

邮电中等专业学校试用教材

# 高频电子电路

长春邮电学校 编

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书根据邮电中等专业学校微波通信专业教学大纲编写的，主要讲述了晶体管高频放大器、高频振荡器、限幅器、混频器和调制与解调等部分的基本原理和简明的分析方法。每章末附有习题。

本书是适用于邮电中等专业学校的教学用书。

## 高 频 电 子 电 路

长春邮电学校 编

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1980年11月 第一版  
印张：15 4/32 页数：242 1980年11月 河北第一次印刷  
字数：347 千字 印数：1—14,000 册

统一书号：K15045·总2406—无6104

定价：1.20 元

## 前 言

本书是邮电中等专业学校教学用书。为适应新形势下邮电教育事业发展的需要，1978年，我们组织部分邮电学校分工编写了微波、载波、市内电话、线路、电报、电源、综合电信和邮政机械等八个专业所用的基础课和专业课的教学用书，并将陆续出版，以应各邮电中等专业学校教学急需。

编好教材，是提高教学质量的关键。我们组织编写本教材时，力求以马列主义、毛泽东思想为指导，努力运用辩证唯物主义的观点阐明科学技术的规律，内容上注意了少而精，尽量反映科学技术的新成就。由于编写、审定的时间仓促，又没有经过教学实践的检验，书中会有不少缺点和错误。希望有关教师和同学在使用过程中，把发现的问题提供给我们以便修改提高。

邮电部人事教育局

一九七八年十二月

## 编 者 的 话

本书是按照邮电中等专业学校微波通信专业教学大纲编写的，主要内容包括晶体管高频参量及其等效电路、晶体管宽频带放大器、调谐放大器、非线性调谐功率放大器、晶体管高频振荡器、限幅器、混频器、调制与解调和微波电子管等部分。

全书共十二章，其中第一、二、三、四、五、七、八、九、十、十一、十二章由唐如俊同志编写，第六章由裴爱华同志编写，并经甘肃省邮电学校王旭同志和北京邮电学院赵长奎同志审核定稿。

1979.10.12

# 目 录

第一章 晶体管高频参量及其等效电路.....	( 1 )
第一节 共基极 $T$ 型高频等效电路.....	( 1 )
第二节 混合 $\pi$ 型高频等效电路.....	( 5 )
第三节 高频 $H$ 参量等效电路.....	( 11 )
第四节 高频 $Y$ 参量等效电路.....	( 15 )
习题.....	( 19 )
第二章 晶体管宽频带放大器.....	( 21 )
第一节 共发射极宽频带放大器.....	( 21 )
第二节 多级宽频带放大器电路的分析.....	( 28 )
第三节 宽频带放大器的时延.....	( 32 )
第四节 共基极宽频带放大器.....	( 35 )
第五节 共集电极宽频带放大器基本电路介绍.....	( 51 )
第六节 展宽通频带的方法.....	( 56 )
第七节 负反馈对宽频带放大器.....	( 66 )
习题.....	( 74 )
第三章 调谐放大器.....	( 77 )
第一节 晶体管调谐放大器的一般介绍.....	( 77 )
第二节 串、并联谐振回路特性.....	( 81 )
第三节 耦合振荡回路.....	( 89 )
第四节 调谐放大器的稳定性.....	( 108 )
第五节 调谐放大器的放大系数及其频率特性.....	( 112 )
习题.....	( 116 )

<b>第四章 放大器的噪声</b> .....	( 117 )
第一节 放大器的固有噪声.....	( 117 )
第二节 晶体管放大器的噪声系数.....	( 123 )
第三节 晶体管噪声频谱和高频噪声公式.....	( 127 )
习题.....	( 132 )
<b>第五章 非线性调谐功率放大器</b> .....	( 133 )
第一节 基本电路及其工作原理.....	( 133 )
第二节 放大电路的分析.....	( 136 )
第三节 放大电路的计算.....	( 143 )
第四节 放大器的偏置电路.....	( 148 )
第五节 放大器的耦合电路.....	( 152 )
习题.....	( 158 )
<b>第六章 晶体管高频振荡器</b> .....	( 159 )
第一节 概述.....	( 159 )
第二节 晶体管高频正弦振荡器.....	( 162 )
第三节 晶体管高频振荡电路的分析与计算.....	( 171 )
第四节 振荡器的振幅稳定与频率稳定.....	( 181 )
第五节 用石英晶体控制的晶体管高频正弦振荡 电路.....	( 192 )
第六节 用锁相技术控制的晶体管高频正弦振荡 电路.....	( 205 )
第七节 体效应振荡器简介.....	( 226 )
第八节 雪崩二极管及其振荡原理简介.....	( 232 )
习题.....	( 234 )
<b>第七章 晶体管限幅器</b> .....	( 236 )
第一节 限幅特性.....	( 236 )
第二节 晶体二极管串、并联限幅器.....	( 237 )

