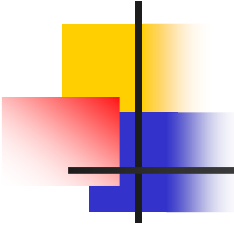


双极晶体管

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY
V1.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong
xyhan5151@yahoo.com.cn www.dianzichan.com



第10章双极晶体管

- 10. 1双极晶体管的工作原理
- 10. 2少子的分布
- 10. 3低频共基极电流增益
- 10. 4非理想效应
- 10. 5等效电路模型
- 10. 6频率上限
- 10. 7大信号开关

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 结构和符号

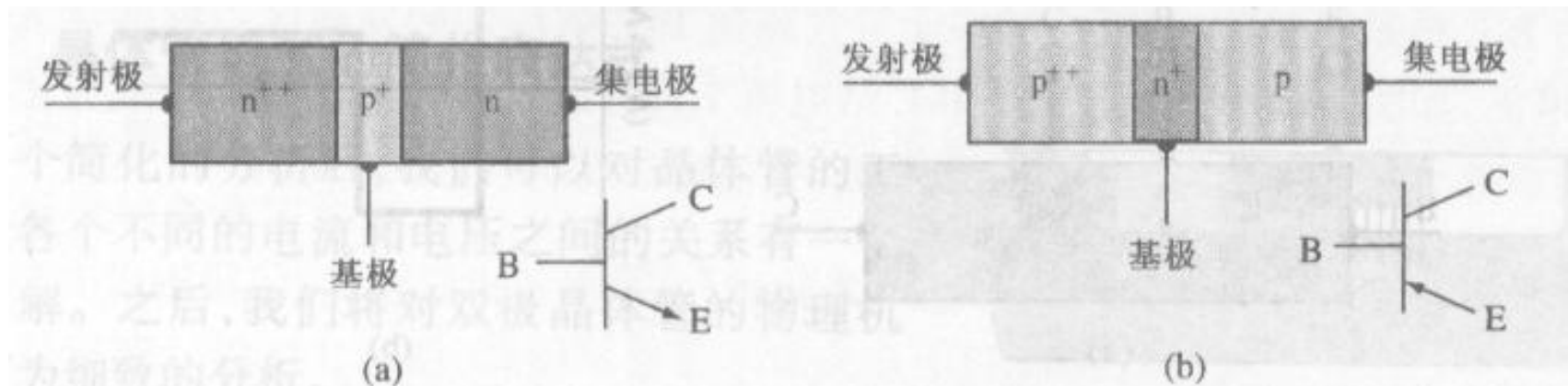
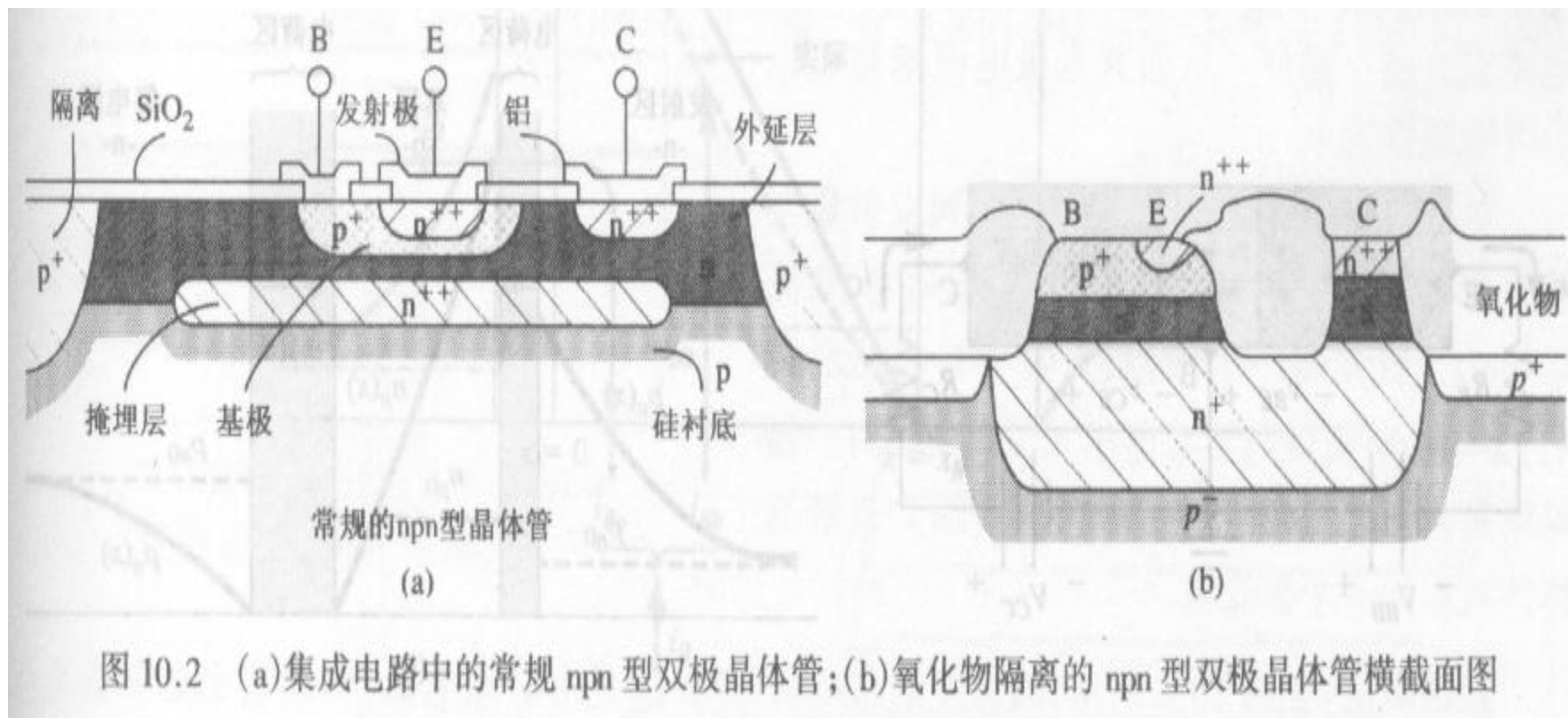


图 10.1 (a) npn 型和 (b) pnp 型双极晶体管的简化结构图及电路符号

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 剖面图



10.1 双极晶体管的工作原理

■ 杂质浓度

10^{19} cm^{-3} , 10^{17} cm^{-3} 和 10^{15} cm^{-3}

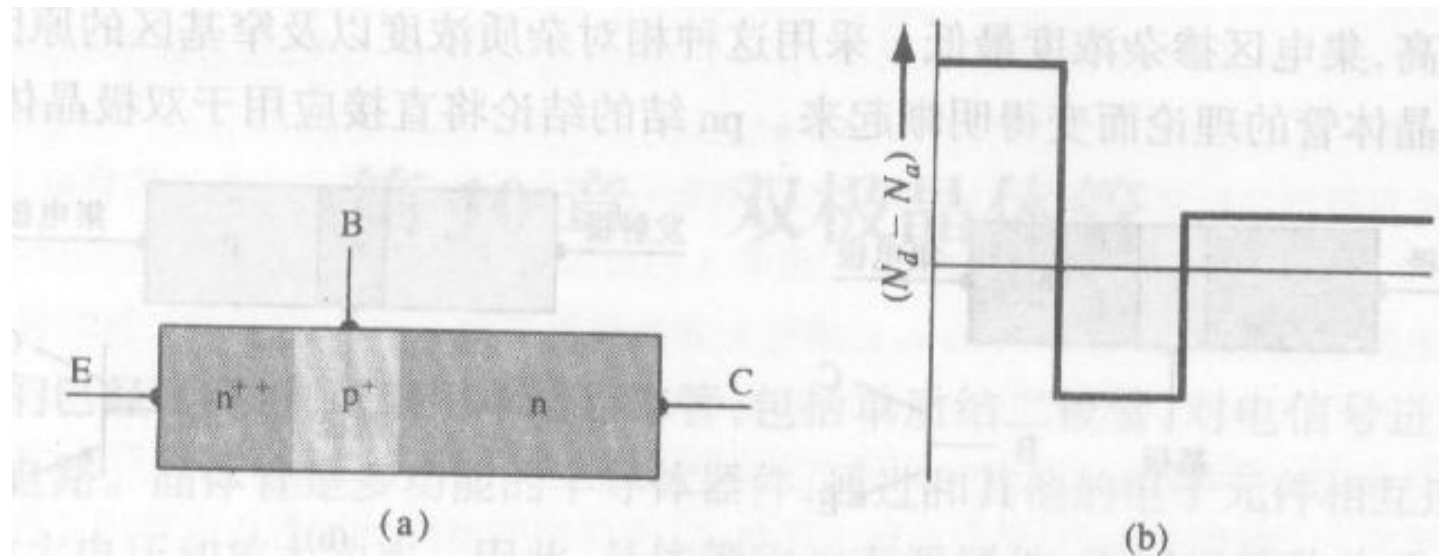
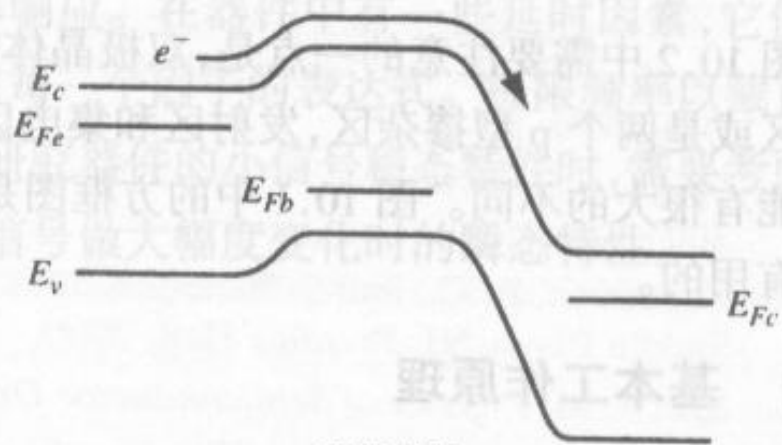
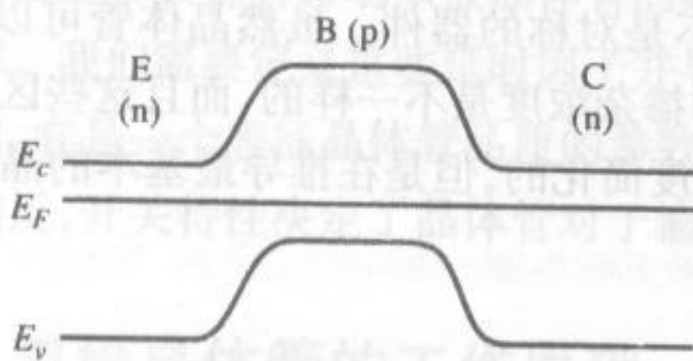
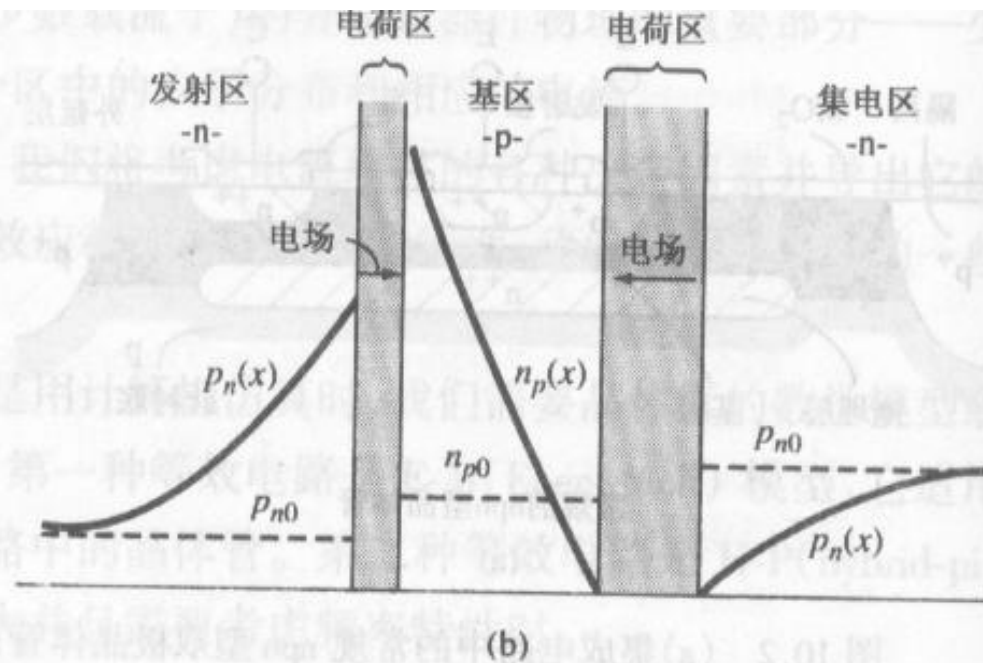
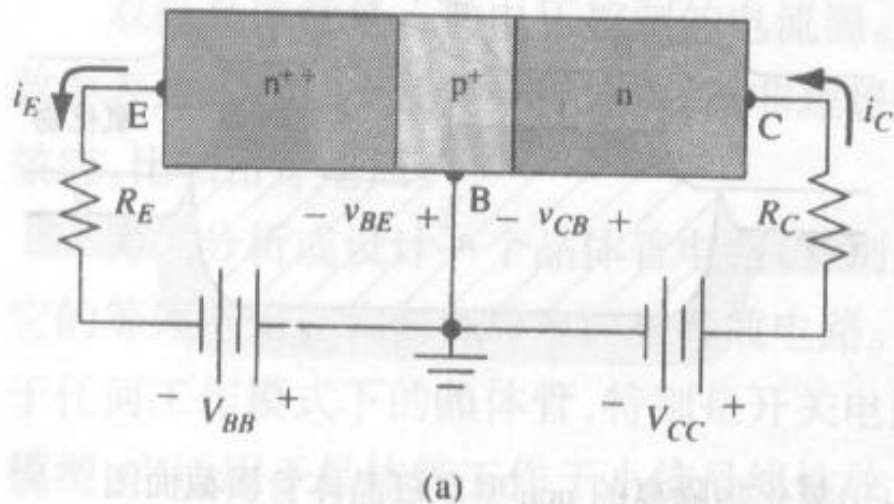


