

高等学校教学用书

晶体管电路原理

JINGTIGUAN DIANLU YUANLI

錢其璈 何錫年 編

10.2

人民教育出版社

高等学校教学用书



晶体管电路原理

JINGTIGUAN DIANLU YUANLI

錢其璈 何錫年 編

人民教育出版社



晶体管电路原理

錢其璈 何錫年 編

北京市书刊出版业营业许可出字第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 K13010·1032 开本 850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张 7 $\frac{1}{2}$ 插页 1

字数 170,000 印数 10,001—16,000 定价 (6) 0.75

1961年9月第1版 1962年3月北京第3次印刷

前 言

晶体管电路近来在电子学线路中的应用中日益广泛起来，所以在高等学校的有关专业中大都开设这一门课程，本书就是为了教学上的需要编写出来的。

本书的内容大致为：第一部分是讲述晶体管的低频特性及在低频电路中的应用；第二部分是讨论晶体管的高频特性及在高频电路中的应用；第三部分是晶体管大信号性能分析及其在脉冲电路中的应用。为了使本书能够更适合于各方面的需要，所以还编入了部分其他章节如隧道二极管电路，晶体管与电子管的对偶性原理等。

从第一章到第十一章是由南开大学物理系钱其璈同志编写，其中第八章与第十一章基本采用了吉林大学物理系的有关部分讲义，编者仅作了些修改和整理工作；第十二章到第十四章以及附录，是由北京大学无线电电子学系何锡年同志编写的。

由于出版时间十分仓促，而且为编者水平所限，错误一定很多，希望读者们能多多提出意见。

在本书整理过程中，有关学校的同志都参加了不少工作，特此表示感谢。

本书取材除了部分是文献资料上的以外，大部参考下列各书：

1. 罗无念、成众志等著：“晶体管电子学”，人民邮电出版社。
2. R. F. 茜亚著：“半导体管电路原理”（中译本），上、下册，上海科学技术出版社。

3. R. F. Shea 等著：“Transistor Circuits Engineering”。

4. R. F. Riddle 等著：“Transistor Physics and Circuits”。

编者

1961年6月

目 录

前言	1
----	---

第一章 晶体管物理概念及其工作原理	1
-------------------	---

§ 1. 半导体的导电机构简介	1
§ 2. 面结合型晶体三极管	5

第二章 晶体管的低频特性	9
--------------	---

§ 1. 晶体管静态特性分析	9
§ 2. 用线性网络理论来分析晶体管	14
§ 3. 等效电路	18
§ 4. 低频 h 参数测量	22

第三章 直流偏置电路	25
------------	----

§ 1. 工作点的建立和稳定方法	25
§ 2. 工作点稳定性的讨论	33
§ 3. 串接放大器的稳定法	34

第四章 低频放大器	37
-----------	----

§ 1. 放大器的基本电路及其公式	37
§ 2. 关于功率增益的讨论	44
§ 3. 低频放大器的设计	46
§ 4. 放大器的控制	49
§ 5. 放大器的反馈	51

第五章 功率放大器	59
-----------	----

§ 1. 功率晶体管的特性	59
§ 2. 甲类功率放大器的设计	60
§ 3. 乙类功率放大器的设计	64
§ 4. 功率放大器畸变问题的讨论	67
§ 5. 辅助对称乙类放大器	71

第六章 高频放大器	75
-----------	----

§ 1. 晶体管的频率效应	75
§ 2. 晶体管的高频等效电路	77

§ 3. 共发射极等效电路	82
---------------	----

§ 4. 几种高频晶体管工作原理介绍	84
--------------------	----

§ 5. 调谐放大器	87
------------	----

§ 6. 自动增益控制问题	92
---------------	----

§ 7. 宽带放大器	94
------------	----

§ 8. 高频放大器的中和与单向化	97
-------------------	----

第七章 振荡器	99
---------	----

§ 1. 一般讨论	99
§ 2. 负阻振荡器	100
§ 3. 反馈振荡器	105
§ 4. 多谐振荡器	110

第八章 调制与解调	115
-----------	-----

§ 1. 导言	115
§ 2. 调幅放大器	116
§ 3. 调幅振荡器	122
§ 4. 晶体管调频电路	123
§ 5. 混频与变频	125
§ 6. 调幅检波	129
§ 7. 调频波的解调	132

