

第三章 双极结型晶体管

一、简答题。

1、以共基极接法的晶体管工作在正向有源模式为例，解释双极结型晶体管放大作用的基本原理。

答：以正向有源工作模式为例说明双极结型晶体管的放大作用。基极既处于输入电路中又处于输出电路中，晶体管的这种连接方法称为共基极接法。由于发射结正向偏压，势垒降低了 qV_E ，电子将从发射区向基区注入，空穴将从基区向发射区注入。基区出现过量电子，发射区出现过量空穴。过量载流子浓度取决于发射结偏压的大小和掺杂浓度。当基区宽度很小（远小于电子的扩散长度）时，从发射区注入基区的电子除少部分被复合掉外，其余大部分能到达集电结耗尽区边缘。集电结处于反向偏压，集电结势垒高度增加了 qV_C 。来到集电结的电子被电场扫入集电区，成为集电极电流。这个注入电子电流远大于反偏集电结所提供的反向电流，构成集电极电流的主要部分。根据以上分析可以看出，BJT 的输入电流的变化将引起输出电流的变化。如果在集电极回路中接入适当的负载 R_L 就可以实现电压信号放大（ $V_{out} = \Delta I_C \cdot R_L$ ），这就是双极结型晶体管放大作用的基本原理。

2、什么是基区扩展电阻？什么是电流聚集效应？怎么解决电流聚集效应的问题？

答：BJT 有源电阻和无源电阻之和称为基区扩展电阻。

由于基区存在体电阻，这种基极电流在有源基区（发射极下面的基区）和无源基区（发射极两侧的基区）都要产生横向的电位降。电位降减少了加在发射结上的正向偏压，在靠近接触的边缘处正偏压比有源区中心处的大，结果使少数载流子的注入从基区边缘起随着向内的深度而下降。非均匀载流子的注入使得沿着发射结出现非均匀的电流分布，造成在靠近边缘处有更高的电流密度，这种现象称为电流聚集效应。

电流集聚减少了晶体管有源区的有效面积，为了减少这种效应，功率晶体管通常设计得具有高的周界面积比，如交叉指状结构。

3、造成 BJT 频率响应的原因是信号的时间延迟，解释时间延迟现象。

答：造成 BJT 频率响应的原因是信号从发射极向集电极传送时要有一个时间延迟。当输入信号变化时，晶体管内部的载流子分布要发生相应的变化，从而引起输出信号的相应变化。当输入信号频率较低时，载流子分布的改变跟得上信号的变化，于是输出信号能够随着输入信号即时地变化。当输入信号频率升高到一定程度时，器件载流子分布的改变跟不上输入信

号的变化，输出信号就不能随着输入信号即时地变化，造成了信号从发射极向集电极传送时的时间延迟。这种时间延迟使器件的增益等性能变差。由于存在时间延迟现象，所以 BT 是一种时间延迟器件。

4、造成 BJT 频率响应的原因是信号的时间延迟，列举出引起信号延迟的主要的 4 个因素，并分别进行解释。写出总的信号延迟时间表达式。

答：信号延迟的主要的 4 个因素分别为：

（1）发射结过渡电容充电时间 τ_E ：BJT 是由 pn 结所构成，pn 结有电容效应。高频信号通过 pn 结时必须对 pn 结电容充放电，电容充放电需要一定的时间，导致信号延迟。

（2）基区渡越时间 τ_B ：对 BJT 频率特性最严格的限制是载流子穿越基区薄层的输运，信号通过基区的时间即基区渡越时间。为了实现较好的频率特性，应把基区设计的很小。

（3）集电结耗尽层渡越时间 τ_d ：在集电结两边加上高的反偏电压，使得耗尽层显著加宽，载流子需要花费一定时间才能通过，即集电结耗尽层渡越时间。

（4）集电结电容充电时间 τ_C ：集电结处在反向偏压下，与结电容并联的电阻很大。集电结也是由 pn 结所构成，因此也有电容效应。电容充放电需要一定的时间，导致信号延迟。

总的信号延迟时间公式：

$$\tau_{ec} = \tau_E + \tau_B + \tau_d + \tau_C$$

5、什么是双极结型晶体管的开关时间？开关时间包括 4 种时间，请分别说明这 4 种时间的物理意义。画出集电极电流的典型开关波形图，在图上标出这几种时间。

答：晶体管处于截止区，集电极电流很小，阻抗很高，晶体管处于“关”态。在饱和状态，集电极电流很大，阻抗很低，晶体管被认为是“通”态。在“通”和“断”两个状态之间的转换是通过改变载流子的分布来完成的。载流子分布不能立刻改变。需要一个过渡时间，称为开关时间。开关时间对应于建立和去除这些少数载流子的时间。

