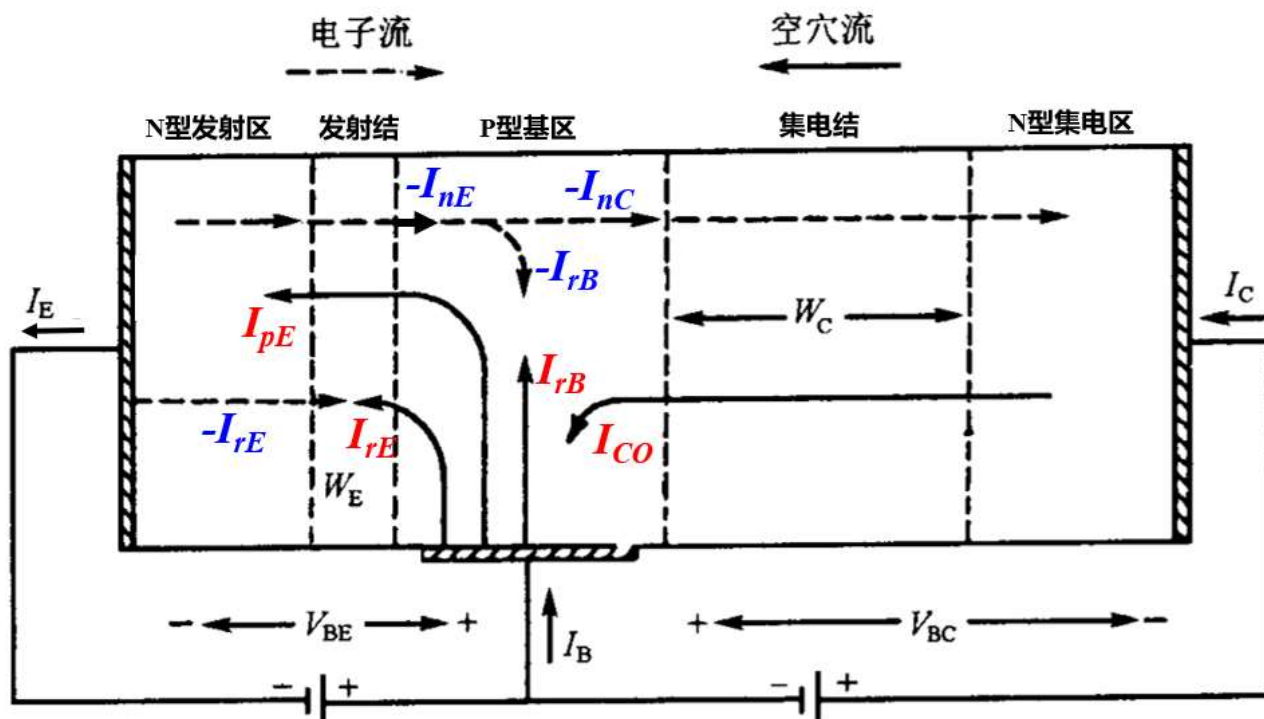


# 5. BJT的端电流



从图中可以清楚地看到，BJT各区中的电流叠加成相应区对应电极的端电流，因此可将BJT端电流总结如下：

发射极电流： $I_E = I_{nE} + I_{rE} + I_{pE}$

集电极电流： $I_C = I_{nC} + I_{CO}$

基极电流： $I_B = I_{pE} + I_{rE} + (I_{nE} - I_{nC}) - I_{CO}$

根据基尔霍夫电流定律可得： $I_E = I_C + I_B$

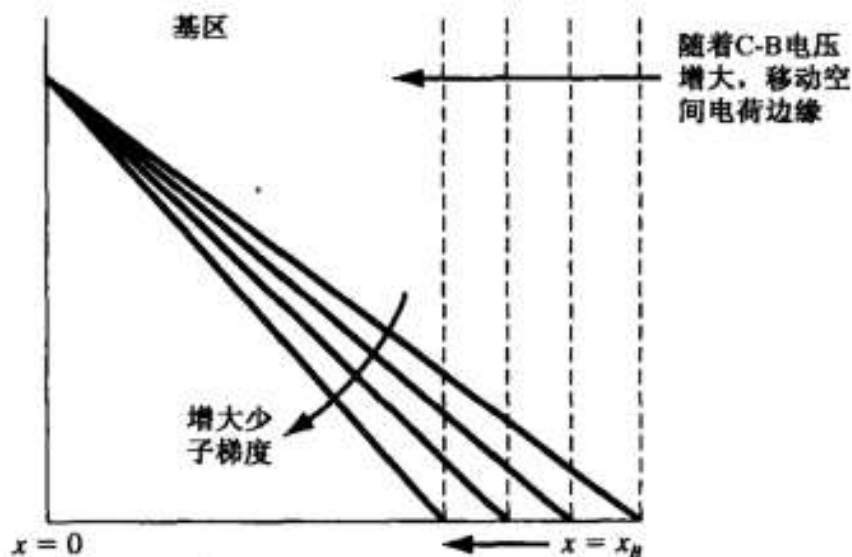
### 3.2.3 非理想现象分析

上述关于BJT电流方程的推导是在基本假设的前提下进行的，以上推导出的方程我们称为理想晶体管的电流方程，它们可以近似描述实际器件的电流-电压特性，但存在一些偏差，本节讨论引起偏差的主要因素或物理效应，主要包括：

