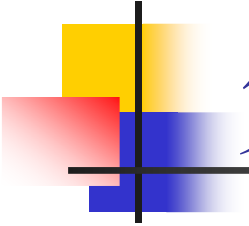


# pn结二极管

---

西安电子科技大学    XIDIDIAN UNIVERSITY  
V1.0    © 2007 韩孝勇    Han XiaoYong  
[xyhan5151@yahoo.com.cn](mailto:xyhan5151@yahoo.com.cn)    [www.dianzichan.com](http://www.dianzichan.com)



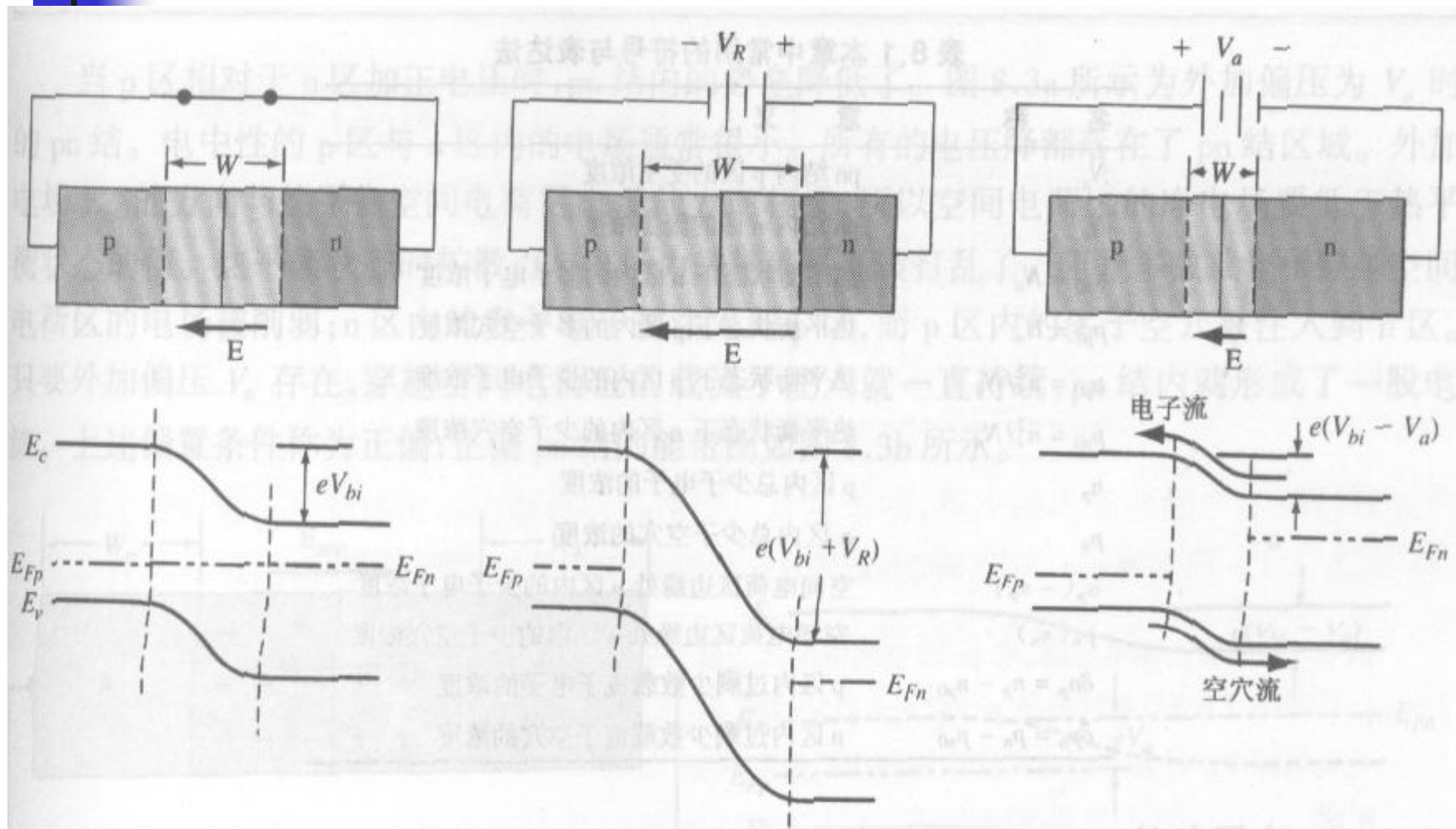
## 第8章pn结二极管

---

- 8. 1 pn结电流
- 8. 2 pn结的小信号模型
- 8. 3产生. 复合电流
- 8. 4结击穿
- \*8. 5电荷存储与二极管瞬态
- \*8. 6隧道二极管

# 8.1 pn结电流

## 定性描述



# 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）

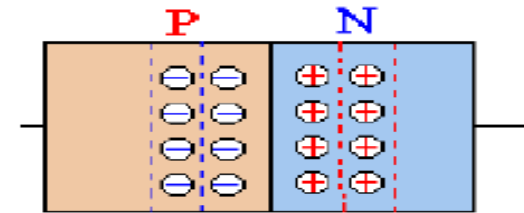
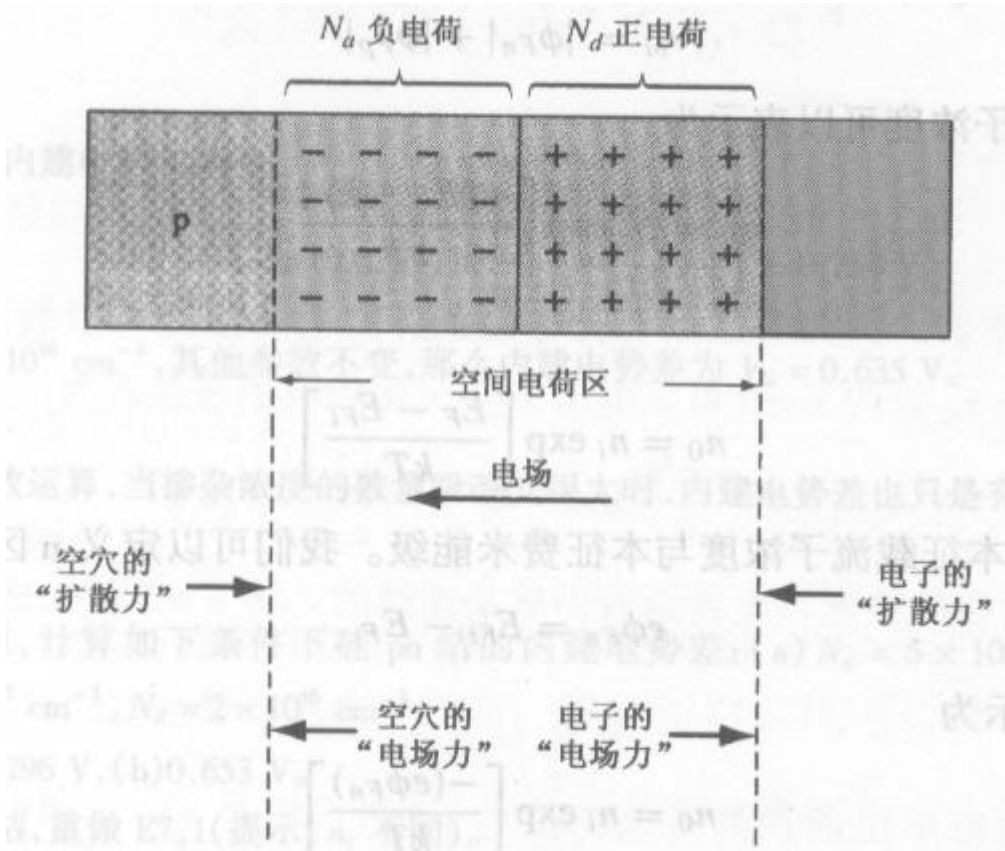