第九章 脉冲电路	135
----------	-----

§ 1. 导言	135
§ 2. 面结合型晶体管的大信号等效电路	136
§ 3. 开关时间的讨论	140
§ 4. 闸门和逻辑电路	143
§ 5. 嵌位电路	146
§ 6. 双稳脉冲电路	148
§ 7. 双稳电路的高速运用	153
§ 8. 单稳触发电路	154
§ 9. 某些脉冲电路的介绍	161

第十章 晶体管在雪崩区域

的运用.....164

§ 1. 引言.....164

§ 2. 雪崩晶体管的基本性能及其测量.....165

§ 3. 电荷控制理论分析晶体管雪崩自振线路.....168

§ 4. 起振条件的推导.....171

§ 5. 自振周期和功率损耗的计算.....173

§ 6. 雪崩晶体管的触发线路.....174

§ 7. 电流脉冲形状的讨论.....175

§ 8. 雪崩晶体管的几个线路介绍.....179

第十一章 隧道二极管电路.....184

§ 1. 引言.....184

§ 2. 隧道二极管的特性.....185

§ 3. 基本放大电路.....188

§ 4. 大讯号运用.....193

§ 5. 隧道二极管参数的测定.....197

第十二章 晶体管电源设备.....200

§ 1. 引言.....200

§ 2. 晶体二极管整流器.....200

§ 3. 晶体二极管稳压器.....202

§ 4. 晶体三极管稳压器.....203

§ 5. 晶体管直流电压变换装置.....204

第十三章 晶体管的噪声.....210

§ 1. 引言.....210

§ 2. 晶体管的噪声.....211

§ 3. 晶体管的噪声系数.....213

§ 4. 晶体管噪声系数的测量.....216

第十四章 真空管电路和晶

体管电路的对偶

性和类似性.....218

§ 1. 对偶性原理简述.....218

§ 2. 点接触型晶体管和真空三极管的对偶性.....220

§ 3. 面结合型晶体管和真空五极管的类似性.....223

§ 4. 关于真空管和晶体管对偶性和类似性的讨论.....224

附录 电路图.....226

§ 1. CO-1型助听器.....227

§ 2. 晶体管万用电表.....228

§ 3. 晶体管示波器.....229

§ 4. 晶体管无线电微音器(小型调频发射机).....230

§ 5. 晶体管电视接收机.....插页

§ 6. 超外差式晶体管收音机.....插页

第一章 晶体管的物理概念及其工作原理

本章的目的是给出学习晶体管电路所必备的物理概念。由于考虑到本书的主要内容是电路，故这里对半导体物理与晶体管原理的知识，只作定性的介绍，有些概念因而也就缺乏一定的严格性。如果想详尽的了解有关问题，可以根据需要阅读有关的书籍。

§ 1. 半导体的导电机构简介

自然界的固体，若按导电性能来分，一般可分为三大类，即导体、半导体、绝缘体。其简单区别在于：

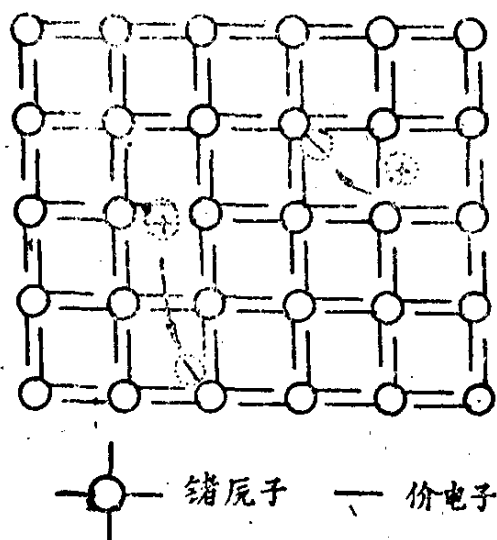
金属(导体)：电导率为 10^4 欧 $^{-1}$ ·厘米 $^{-1}$ 以上，温度系数为负。

绝缘体：电导率为 10^{-10} 欧 $^{-1}$ ·厘米 $^{-1}$ 以下，温度系数为正。

半导体：电导率介于 10^4 —— 10^{-10} 欧 $^{-1}$ ·厘米 $^{-1}$ 之间，温度系数为正，且很大。

金属的特征是在于它的内部存在着大量的“自由”电子：即有很多价电子在热激发情况下是“自由”的，而良好的绝缘体则没有这种“自由”电子(严格说是甚少)，它的价电子都构成了共价键。半导体则是其中一部分挣脱共价键而参与了导电。