- 1、缓变基区
- 2、发射极电流集边效应
- 3、基区宽度调制
- 4、基区展宽效应
- 5、雪崩倍增效应
- 6、基区穿通效应
- 7、产生复合电流效应
- 8、大注入效应

### 3、基区宽度调制效应

反偏pn结的耗尽区宽度明显依赖于电压。当BJT工作在放大状态时，改变基极和集电极间的电压 $V_{BC}$ 将引起集电结耗尽区宽度变化，因此也引起中性基区宽度 $W_b$ 的变化，这种现象称为**基区宽度调制效应**，也称Early 效应。



放大状态下，**反偏**的集电结电压 $V_{BC}$ 越大，**集电结耗尽层越宽**，基区宽度越小。从前面BJT少子分布的分析可知，放大状态下基区中的少子几乎呈线性分布。所以基区宽度变小时，基区少子浓度梯度增大。

## 5、雪崩倍增效应

BJT在放大状态下，当 $V_{bc}$ （共基极接法中的基极-集电极偏压）或 $V_{ce}$ （共发射极接法中的集电极-发射极偏压）超过集电结**临界击穿电压**时，集电极电流 $I_C$ 急剧增加，这种现象称为**雪崩击穿**，其原因是集电结耗尽区内的电场太强而产生大量的电子-空穴对（雪崩倍增）。



## 6、基区穿通效应

在基区宽度很小或基区掺杂浓度很低的情形下，有可能在集电结发生雪崩击穿之前，集电结的耗尽区已经扩展到同发射结的耗尽区会合，即中性基区宽度  $W_B$  下降到零，这就是**基区穿通效应**，相应的集电结电压称为穿通电压，以  $V_{PT}$  表示。一旦基区穿通，发射区的电子直接受集电结的电场作用，相当于**集电极与发射极短路**，电流迅速增大。

假设基区和集电区都是均匀掺杂，根据第二章  $pn$  结耗尽层宽度的公式，集电结耗尽层在基区中所占的宽度为

$$d = \left[ \frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_c}{N_B(N_B + N_c)} (V_{CB} + V_{bi}) \right]^{1/2}$$

$d=W_B$  时基区穿通，相应的  $V_{CB}$  等于  $V_{PT}$ ，忽略集电结内建电势  $V_{bi}$ ，得

$$V_{PT} \approx \frac{q}{2\epsilon_s} \frac{N_B}{N_c} (N_B + N_c) W_B^2$$

$$N_C \ll N_B \text{ 时 } V_{PT} \approx \frac{q}{2\epsilon_s} \frac{N_B^2}{N_c} W_B^2$$

对于一定的基区宽度  $W_B$ ，只有基区掺杂浓度  $N_B$  较大时才能防止基区穿通。

## 8、大注入效应

当 $V_{BE}$ 增大使得注入到基区的少子浓度接近基区多子浓度（大注入条件），发射效率 $\gamma$ 降低，导致 $\beta_0$ 降低，这种效应称为大注入效应，也称为Webster效应。

大注入相当于增加了基区的浓度，会改变基区的电导，这称为基区电导调制效应

以NPN管为例来说明基区电导调制效应：

由基区电中性要求，基区中多子与少子分布相同，即满足

$$\frac{dn_B(x)}{dx} = \frac{dp_B(x)}{dx} \quad \text{和} \quad p_B(x) = p_{B0} + n_B(x) = N_B + n_B(x)$$

考虑到基区大注入的少子对多子分布带来的影响后，基区电导率为

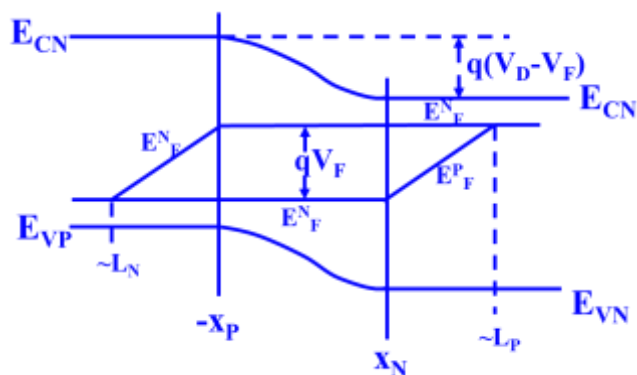
$$\sigma_B = q\mu_{pB}(N_B + n_B(x))$$

考虑大注入效应后  $I_C \approx I_{nE} \propto \exp(qV_{BE}/2kT)$  且  $I_B \approx I_{pE} \propto \exp(qV_{BE}/kT)$