图 7.2 空间电荷区、电场,以及施加在载流子上的两种力

## 回顾7.2零偏

## 电场强度

- 电荷密度（均匀）
- 电场强度（ $x=0$ 处  $E$  最大）

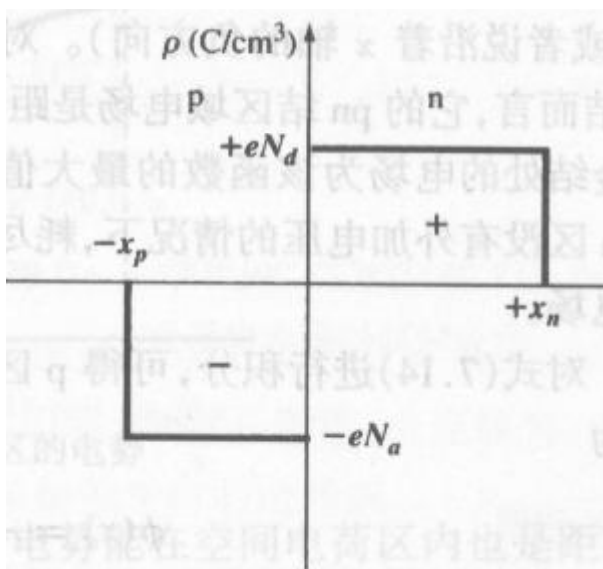


图 7.4 突变结近似均匀掺杂  
pn结的空间电荷密度

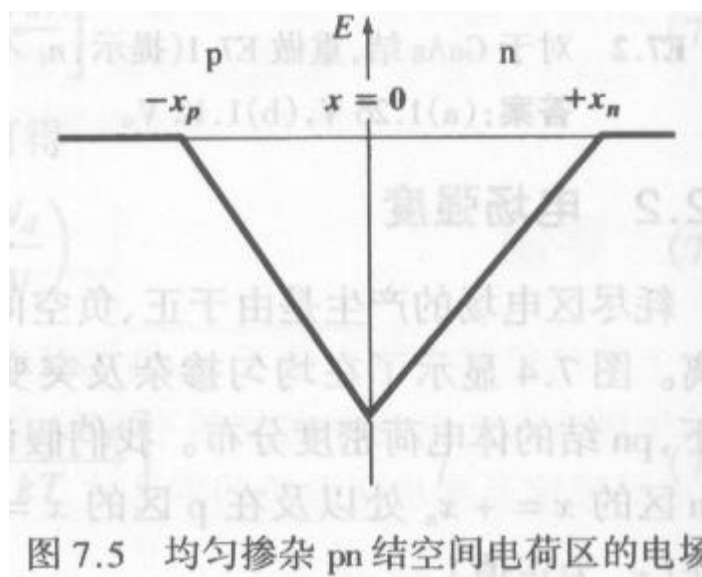


图 7.5 均匀掺杂 pn 结空间电荷区的电场

## 回顾7.2零偏

## 电场强度

图 7.6 显示了 pn 结电势随距离变化的曲线。由图可知,电势表达式为距离的二次函数。 $x = x_n$  处的电势大小与内建电势差的大小相同。那么由式(7.25)可以推出

$$V_{bi} = |\phi(x = x_n)| = \frac{e}{2\epsilon_s} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2) \quad (7.26)$$

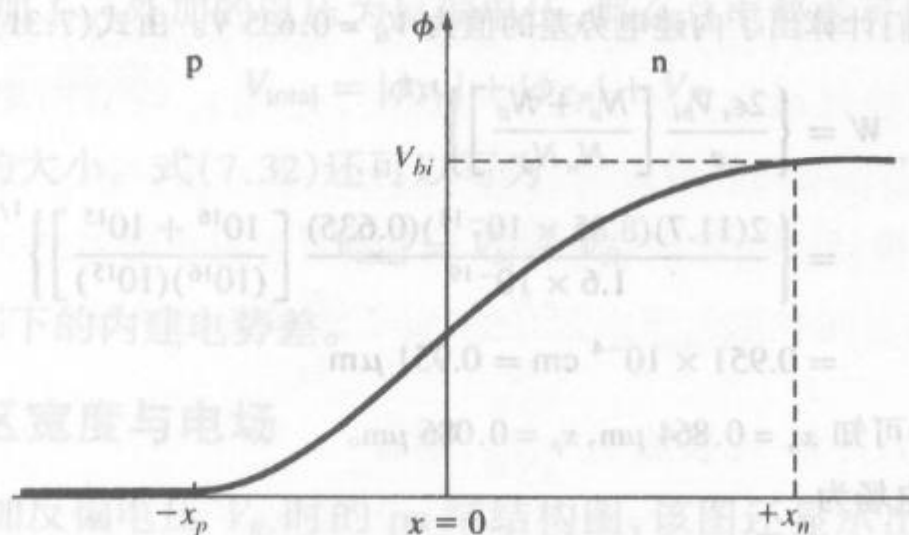


图 7.6 均匀掺杂 pn 结空间电荷区的电势

# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

## ■ 理想假设

1. 耗尽层突变近似。空间电荷区的边界存在突变,并且耗尽区以外的半导体区域是电中性的。
2. 载流子的统计分布采用麦克斯韦-玻尔兹曼近似。
3. 小注入假设。
- 4a. pn结内的电流值处处相等。
- 4b. pn结内的电子电流与空穴电流分别为连续函数。
- 4c. 耗尽区内的电子电流与空穴电流为恒定值。

第一种分布定律是麦克斯韦-玻尔兹曼分布函数。这种分布认为粒子是可以被一一区别开的,而且对每个能态所能容纳的粒子数没有限制。容器中的气体处于相对低压时的状态可看做是这种分布。