图 10.3 均匀掺杂的 npn 型双极晶体管的理想化掺杂浓度分布图

•正向有源模式



(c)

图 10.4 (a) npn 型双极晶体管工作在正向有源区时的偏置情况; (b) 工作于正向有源区时, npn 型双极晶体管中少子的分布; (c) 在零偏和在正向有源区时, npn 型双极晶体管的能带图

回顾7.1 pn结的基本结构

- 空间电荷区=耗尽区（没有可动电荷）

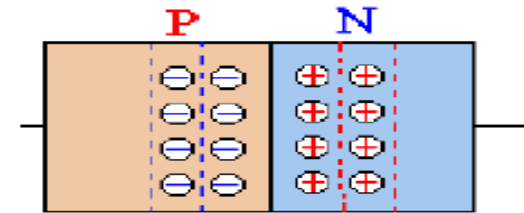
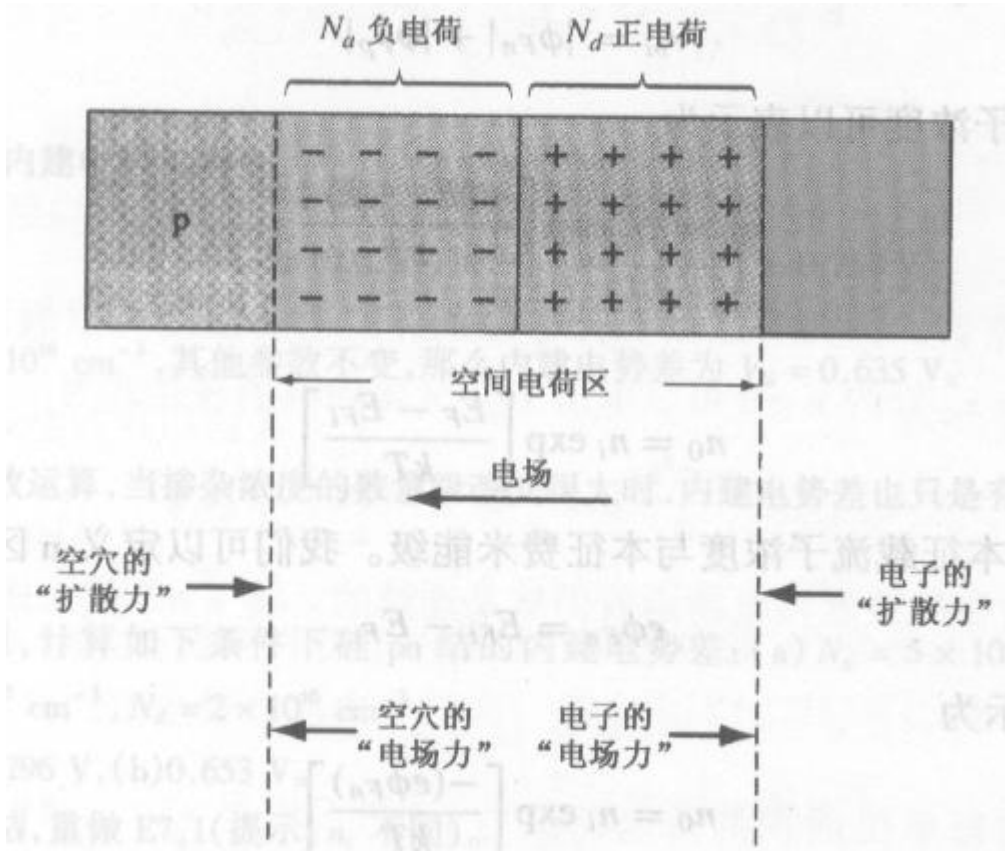
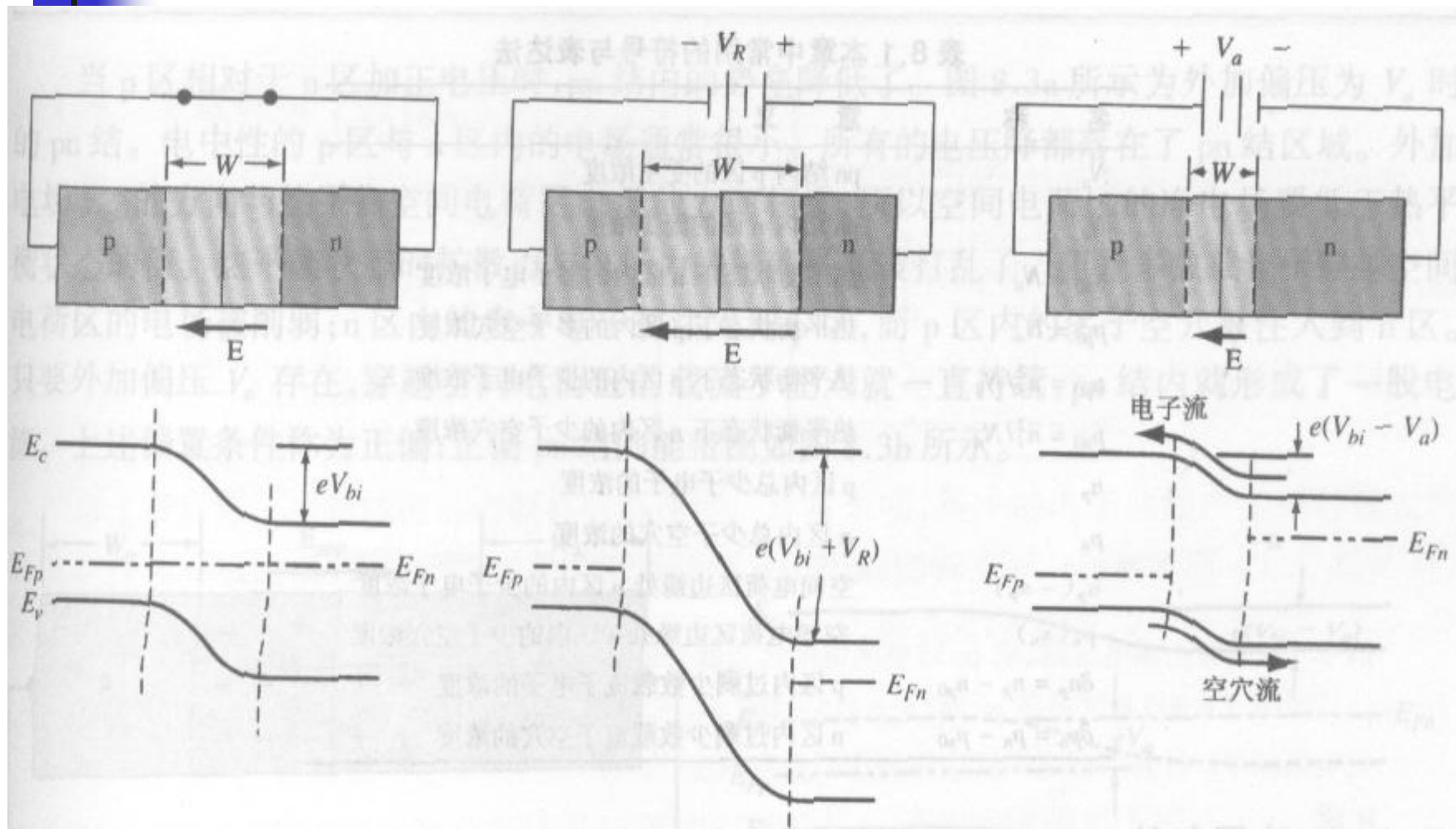


图 7.2 空间电荷区、电场,以及施加在载流子上的两种力

回顾8.1 pn结电流

定性描述



10.1 双极晶体管的工作原理

- 截面图：注入和收集

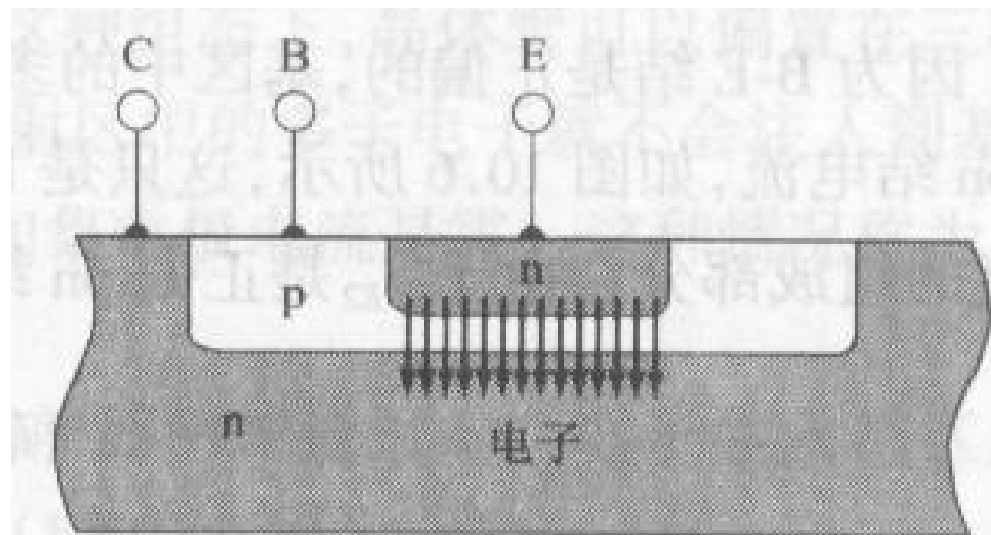
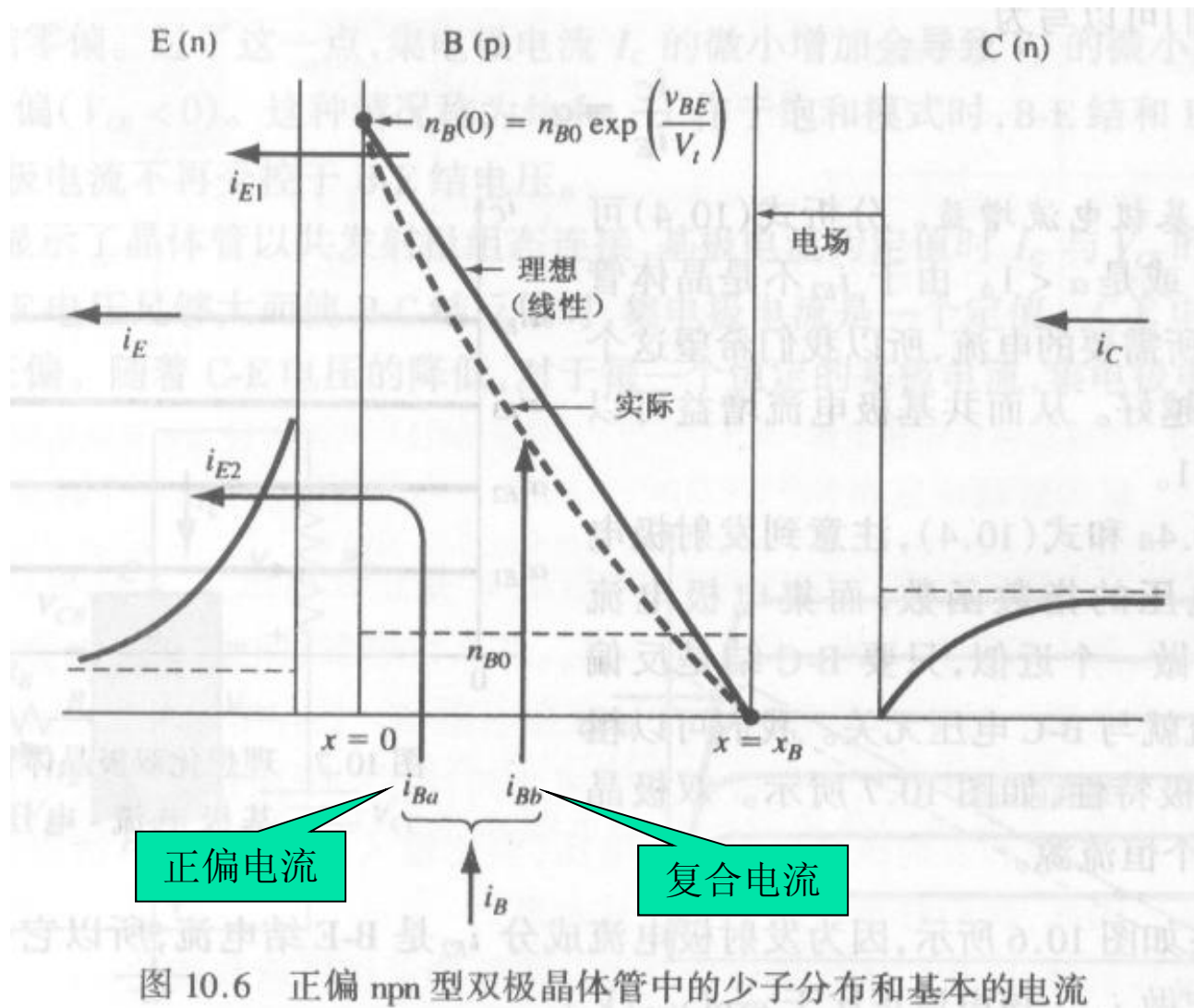