第三节	晶体三极管限幅器	( 243 )
	习题	( 244 )
<b>第八章</b>	<b>晶体管倍频器</b>	( 245 )
第一节	非线性调谐放大式倍频器	( 245 )
第二节	变容二极管倍频器	( 246 )
第三节	阶跃管倍频器	( 252 )
	习题	( 257 )
<b>第九章</b>	<b>晶体管混频器</b>	( 258 )
第一节	混频的基本概念	( 258 )
第二节	晶体管混频器	( 262 )
第三节	晶体管变频器及其干扰	( 264 )
	习题	( 269 )
<b>第十章</b>	<b>调制与解调</b>	( 270 )
第一节	晶体管幅度调制—调幅器	( 273 )
第二节	晶体管振幅检波器	( 288 )
第三节	晶体管频率调制—调频器	( 299 )
第四节	晶体管相位调制器	( 324 )
第五节	晶体管频率检波器	( 327 )
	习题	( 354 )
<b>第十一章</b>	<b>微波电子管</b>	( 357 )
第一节	什么是反射式速调管	( 358 )
第二节	反射式速调管振荡器是怎样振荡的	( 363 )
第三节	反射式速调管振荡器的振荡模——电子 调谐	( 368 )
第四节	反射式速调管的特性参量	( 372 )
第五节	反速调管使用过程中容易出现的故障及 其处理方法	( 377 )

第六节	行波管	( 380 )
第七节	行波管放大器是怎样工作的	( 389 )
第八节	行波管放大器的工作特性	( 398 )
第九节	行波管放大器设计使用中的有关问题	( 412 )
	习题	( 416 )
<b>第十二章</b>	<b>晶体管高频电子电路的测试和调整</b>	<b>( 418 )</b>
第一节	宽频带中频放大器的测试	( 418 )
第二节	晶体管高频振荡器的调测	( 444 )
第三节	限幅器的限幅系数的测量	( 456 )
第四节	调制器与解调器的测试	( 459 )



# 第一章 晶体管高频参量及其等效电路

在《电子电路》课程中，我们曾用低频  $h$  参量及其等效电路，对晶体管低频放大器进行了分析。但由于低频  $h$  参量等效电路忽略了晶体管在高频工作时的内部物理现象，所以它只适用于低频范围。对于高频或宽频带放大器（工作频率几十兆赫甚至到百兆赫以上）来说，它是不适用的。因此，必须再找到一种能够反映晶体管在高频工作时的高频参量及其等效电路。利用高频参数和等效电路才能较全面地分析和研究晶体管在高频或宽频带中频放大器中的工作特性。

## 第一节 共基极 $T$ 型高频等效电路

晶体管共基极  $T$  型高频等效电路是在低频  $T$  型等效电路的基础上，加进晶体管发射结电容  $C_{je}$  和位垒电容  $C_{js}$  后，画出来的等效电路。如图1—1所示。图1—1(a)是  $NPN$  型晶体管低频  $T$  型等效电路，图中  $b'$  为基区中一个抽象的点，用以区别晶体管基极引线  $b$ ，并把基极内部到外部之间的电阻集总为  $r_{bb'}$ 。 $r_{je}$  为晶体管发射结电阻， $r_{js}$  为集电结电阻。那么在图1—1(a)中，是否把晶体管发射结扩散电容  $C_{je}$  和集电结位垒电容  $C_{js}$  加上去（如图1—1(b)）就能成为高频  $T$  型等效电路呢？关于这一点应从晶体管在高频工作时的内部物理现象加以说明。图1—2是晶

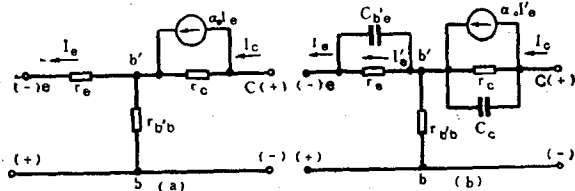


图 1-1 NPN型晶体管T型等效电路

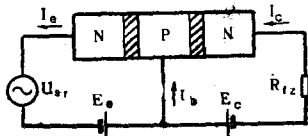


图 1-2 晶体管共发射极接法的放大电路

晶体管共基极接法的放大电路。

当放大电路在没有交流信号输入时，则由于发射结上加有一定的正向偏压，使发射区向基

区注入一稳定数量的载流子。这些载流子到达基区后，由于基区载流子密度分布不均匀（靠近发射结密度大而靠近集电结密度小），这样就能以它本身固有的能量向集电结扩散，当到达集电结时，由于受位垒电场的作用，载流子被集电极收集，而形成了集电极电流。从发射区注入到基区的载流子，在到达集电极的过程中，总是需要一定的时间。把这个时间称为扩散时间，用 $\tau_d$ 表示。