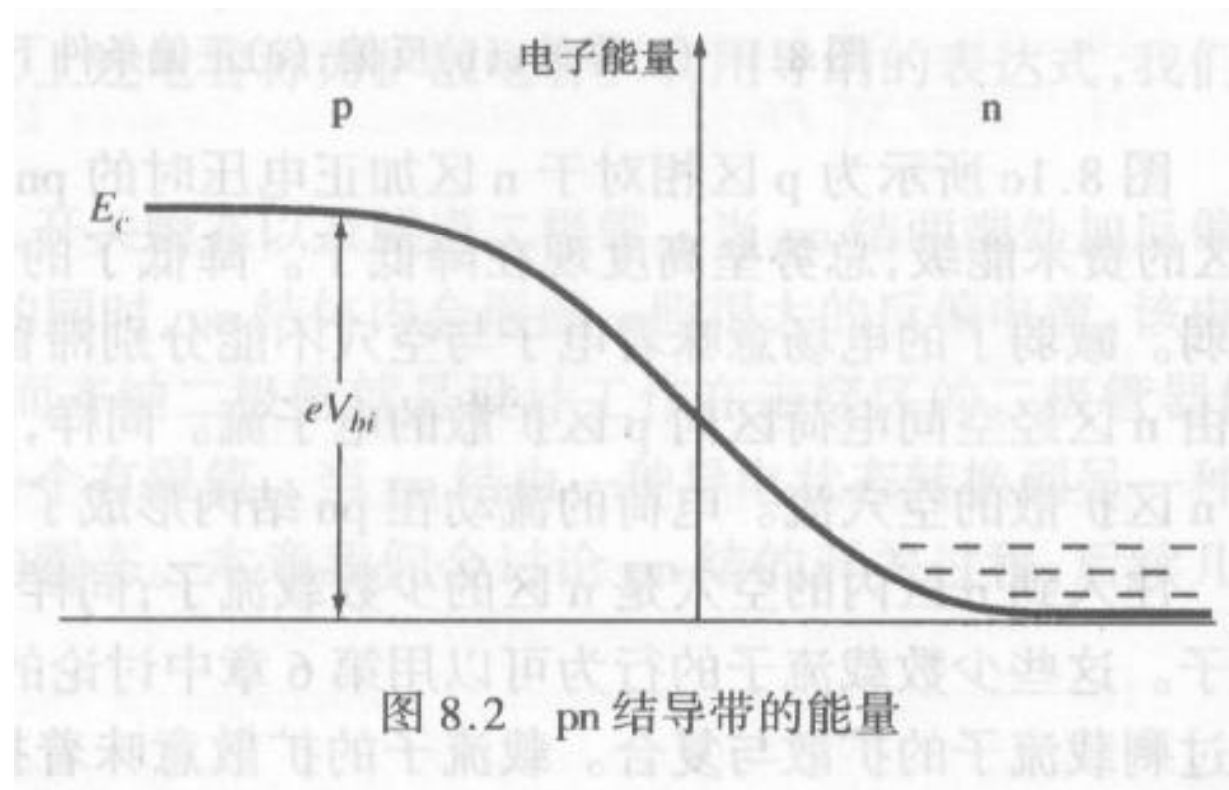
# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

表 8.1 本章中常用的符号与表达法

| 名 称                         | 意 义                  |
|-----------------------------|----------------------|
| $N_a$                       | pn 结内 p 区的受主浓度       |
| $N_d$                       | pn 结内 n 区的施主浓度       |
| $n_{n0} = N_d$              | 热平衡状态下 n 区内的多子电子浓度   |
| $p_{p0} = N_a$              | 热平衡状态下 p 区内的多子空穴浓度   |
| $n_{p0} = n_i^2 / N_a$      | 热平衡状态下 p 区内的少子电子浓度   |
| $p_{n0} = n_i^2 / N_d$      | 热平衡状态下 n 区内的少子空穴浓度   |
| $n_p$                       | p 区内总少子电子的浓度         |
| $p_n$                       | n 区内总少子空穴的浓度         |
| $n_p(-x_p)$                 | 空间电荷区边缘处 p 区内的少子电子浓度 |
| $p_n(x_n)$                  | 空间电荷区边缘处 n 区内的少子空穴浓度 |
| $\delta n_p = n_p - n_{p0}$ | p 区内过剩少数载流子电子的浓度     |
| $\delta p_n = p_n - p_{n0}$ | n 区内过剩少数载流子空穴的浓度     |

# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

## ■ 能量图



# 8.1 pn结电流

## 理想电流电压关系

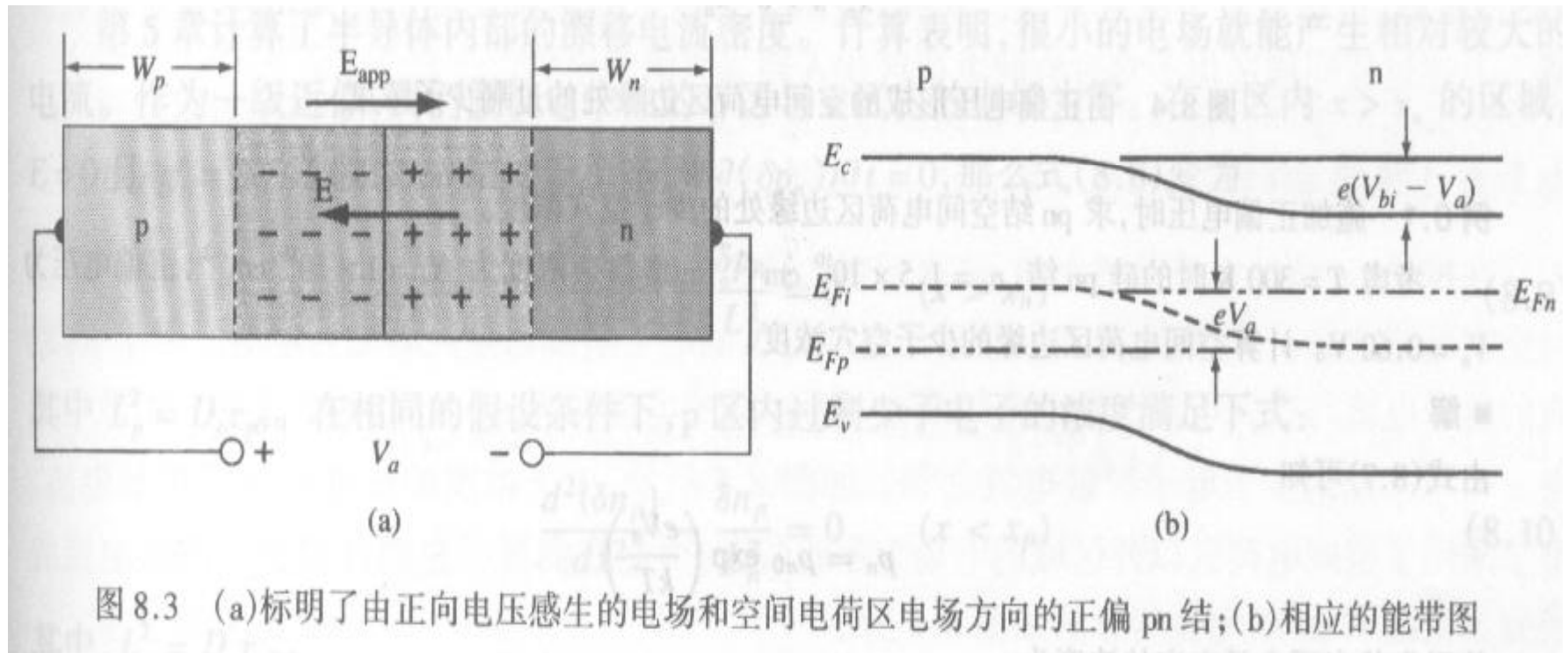
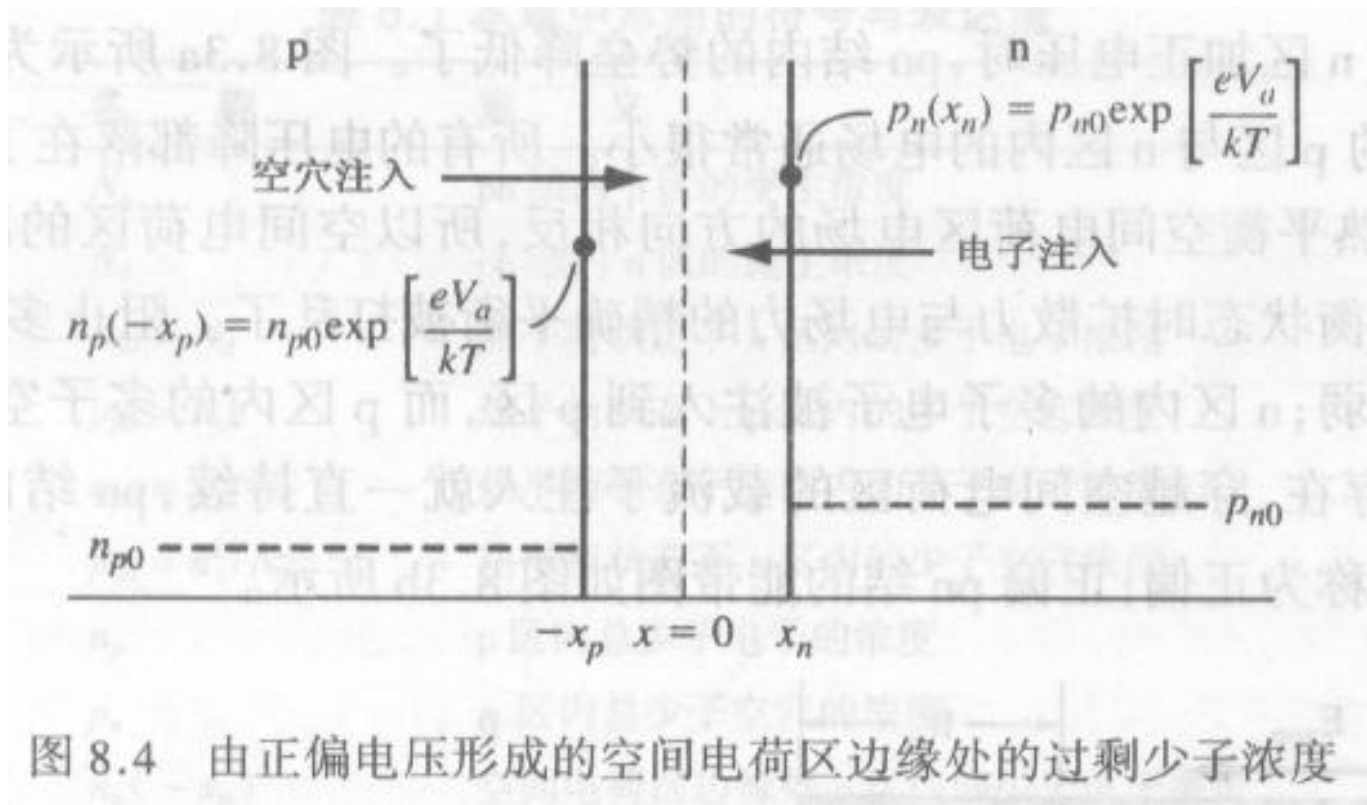


图 8.3 (a)标明了由正向电压感生的电场和空间电荷区电场方向的正偏 pn 结;(b)相应的能带图

# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系



# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

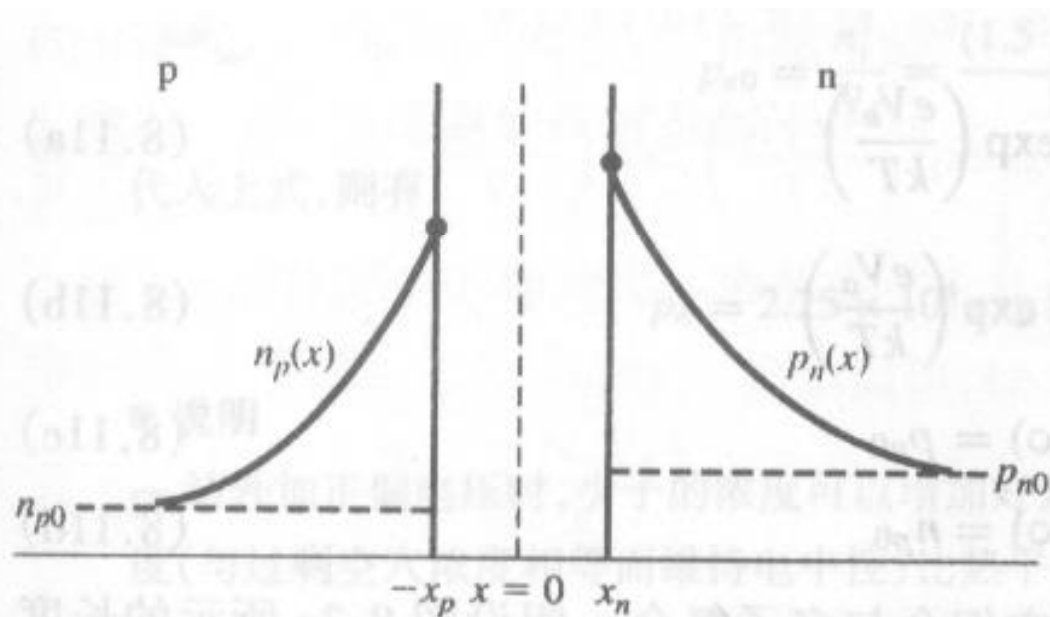
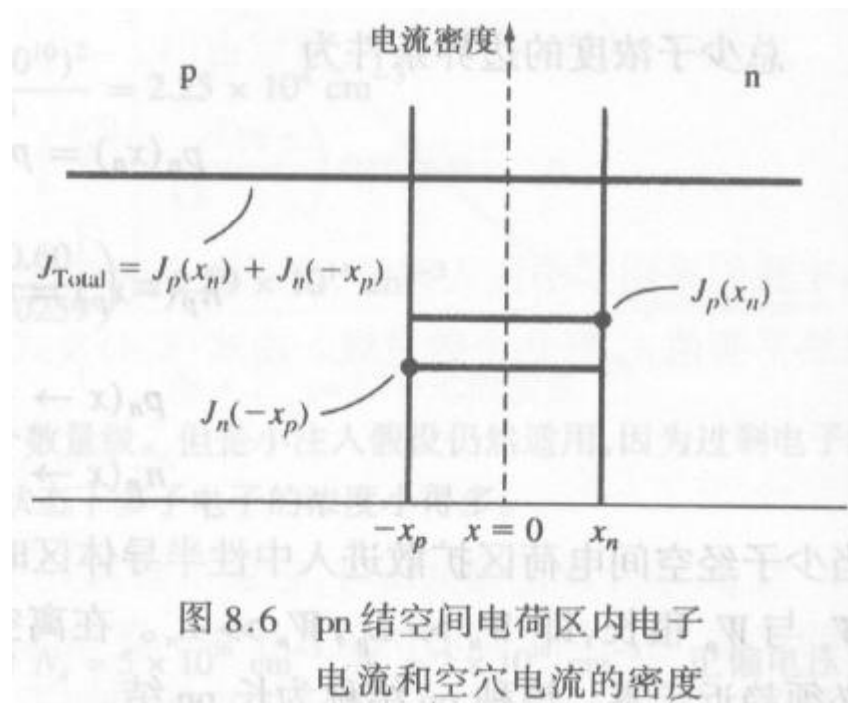