图 10.5 npn 型双极晶体管的横截面图, 该图显示了正向有源模式下电子的注入和收集

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 简化电流



10.1 双极晶体管的工作原理

■ 集电极电流

集电极电流：假定在基区中电子为理想化的线性分布，集电极电流可以以扩散电流的形式写出如下：

$$i_C = eD_n A_{BE} \frac{dn(x)}{dx} = eD_n A_{BE} \left[\frac{n_B(0) - 0}{0 - x_B} \right] = \frac{-eD_n A_{BE}}{x_B} \cdot n_{B0} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_i}\right) \quad (10.1)$$

这里 A_{BE} 是 B-E 结的横截面积， n_{B0} 是基区中的热平衡电子浓度， V_i 是热电压。电子的扩散沿 $+x$ 方向，因此习惯上电流沿 $-x$ 方向。仅考虑大小，式(10.1)可写为

$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_i}\right) \quad (10.2)$$

集电极电流由基极和发射极之间的电压控制；也就是说，器件一端的电流由加到另外两端的电压控制。正如我们所提到的，这就是晶体管的基本工作原理。

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 发射极电流

$$i_{E2} = I_{S2} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$i_E = i_{E1} + i_{E2} = i_C + i_{E2} = I_{SE} \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_T}\right)$$

$$\frac{i_C}{i_E} \equiv \alpha$$

α 称为共基极电流增益

I_C, I_E 均正比于 v_{BE}/V_T ,
因此电流之比为常数

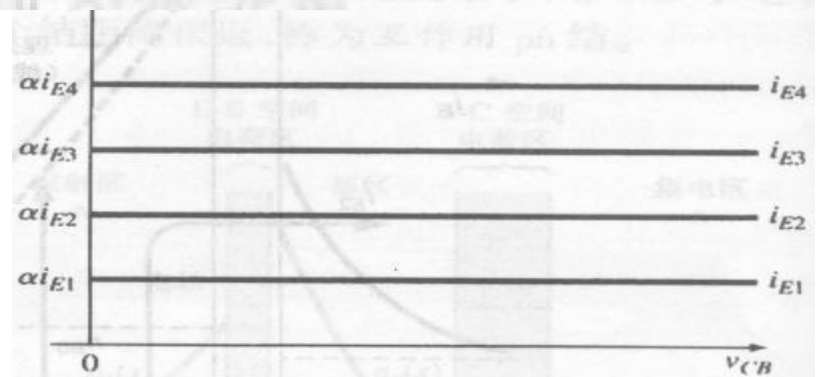
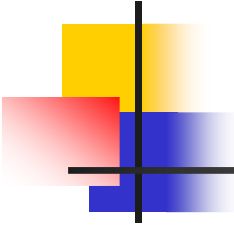


图 10.7 理想化双极晶体管的共基极电流 - 电压特性



10.1 双极晶体管的工作原理

- 基极电流

$$\frac{i_C}{i_B} \equiv \beta \quad \beta \text{ 称为共发射极电流增益}$$

i_{B_a} 。该电流正比于 $\exp(v_{BE}/V_t)$

i_{B_b} 也正比于 $\exp(v_{BE}/V_t)$

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 工作模式

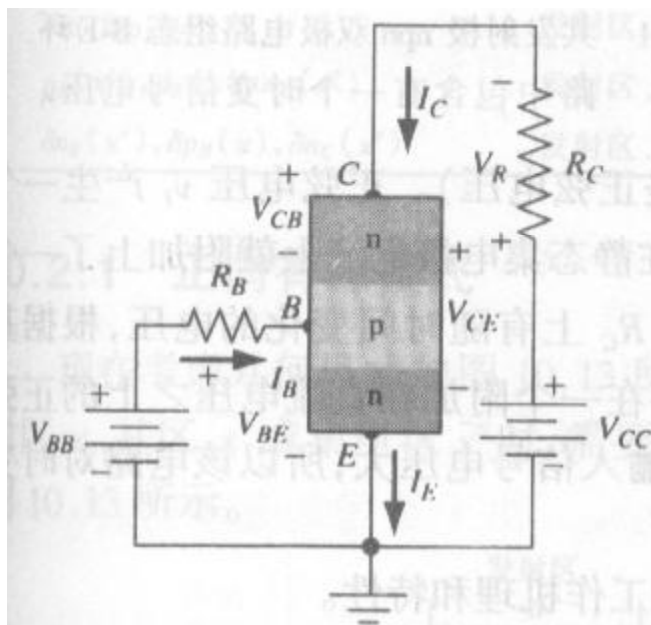


图 10.8 共发射极电路中的 npn 型双极晶体管

$I_C = 0$ 时, 晶体管处于截止区
当基极电流变化时, 集电极电流没有变化, 则处于饱和区
当关系式 $I_C = \beta I_B$ 成立时, 晶体管处于正向有源区

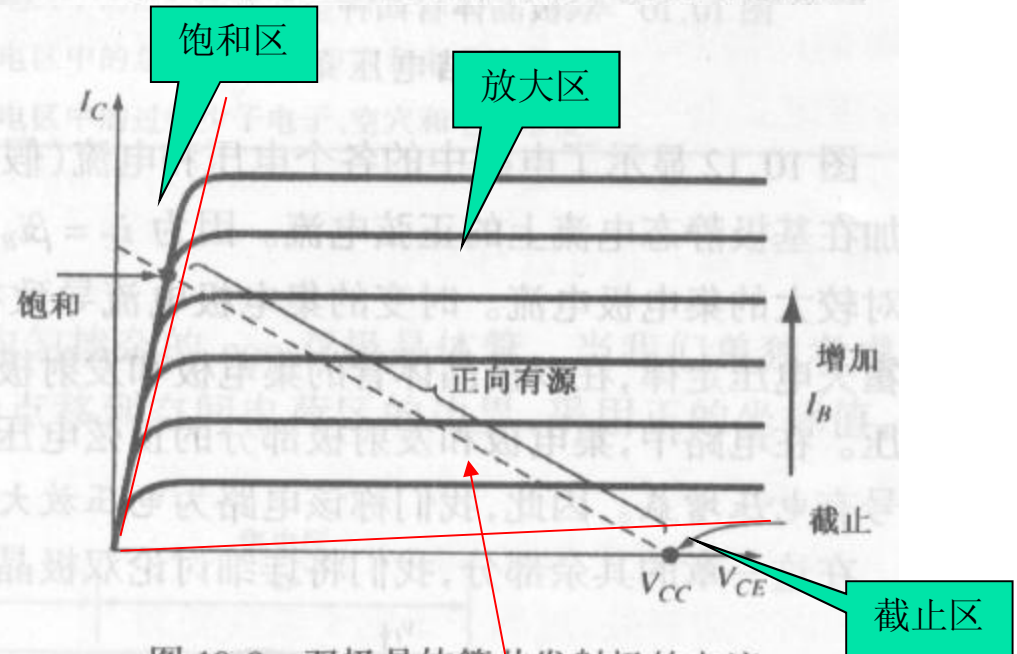
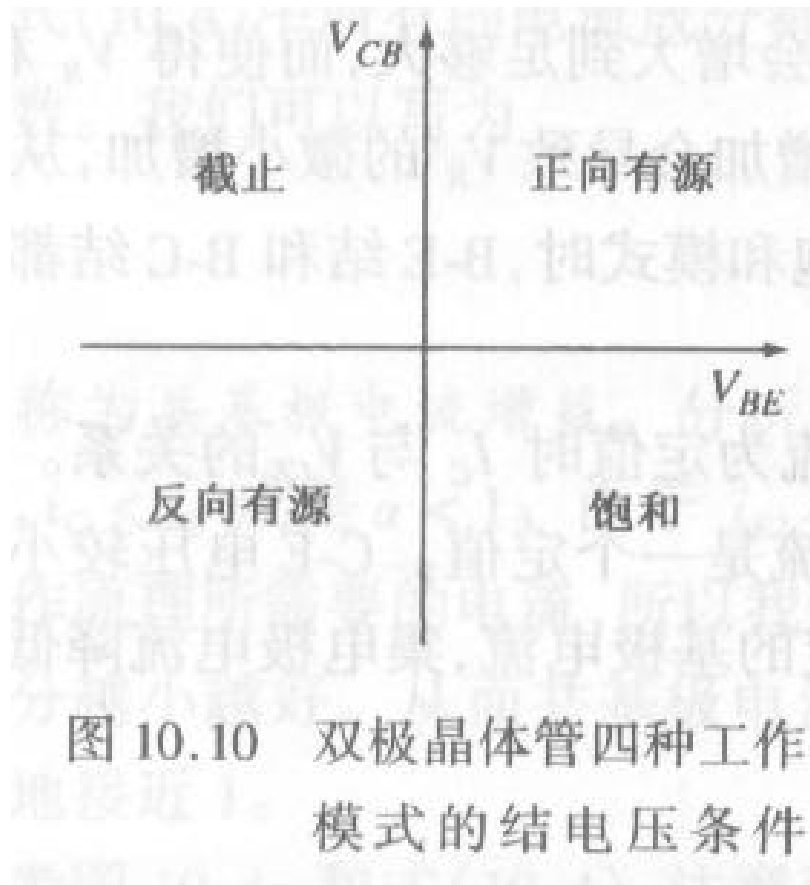


图 10.9 双极晶体管共发射极的电流电压特性, 添加了负载线

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

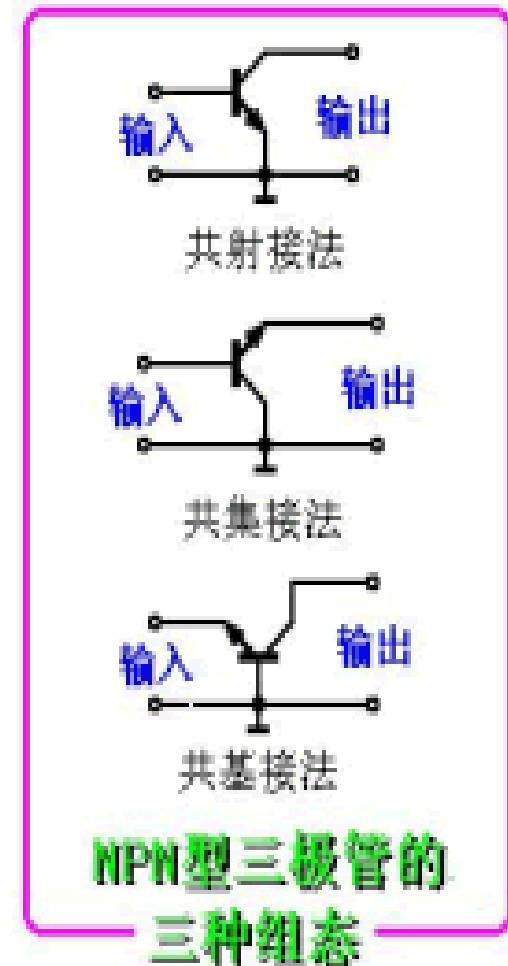
10.1 双极晶体管的工作原理

- 四种工作模式
- 正反
- 反反
- 反正
- 正正



三极管的三种连接方式

- 三极管在电路中的连接方式有三种：
- ①共基极接法；
- ②共发射极接法，
- ③共集电极接法。
- 共什么极是指电路的输入端及输出端以这个极作为公共端。
- 必须注意，无论那种接法，为了使三极管具有正常的电流放大作用，都必须外加大小和极性适当的电压。
- 即必须给发射结加正向偏置电压，发射区才能起到向基区注入载流子的作用；
- 必须给集电结加反向偏置电压（一般几~几十伏），在集电结才能形成较强的电场，才能把发射区注入基区，并扩散到集电结边缘的载流子拉入集电区，使集电区起到收集载流子的作用。



