綫电元件結合使用,就可大大降低设备的重量和减小设备的体积,解决设备小型化的问题。

由鍍或硅晶体制成的晶体管本身是不需要真空和玻璃壳的制品,因而管子的强度大大提高;又因电极沒有机械支架,这就具有較强的抗击性和抗振性。

晶体管的寿命很长,使它用在计算机方面更有可能,因为在计算机中,管子用得很多,可靠性的问题具有原則性的意义。

由于晶体管具有以上特性,它不仅可以代替电子管应用于一般电子设备中,而且在許多情况下,可以有效地解决一系列用其他电子器件所不能解决的问题,例如由于它的輕小坚固和耗电少,因而应用于宇宙飞船內的自动化系統和遙控、遙測设备中,更显示出它的无可比拟的优越性。

但是,晶体管电子学是一门正在迅速发展新兴科学,在晶体管的生产和运用方面还存在不少的缺点。与电子管相比,它的参数在很大程度上决定于温度和工作状态,以及管与管间的参数差异很大,噪声电平较高,工作频率范围较狭,输出功率较小。所以在许多场合晶体管也不可能完全代替电子管。但是半导体技术发展历史很短,有一些缺点将在发展过程中逐渐得到改善,尤其是许多新型半导体器件的研究成功,使它在电子技术中获得日益广泛的应用。

我国自解放以来,在党和政府的英明正确的领导下,无线电制造技术有了飞跃的发展,现在已能生产 II-6 型锗三极管等,并应用于无线电设备中。1958 年全国大跃进以来,研究制造出了功率大而且运用频率高的晶体三极放大管。现在我国不仅在晶体管的制造上,而且在晶体管电子学的理论上也解决了一系列的重大问题。可以深信,在党的总路线的光辉照耀下,我国半导体科学事业必将更为迅速地向前发展。

本章主要讨论面结型晶体管的基本工作原理和特性、参量、以及晶体管低频放大器的工作原理和简要计算方法。

4.1 晶体三极管的工作原理和特性曲线

晶体管的类型很多,它们在工作原理、结构工艺和用途上有很大的不同,本节仅讨论工业中应用得最多的面结型晶体三极管。

4.1.1 工作原理

晶体三极管的结构就是在同一块单晶体上形成 $p-n-p$ 或 $n-p-n$ 的三层,组成了二个非常靠近的 $p-n$ 结,各层接上引出线作为三个电极。图 4.1.1 所示的 $p-n-p$ 型晶体管,通常用 n 型锗作基极,在它的左侧及右侧以铟原子扩散到锗中形成 p 型锗,一边作为发射极,另一边作为集电极。同样,也可得到 $n-p-n$ 型的晶体三极管。因两者并没有质的区别,

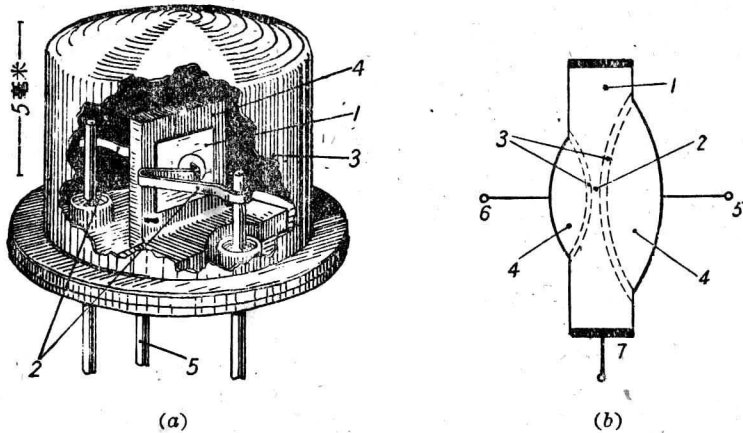


图 4.1.1 面结式晶体三极管的结构:

(a) 某种类型的面结式晶体三极管的构造:

1—锲片; 2—发射极和集电极的引出线; 3—密封的金属外壳; 4—金属的晶体座; 5—基极引出线(与外壳相接)。

(b) $p-n-p$ 型面结式晶体三极管的结构原理:

1— n 型锲; 2— n 型层; 3— p 型层; 4—钢; 5—集电极; 6—发射极; 7—基极。

这里只讨论用得更普遍的 $p-n-p$ 型三极管。

晶体管作放大器工作时, 必须在发射极和基极间(称发射结)接入顺向电压 E_e , 在集电极和基极间(称集电结)接入逆向电压 E_c (图 4.1.2, a)。

从 $p-n$ 结的理论可知, 集电结在较高的逆向电压作用下, 提高了势垒, 阻止了多数载流子造成的扩散电流, 只通过少数载流子造成的漂移电流(图 4.1.2, b), 形成数值很小的反向电流 I_s , 它的大小与 E_c 无关, 类似于饱和。但发射结情况就大为不同, 当它加上较小的顺向电压 E_e , 就通过多数载流子造成的扩散电流, 即包括从基极到发射极的电子流 I_n 和从发射极到基极的空穴流 I_p 。图 4.1.2, a 中实心点代表电子, 空心点代表空穴, 其所属的箭头表示它们的实际运动方向; 因两者所带电荷的正负相反, 移动方向亦相反, 所以对外面电路中的电流来说它们彼

此是相加的。 I_p 和 I_e 的大小,与晶体管的 p 型与 n 型半导体中的载流子浓度有关。如基极晶体掺杂程度远低于发射极晶体,则发射极上多数载流子浓度 p 远大于基极上的多数载流子浓度 n ,可以看成流经发射结的电流主要是空穴流 I_p 。换句话说,发射结在 E_e 作用下,使发射极的多数载流子(空穴)注入基极。

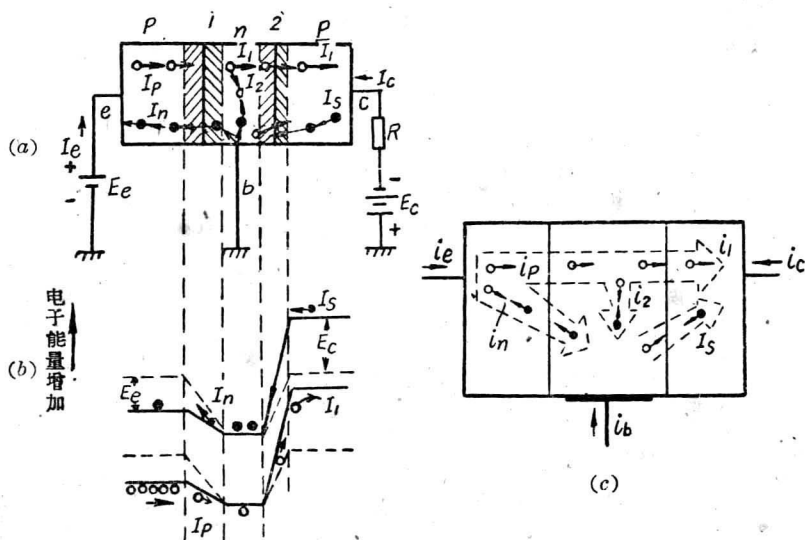


图 4.1.2 $p-n-p$ 型三极管的工作原理:

(a) 电路图: 1—发射结; 2—集电结; ○—空穴; ●—电子; e—发射极; b—基极, c—集电极。(b) 能带图; (c) 载流子的运动分析图。

空穴由发射极(p 区)进入基极(n 区)后,像基极中的少数载流子一样,从浓度高的区域(即接近发射结边界)向低浓度区(即接近集电结边界)扩散,并且就在集电结边界上受高的势垒作用,流向集电极。因为基极厚度很薄(约几十微米),注入基极的空穴在扩散运动中复合掉的很少,绝大多数都能到达集电极。这时,集电极电流则不单只有很小的反向饱和电流 I_s ,还有空穴注入基极形成的较大的集电极电流分量 I_i ,它的大小只比发射极电流略小一些。

• 晶体管起放大作用,是在发射极外电路上再加一信号源,在集电极外电路上加一高阻值的负载电阻。因发射结的低阻性能,使发射极回路有很低的输入电阻,較低的信号电压就能造成較大的发射极电流变化,功率消耗也較小。集电结有高阻性能,负载电阻如远大于输入电阻,而集电极的电流变化又非常接近发射极电流变化,自然有較大的电压及功率輸出。所以放大作用可以看成是负载电阻由 E_c (能源)經集电结高阻供电,而发射极注入的载流子改变集电结阻挡层的电位(相应于电阻的改变),造成輸出的改变。所以晶体三极管英文称为“transistor”,它是“transfer resistor”二字組成,有轉移电阻的意思。