图 8.5 正偏条件下 pn 结内部的稳态少数载流子浓度

# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系



# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

## ■ 理想关系

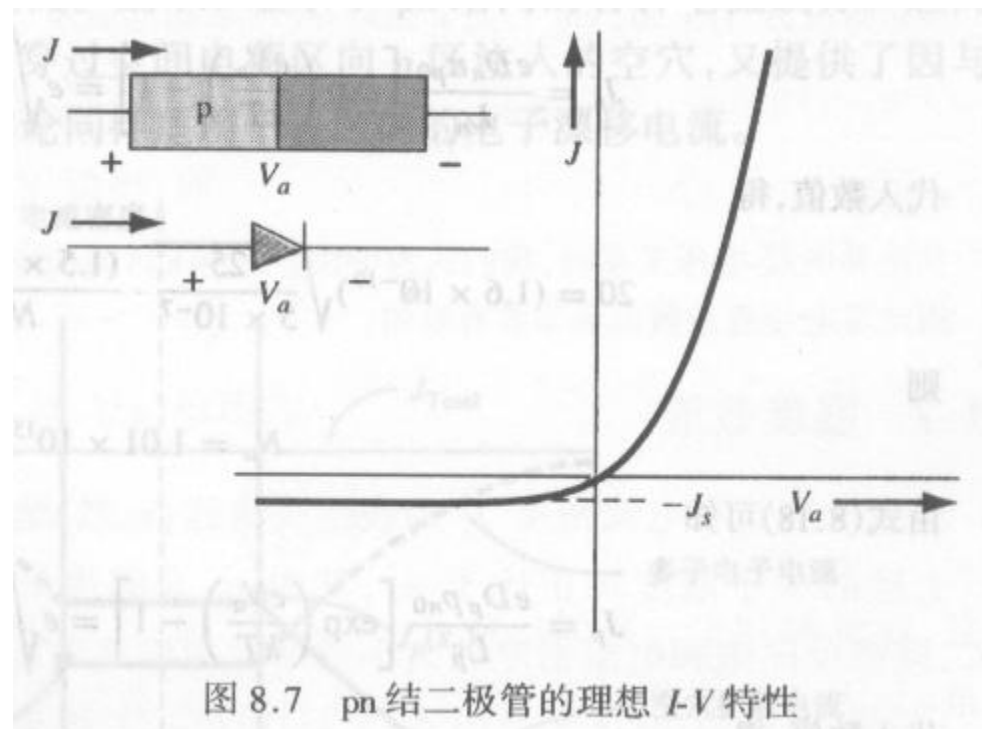
$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_s = \left[ \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right]$$