当交流信号 $u_r$ 输入时，则发射结电压有一变化量 $\Delta u_{eb}$ ，并引起集电极电流产生一相应的变化量 $\Delta i_c$ 。即当发射结两端有交流信号 $u_r$ 作用时，在集电极回路中，必定产生相应地交变电流 $I_c$ 。由于从发射区向基区注入的载流子，扩散到集电极总需要一定的时间，所以集电极电流 $I_c$ 比发射极电流 $I_e$ 滞后一相角 $\phi$ 。当交流信号 $u_r$ 的周期 $T \gg \tau_d$ （晶体管在低频工作）时， $\tau_d$ 的影响可以忽略不计，于是 $\phi$ 也忽略不计。但当晶体管工作频率的周期 $T$ 和 $\tau_d$ 相接近时，则 $\tau_d$ 的影响就不能忽略，工作频率越高（ $T$ 越小） $\tau_d$ 的影响就越大。这是由于工作频率越高

时，其周期越短。注入到基区的载流子相对地在基区停留的时间就显得越长，则它被复合掉的机会也就越多，因此引起  $I_e$  的增加而使  $I_c$  下降。这和图1—1(b)所示的等效电路中所描述的物理现象是一致的。在图1—1(b)中，还可以清楚的看到，当晶体管的工作频率升高时，发射极电流  $I_e$  就分成两部分，而只有流经  $r_e$  的电流  $I'$ ，才能起到控制集电极电流  $I_c$  的作用；这是由于  $I'$  是在基区中向集电极运动时所形成的集电极电流  $I_c$  的缘故。而流经电容  $C_{b'e}$  的电流则是一个分路电流，它是流过发射结到达基极所形成的基极电流，所以它只使  $I_e$  增加而不能对集电极电流起控制作用。这种现象在频率越高时越为严重。也就是说，工作频率越高，晶体管共基极电流放大系数  $\alpha$  越减小。由此可见，当晶体管在高频工作时，共基极电流放大系数  $\alpha$  是频率的函数，其值与频率有关。

在图1—1(b)中，用发射结电容  $C_{b'e}$  和  $r_e$  的并联作用来模拟载流子在基区中扩散的时间对晶体管高频工作时的影响。

由于发射结电容  $C_{b'e}$  的分路作用，使到达集电极的电流  $I_c = \alpha_o I'$  ( $\alpha_o$  为低频电流放大系数)，故在图1—1(b)的  $c, b'$  两端串入一恒流源  $\alpha_o I'$ 。如果把集电结电容  $C_{b'c}$  ( $C_d$ ) 对晶体管在高频工作时的影响也考虑进去，则图1—1(b)将和图1—2相等效。而晶体管在高频工作时的  $r_e$  的分路作用却很小，故可略去不计。如果用  $I_e$  作为图1—1(b)中恒流源的控制量，则恒流源中的  $\alpha_o$  就要用复数的  $\hat{\alpha}$  来代替，如图1—3所示。

对照图1—1(b)和图1—3，如果要求二者在外电路看来完全等效，则必须满足

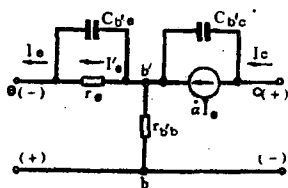


图 1—3 晶体管的高频 T 型等效电路

于是

$$\dot{a} \dot{I}_e = \alpha_0 I'_e$$

$$\begin{aligned} \dot{a} &= \frac{\alpha_0 I'_e}{\dot{I}_e} = - \frac{\frac{1}{j\omega C_{b'e}}}{r_e + \frac{1}{j\omega C_{b'e}}} \cdot \alpha_0 \\ &= \frac{\alpha_0}{1 + j\omega C_{b'e} r_e} \end{aligned} \quad (1-1)$$

因此  $\dot{a}$  的模值是

$$a = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + (\omega C_{b'e} r_e)^2}}$$