图Z115 三种连接方式

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 共射放大电路

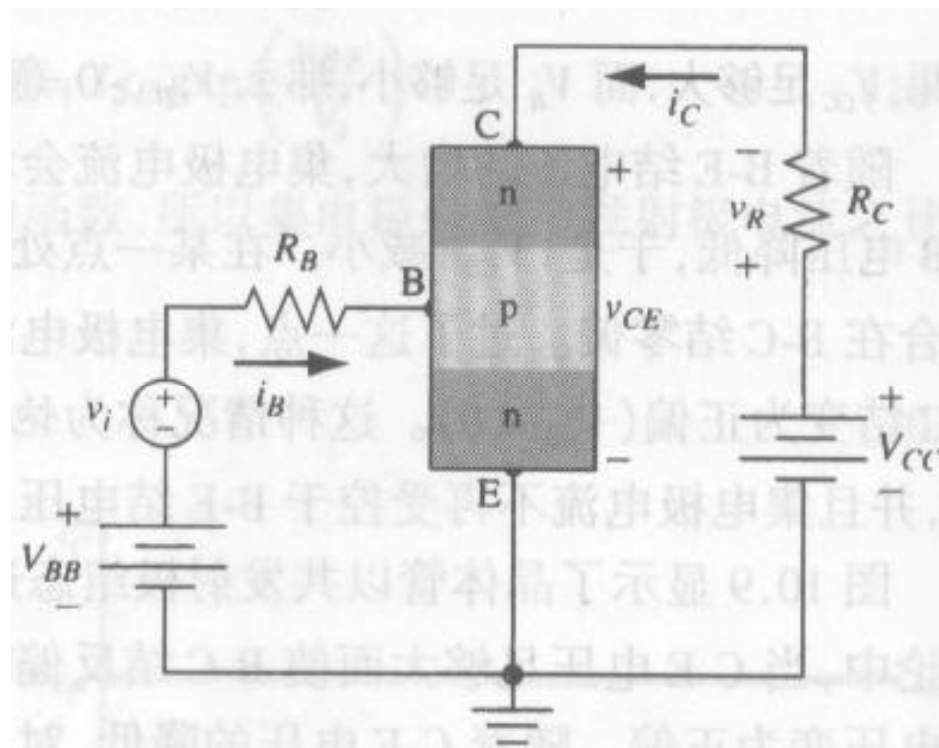


图 10.11 共发射极 npn 双极电路组态 B-E 环路中包含有一个时变信号电压 v_i

10.1 双极晶体管的工作原理

■ 放大电路波形

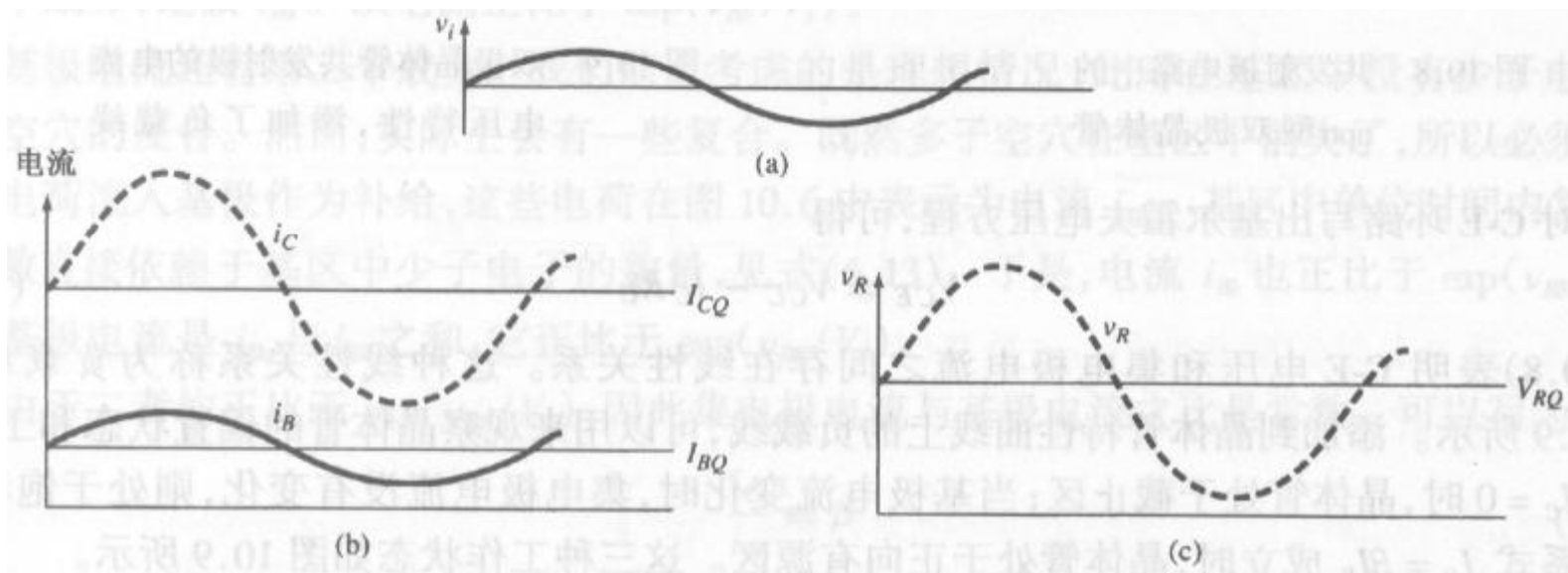


图 10.12 图 10.11 所示电路中的电流和电压:(a)输入正弦信号电压;(b)附加在直流电流之上的正弦基极和集电极电流;(c)附加在直流电压之上的电阻 R_C 的正弦电压

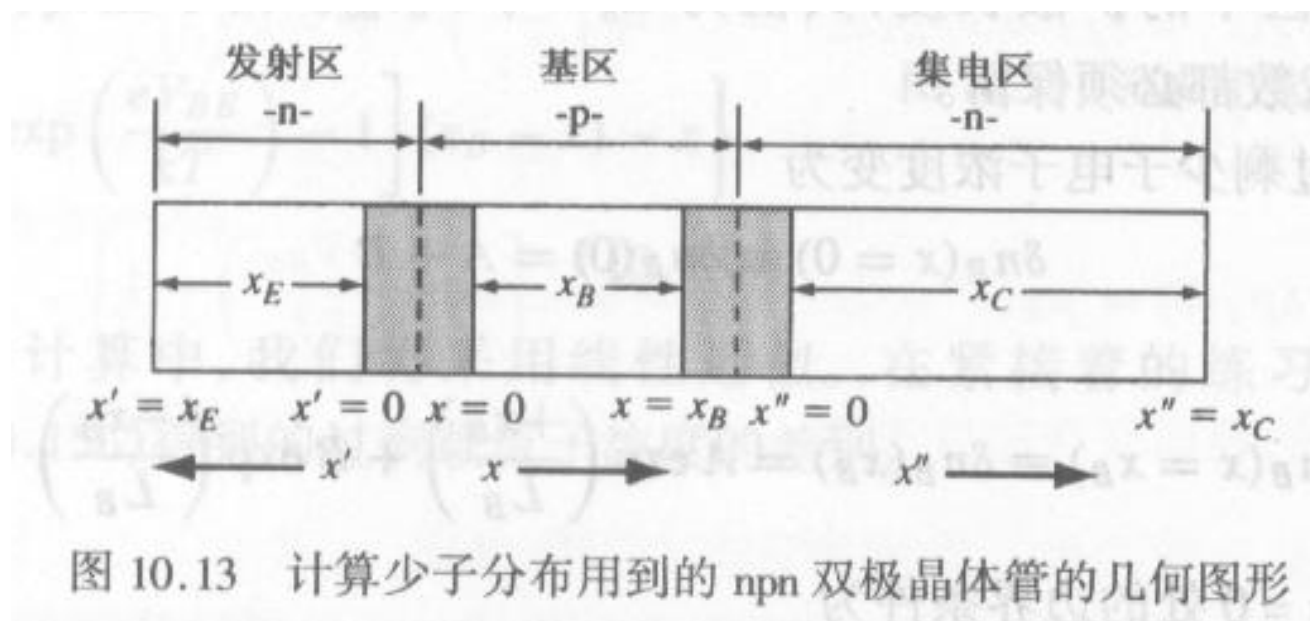
10.2 少子的分布

表 10.1 双极晶体管的分析中用到的符号

符 号	定 义
nnp 和 npn 晶体管	
N_E, N_B, N_C	发射区、基区和集电区中的掺杂浓度
x_E, x_B, x_C	电中性发射区、基区和集电区的宽度
D_E, D_B, D_C	发射区、基区和集电区中的少子扩散系数
L_E, L_B, L_C	发射区、基区和集电区中的少子扩散长度
$\tau_{E0}, \tau_{B0}, \tau_{C0}$	发射区、基区和集电区中的少子寿命
npn 晶体管	
p_{E0}, n_{B0}, p_{C0}	发射区、基区和集电区中的热平衡少子空穴、电子和空穴浓度
$p_E(x'), n_B(x), p_C(x'')$	发射区、基区和集电区中的总少子空穴、电子和空穴浓度
$\delta p_E(x'), \delta n_B(x), \delta p_C(x'')$	发射区、基区和集电区中的过剩少子空穴、电子和空穴浓度
pnp 晶体管	
n_{E0}, p_{B0}, n_{C0}	发射区、基区和集电区中的热平衡少子电子、空穴和电子浓度
$n_E(x'), p_B(x), n_C(x'')$	发射区、基区和集电区中的总少子电子、空穴和电子浓度
$\delta n_E(x'), \delta p_B(x), \delta n_C(x'')$	发射区、基区和集电区中的过剩少子电子、空穴和电子浓度

10.2 少子的分布

■ 正向有源模式



10.2 少子的分布

■ 浓度

$$\delta p_E(x') \approx \frac{p_{E0}}{x_E} \left[\exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] (x_E - x')$$

$$\delta n_B(x) \approx \frac{n_{B0}}{x_B} \left\{ \left[\exp\left(\frac{eV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right] (x_B - x) - x \right\}$$

$$\delta p_C(x'') = -p_{C0} \exp\left(\frac{-x''}{L_C}\right)$$

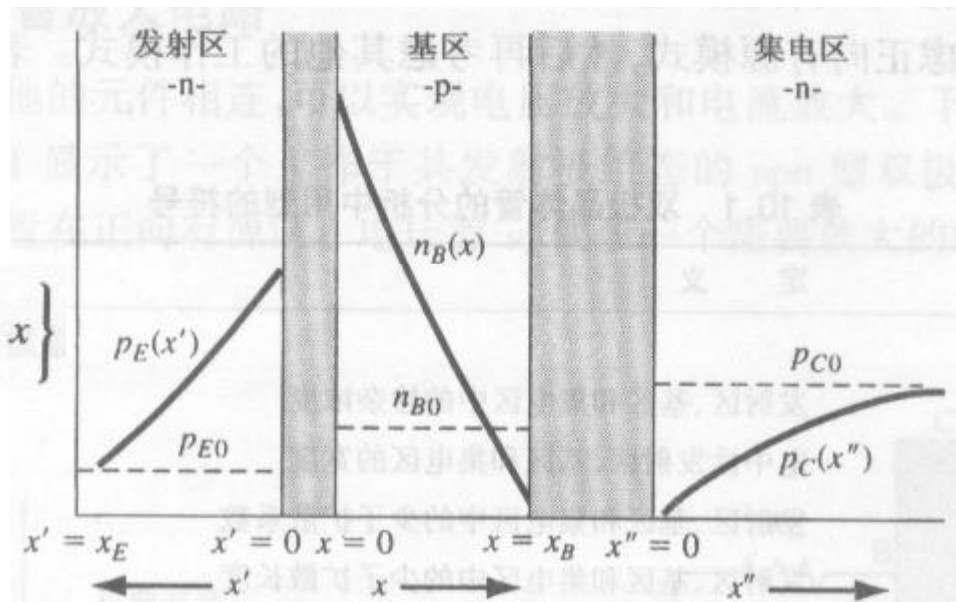


图 10.14 npn 型双极晶体管在正向有源区时的少子分布

10.2 少子的分布

- 其他工作模式：截止和饱和时的少子分布

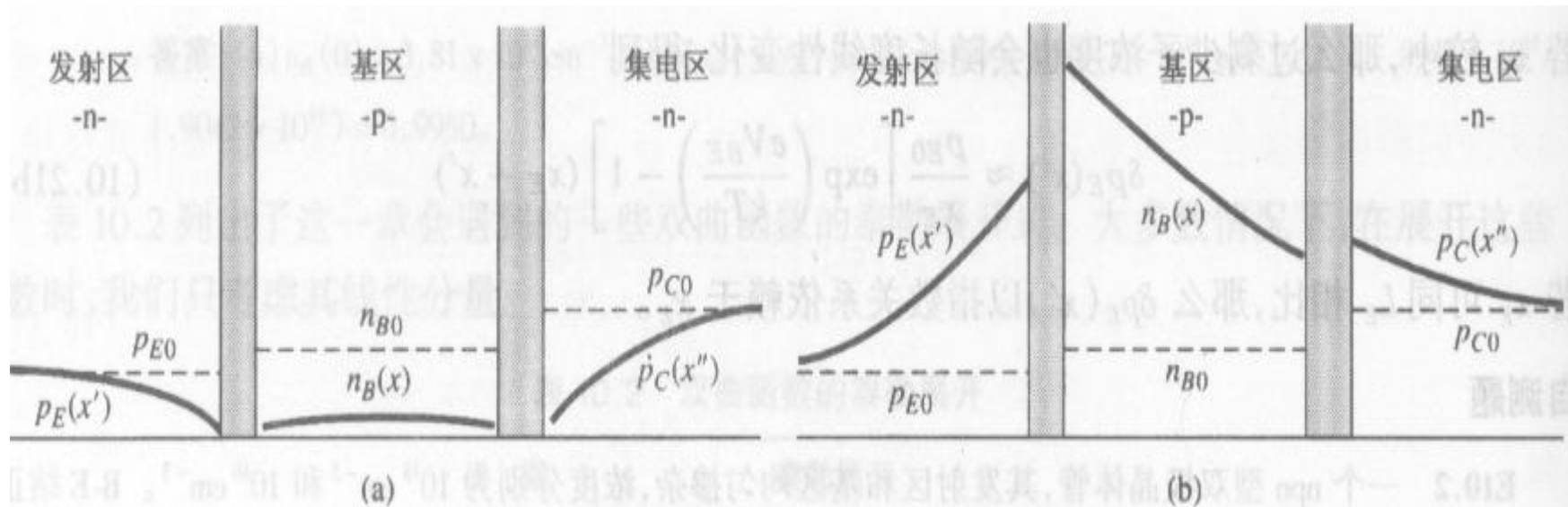


图 10.16 npn 型晶体管工作在截止区(a)和饱和区(b)时的少子分布

10.2 少子的分布

■ 其他工作模式：反向有源区

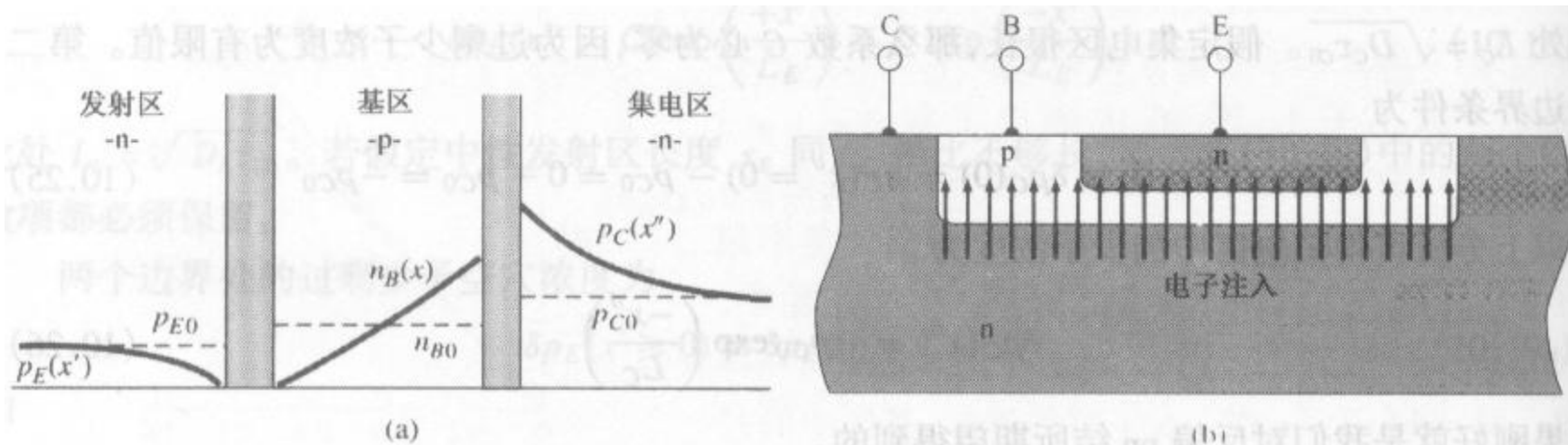


图 10.17 (a)工作在反向有源区时, npn 型双极晶体管的少子分布; (b)工作在反向有源区时, npn 型双极晶体管的横截面图, 该图说明了电子的注入和收集