我们以锗(Ge)为例加以说明，理想的锗晶体(无杂质，位错，缺陷等)，每个价电子均互相结合成共价键，故无热激发时都不参与导电，是绝缘的。但事实上，晶体点阵热运动的存在，使得总有一部分共价键被击破，相应就有部分价电子成为“自由”电子，可以在电场作用下参与导电，留下的缺位则易于为邻近的电子所移补而造成缺位的移动，这样我们可以把缺位的移动视为一个单位正电荷的移动，这就是通常所称呼的空穴。定性的图象示于图(1-1)。



图(1-1) 锗完整晶体示意图

这里的电子和空穴统称之为载流子。由此可得出结论，半导体的导电机构与金属不同，即它同时存在着两种导电机构，电子导电与空穴导电，代表着电子的两种导电方式。

凡依靠热激发（或其他激发方式）而参与导电的电子数和空穴数相等的我们称之为本征导电，这种理想半导体也叫做本征

半导体。

如果在本征半导体中加入杂质原子，而造成某种载流子数目大大增加，导电性能改变，这种情况称之为杂质导电。

仍以 Ge 为例，当五价原子（磷 P，砷 As，锑 Sb）占据晶格中锗原子位置时，它的四个价电子仍和周围锗原子的价电子组成共价键，但第五个价电子却成了“自由”状态，这种类型的杂质称为施主杂质。此情况下主要的载流子是电子，称为 n 型导电，这种类型的半导体材料也就称为 n 型半导体。

当三价原子（硼 B、铝 Al、镓 Ga、铟 In）占据晶格中锗原子位置时，晶格共价键结构是不完整的（缺位），造成一个空穴的出现，亦可参与导电，这类杂质称为受主杂质。这种导电机构是主要以空穴为载流子，称为 p 型导电，这种类型的半导体材料称为 p 型半导体。

凡是 n 型半导体中的电子称为多数载流子，空穴为少数载流子。反过来，在 p 型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。

在同一半导体的晶体中，有时同时存在着 p 型区与 n 型区，且

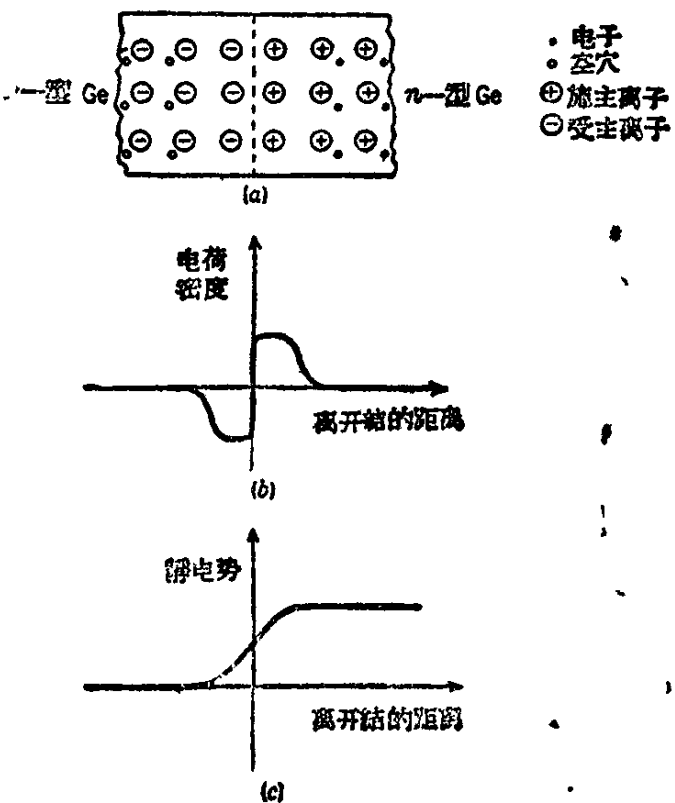
在其交界处晶体结构仍保持連續性，在結合处构成一个具有特殊电学特性的区域，則称此区域为 $p-n$ 結。

結的种类通常可分为两种：突变結（合金結）是指杂质濃度的分布在边界上的变化是突然的；緩变結（扩散結）是指杂质濃度的分布在边界上变化是漸变的。实际制得的結都是处于二者之間、而更倾向于其中的一种。