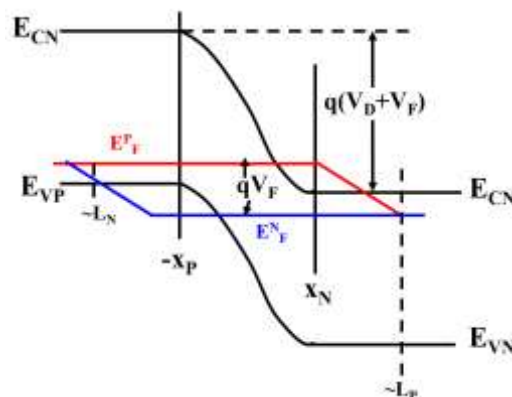
所以可以得到  $\beta_0 \approx \frac{I_C}{I_B} \propto \frac{\exp(qV_{BE}/2kT)}{\exp(qV_{BE}/kT)} \propto \exp\left[-\frac{qV_{BE}}{2kT}\right] \propto I_C^{-1}$

# 第三章习题答案

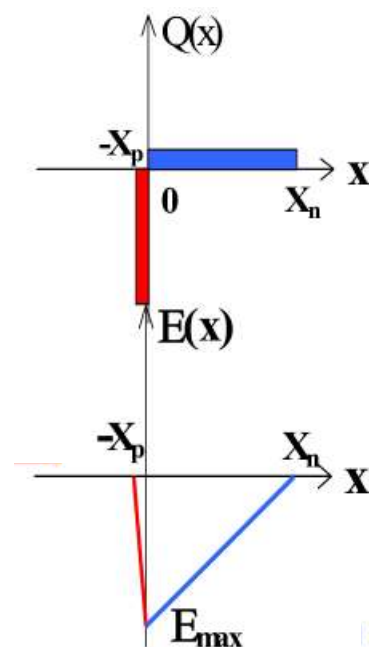
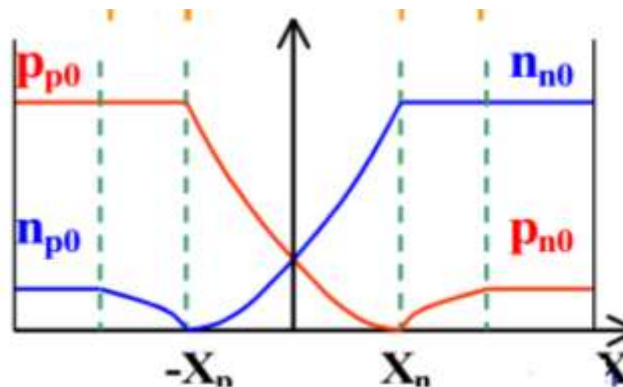
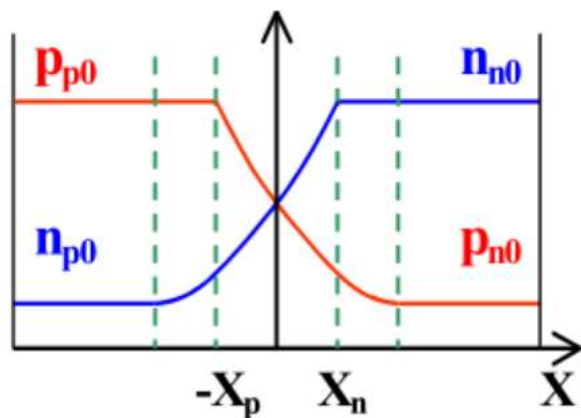
1. 做出 PNP 晶体管在放大状态下的能带图以及电场分布情况（需要体现出准费米能级，发射区和集电区掺杂浓度的区别）。