当  $\omega C_{b'e} r_e = 1$  时,  $a$  下降为  $\frac{\alpha_0}{\sqrt{2}}$ , 如果这时对应的频率  $f = f_a$ , 则

$$f_a = \frac{1}{2\pi C_{b'e} r_e} \quad (1-2)$$

$f_a$  称为共基极 (短路) 电流放大系数的截止频率或简称共基极截止频率。

上式中  $C_{b'e} r_e$  的乘积是一时间常数, 如用  $\tau_d$  表示, 则

$$\tau_d = C_{b'e} r_e = \frac{1}{2\pi f_a}, \text{ 所以}$$

$$\dot{a} = \frac{\alpha_0}{1 + j\omega \tau_d} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_a}} \quad (1-3)$$

可见  $\dot{a}$  是频率的函数, 其值随工作频率的升高而下降, 如图1-4所示。

由于用  $C_{b'e}$  和  $r_e$  模拟  $a$  随频率升高而下降的特性还不够完善, 所以在用式(1-3)计算  $\dot{a}$  的相角时, 有一定的误差。因此, 对式(1-3)作如下修正, 即

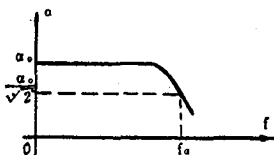


图 1-4  $\alpha$  随工作频率变化的曲线

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0 e^{-jm \frac{f}{f_a}}}{1 + j \frac{f}{f_a}} \quad (1-4)$$

式中  $e^{-jm \frac{f}{f_a}}$  称为附加相移，这是由实践得出的。此时  $\dot{\alpha}$  的模值未变，即

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2}} \quad (1-5)$$

而相移则为

$$\phi_a = -m \frac{f}{f_a} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{f}{f_a} \quad (1-6)$$

式中  $m$  值的大小与晶体管的结构有关。对于扩散型晶体管  $m \approx 2$ ，对于漂移型晶体管  $m \approx 1$ 。

## 第二节 混合 $\pi$ 型高频等效电路

混合  $\pi$  型等效电路，是晶体管共发射极的等效电路，用以模拟晶体管在高频工作时的特性。根据晶体管的内部物理过程，可直接把它推导出来。当然也可以用共基极  $T$  型等效电路来转换。

通过《电子电路》课程的学习，对于晶体管的内部物理过

程，可以归纳为：

一、当晶体管的发射结和集电结上电压有变化时，基区中少数载流子将发生扩散与复合两种现象，并且都随工作频率变化而变化。

二、当晶体管发射结、集电结上电压变化时，由于位垒随着变化，这将引起充放电效应而形成位垒电容。这种效应也是与频率有关的。

三、从晶体管PN结内部工作区到管外各极引线之间，存在着半导体材料的体积电阻，电流通过时会产生电压降，但与频率无关。

根据这些物理现象，共发射极接法的晶体管，可用图1—5来模拟。

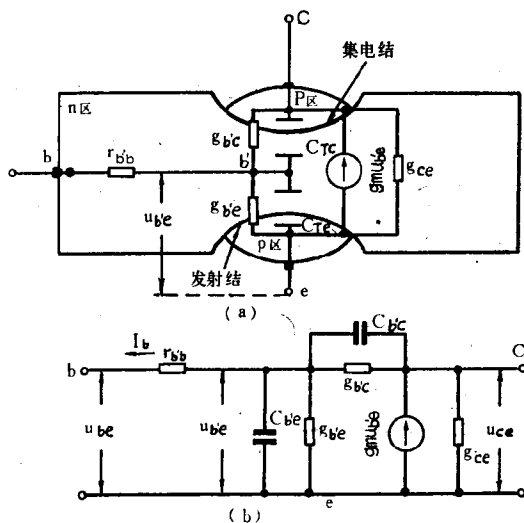


图 1—5 晶体管共发射极物理参数模拟图

由晶体管内部结构可知，从基极外部引线  $b$  到内部扩散区中某一抽象点  $b'$  之间，是一段较长而又薄的  $N$  型半导体，因掺入杂质很少，因而电导率不高，所以存在一定体积电阻，故在图1—5(a)中  $b-b'$  两点之间，用一集总电阻  $r_{b'}$  来表示。由于发射区和集电区掺入杂质多，电导率高，电阻很小，因此，可以把这两个体积电阻略去。

因为晶体管发射结和集电结都存在位垒电容，所以在图1—5(a)中  $b'-e$  和  $b'-c$  分别接上一个电容  $C_{T_e}$  和  $C_{T_c}$  来等效。电容  $C_{T_e}$  和  $C_{T_c}$  分别是  $C_{b'e}$  和  $C_{b'c}$  中的一部分。