現在来研究一下 $p-n$ 結的特性。首先我們来闡明 $p-n$ 結区域电荷分布的情况，設在最初 p 型半导体和 n 型半导体接触的时候（理想化的假設情况），由于 p 区空穴濃度大于 n 区，电子濃度則恰相反，故必然产生因濃度梯度存在而发生的扩散运动，載流子扩散的結果却又引起結层內出現內部电场，电场作用促使載流子沿与扩散相反的方向运动。上述过程最終达到动态平衡，就出現一个空間电荷区域，沒有淨电流通过結。这种电荷分布与相应的电势曲线示于图(1-2)中。

$p-n$ 結最重要的特性是整流特性。現在我們从电势曲线在外电场作用下变化的情况來說明整流特性。由于 $p-n$ 結的导电机构是电子与空穴的混合机构，我們只說明空穴的情况，电子情况完全类似。

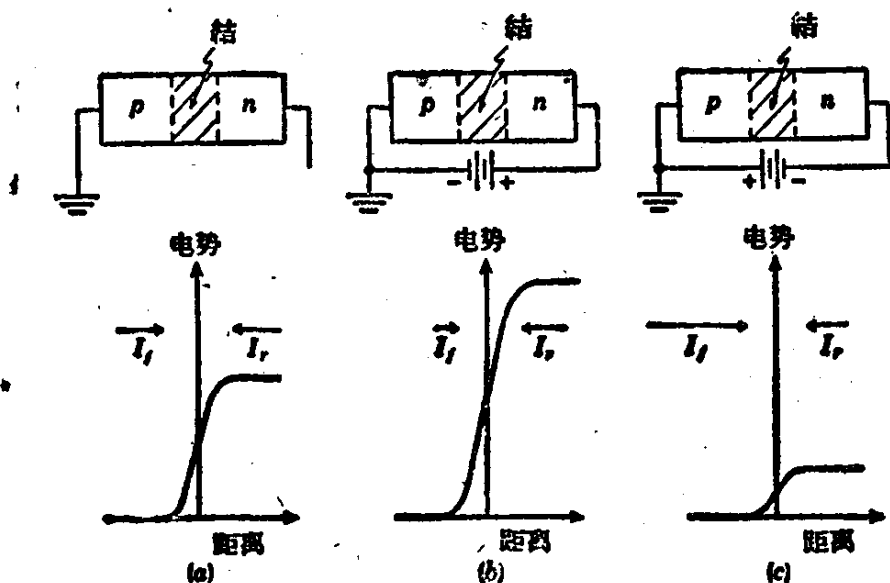
在图(1-3)中示出在外加直流电压时，通过 $p-n$ 結电流的情况



图(1-2) 突变結的电荷与静电势的分布图

(空穴流)。 I_f 表示正向空穴流, I_r 表示反向空穴流。

在一定的温度下, p 区中有些空穴得到足够的能量爬过势垒而与 n 区中的电子复合, 构成电流 I_f , 而 n 区中由于热激发而总会产生一些空穴, 它们到达势垒边上就会落下势垒到 p 区中去构成电流 I_r , 在一定温度下, 这两部分电流是相等的, 故无净电流通过结。

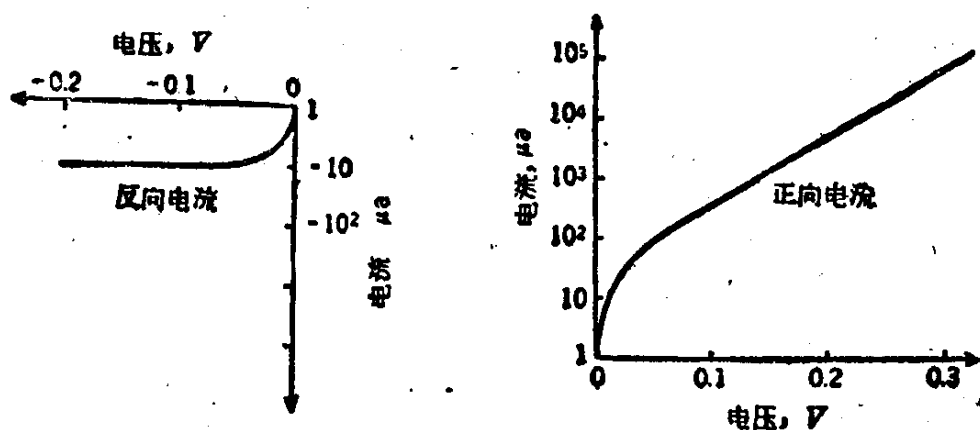


图(1-3) $p-n$ 结处空穴流随偏压变化的情况

当 $p-n$ 结加上正向偏压时, 对势垒的作用是降低, 于是较多的空穴可以爬过势垒形成 I_f 的增大, 而反向电流 I_r 却不受势垒高度的影响, 仍维持不变。故在正向偏压下通过结的电流是随电压加大而增加。