正偏下的PN结能带图



反偏下的PN结能带图



PN结电场分布

# 第三章习题答案

发射区

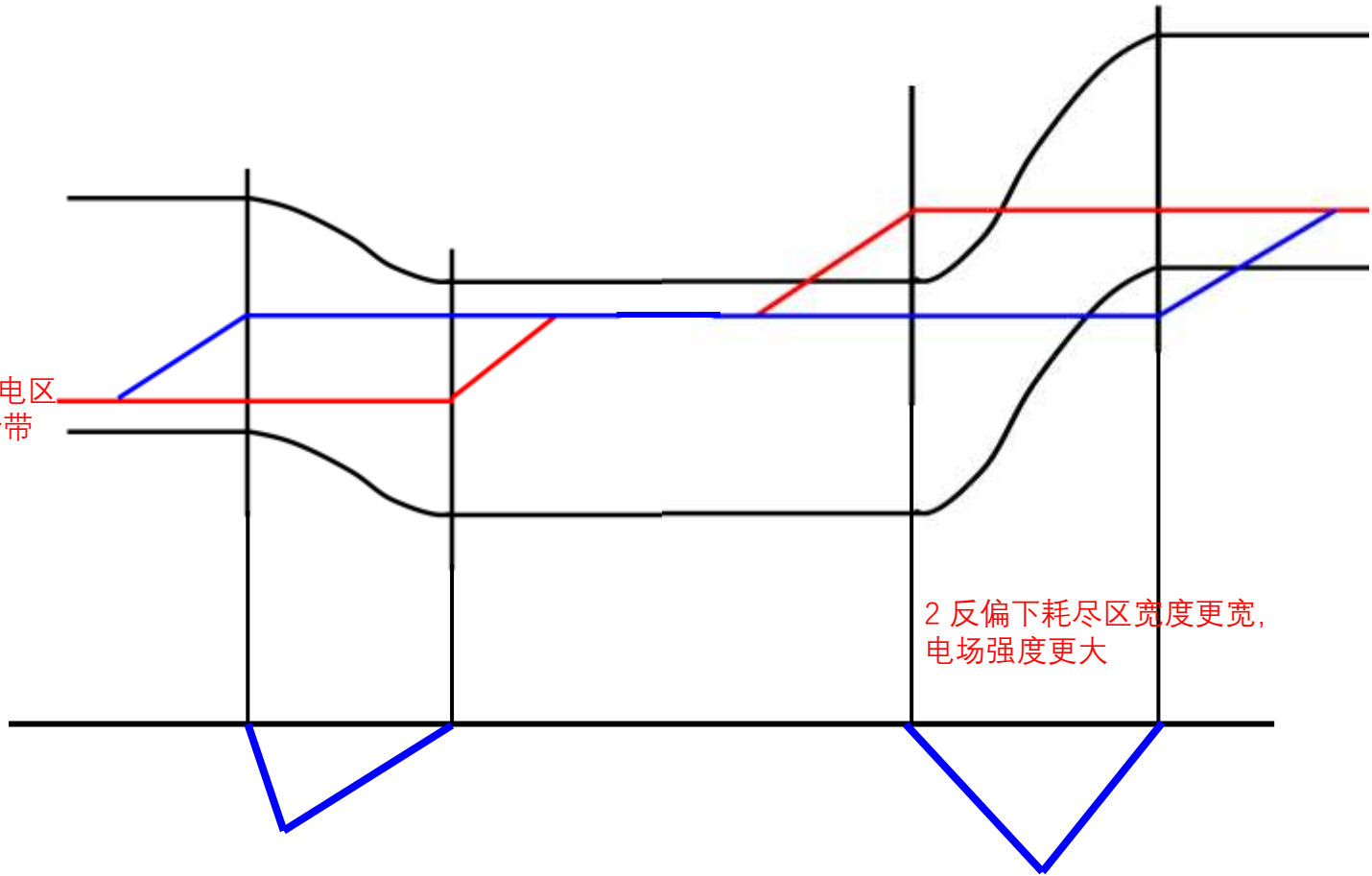
基区

集电区

1 发射区掺杂大于集电区  
费米能级更加靠近价带

2 反偏下耗尽区宽度更宽,  
电场强度更大

电场





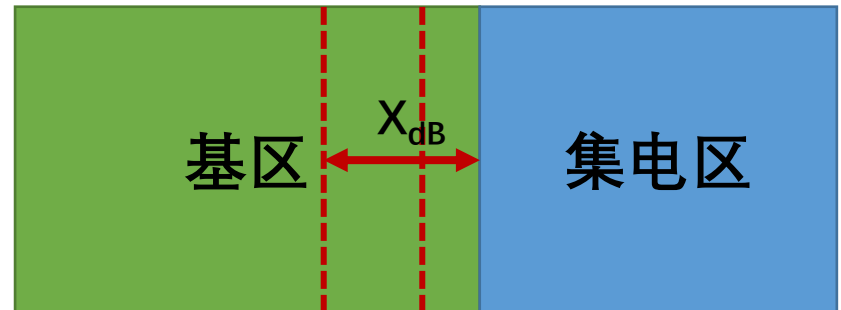
# 第三章习题答案

2. 对于均匀掺杂的硅 NPN 晶体管，基区掺杂浓度  $N_B=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，集电区掺杂浓度  $N_C=2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，发射区掺杂浓度  $N_E=1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，工作温度  $T=300 \text{ K}$ ，硅的本征载流子浓度  $n_i=1.02 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，介电常数为 11.7，冶金结宽度（没有偏压下的基区宽度）为  $0.5 \mu\text{m}$ 。试确定放大状态下，（1）集电结电压为 5 V 和 10 V 下的基区宽度；（2）该器件的穿通电压。