$J_s$  称为反向饱和电流密度

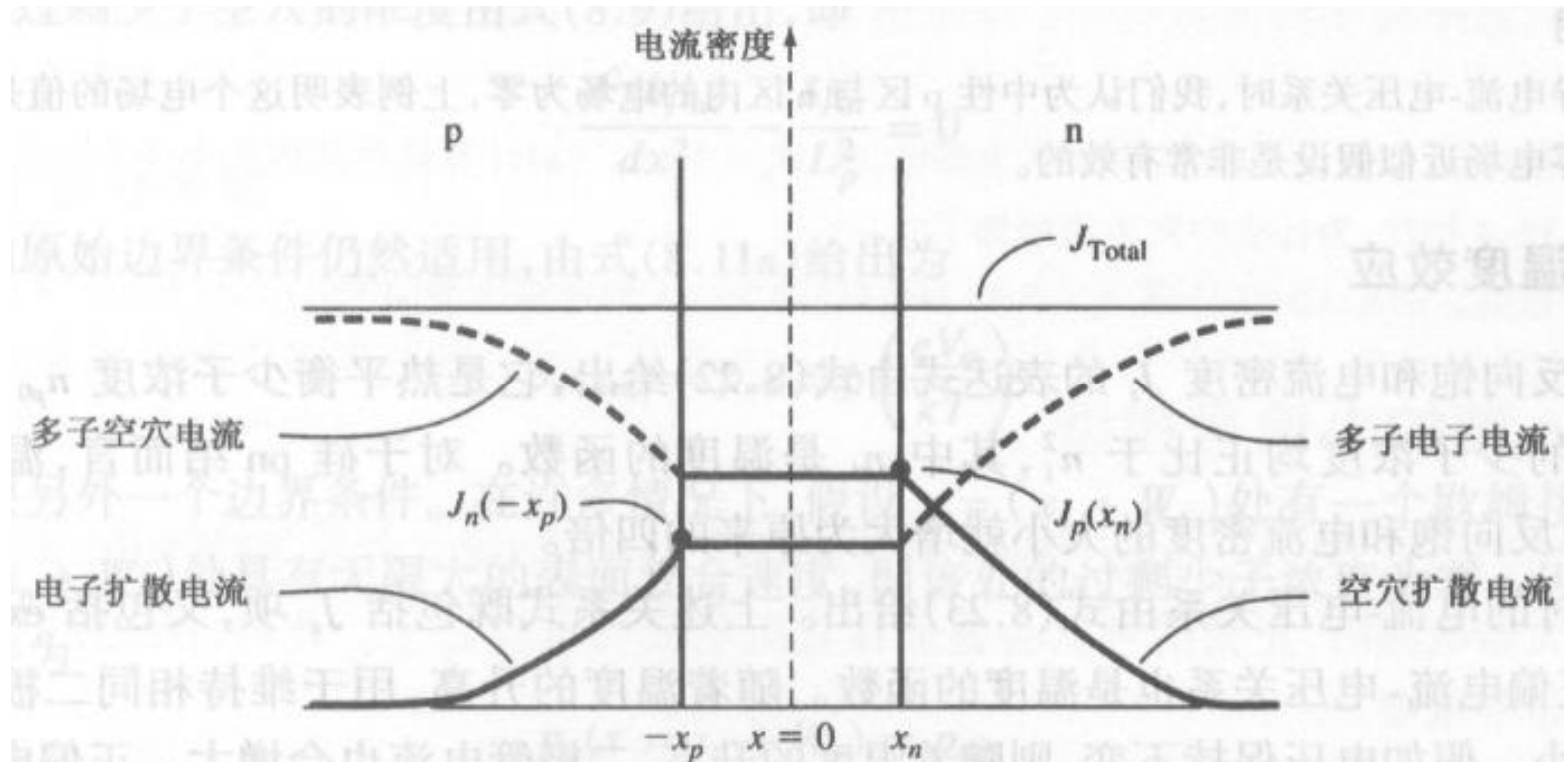
$$L_p^2 = D_p \tau_{p0}$$

$$L_n^2 = D_n \tau_{n0}$$



# 8.1 pn结电流

## 理想电流电压关系



# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

## ■ 少子分布及长二极管

总少子浓度的边界条件为

$$p_n(x_n) = p_{n0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad (8.11a)$$

$$n_p(-x_p) = n_{p0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad (8.11b)$$

$$p_n(x \rightarrow +\infty) = p_{n0} \quad (8.11c)$$

$$n_p(x \rightarrow -\infty) = n_{p0} \quad (8.11d)$$

当少子经空间电荷区扩散进入中性半导体区时,它们会与多子复合。假设图 8.3a 所示的长度  $W_n$  与  $W_p$  很长,即  $W_n \gg L_p, W_p \gg L_n$ 。在离空间电荷区很远的地方,过剩少数载流子的浓度必须趋近于零。该种 pn 结称为长 pn 结。

# 8.1 pn结电流 理想电流电压关系

## ■ 温度特性

理想反向饱和电流密度  $J_s$  的表达式由式(8.22)给出,它是热平衡少数浓度  $n_{p0}$  与  $p_{n0}$  的函数。上述的少数浓度均正比于  $n_i^2$ , 其中  $n_i$  是温度的函数。对于硅 pn 结而言,温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ,理想反向饱和电流密度的大小就增大为原来的四倍。

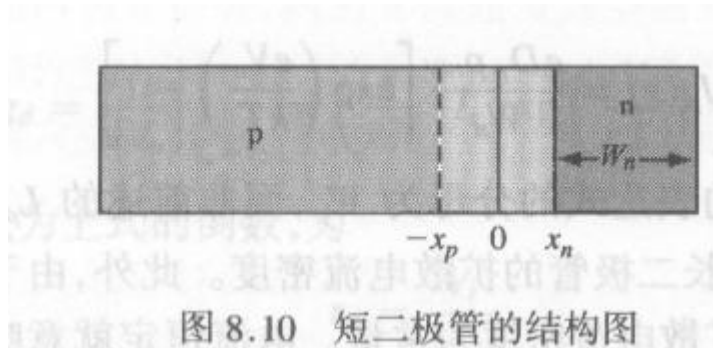
正偏时的电流-电压关系由式(8.23)给出。上述关系式既包括  $J_s$  项,又包括  $\exp(eV_a/kT)$  项,这样正偏电流-电压关系也是温度的函数。随着温度的升高,用于维持相同二极管电流的电压值变小。假如电压保持不变,则随着温度的升高,二极管电流也会增大。正偏电流随温度的变化不如反向饱和电流的变化明显。

$$J_s = \left[ \frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right]$$

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

# 8.1 pn结电流

## ■ 短二极管



少子空穴扩散电流密度的表达式为

$$J_p = -eD_p \frac{d(\delta p_n(x))}{dx}$$

那么,在短 n 区内有

$$J_p(x) = \frac{eD_p p_{n0}}{W_n} \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (8.30)$$

现在,少子空穴扩散电流密度的表达式的分母为  $W_n$ ,而非前述的  $L_p$ 。由于  $W_n \ll L_p$ ,则短二极管的扩散电流密度要远大于长二极管的扩散电流密度。此外,由于 n 区内少子的浓度近似为距离的线性函数,因此少子扩散电流密度为常量。电流恒定就意味着短区内的少子不存在复合过程。

## 8.2 pn结的小信号模型

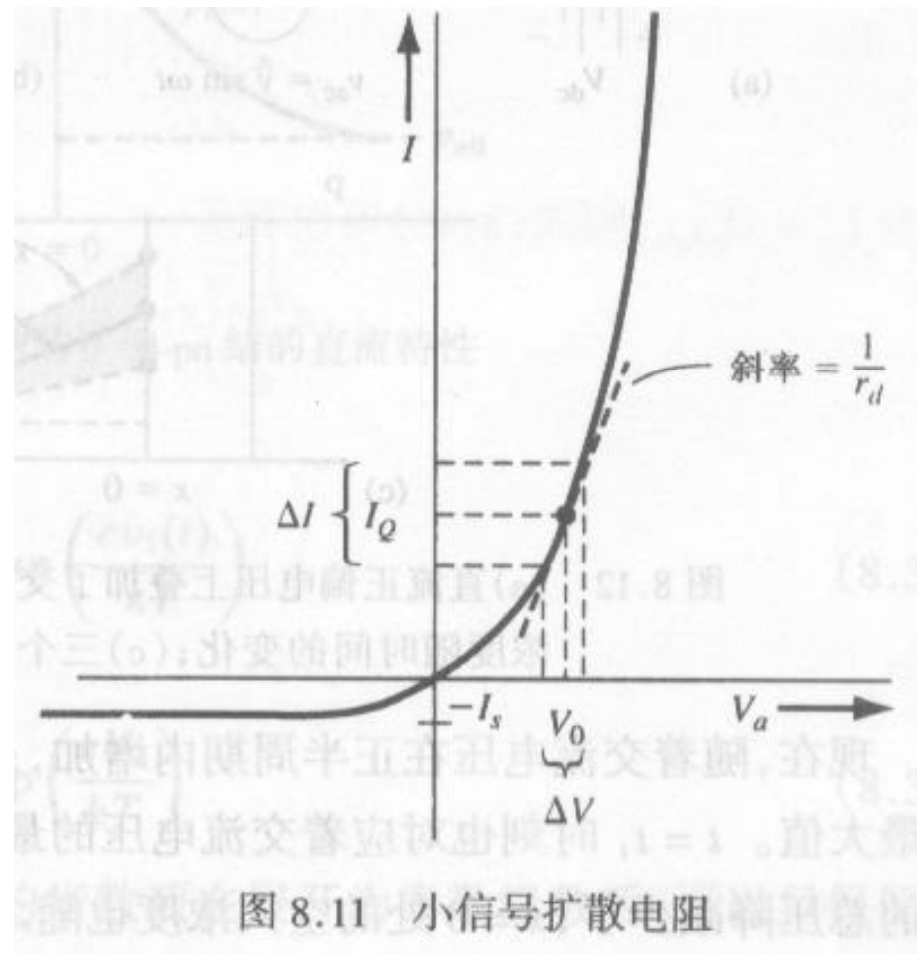
### ■ 扩散电阻

$$I_D = I_s \left[ \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$g_d = \left. \frac{dI_D}{dV_a} \right|_{V_a=V_0}$$