当 $p-n$ 结加上反向偏压时, 对势垒的作用是增高, 相应能爬上势垒的空穴数减少。偏压足够大时, I_f 小到可以忽略, 则净电流实际上等于与偏压无关的 I_r 。实验结果得到的伏安特性曲线如图(1-4)所示。

若 p 区和 n 区的杂质浓度相同, 则电子电流和空穴电流是相等的, 若有显著的不同, 则两种电流不相等, 而以其中的一个为主要通过结的电流。在 $p-n$ 结处少数载流子的输入作用, 称为少数

图(1-4) p - n 結的伏安特性

載流子的注射, 定义注射效率为

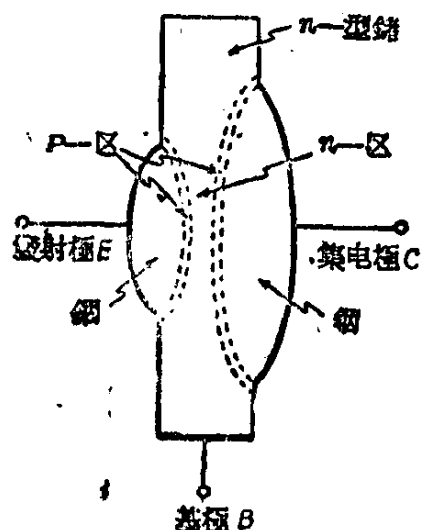
$$\gamma = \frac{\text{空穴电流密度(或电子)}}{(\text{空穴} + \text{电子})\text{电流密度}}$$

p - n 結上加上一个交变电压 ΔV , 則相应在結层附近就有一个电荷量的改变 ΔQ , 从电容的定义我們知道 $C = dQ/dV$; 故一个 p - n 結在交流运用时呈现出有电容的效应, 称为 p - n 結的电容。

p - n 結在所加反向电压值达到一定程度时, 会出现电流突然增长的情况, 此现象称为 p - n 結的击穿。击穿现象的物理机构主要为两种: 齐納式击穿——結区域在强电场的作用下, 束縛的价电子被拉脫而大量参与导电。雪崩式击穿——强电场作用下进入結区的載流子获得足够的能量与晶格碰撞, 导致电子的脫出而参与导电, 类似气体电离过程。上述两种机构, 在晶体管中主要存在的是雪崩击穿机构, 其詳細情况留待第十一章加以討論。

§ 2. 面結合型晶体三极管

結型三极管的典型結構如图 (1-5) 所示。在鍍片的兩側各熔合一个錫球, 形成两个 p 型区, 鍍是 n 型的, 故构成了两个 p - n 結, 其三个接头分别称为发射极 (E), 基极 (B), 集电极 (C)。 EB 間的結称发射結, 作用是向 n 区注射少数載流子; BC 間的称为集电結,



图(1-5) 结型三极管示意图

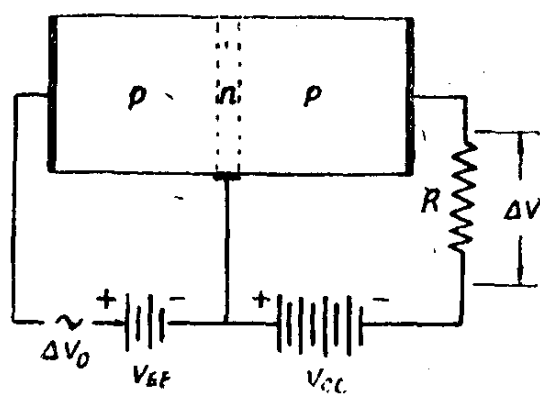
作用是收集发射结注入到 n 区中的载流子。

在实际的结构中，为保证注入的少数载流子能在很短时间内几乎没有损失地渡越到集电极去，基层总是做得很薄，约几个微米到几十微米。

和电子管工作时需要有工作电压（板压和栅压）一样，晶体管在发射结上必须加上正向电压以起注射载流子之作用；集电结上要加反向偏压以收

集载流子。以 $p-n-p$ 型晶体管为例，空穴从发射结注入基层后，通过扩散而越过基层到达集电结，为强电场吸去。发射结正向运用，处于低阻抗，集电结为反向运用处于高阻抗，而通过的电流则几乎相等，所以实质上可看作是一个电流不变的阻抗变换器，英文 Transistor 一词的由来即基于此。