**解：**从图中看出基区变化的原因是C-B结在基区中空间电荷区的变化

由PN结的公式可得集电结在基区中的宽度

$$X_{dB} = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_{CB})}{q} \left[ \frac{N_C}{N_B} \frac{1}{N_B + N_C} \right] \right\}^{1/2}$$



10V ← 5V

代入数据得：

$$\begin{aligned} X_{dB} &= \left\{ \frac{2 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-12} (V_{bi} + V_{CB})}{1.6 \times 10^{-19}} \left[ \frac{2 \times 10^{15}}{5 \times 10^{16}} \times \frac{1}{2 \times 10^{15} \times 10^6 + 5 \times 10^{16} \times 10^6} \right] \right\}^{1/2} \\ &= \{(9.96 \times 10^{-16})(V_{bi} + V_{CB})\}^{1/2} \end{aligned}$$

# 第三章习题答案

1. 内建电势差为：

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_B N_C}{n_i^2} \right) = 0.717V$$

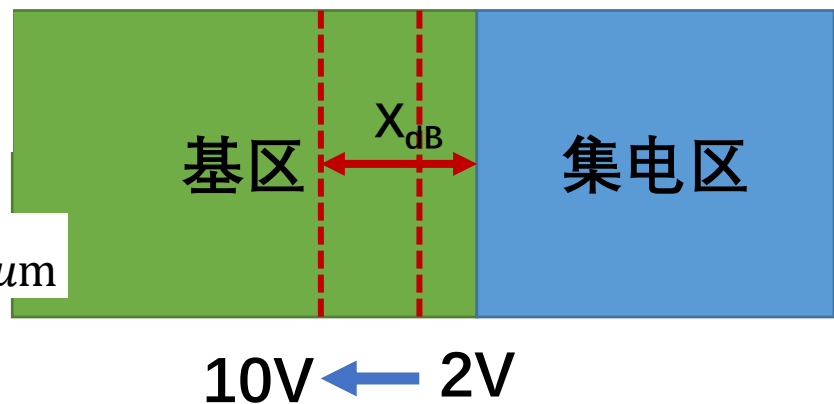
2. 因此代入 $V_{CB}$ 有：

当 $V_{CB} = 5V$ 时：

$$X_{dB} = \{ (9.96 \times 10^{-16}) \times (0.717 + 5) \}^{\frac{1}{2}} = 0.075\mu m$$

当 $V_{CB} = 10V$ 时：

$$X_{dB} = \{ (9.96 \times 10^{-16}) \times (0.717 + 10) \}^{\frac{1}{2}} = 0.103\mu m$$



3. 因此计算出中性基区的宽度分别为：

$$\text{当 } V_{CB} = 5V \text{ 时: } x_B = 0.5 - 0.075 = 0.425\mu m$$

$$\text{当 } V_{CB} = 10V \text{ 时: } x_B = 0.5 - 0.103 = 0.397\mu m$$

所以当C-B结电压从5V变化到10V时，中性基区宽度从0.425 $\mu m$ 变化到0.397 $\mu m$ 。

4. 当基区宽度变为0时，器件穿通，即

$$X_{dB} = \{ (9.96 \times 10^{-16}) \times (0.717 + V_{pt}) \}^{\frac{1}{2}} = 0.5\mu m$$

得出  $V_{pt} = 250V$

# 第三章习题答案

2. 以下列参数计算一个硅双极晶体管在  $T=300\text{K}$  时的共发射极电流增益。

$$D_E = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$x_B = 0.70 \text{ } \mu\text{m}$$

参数计算如下：

$$D_B = 25 \text{ cm}^2/\text{s}$$

$$x_E = 0.50 \text{ } \mu\text{m}$$

$$\tau_{E0} = 1 \times 10^{-7} \text{ s}$$

$$N_E = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$\tau_{B0} = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$$

$$N_B = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$J_{r0} = 5 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$$

$$V_{BE} = 0.65 \text{ V}$$

$$p_{E0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{1 \times 10^{18}} = 2.25 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_{B0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{1 \times 10^{16}} = 2.25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$L_E = \sqrt{D_E \tau_{E0}} = 10^{-3} \text{ cm}$$

$$L_B = \sqrt{D_B \tau_{B0}} = 3.54 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

解：共发射极电流增益公式（一般考虑  $W_b \ll L_{nb}$ ）

$$\alpha_T = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \text{sech}\left(\frac{W_b}{L_{nb}}\right) \approx 1 - \frac{W_b^2}{2L_{nb}^2}$$

$$\gamma = \left(1 + \frac{D_{pe}}{D_{nb}} \frac{p_{ne0}}{n_{pb0}} \frac{W_b}{L_{pe}}\right)^{-1}$$