从上述可見,晶体三极管要有放大作用,必須:

(1) 外加直流电压的极性使发射结在順向导电状态,即是低阻;使集电结是逆向导电状态,即是高阻。

(2) 輸出的负载电阻应接在集电结迴路上,数值要足够大。

(3) 輸入信号源应能供給足够大的电流,才使发射极能向基极注入足够多的载流子。

为了进一步討論晶体管三个电极上的电流 i_e 、 i_b 和 i_c 的相互联系,可用图 4.1.2, c 所示的晶体管内部电流的分配来表示,即

$$i_e = i_p + i_n = i_1' + i_2 + i_n, \quad (4.1.1)$$

$$-i_c = i_1 + I_s, \quad (4.1.2)$$

$$-i_b = i_e + i_c = i_2 + i_n - I_s. \quad (4.1.3)$$

从上列三式可知, i_e 是正值,它由順向电流組成。 i_c 和 i_b 是負的,表示它們的真正方向与規定方向相反^①。 i_c 在数值上非常接近 i_e , 所以 i_b 只有很小的数值。

当发射极迴路中加入电势变量时(相当于信号),造成发射极电流增量 Δi_e , 它相应地造成 Δi_p 、 Δi_1 和 Δi_c 的变化。因为 i_c 占 i_1 的絕大部

① 关于本书中規定的电流和电压的正方向,參閱附录 2, 希讀者加以注意。

分, i_1 又占 i_p 的绝大部分, 这说明了由输入电流 i_e 的变化所造成的输出电流 i_c 的变化几乎与输入电流 i_e 的变化相等。

在保持集电极电压 u_c 不变时(即指集电极电压的交变分量被短路), Δi_e 与由它造成的 Δi_c 的比值, 称为共基极(即发射极输入时)的短路电流放大系数 α , 即

$$\alpha = \left. \frac{-\Delta i_c}{\Delta i_e} \right|_{u_c = \text{常数}} \quad (4.1.4)$$

式中负号表示图 4.1.2, c 上给定的 i_c 方向与实际电流方向相反, 有一负号才使 α 为一正值。实际上 u_c 变化对 α 数值影响不大, 习惯上就称为共基极的电流放大系数。

α 是晶体管的重要参数, 从上述分析可知 α 值总是小于 1, 一般在 0.9 到 0.99 之间。减小注入的载流子在基极中的复合(例如减小基极的厚度), 可提高 α 值。

晶体管放大器以发射极作为输入(即共基极接法)并不能获得最大的功率放大, 因为 $\Delta i_c = (0.9 \sim 0.99)\Delta i_e$ 。但 $\Delta i_b = (0.1 \sim 0.01)i_e$; 如果以基极作为信号输入端, 集电极作为输出端(即共发射极接法), 信号源只需供给小得多的电流就可得到同样的 Δi_c 输出, 这电路如图 4.1.3, a 所示。

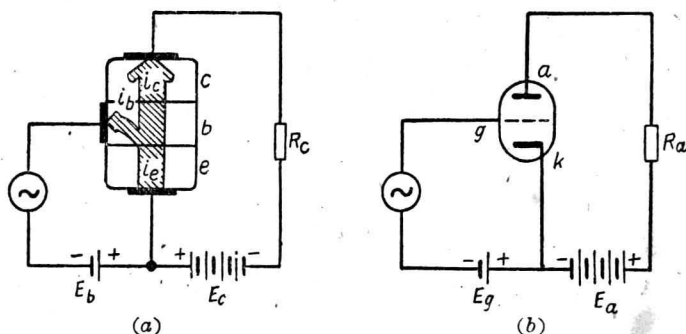


图 4.1.3 $p-n-p$ 型晶体管的共发射极放大电路和相应的电子管电路:
(a) 晶体管电路; (b) 电子管电路。

同样, 共发射极的短路电流放大系数 β 为:

$$\beta = \frac{-\Delta i_c}{-\Delta i_b} \Big|_{u_c = \text{常数}} \quad (4.1.5)$$

代入式(4.1.3)和式(4.1.4), 得 β 与 α 的关系为:

$$\beta = \frac{-\Delta i_c}{-\Delta i_b} = \frac{-\Delta i_c}{\Delta i_e + \Delta i_c} = \frac{\frac{-\Delta i_c}{\Delta i_e}}{1 - \frac{-\Delta i_c}{\Delta i_e}} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