图(1-6)示出晶体管基本放大器的一种接法：共基极接法，我们分析其放大特性。 ΔV_0 是交流讯号源，在发射结上引起电流为 Δi_0 ，其中包括了大部分注入的空穴流和一小部分反向的电子流，我们设发射结电阻为 r ，则

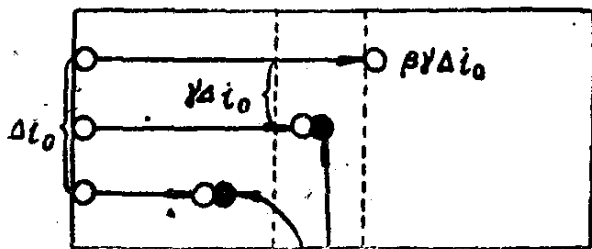


图(1-6) 共基极放大器

$$\Delta V_0 = r \Delta i_0,$$

Δi_0 中只有 $\gamma \Delta i_0$ (γ 是注射效率) 部分是注入 n 区的空穴。进入 n 区的空穴是垂直于 $p-n$ 结作扩散运动的（在无内部电场时），故发射结注入的空穴 $\gamma \Delta i_0$ 是向着集电结运动的，但它们不可能全部到

达,总有一部分中途复合,只有剩余的部分 $\beta(\gamma\Delta i_0)$ 才能通过集电结而变为输出迴路的电流,图(1-7)是上述过程的概括。这里 β 称为传输效率。自上而下第一条线表示 Δi_0 中注入 n 区且最后达到集电极的空穴流;第二条线表示 Δi_0 中注入 n 区并在 n 区中复合掉的空穴



图(1-7) 电流运动机构示意图

流,复合后就变为到基极的传导电流,这部分显然等于 $\gamma(1-\beta)\Delta i_0$;第三条线表示的是 Δi_0 中的电子电流部分,电子由基极穿过 $p-n$ 结而在 p 区内与空穴复合,转变为空穴的传导电流,这一部分等于 $(1-\gamma)\Delta i_0$ 。

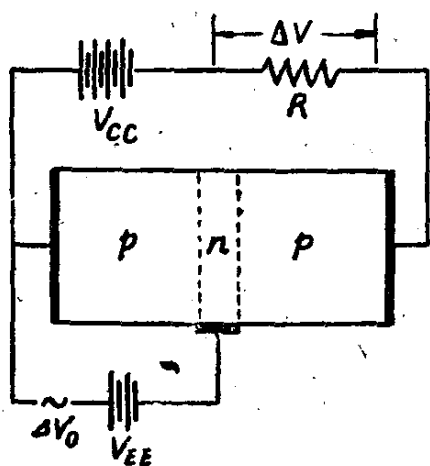
按照上面的简单分析,我们就得到下列输入和输出的关系:

$$\text{电流放大系数} = \frac{\beta\gamma\Delta i_0}{\Delta i_0} = \beta\gamma = \alpha (\alpha < 1),$$

$$\text{电压放大系数} = \frac{R(\beta\gamma\Delta i_0)}{\Delta V_0} = \frac{R\alpha\Delta i_0}{r\Delta i_0} = \left(\frac{R}{r}\right)\alpha,$$

$$\text{功率放大系数} = \frac{R(\beta\gamma\Delta i_0)^2}{(\Delta V_0)(\Delta i_0)} = \left(\frac{R}{r}\right)\alpha^2.$$

由于 R 可以比 r 大数百倍,而 α 是小于 1 但十分接近于 1 的,故电压放大系数和功率放大系数均甚大,可达数百。



图(1-8) 共发射极放大器

上面讨论的是共基极接法,实际上常用的是共发射极接法,其线路如图(1-8)所示,从放大的内部情况看,基本上和以前分析共基极接法是相同的,加在发射结上的电压仍为 $V_{EE} + \Delta V_0$,只是在集电结上的电压略有改变为 $(V_{cc} + \Delta V) - (V_{EE}$