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} \longrightarrow \alpha_0 = \alpha_T \gamma \longrightarrow$$

所以有：

$$\alpha_T = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \text{sech}\left(\frac{W_b}{L_{nb}}\right) \approx 1 - \frac{W_b^2}{2L_{nb}^2} = 1 - \frac{(0.7 \times 10^{-4})^2}{2 \times (3.54 \times 10^{-3})^2} = 0.9998$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{D_E p_{E0} W_b}{D_B n_{B0} L_{pe}}} = \frac{1}{1 + \frac{10}{25} \times \frac{2.25 \times 10^2}{2.25 \times 10^4} \times \frac{0.7}{10}} = 0.9997$$

$$\alpha_0 = \alpha_T \gamma = 0.9995$$

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} = 1999$$

## 4. 提高共基极直流电流增益的一般原则

- ◆ 晶体管的电流传输作用是晶体管具有放大能力的基础，晶体管具有放大作用需要满足下列条件：发射结与集电结要相距很近即基区宽度要远远小于电子扩散长度；发射结正偏；集电结反偏。这样才会有电流传输过程，即晶体管工作在放大区。
- ◆ 晶体管的作用是将发射极电流最大限度地传输到集电极。为提高 $\alpha_0$ ，要尽可能减小输运过程中的损失。主要方法有：
  - (1) 提高发射效率 $\gamma$ 。
  - (2) 提高基区传输因子 $\alpha_T$ 。

第一二讲 27页

## 5. 提高共基极直流电流增益的主要措施

$$\alpha_T = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \text{sech}\left(\frac{W_b}{L_{nb}}\right) \approx 1 - \frac{W_b^2}{2L_{nb}^2}$$

第一二讲 29页

$$\gamma = \left[ 1 + \frac{D_{pe}}{D_{nb}} \frac{p_{ne0}}{n_{pb0}} \frac{L_{nb}}{L_{pe}} \tanh\left(\frac{W_b}{L_{nb}}\right) \right]^{-1}$$

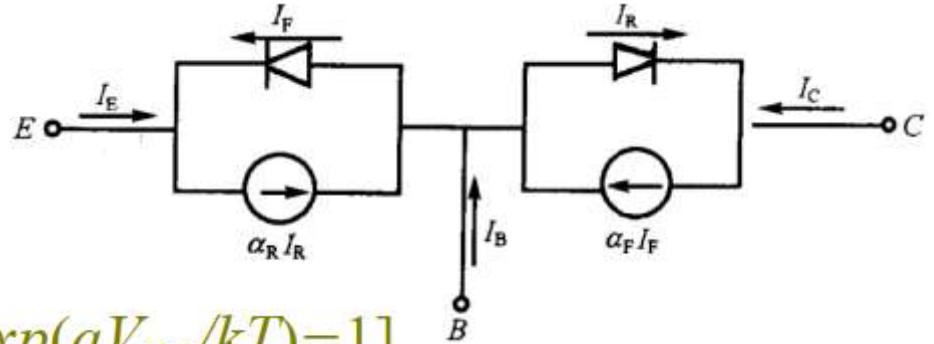
根据 $\alpha_T$ 和 $\gamma$ 的表达式可提出提高电流增益的主要措施有：

- ◆  $\alpha_T$ 表达式中 $W_b$ 项为基区宽度，**减小基区宽度**可增大 $\alpha_T$ 。
- ◆ **提高基区载流子寿命和迁移率**，以增大载流子扩散长度 ( $L_{nb}^2 = D_{nb} \tau_{nb}$ )，使 $\alpha_T$ 和 $\gamma$ 均增大。



# 第三章习题答案-第二次作业

1. 一个npn型双极晶体管工作在放大状态下。运用E-M模型，试将基极电流 $I_B$ 用 $\alpha_F$ ,  $\alpha_R$ ,  $I_{F0}$ ,  $I_{R0}$ 和 $V_{BE}$ 表示出来。



解：由E-M模型的基本方程

$$I_E = -I_{F0}[\exp(qV_{BE}/kT) - 1] + \alpha_R I_{R0}[\exp(qV_{BC}/kT) - 1]$$

$$I_C = -I_{R0}[\exp(qV_{BC}/kT) - 1] + \alpha_F I_{F0}[\exp(qV_{BE}/kT) - 1]$$

由图可知，根据基尔霍夫电流定律

$$I_B = -(I_E + I_C) = -\left\{(\alpha_F I_{F0} - I_{F0})\left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1\right] + (\alpha_R I_{R0} - I_{R0})\left[\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1\right]\right\}$$