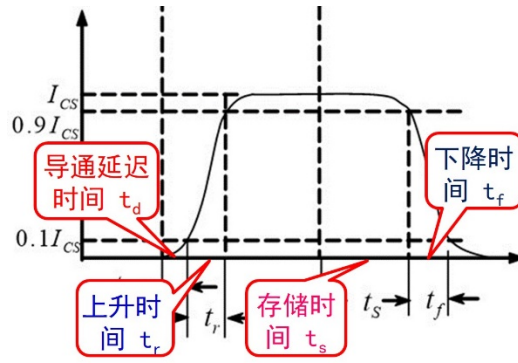
开关时间包括 4 种时间，分别为：

（1）导通延迟时间 t_d ：从加上输入阶跃脉冲至输出电流达到最终值的 10%，即 $0.1 I_{CS}$ 所经历的时间。

（2）上升时间 t_r ：电流 I_C 从 I_{CS} 的 10% 上升到 90% 所需要的时间。

（3）存储时间 t_s ：从基极电流发生负阶跃到集电极电流下降到 $0.9 I_{CS}$ 之间的时间。

（4）下降时间 t_f ：集电极电流从最大值（ I_{CS} ）的 90% 下降到 10% 的时间间隔。为上升时间的逆过程。



二、计算题。

1、一个 npn 硅晶体管具有下列参数： $x_B = 2 \mu m$ ，在均匀掺杂基区， $N_a = 5 \times 10^{16} cm^{-3}$ ， $\tau_n = 1 \mu s$ ， $A = 0.01 cm^2$ 。若集电结反向偏置， $I_{nE} = 1 mA$ ，计算在发射结基区一边的过量电子浓度、发射结电压、基区输运因子。（ $V_T = 0.026 V$ ， $q = 1.6 \times 10^{-19} C$ ， $n_i = 1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ ， $\mu_n = 1350 cm^2/V \cdot s$ ）。

解：

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{\frac{kT \mu_n \tau_n}{q}} = \sqrt{V_T \mu_n \tau_n} = \sqrt{0.026 \times 1350 \times 1.0 \times 10^{-6}} = 5.92 \times 10^{-3} cm$$

$$= 59.2 \mu m$$

$$L_n \gg x_B = 2 \mu m$$

由于：

$$I_{nE} = qAD_n \frac{n_i^2}{N_a x_B} (e^{V_E/V_T} - 1) = qAD_n \frac{n_i^2}{N_a x_B} e^{V_E/V_T}$$

因此发射结电压为：

$$V_E = V_T \ln \left(\frac{I_{nE} N_a x_B}{qAD_n n_i^2} \right)$$

$$= 0.026 \ln \frac{(1 \times 10^{-3})(5 \times 10^{16} \times 10^{-6})(2 \times 10^{-6})}{(1.6 \times 10^{-19})(0.01 \times 10^{-4})(1350 \times 10^{-4})(1.5 \times 10^{10} \times 10^6)^2}$$

$$= 0.44 V$$

流入基区过量载流子浓度为：

$$n_p(0) = n_{p0} e^{V_E/V_T}$$

$$\Delta n_p(0) = n_p(0) - n_{p0} = n_{p0} (e^{V_E/V_T} - 1) = \frac{n_i^2}{N_a} e^{V_E/V_T} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{5 \times 10^{16}} e^{0.44/0.026}$$

$$= 9.41 \times 10^{10} cm^{-3}$$

基区输运因子为：

$$\beta_T = 1 - \frac{1}{2} \frac{x_B^2}{L_n^2} = 1 - \frac{(2 \times 10^{-6})^2}{2 \times (59.2 \times 10^{-6})^2} = 0.9994 \approx 1$$

2、硅 npn 晶体管在 300 K 时具有如下参数： $I_E = 1 \text{ mA}$, $C_{TE} = 1 \text{ pF}$, $x_B = 0.5 \text{ } \mu\text{m}$, $D_n = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$, $x_m = 2.4 \text{ } \mu\text{m}$, $r_{SC} = 20 \text{ } \Omega$, $C_{TC} = 0.1 \text{ pF}$, $V_T = 0.026 \text{ V}$ 。求发射区-集电区渡越时间和截止频率。

解：发射结充电时间：

$$\tau_E = r_e C_{TE} = \frac{V_T}{I_E} C_{TE} = \frac{0.026}{1 \times 10^{-3}} \times 10^{-12} = 26 \times 10^{-12} \text{ (s)} = 26 \text{ (ps)}$$

基区渡越时间：

$$\tau_B = \frac{x_B^2}{2D_n} = \frac{(0.5 \times 10^{-4})^2}{2 \times 25} = 50 \times 10^{-12} \text{ (s)} = 50 \text{ (ps)}$$

集电结耗尽层渡越时间：

$$\tau_d = \frac{x_m}{v_s} = \frac{2.4 \times 10^{-4}}{10^7} = 24 \times 10^{-12} \text{ (s)} = 24 \text{ (ps)}$$

集电结电容充电时间：

$$\tau_C = r_{SC} C_{TC} = 20 \times 0.1 \times 10^{-12} = 2 \times 10^{-12} \text{ (s)} = 2 \text{ (ps)}$$

因此，发射区-集电区渡越时间为：

$$\tau_{ec} = \tau_E + \tau_B + \tau_d + \tau_C = 26 + 50 + 24 + 2 = 102 \text{ (ps)}$$

共基极截止频率：

$$f_\alpha = \frac{\omega_\alpha}{2\pi} = \frac{1}{2\pi(102 \times 10^{-12})} = 1.53 \text{ (GHz)}$$

特征频率：

$$f_T \approx f_\alpha = 1.53 \text{ (GHz)}$$

共发射极截止频率：

$$f_\beta = \frac{\omega_\beta}{2\pi} = \frac{f_T}{h_{FE}} = \frac{1.53 \times 10^9}{100} = 15.3 \text{ (MHz)}$$