$+\Delta V_0$), 然而 V_{co} 足够大, 使集电结保持在反向饱和情况下, 这样的电压差别是影响不大的, 故同样输入讯号 ΔV_0 , 仍然引起同样的空穴流 $\alpha \Delta i_0$ 到集电结, 并等于通过 R 的电流, 故输出电压也还是 $\Delta V = \alpha i_0 R_0$, 这里主要的差别在于: 发射极电流 Δi_0 不再是输入电流, 现在输入电流是通过基极的电流, 即图 (1-7) 中 $\beta \gamma \Delta i_0$ 以外的两部分电流, 故输入电流是

$$\Delta i_0 - (\beta \gamma \Delta i_0) = (1 - \alpha) \Delta i_0.$$

由于这一区别, 输入输出的关系就有了改变:

$$\text{电流放大系数} = \frac{\alpha \Delta i_0}{(1 - \alpha) \Delta i_0} = \frac{\alpha}{1 - \alpha},$$

$$\text{电压放大系数} = \frac{\alpha \Delta i_0 R}{r \Delta i_0} = \left(\frac{R}{r} \right) \alpha,$$

$$\text{功率放大系数} = \frac{(\Delta V)(\alpha \Delta i_0)}{(\Delta V_0)(1 - \alpha) \Delta i_0} = \left(\frac{R}{r} \right) \frac{\alpha^2}{1 - \alpha}.$$

与共基极情况比较, 电压放大是相同的, 但电流放大和功率放大则多了一个因子 $1/(1 - \alpha)$, 因为 α 总是小于而近于 1 的, 所以此因子很大 (例如: $\alpha = 0.98$, $1/(1 - \alpha) = 50$), 这种联结法的好处就是在于能够同时获得大的电流放大和电压放大。

本章参考文献

1. 洪朝生: “半导体的一般介绍”, 半导体会议文集, 第 1 页—17 页, 科学出版社。
2. 罗无念, 成众志等著: “晶体管电子学”第一章, 人民邮电出版社。
3. R. F. 茜亚: “半导体管电路原理”(上), 第一章, 上海科学技术出版社。
4. 黄昆、卓济仓: “晶体放大器”, 半导体会议文集, 第 49 页—70 页, 科学出版社。

第二章 晶体管的低频特性

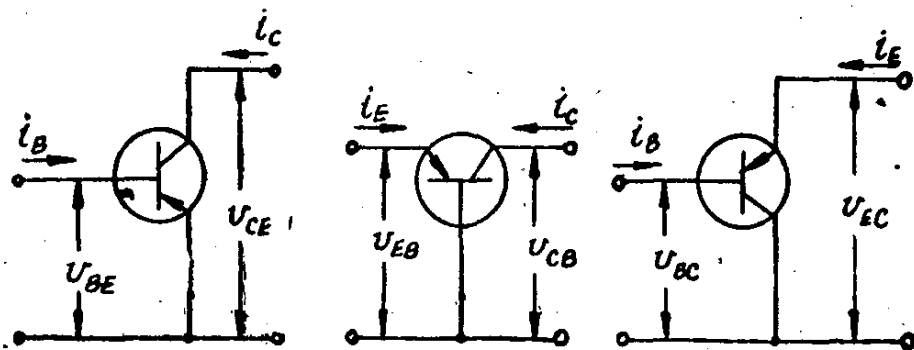
本章中，把晶体管作为线性有源的三端器件来看待。首先详尽地描述其静态特性曲线族，及由此可以导出的低频参数；然后把晶体管作为线性四端网络来进行分析，导出网络参数，给出相应的等效电路；最后简单地介绍一下低频 h 参数的测量。

§ 1. 晶体管静态特性分析

晶体管和其他电路元件一样，可以用端电压和端电流的关系来完全表示其电学特性。一般的晶体管都是三端器件，其电学特性可由流过三个端头的电流 i_1 、 i_2 、 i_3 和跨在三个端头间的电压 v_1 、 v_2 、 v_3 来描述。但是由于：

$$\left. \begin{aligned} i_1 + i_2 + i_3 &= 0, \\ v_1 + v_2 + v_3 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

故实际上只需两个端电流和两个端电压就可以完全确定。把晶体管作为放大器时，一端是输入端，另一端是输出端，第三个为输入与输出所共用。因此我们感兴趣的两个电流是输入电流和输出电流，两个电压则为输入电压和输出电压。



图(2-1) 三种基本组态

晶体管的三根引线可分别被指定为公共端，因而有了三种基本组态：即共发射极、共基极、共集电极，示于图(2-1)。

(1) 面结合型晶体三极管静态特性分析：

对应晶体管的每种组态，均可测出其静态特性曲线来。那么以那种组态的特性曲线为最好呢？选择的依据主要有两点：第一、表示该器件特性的精确性；第二、曲线在电路设计中的常用性。