即 $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ 或 $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$ (4.1.6)

当 $\alpha = 0.9$ 到 0.99 时, β 值约为 10 到 100 , 远大于 1 。所以晶体管电路中 共发射极接法 易获得更大的功率放大, 因而应用也最多。

为了易于掌握晶体管放大器, 把它工作的物理过程与电子三极管加以比拟, 对了解它们之间的相似性和特殊性是有好处的 (图 4.1.3)。在晶体管中, 发射极是用来产生载流子 ($p-n-p$ 型中这是空穴) 的, 因此它和电子管的阴极相对应。集电极是用来收集载流子的, 因此和电子管的阳极对应。基极是载流子通过的必经之路, 基极电流的大小反映了载流子通过的数量, 好像对它们流过的数量可以起控制作用, 所以和电子管的栅极相对应。

值得指出的是它们之间有许多不同: 一是直流电源极性不完全相同, 尤其是 集电结必须在反向电压下工作, 如果变成正向电压, 将导致大量电流把结熔化毁坏, 而在电子管中则不会有这现象。二是电子管一般是工作在负栅压下, 因此没有栅流, 信号源只需有足够电压即可, 而不消耗功率; 但晶体管即使采用共发射极接法, 仍需较显著的电流, 因此 输入端是低阻性能, 信号源必需能供给足够的电流及功率。二者间还有一些其他差别, 以后再逐步深入讨论。

$n-p-n$ 型晶体管的工作原理与上述情况相同, 只是注入基极的

流子不再是空穴而是电子。按外加直流电压的方向仍要保証发射結是低阻式集电結是高阻的要求，电源极性要反接过来。其他情况这里不再討論。

4.1.2 晶体三极管的静态特性曲线

晶体管同样可用特性曲线反映输出电压和电流与输入电压和电流之间的关系，只是它要反映四个量间的关系，因此至少要有二组特性曲线。这正像正栅压时的真空三极管，它也需要二组特性曲线，即阳极特性和栅极特性。

1. 共基极的特性曲线

通常用得最多的特性是：下列二组，即

$$\left. \begin{array}{l} \text{輸出特性曲线族 } i_c = f(u_{cb}) | i_e = \text{常数}; \\ \text{輸入特性曲线族 } u_{eb} = f(i_e) | u_{cb} = \text{常数}. \end{array} \right\} \quad (4.1.7)$$

它们的典型形状如图 4.1.4 所示。

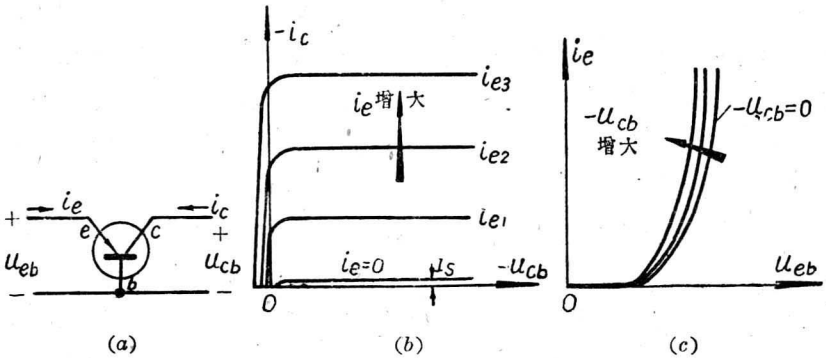


图 4.1.4 晶体管典型的共基极静态特性曲线：

(a) 电路图；(b) 输出特性；(c) 输入特性。

共基极的输出特性在 u_{cb} (简称为 u_c) 为负的区域近似为水平线。当 $i_e = 0$ 时，集电极只流过集电结的反向饱和电流 I_s (或称空载不可控电流)，是一条非常接近横轴的水平线。当 i_e 由零逐渐增大时，即使 u_c