$$r_d = \left. \frac{dV_a}{dI_D} \right|_{I_D=I_{DQ}}$$

$I_{DQ}$  为直流静态电流



## 8.2 pn结的小信号模型

### ■ 扩散电阻

若我们认为二极管的正偏电压足够大,则电流-电压关系中的 $(-1)$ 项就可以省略,从而增量电导变为

$$g_d = \left. \frac{dI_D}{dV_a} \right|_{V_a=V_0} = \left( \frac{e}{kT} \right) I_s \exp \left( \frac{eV_0}{kT} \right) \approx \frac{I_{DQ}}{V_T} \quad (8.34)$$

直流静态电流

小信号增量电阻的表达式为上式的倒数,为

$$r_d = \frac{V_T}{I_{DQ}} \quad (8.35)$$

增量电阻随着偏置电流的增加而减小,并与图 8.11 所示的  $I$ - $V$  特性曲线的斜率成反比。增量电阻又称为扩散电阻。

## 8.2 pn结的小信号模型

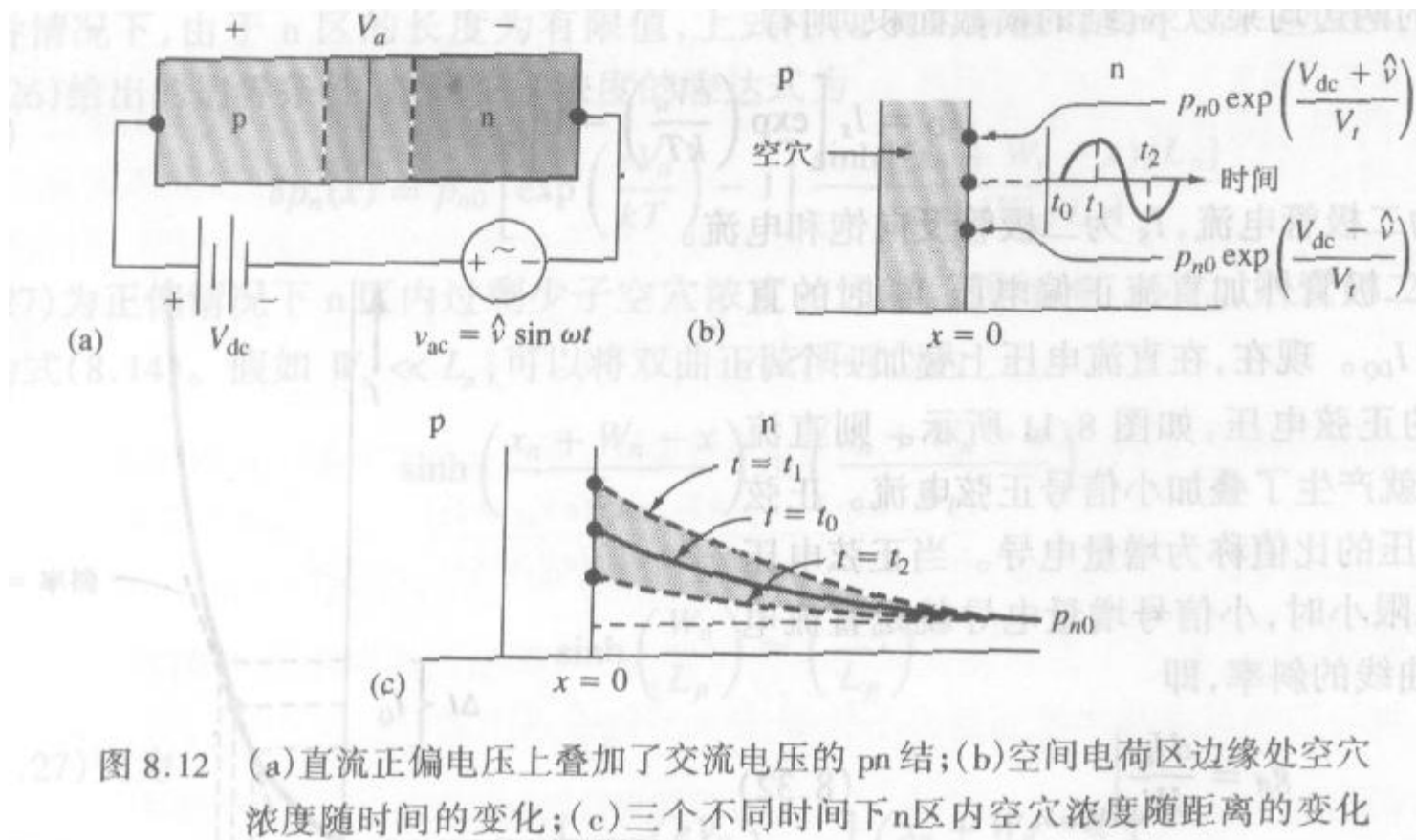