放大状态下， $V_{BC} < 0$ ，对上式作近似有

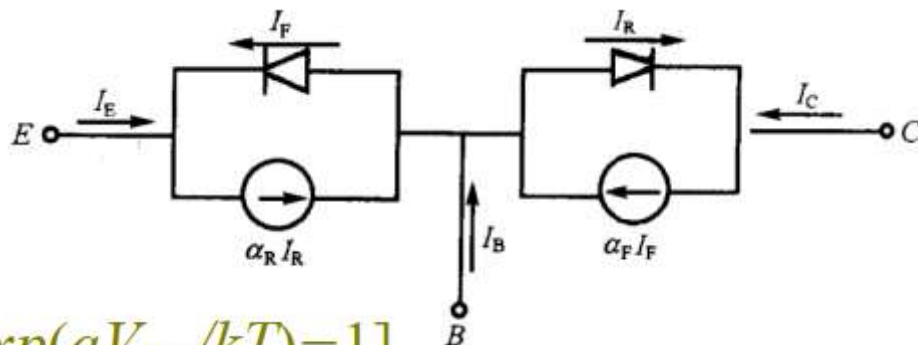
$$I_B = -\left\{(\alpha_F I_{F0} - I_{F0})\left[\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1\right] - (\alpha_R I_{R0} - I_{R0})\right\}$$

# 第三章习题答案

2. 考虑E-M模型，将基极悬空，以便使  $I_B=0$ 。证明，当放大状态下，有  $I_C =$

$$I_{CEO} = I_{R0} \frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F}$$

解：根据E-M模型的基本方程



$$I_E = -I_{F0} [\exp(qV_{BE}/kT) - 1] + \alpha_R I_{R0} [\exp(qV_{BC}/kT) - 1]$$

$$I_C = -I_{R0} [\exp(qV_{BC}/kT) - 1] + \alpha_F I_{F0} [\exp(qV_{BE}/kT) - 1]$$

当  $I_B=0$  时，根据E-M模型的等效电路图得

$$I_E = -I_C$$



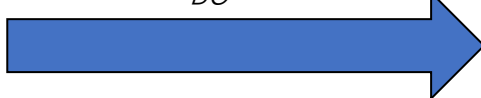
$$-I_{F0} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] + \alpha_R I_{R0} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right] = I_{R0} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right] - \alpha_F I_{F0} \left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$V_{BC} < 0$$



$$\left[ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] = \frac{(\alpha_R - 1)I_{R0}}{\alpha_F I_{F0} - I_{F0}}$$

代入  $I_C$  的表达式，  
并考虑  $V_{BC} < 0$  做近似



$$I_C = I_{R0} \frac{1 - \alpha_F \alpha_R}{1 - \alpha_F}$$

## 第三章习题答案

3. 考虑一个npn型硅晶体管,  $T=300\text{K}$ 。假设其参数如下, 分别计算特征频率 $f_T$ 和截止频率 $f_\beta$ 。

$$I_E = 0.5\text{mA}, W_B = 0.7\mu\text{m}, C_{jC} = 0.08\text{pF}, C_{jE} = 0.8\text{pF}, D_n = 25\text{cm}^2/\text{s}, r_c = 30\Omega,$$

$$\beta_0 = 50$$

解: 特征频率 $f_T$ 表达式为:

$$f_T = \beta_0 f_\beta = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_F + \frac{kT}{qI_C} C_{jE} + \left(\frac{kT}{qI_C} + r_c\right) C_{jC}}$$

$$\tau_F = \tau_B = \frac{x_B^2}{2D_n} = \frac{(0.7 \times 10^{-4})^2}{2 \times 25} = 9.8 \times 10^{-11}\text{s}$$

$$I_C = \beta_0 I_B = 50 I_B$$

$$I_C + I_B = I_E = 0.5 \times 10^{-3}\text{A}$$

代入所有参量以及已知参数可得:

$$I_C = 0.49 \times 10^{-3}\text{A}$$

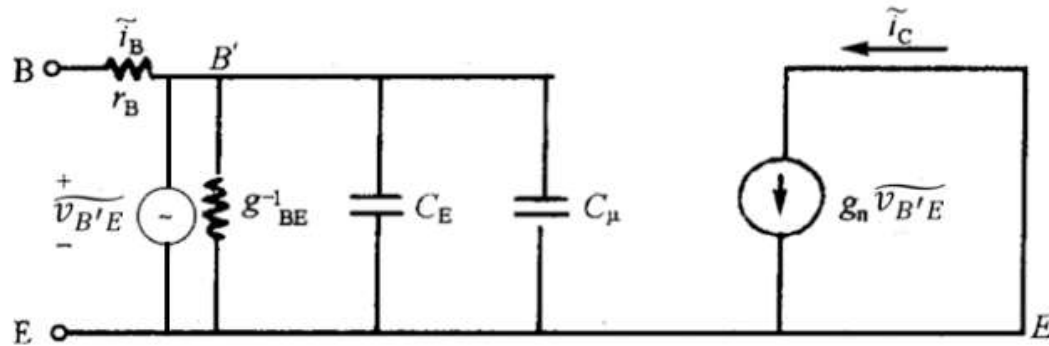
$$f_T = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{9.8 \times 10^{-11} + \frac{0.026}{0.49 \times 10^{-3}} \times 0.8 \times 10^{-12} + \left(\frac{0.026}{0.49 \times 10^{-3}} + 30\right) \times 0.08 \times 10^{-12}} = 1.08 \times 10^9\text{Hz}$$

$$f_\beta = \frac{f_T}{\beta_0} = \frac{1.08 \times 10^9}{50} = 2.16 \times 10^7\text{Hz}$$