的绝对值较低(甚至是零),由于集电结势垒的反向电场作用,使发射极注入基极的空穴除少量是在基极中复合外,全部都向集电结扩散, i_c 的增量等于 $\alpha \Delta i_e$, 已接近 i_e 的增量。故当 $-u_c$ 增大时, i_c 仍呈饱和状态。所以 i_c 与 i_e 的关系可近似写成:

$$-i_c = I_s + \alpha i_e. \quad (4.1.8)$$

如考虑到集电结的漏电阻和 u_c 变化时影响 α 而使 i_c 变动的等效电阻(如 i_e 不变 u_c 改变时,集电结增厚,使基极变薄,所以 α 增大一些),即相当于集电结有一反向电阻 r_c , 则

$$-i_c = I_s + \alpha i_e + \frac{(-u_c)}{r_c}. \quad (4.1.9)$$

因 r_c 很大,输出特性仍像水平线。

在 u_c 为正时,集电结处于顺向导电情况,电流迅速增加,它抵消了集电结上的扩散电流,使 $-i_c$ 迅速下降到零,这从图 4.1.4, b 的 $+u_c$ 曲线部分可明显看出。

共基极的输入特性,在 $u_{cb} = 0$ 时,即是发射结的顺向伏安特性。当 $u_{cb} < 0$ 时,在相等的 u_{cb} 下有较大的 i_c , 这是因为集电结上负电场的存在影响发射结,使 i_e 增大一些,但这影响并不很大。所以图 4.1.4, c 所示是一组非常靠近的曲线族。

2. 共发射极的静态特性

共发射极的输出特性和输入特性如图 4.1.5 所示。理论上它可由共基极曲线族直接推导出来。

共发射极输出特性与共基极特性相比,有下列几个特点:

(1) 当 $i_b = 0$ 时, $i_c - u_c$ (因 $u_{ce} \approx u_{cb}$) 曲线不再等于 $p-n$ 结反向饱和电流 I_s , 而增大到 $I_s' = (1 + \beta)I_s$ 。当基极电流变化 Δi_b 时,集电极电流变化 $\beta \Delta i_b$ 。在图 4.1.5, b 曲线上 Δi_b 要比 Δi_c 小一个数量级。

这个关系可从式(4.1.8)和式(4.1.3)来求得,即

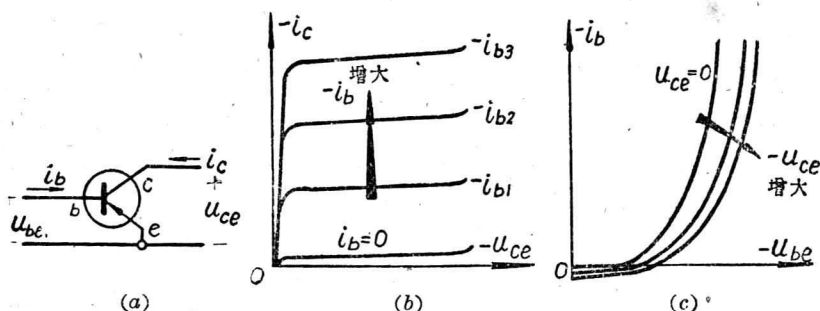


图 4.1.5 晶体管典型的共发射极静态特性曲线:

(a) 电路图; (b) 输出特性; (c) 输入特性。

$$-i_c = I_s + \alpha i_e = I_s + \alpha(-i_b - i_c).$$

解 $i_c - i_b$ 关系得

$$-i_c = \frac{I_s}{1-\alpha} + \frac{\alpha}{1-\alpha}(-i_b) = (1+\beta)I_s + \beta(-i_b). \quad (4.1.10)$$

第一项为共发射极时的不控电流, 因 β 值约为数十, 这项数值已相当可观了。第二项反映了共发射极的放大关系。

(2) 当 i_b 一定 (或 $i_b=0$) 而 $-u_c$ 增高时, $-i_c$ 有较显著的增大, 即特性曲线平坦部分有较明显的斜率 (共基极特性很像水平线)。这是因为电压 $-u_c$ 经过集电结电阻 r_c 加到发射结上, 使发射极电流增大一些, 从而使 $-i_c$ 有较显著的增大; 或者也可看成共发射极接法的集电结等效电阻比 r_c 要小一些。

这关系可从图 4.1.6 上明显地看出。图中把晶体管看成是理想的, I_s 和 r_c 看成是与集电结并联的电流源和电阻。当发射极开断 (图 a), 这相当于共基极接法而 $i_e=0$, 则 $-i_c = I_s + \frac{-u_{cb}}{r_c}$ 。当基极开断 (图 b), 这相当于共发射极接法而 $i_b=0$, 这时理想晶体管的基极流过的电流为 $(I_s + \frac{-u_{cb}}{r_c})$, 因此集电结电流