10.3 低频共基极电流增益

■ 电流成分__粒子流

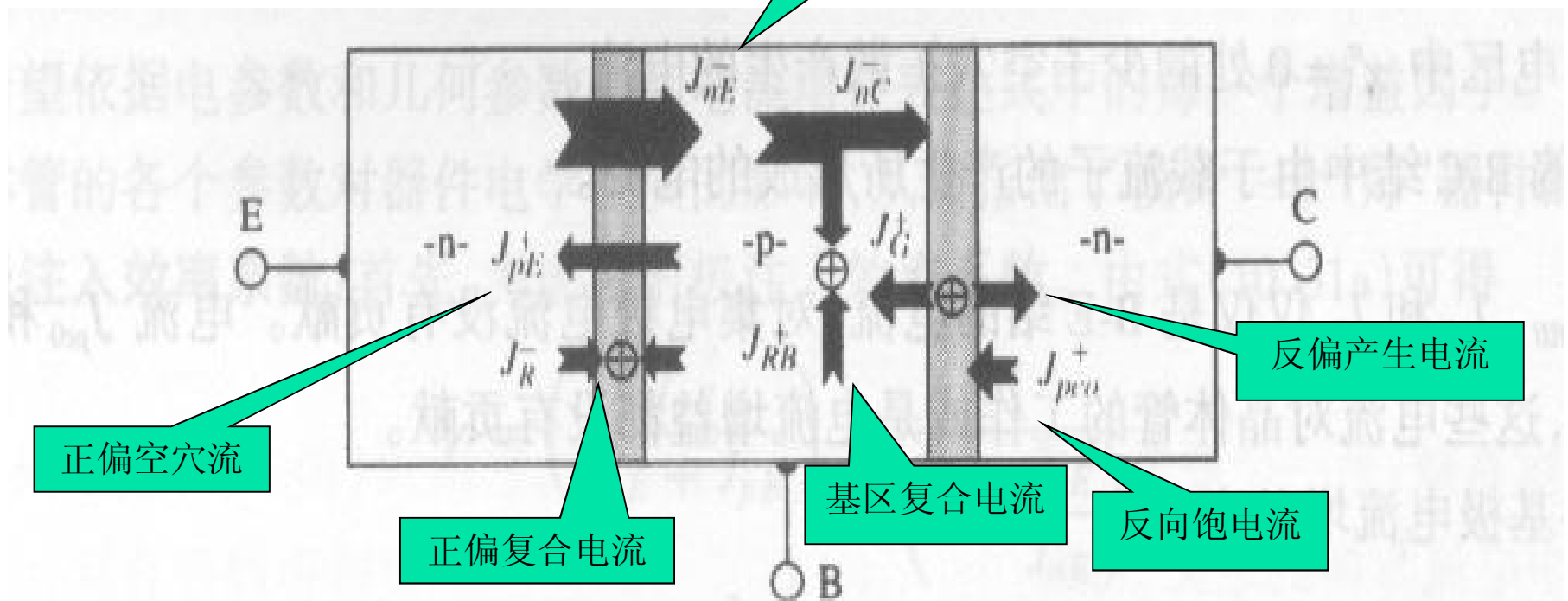


图 10.18 npn 型晶体管工作于正向有源区时,粒子流密度和粒子流成分的示意图

10.3 低频共基极电流增益

■ 成分 电流

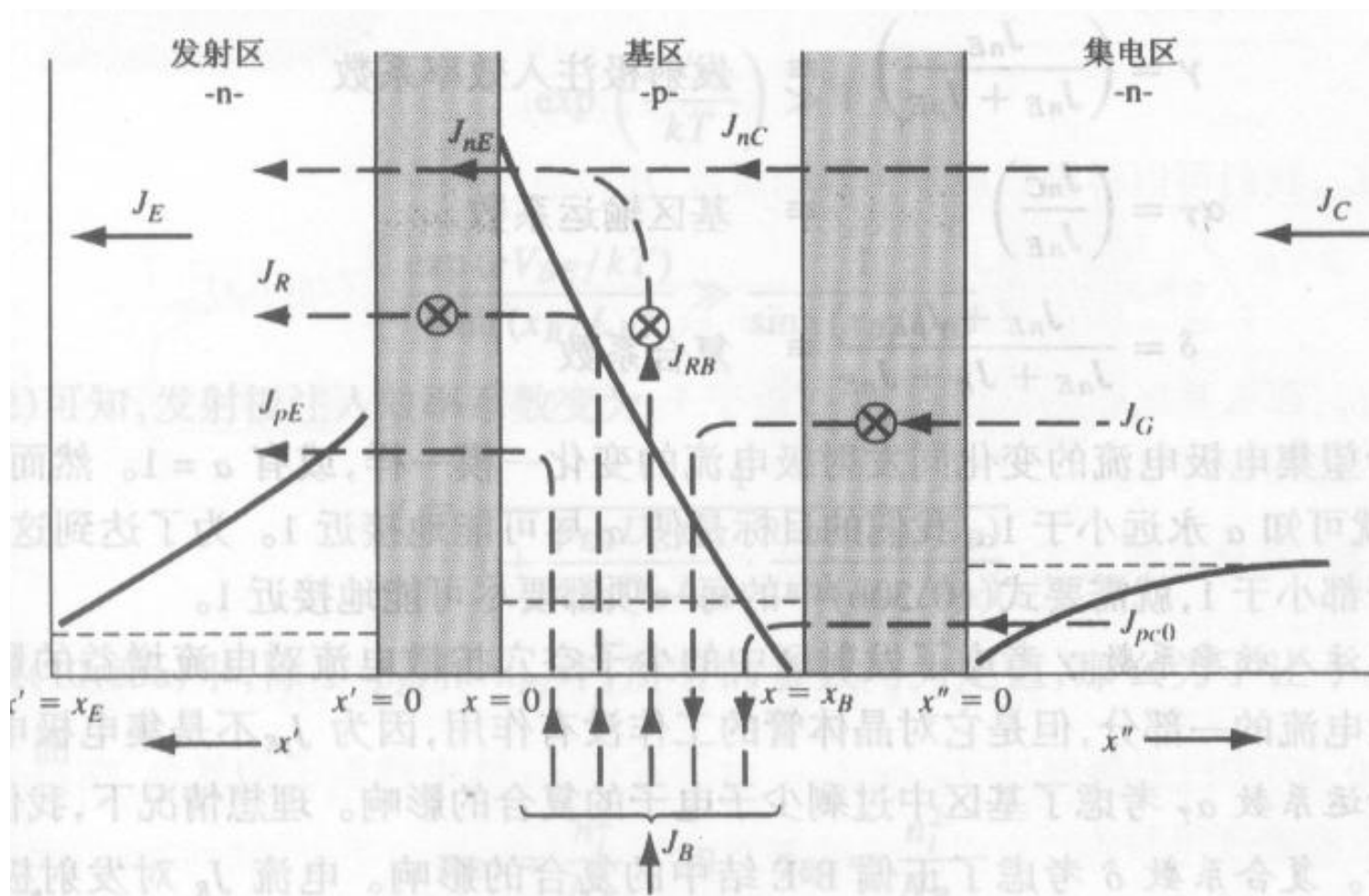


图 10.19 npn 型晶体管工作于正向有源模式时的电流密度成分

10.3 低频共基极电流增益

直流共基极电流增益定义为

$$\alpha_0 = \frac{I_C}{I_E}$$

假定集电结和发射结的横截面积一样,则可以依据电流密度写出电流增益为

$$\alpha_0 = \frac{J_C}{J_E} = \frac{J_{nC} + J_G + J_{pC0}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}}$$

我们的兴趣主要在于确定发射极电流变化对集电极电流的影响。小信号或是正弦信号的共基极电流增益定义为

$$\alpha = \frac{\partial J_C}{\partial J_E} = \frac{J_{nC}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \quad (10.29)$$

10.3 低频共基极电流增益

反偏 B-C 结电流 J_C 和 J_{pC0} 不是发射极电流的函数。我们重写式(10.29)为

$$\alpha = \left(\frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \right) \left(\frac{J_{nC}}{J_{nE}} \right) \left(\frac{J_{nE} + J_{pE}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \right)$$

或是

$$\alpha = \gamma \alpha_T \delta$$

式(10.30b)中的因子定义为

$$\gamma = \left(\frac{J_{nE}}{J_{nE} + J_{pE}} \right) \equiv \text{发射极注入效率系数}$$

$$\alpha_T = \left(\frac{J_{nC}}{J_{nE}} \right) \equiv \text{基区输运系数}$$

$$\delta = \frac{J_{nE} + J_{pE}}{J_{nE} + J_R + J_{pE}} \equiv \text{复合系数}$$

发射极注入效率系数 γ 考虑了发射区中的少子空穴扩散电流对电流增益的影响

基区输运系数 α_T 考虑了基区中过剩少子电子的复合的影响

复合系数 δ 考虑了正偏 B-E 结中的复合的影响

10.3 低频共基极电流增益

表 10.3 限制因素小结

发射极注入效率

$$\gamma \approx \frac{1}{1 + \frac{N_B}{N_E} \cdot \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{x_B}{x_E}} \quad (x_B \ll L_B), (x_E \ll L_E)$$

基区输运系数

$$\alpha_T \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)^2} \quad (x_B \ll L_B)$$

复合系数

$$\delta = \frac{1}{1 + \frac{J_{r0}}{J_{s0}} \exp \left(\frac{-eV_{BE}}{2kT} \right)}$$

共基极电流增益

$$\alpha = \gamma \alpha_T \delta \approx \frac{1}{1 + \frac{N_B}{N_E} \cdot \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{x_B}{x_E} + \frac{1}{2} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)^2 + \frac{J_{r0}}{J_{s0}} \exp \left(\frac{-eV_{BE}}{2kT} \right)}$$

共发射极电流增益

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx \frac{1}{\frac{N_B}{N_E} \cdot \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{x_B}{x_E} + \frac{1}{2} \left(\frac{x_B}{L_B} \right)^2 + \frac{J_{r0}}{J_{s0}} \exp \left(\frac{-eV_{BE}}{2kT} \right)}$$

10.3 低频共基极电流增益

■ 数值概念

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

共发射极电流增益

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

共基极电流增益

$$\alpha = \gamma \alpha_T \delta = (0.9944)(0.9998)(0.999\ 86) = 0.994\ 06$$

所以共发射极电流增益为

例子

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0.994\ 06}{1 - 0.994\ 06} = 167$$