当发射结上有信号  $u_{b'e}$ ，作用时，将引起大量载流子通过发射结注入到基区，它们在扩散过程中由于复合作用，使基极产生电流  $I_b$ 。这一物理现象可用一电阻  $r_{b'e}$  接在图1—5(a)中  $b'-e$  之间来等效。由于  $u_{b'e}$  是随频率变化的，所以它还引起基区贮存少数载流子的电荷发生变化，这一变化相当于  $b'-e$  两点之间有充放电性质的电流在变化，故用一电容来等效，这个电容称为扩散电容，用  $C_{D_e}$  表示，于是发射结总电容  $C_{b'e} = C_{D_e} + C_{T_e}$ 。由于发射结通常处于正向偏置，所以  $C_{b'e} \gg C_{T_e}$ ，故可以认为  $C_{b'e} \approx C_{D_e}$ 。又由于晶体管存在电流放大作用，因此电压  $u_{b'e}$  对集电极电流的控制作用是很强的，如果用参量  $g_m = \frac{\Delta I_c}{\Delta u_{b'e}}$  来衡量电压  $u_{b'e}$  对集电极电流的控制能力，那么，就可在图1—5(a)中的  $c-e$  两之间接一恒流源  $g_m u_{b'e}$  来等效。其中  $g_m$  称为跨导，它表示输入电压对输出电流的控制能力。

当集电结上电压变化时，引起阻挡层厚度变化，因而引起基区宽度变化（即宽度调制），导致基区少数载流子电荷密度发生改变，在外电路看来，相当于产生一充放电性质的电流，故在图1—5(a)中  $b'-c$  之间，接一电容  $C_{DC}$  来等效。由于  $C_{DC}$  是

扩散电容，所以集电结总电容  $C_{b'e} = C_{TC} + C_{DC}$ 。由于集电结处于反向偏置，所以  $C_{TC} \gg C_{DC}$ ，故  $C_{b'e} \approx C_{TC}$ 。

通过上述分析，我们就可以把图1-5(a)用图1-5(b)来等效，把它称为混合  $\pi$  型等效电路，图中共有五个参量，即  $g_m$ 、 $C_{b'e}$ 、 $C_{b'c}$  和  $r_{b'e}$ 、 $r_{b'c}$ ，其中  $r_{b'e}$  和  $C_{b'e}$  在晶体管手册中都给出参考值，也可通过仪表测试来获得。但要注意的是，晶体管手册中常用  $C_{cb}$  作为集电结电容的表示符号，即  $C_{b'e} = C_{cb}$ 。另外三个参量都要通过计算来求得。

在半导体理论中可以证明：

$$r_{b'e} = \frac{26(mV)}{I_e(mA)} (\Omega) \quad (1-7)$$

该式说明，当晶体管的静态工作点确定之后，即直流发射极电流  $I_e \approx I_{CQ}$  为已知量时，便可用式(1-7)求出  $r_{b'e}$ ，如再测得  $\beta_0$ ，则

$$r_{b'c} = (1 + \beta_0) r_{b'e}$$

然后就能求出跨导

$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'c}}$$

电容  $C_{b'e}$  虽然可以用式(1-3)求出，但  $f_a$  的测量困难，而且又不易准确，故需另找办法。

根据晶体管共发射极电流放大系数的定义和式(1-3)可以得到：

$$\beta_0 = \frac{\dot{a}}{1 - \dot{a}} = \frac{\frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_a}}}{1 - \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_a}}}$$



$$= \frac{\frac{\alpha_0}{1-\alpha_0}}{1+j\frac{f}{(1-\alpha_0)f_a}} \quad (1-8)$$

如果令

$$\left\{ \begin{aligned} \beta_0 &= \frac{\alpha_0}{1-\alpha_0} \\ f_\beta &= (1-\alpha_0)f_a = \frac{f_a}{1+\beta_0} \end{aligned} \right.$$

则

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta}} \quad (1-9)$$

或

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} \quad (1-10)$$

式中 $f_\beta$ 称为晶体管共发射极截止频率。如果 $f_T$ 表示 $\beta=1$ 时的对应频率，则 $f_T$ 就是晶体管的特征频率，它表示晶体管工作的极限频率，同时式(1-10)也可写成

$$1 = \frac{\beta_0}{\sqrt{1+\left(\frac{f_T}{f_\beta}\right)^2}} \quad (1-11)$$

由于

$$\begin{aligned} f_T \gg f_\beta, \text{ 则式(1-11)可写成} \\ f_T \approx \beta_0 f_\beta (\text{常数}) \end{aligned} \quad (1-12)$$

实际上，当 $f > (3\sim 5)f_\beta$ 时，测试频率 $f$ 和测得 $\beta$ 值的乘积就是特征频率 $f_T$ 。在晶体管手册中，可查得 $f_T$ 的参考值。

从图1-5(b)可以看出，当输出端短路时，则