# 第三章习题答案

4. 试确定小信号电流增益 $\beta$ 下降到其低频的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率。所有用到的物理量均用课件上的符号表示，只需算出表达式，不需算出具体数值。

解：利用高频小信号等效电路求出电流增益 $\beta$ 与频率的关系



$$\beta = \frac{\frac{g_m}{C_E + C_{\mu}}}{\frac{g_{BE}}{C_E + C_{\mu}} + j\omega} = \frac{\frac{g_m}{g_{BE}}}{1 + j\omega \frac{C_E + C_{\mu}}{g_{BE}}} = \frac{\beta_0}{1 + j\omega/\omega_{\beta}} = \frac{\beta_0}{1 + jf/f_{\beta}}$$

$$\beta_0 = \frac{g_m}{g_{BE}}$$

$$\omega_{\beta} = \frac{g_{BE}}{C_E + C_{\mu}}$$

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi} \omega_{\beta}$$



## 第三章习题答案

所以电流增益 $\beta$ 的大小为  $|\beta| = \beta_0 / \sqrt{1 + (f/f_\beta)^2}$

当 $|\beta|$ 下降到 $\beta_0/\sqrt{2}$ 时

$$f = f_\beta$$

因为 $f_\beta$ 和 $\omega_\beta$ 间的关系为

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi} \omega_\beta$$

$\omega_\beta$ 的表达式为

$$\omega_\beta = \frac{g_{BE}}{C_E + C_\mu}$$

所以 $f_\beta$ 的表达式为

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi} \omega_\beta = \frac{1}{2\pi} \frac{g_{BE}}{C_E + C_\mu}$$

## 第三章习题答案

5. 在一个特殊的双极晶体管中，基区渡越时间占总时间的20%。基区宽度为 $0.5\mu\text{m}$ ，基区扩散系数为 $D_B = 20\text{cm}^2/\text{s}$ 。试确定截止频率。

解：特征频率 $f_T$ 的表达式为

$$f_T = \beta_0 f_\beta = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_F + \frac{kT}{qI_C} C_{jE} + (\frac{kT}{qI_C} + r_C) C_{jC}}$$

表达式中的三项之和为总时间常数，且 $\tau_F \approx \tau_B$ ， $\tau_B$ 可以通过下面式子求得

$$\tau_B = \frac{W^2}{2D_B} = \frac{(0.5 \times 10^{-4})^2}{2 \times 20} = 6.25 \times 10^{-11} \text{s}$$

由题意可得总时间常数为

$$\tau = \frac{6.25 \times 10^{-11}}{0.2} = 3.125 \times 10^{-10} \text{s}$$

所以可以计算得到特征频率 $f_T$ 的值为

$$f_T = \frac{1}{2\pi} \times \frac{1}{3.125 \times 10^{-10}} = 509 \text{MHz}$$

## 第三章习题答案

6.(a) 如果由于制造的误差，一组晶体管的中性基区宽度变化范围为  $0.800 \leq x \leq 1.00 \mu\text{m}$ ，计算基区输运系数  $\alpha_T$  的变化范围。假定  $L_B = 1.414 \times 10^{-3} \text{cm}$ 。

(b) 用(a)中的计算结果，假定  $\gamma = 0.9967$ ，计算共发射极电流增益的变化范围

解：

(a)  $\alpha_T$  的表达式可以写成 
$$\alpha_T = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} = \text{sech}\left(\frac{x}{L_B}\right) \approx 1 - \frac{x^2}{2L_B^2}$$

将  $L_B$  及  $x$  的取值范围代入，可得到  $\alpha_T$  的变化范围为

$$0.9975 \leq \alpha_T \leq 0.9984$$

(b) 要计算共发射极电流增益可以先计算共基极电流增益  $\alpha_0 = \alpha_T \gamma$

所以代入  $\gamma = 0.9967$ ，则  $\alpha_0$  的变化范围为  $0.9942 \leq \alpha_0 \leq 0.9951$

共发射极电流增益  $\beta_0$  与共基极电流增益  $\alpha_0$  之间存在以下关系 
$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}$$

将  $\alpha_0$  的变化范围代入上式可以得到  $\beta_0$  的变化范围为

$$171.41 \leq \beta_0 \leq 203.08$$