10.4 非理想效应

■ 基区宽度调制效应

厄尔利(Early)效应

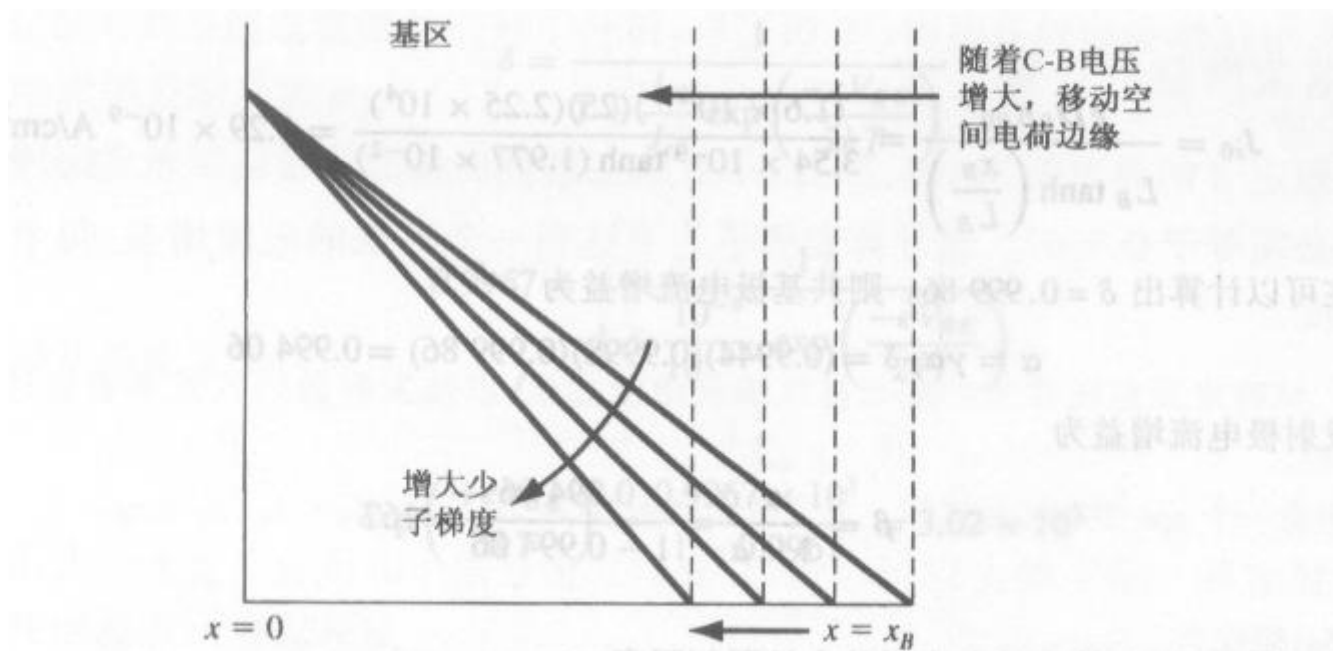


图 10.21 随 B-C 结空间电荷区宽度变化, 基区宽度的变化及少子浓度梯度的变化

10.4 非理想效应

■ 基区宽度调制效应

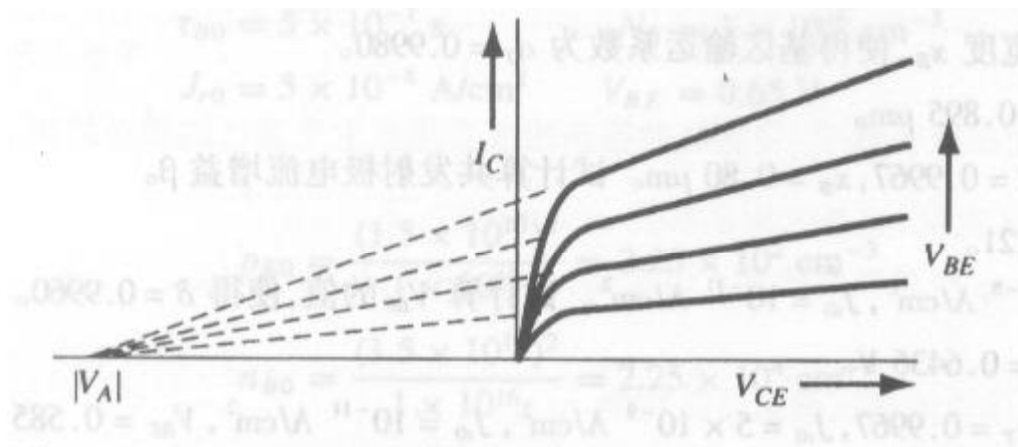


图 10.22 电流-电压特性曲线,从中可看出厄尔利电压的大小

厄尔利电压的典型值在 100 ~ 300 V 之间

10.4 非理想效应

- 大注入效应
注入的少子比多子还多
 $N_B \geq P_p$

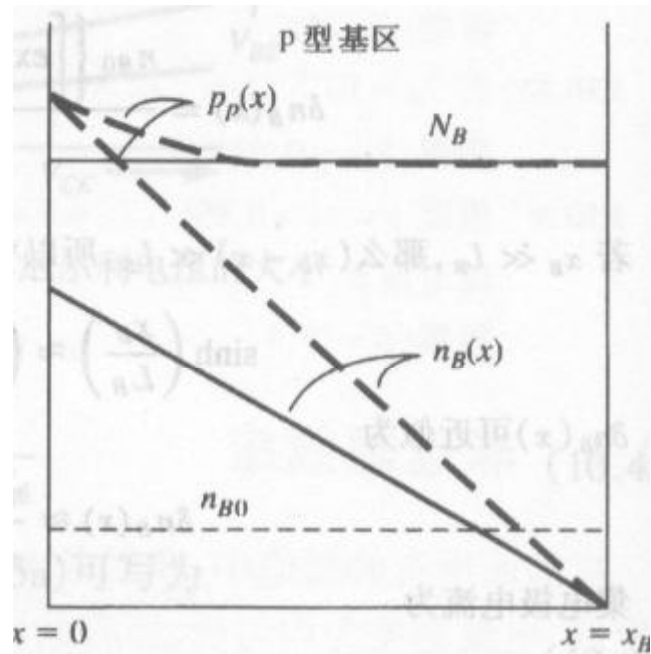


图 10.23 小注入和大注入时,基区中少子和多子的浓度(实线为小注入,虚线为大注入)

10.4 非理想效应

- 大注入效应一、注入效率降低 J_{pe} 增加
- 大注入效应二：集电极电流增速变小

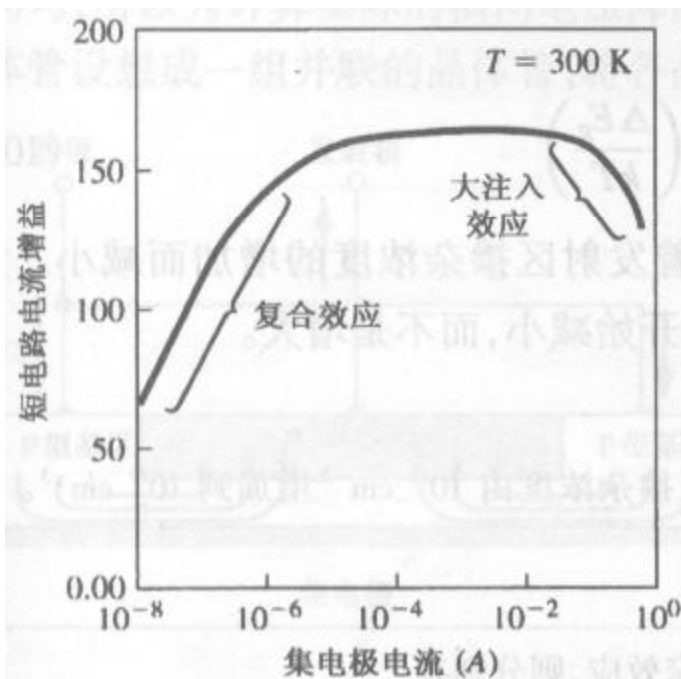


图 10.24 共发射极电流增益随集电极电流变化的曲线

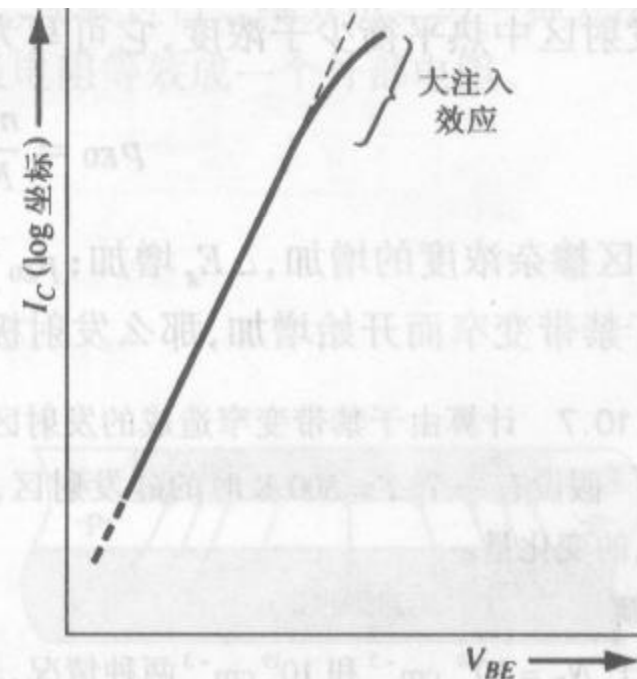


图 10.25 集电极电流随B-E结电压的变化,说明了大注入效应

10.4 非理想效应

■ 发射区禁带变窄

P_{E0} 增加

发射效率降低

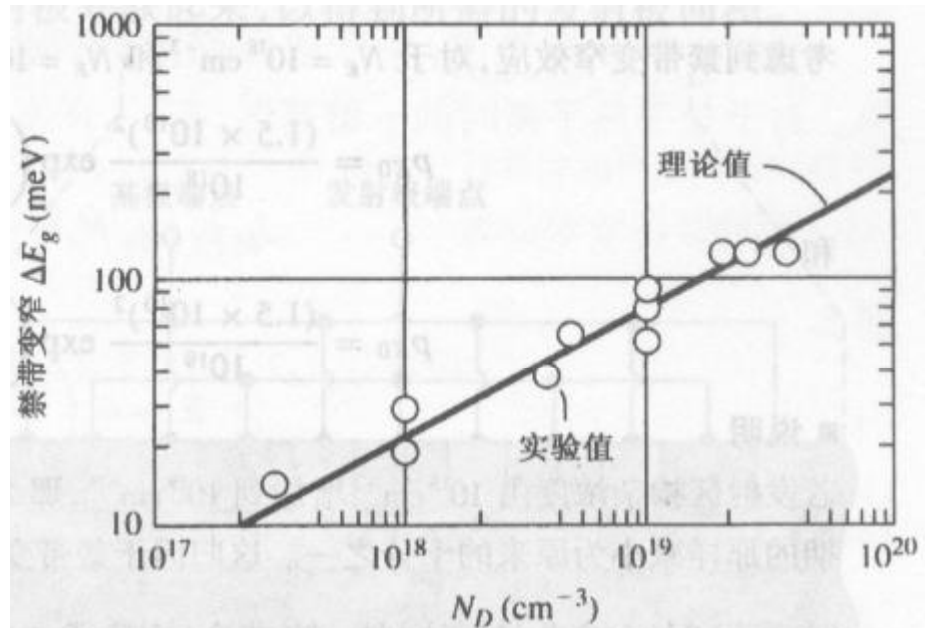


图 10.26 硅中施主浓度的变化引起禁带变窄因子的变化

发射区掺杂浓度 很高时,由于禁带变窄效应,会使电流增益比我们预期的要小。

10.4 非理想效应

- 电流集边效应：导致局部过热或局部大注入

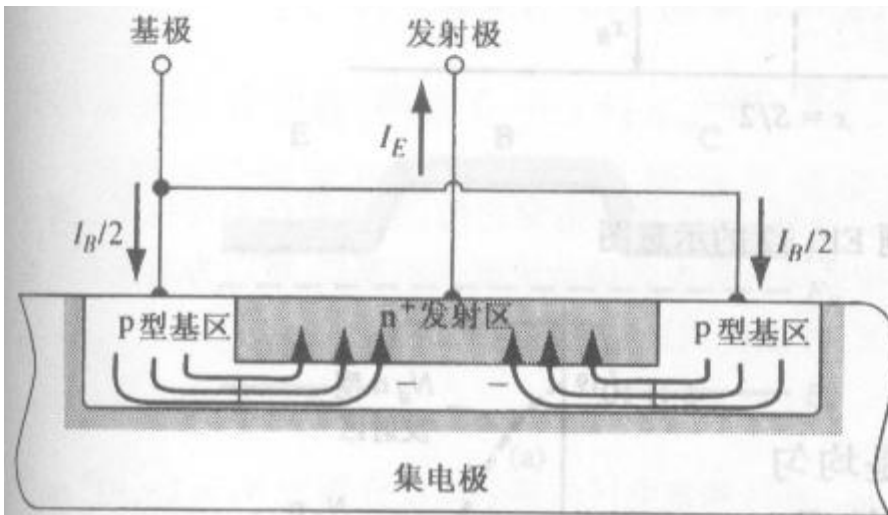


图 10.27 npn 型双极晶体管的截面图,说明了基极电流的分布及基区中的横向电压降

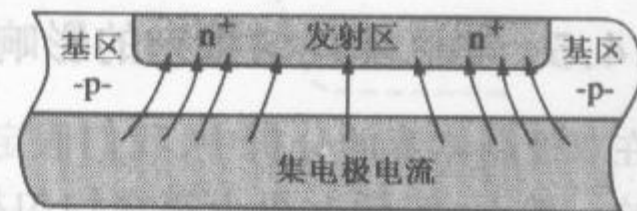
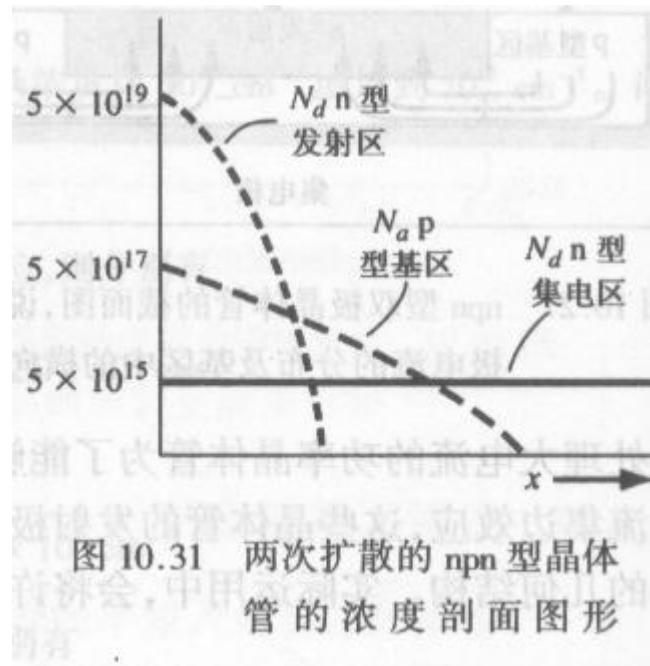