在面结合型晶体管中，发射极注入基层的载流子绝大部分均到达了集电极，而只有极少数是通过基极而形成基极电流的。但基极电流却是个重要的量，因为在共发射极和共集电极两种组态中，它都是输入电流。若在共基极组态下，从曲线上可以找出 i_E 和 i_C ，而基极电流 i_B 却必须从式子(2-2)中求得：

$$i_B = -(i_E + i_C). \quad (2-2)$$

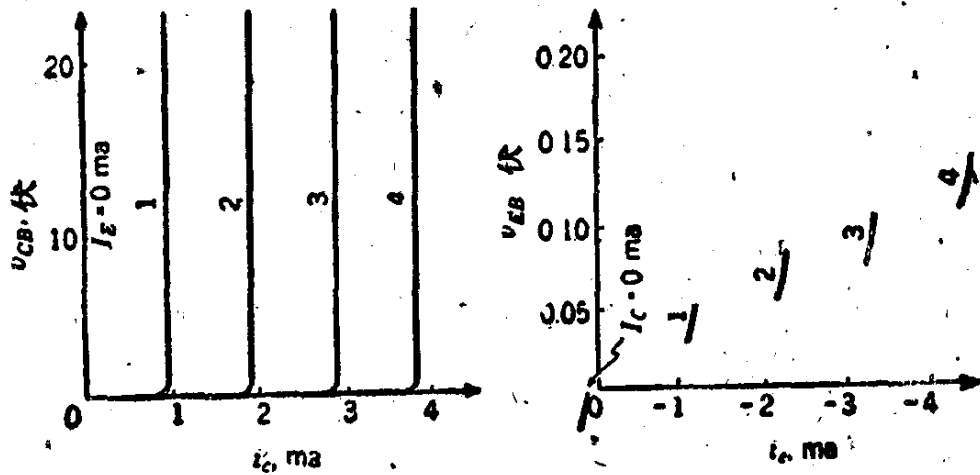
由于 i_C , i_E 是方向相反，而数值相差不多，只相差百分之几，只要 i_E 和 i_C 产生很小的误差就会造成 i_B 巨大的误差，因此给出的共基极组态特性曲线对 i_B 表示的精确度甚差。

正常运用下的发射极总是接正向偏压，集电极则加反向偏压。因此集电极到基极的电压远远大于基极到发射极的电压，集电极到基极的电压实际上几乎等于集电极到发射极的电压。如在共集电极组态下，特性曲线上给出的正是这两个电压，而基极到发射极的电压则为此二电压之差，此差甚小，不能精确求出。故共集电极特性曲线表示晶体管性能的精确度也不好。

为共发射极组态描绘的特性曲线明显地表示出基极的电流和基极与发射极间的电压的数值，故它们可以精确的给出(2-1)式中的六个量。另外，共发射极组态是最常用的。基于上述理由，我们认为仔细地了解共发射极特性是重要的。

下面分别讨论一下共基极特性曲线和共发射极特性曲线。前者由于历史的原因，到现在使用者仍不少。

(a) 共基极特性曲线:

图(2-2) $n-p-n$ 型面结型共基极特性曲线

图(2-2)是一组用来表示共基极特性的静态特性曲线族。观察特性曲线可以知道: 晶体管有着高的输出阻抗, 且输出线性良好, 低压下亦可运用; 输入电流电压间不是线性关系, 且输入阻抗低。

由图所示的特性曲线中, 可以导出一组 r 参数, 各参数定义为:

$$\left. \begin{aligned} r_{11b} &= \left(\frac{\partial v_E}{\partial i_E} \right)_{I_C} & r_{21b} &= \left(\frac{\partial v_C}{\partial i_E} \right)_{I_C} \\ r_{12b} &= \left(\frac{\partial v_E}{\partial i_C} \right)_{I_E} & r_{22b} &= \left(\frac{\partial v_C}{\partial i_C} \right)_{I_E} \end{aligned} \right\} \quad (2-3)$$

小注角 b 是指共基极组态。这些参量的仔细讨论下节再谈。

(b) 共发射极特性:

图(2-3)表示共发射极特性曲线, 其中(a)(b)是最基本的, 已足够代表共发射极的特性了。但在某些时候, 例如关于畸变的讨论等, 则应用转移特性曲线更清楚些。

观察特性曲线可知: 输出特性线性也很好, 但比共基极差些; 输出阻抗不如共基极的高; 不象共基极那样平行于电压轴, 拐点也较早些, 虽也可以低压运用, 但不如共基极; 输入电流是 I_B, I_E 很