图 10.28 npn 型双极晶体管的截面图,说明了发射极电流集边效应

10.4 非理想效应

- 非均匀掺杂：浓度梯度导致静电场，改变少子分布



10.4 非理想效应

- 击穿电压： 穿通击穿（距离太近）和雪崩击穿（较远）

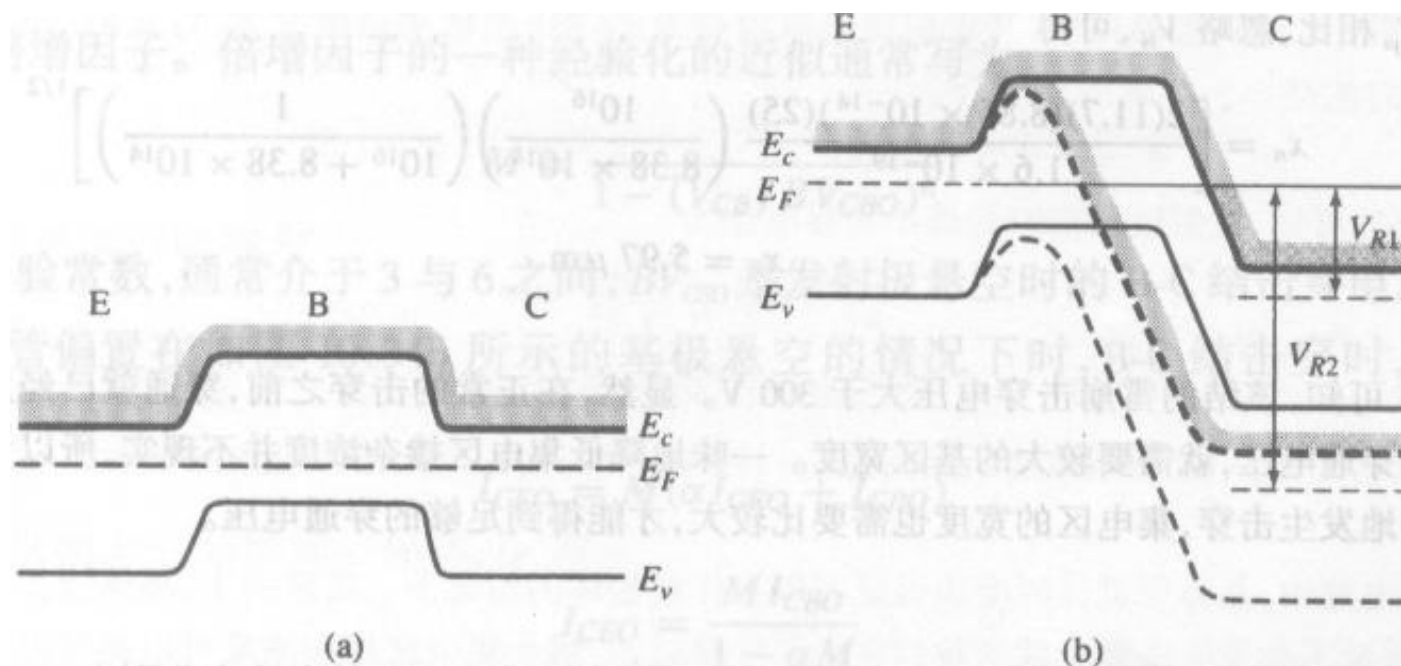


图 10.32 npn 型双极晶体管的禁带宽度示意图:(a)热平衡条件下;(b)B-C 结施加反偏电压时 V_{R1} 未穿通,而加反偏电压 V_{R2} 时已穿通

10.5 等效电路模型

E-M(Ebers-Moll)模型应用于开关电路中,Hybrid-Pi 模型应用于放大电路中

■ E-M模型

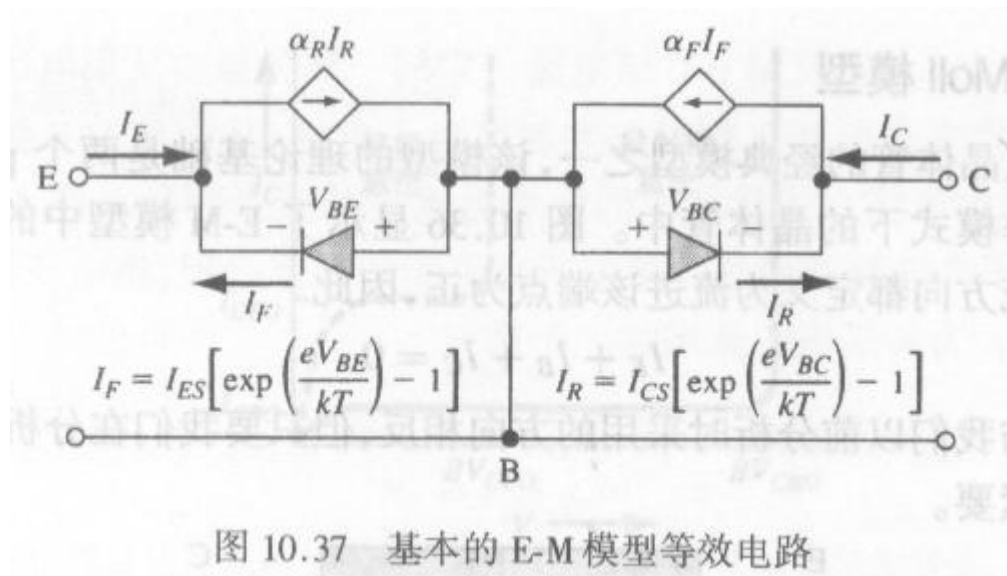


图 10.37 基本的 E-M 模型等效电路

10.5 等效电路模型

■ H-P模型

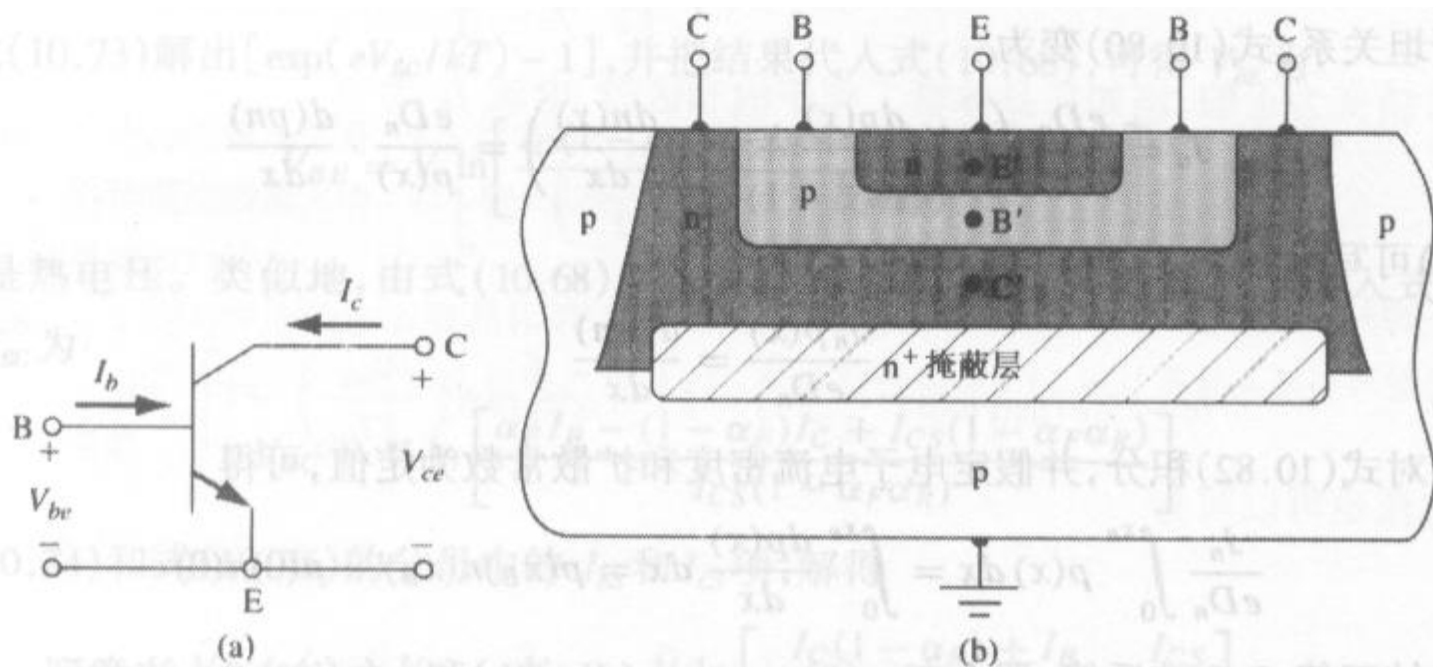
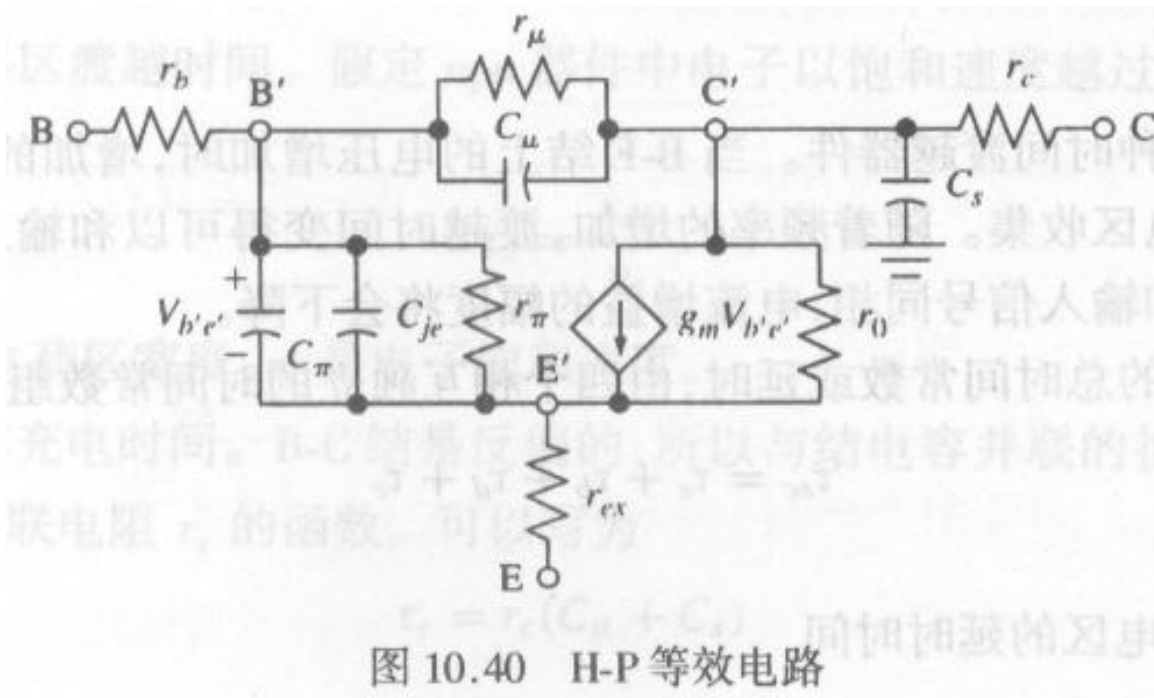
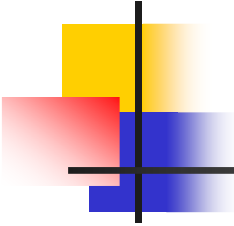


图 10.38 (a)小信号电流和电压时的共发射极 npn 型双极晶体管;(b)H-P 模型中 npn 型双极晶体管的横截面

10.5 等效电路模型

■ H-P模型





10. 6频率上限

■ 延时因子

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_b + \tau_d + \tau_c$$

τ_{ec} = 发射区到集电区的延时时间

τ_e = E-B 结电容充电时间

τ_b = 基区渡越时间

τ_d = 集电结耗尽区渡越时间

τ_c = 集电结电容充电时间

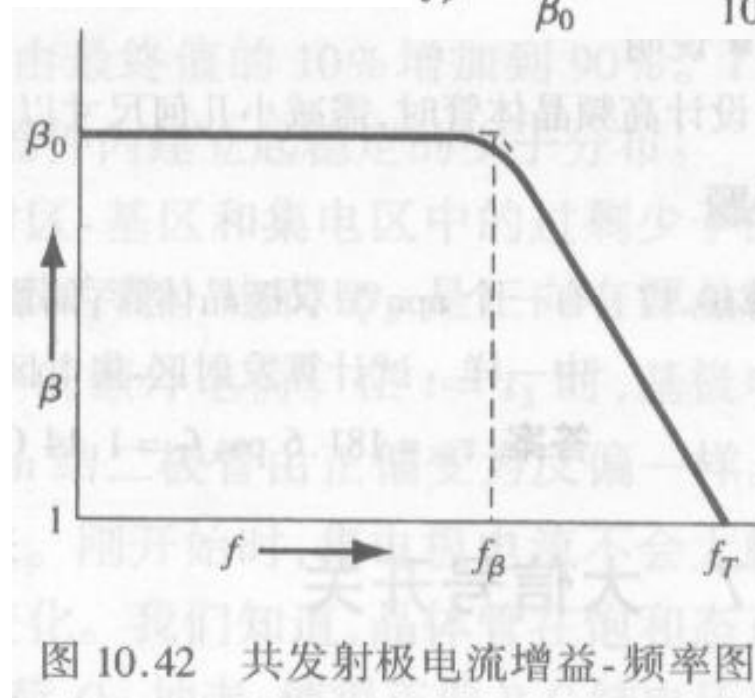
10.6 频率上限

■ 截止频率

$$f_{\beta} \approx \frac{f_T}{\beta_0}$$

$$\tau_{ec} = 25.9 + 50 + 24 + 4 = 103.9 \text{ ps}$$
$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau_{ec}} = \frac{1}{2\pi(103.9 \times 10^{-12})} = 1.53 \text{ GHz}$$

$$f_{\beta} = \frac{f_T}{\beta_0} = \frac{1.53 \times 10^9}{100} = 15.3 \text{ MHz}$$



10. 7大信号开关

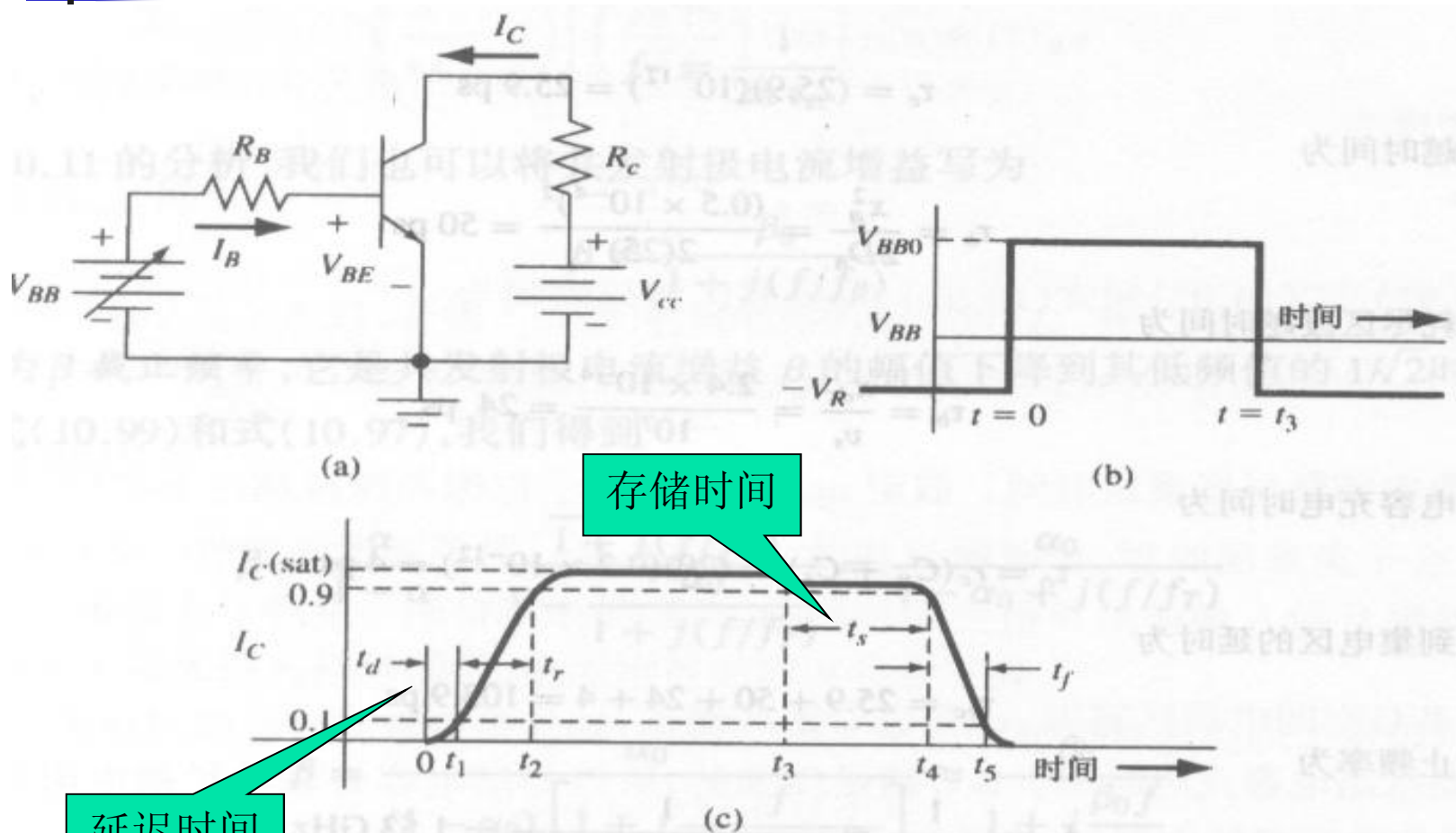
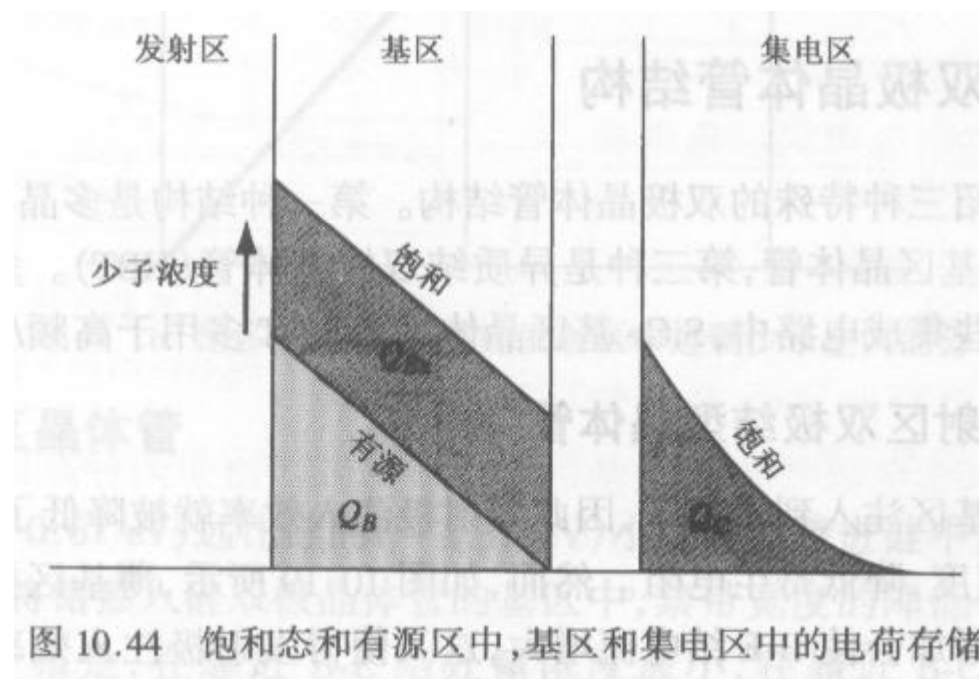


图 10.43 (a)研究晶体管开关特性所用的电路;(b)驱动晶体管的基极输入;(c)晶体管工作状态转换过程中集电极电流随时间的变化

10. 7大信号开关



10.7 大信号开关

- 肖特基钳位三极管：使VBC不会太高，少子浓度降低而加快速度

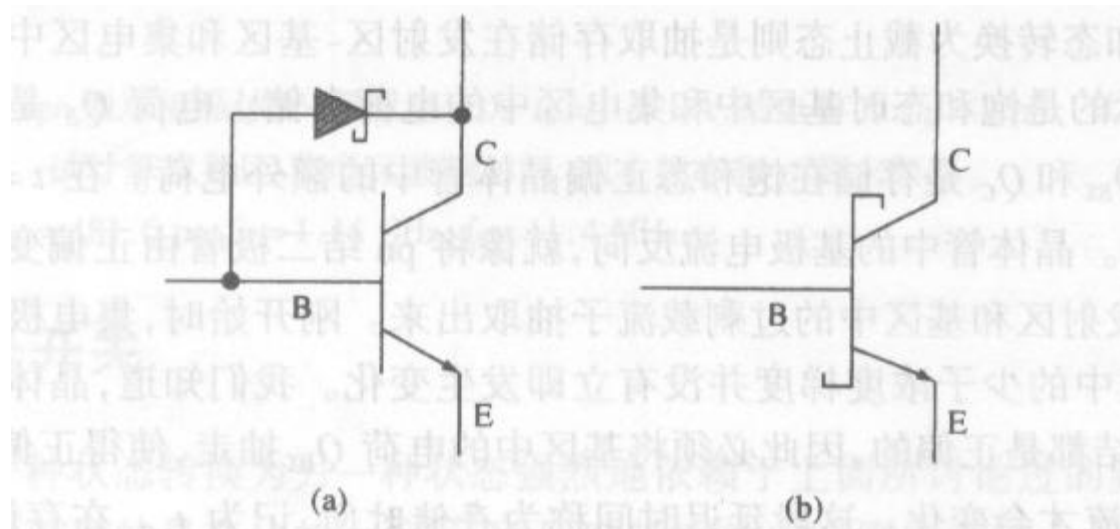
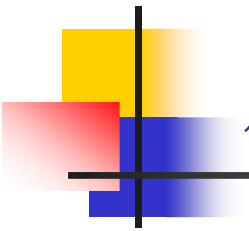


图 10.45 (a)肖特基钳位晶体管;(b)肖特基钳位晶体管的电路符号



小结

- 有两种类型的双极晶体管,即 npn 型和 pnp 型。每一种晶体管都有三个不同的掺杂区和两个 pn 结。中心区域(基区)非常窄,所以这两个结称为相互作用结。
- 晶体管工作于正向有源区时,B-E 结正偏,B-C 结反偏。发射区中的多子注入基区,在那里它们变为少子。少子扩散过基区进入 B-C 结空间电荷区,在那里,它们被扫入集电区。
- 当晶体管工作在正向有源区时,晶体管一端的电流(集电极电流)受另外两个端点所施加的电压(B-E 结电压)的控制。这就是其基本的工作原理。
- 晶体管的三个扩散区有不同的少子浓度分布。器件中主要的电流由这些少子的扩散决定。
- 共发射极电流增益是三个因子的函数——发射极注入效率系数、基区输运系数和复合系数。发射极注入效率考虑了从基区注入到发射区的载流子,基区输运系数反映了载流子在基区中的复合,复合系数反映了载流子在正偏发射结内部的复合。

■ 考虑了几个非理想效应：

1. 基区宽度调制效应,或者说是厄尔利效应——中性基区宽度随 B-C 结电压变化而发生变化,于是集电极电流随 B-C 结或 C-E 结电压变化而变化。
2. 大注入效应使得集电极电流随 C-E 结电压增加而以低速率增加。
3. 发射区禁带变窄效应使得发射区掺杂浓度非常高时发射效率变小。
4. 电流集边效应使得发射极边界的电流密度大于中心位置的电流密度。
5. 基区非均匀掺杂在基区中感生出静电场,有助于少子渡越基区。
6. 两种击穿机理——穿通和雪崩击穿。

■ 晶体管的三种等效电路或数学模型。E-M 模型和等效电路对于晶体管的所有工作模式均适用。基区为非均匀掺杂时,应用 G-P 模型很方便。小信号 H-P 模型应用于线性放大电路中的正向有源晶体管。

■ 晶体管的截止频率是表征晶体管品质的一个重要参数,它是共发射极电流增益的幅值变为 1 时的频率。频率响应是 E-B 结电容充电时间、基区渡越时间、集电结耗尽区渡越时间和集电结电容充电时间的函数。

■ 虽然开关应用涉及到电流和电压较大的变化,但晶体管的开关特性和频率上限直接相关。开关特性的一个重要的参数是电荷存储时间,它反映了晶体管由饱和态转变为截止态的快慢。

重要术语解释

α 截止频率:共基极电流增益幅值变为其低频值的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率,就是截止频率。

禁带变窄:随着发射区重掺杂,禁带的宽度减小。

基区渡越时间:少数载流子通过中性基区所用的时间。

基区输运系数:共基极电流增益中的一个系数,体现了中性基区中载流子的复合。

基区宽度调制效应:随 C-E 结电压或 C-B 结电压的变化,中性基区宽度的变化。

β 截止频率:共发射极电流增益幅值下降到其低频值的 $1/\sqrt{2}$ 时的频率。

集电结电容充电时间:随发射极电流变化, B-C 结空间电荷区和集电区-衬底结空间电荷区宽度发生变化的时间常数。

集电结耗尽区渡越时间:载流子被扫过 B-C 结空间电荷区所需的时间。

共基极电流增益:集电极电流与发射极电流之比。

共发射极电流增益:集电极电流与基极电流之比。

电流集边:基极串联电阻的横向压降使得发射结电流为非均匀值。

截止:晶体管两个结均加零偏或反偏时,晶体管电流为零的工作状态。

截止频率:共发射极电流增益的幅值为 1 时的频率。

厄尔利电压:反向延长晶体管的 I-V 特性曲线与电压轴交点的电压的绝对值。

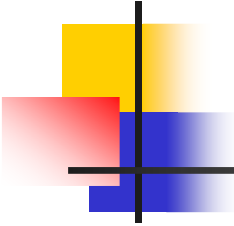
E-B 结电容充电时间:发射极电流的变化引起 E-B 结空间电荷区宽度变化所需的时间。

发射极注入效率系数:共基极电流增益的一个系数,描述了载流子从基区向发射区的注入。

正向有源:B-E 结正偏、B-C 结反偏时的工作模式。

反向有源:B-E 结反偏、B-C 结正偏时的工作模式。

输出电导:集电极电流对 C-E 两端电压的微分之比。



知识点

- 描述晶体管的基本工作情况。
- 画出晶体管工作于不同的模式时,热平衡时的能带图。
- 发射结加电压后,近似计算集电极电流。
- 画出晶体管在不同工作情况下的少子浓度分布草图。
- 由少子分布曲线,确定晶体管中不同的扩散电流和其他的电流成分。
- 解释限制电流增益的各种因素的物理机理。
- 由晶体管中的电流成分来定义限制电流的因素。
- 描述基区宽度调制效应及其对晶体管的 $I-V$ 特性产生影响的物理机理
- 描述双极晶体管的击穿机理。
- 画出晶体管工作于正向有源区时,简化的小信号 H-P 等效电路。
- 定性描述双极晶体管的频率响应的四个延时或时间常数。

复习题

1. 描述工作在正向有源区时 npn 型双极晶体管的电荷流动情况。电流是扩散电流还是漂移电流？
2. 定义共发射极电流增益并解释为什么在近似情况下电流增益为一个常数。
3. 解释晶体管在截止、饱和和反向有源区时的工作情况。
4. 画出 pnp 型双极晶体管在正向有源区时的少子浓度分布。
5. 定义并描述共基极电流增益的三个限制因素。
6. 什么是基区宽度调制效应？该效应的另一个称呼是什么？
7. 什么是大注入？
8. 解释发射极电流集边效应。
9. 定义 I_{CBO} 和 I_{CEO} ，解释为什么 $I_{CEO} > I_{CBO}$ 。
10. 画出 npn 型双极晶体管的简化 H-P 模型，解释什么时候用到该模型。
11. 描述限制双极晶体管的频率响应的延时因素。



END