图 8.12 (a)直流正偏电压上叠加了交流电压的 pn 结;(b)空间电荷区边缘处空穴浓度随时间的变化;(c)三个不同时间下 n 区内空穴浓度随距离的变化

## 8.2 pn结的小信号模型

参数  $C_d$  称为扩散电容,可表示为

$$C_d = \left( \frac{1}{2V_r} \right) (I_{p0}\tau_{p0} + I_{n0}\tau_{n0})$$

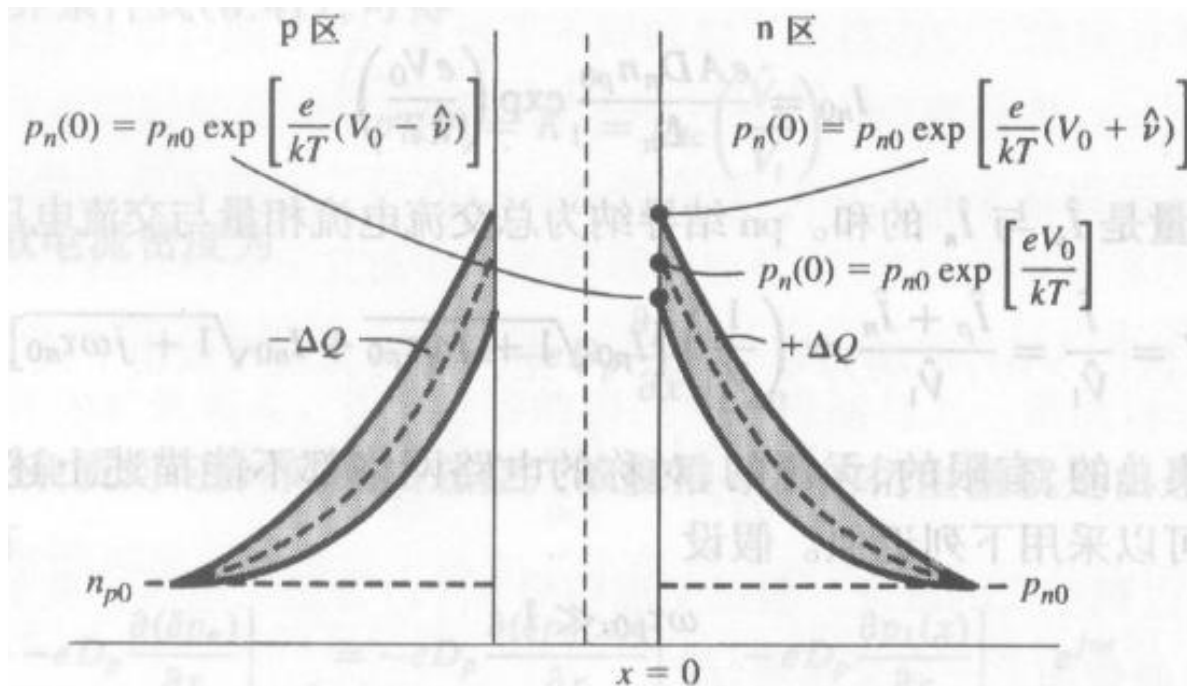


图 8.14 随正偏电压改变而改变的少子浓度

## 8.2 pn结的小信号模型

### ■ 等效电路

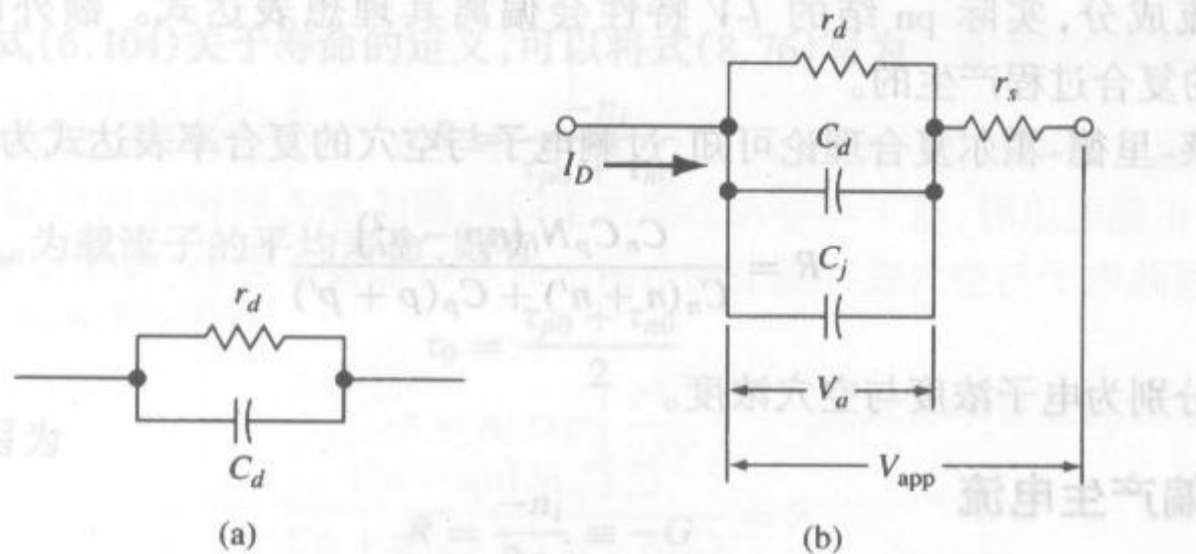
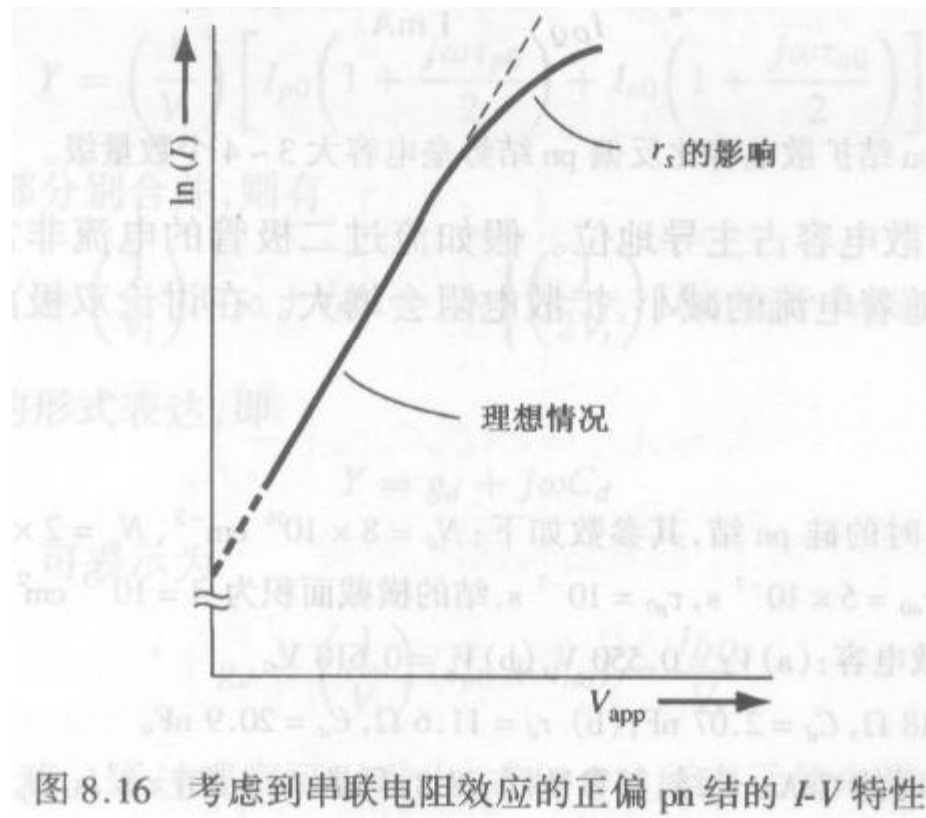


图 8.15 (a)理想正偏 pn 结的小信号等效电路;(b) pn 结的完整小信号等效电路

## 8.2 pn结的小信号模型



## 8.3 产生复合电流

### ■ 反偏 $J_R$

负复合率即产生率

$$R = \frac{-n_i}{2\tau_0} \equiv -G$$

$$J_{\text{gen}} = \frac{en_i W}{2\tau_0}$$

$$J_R = J_s + J_{\text{gen}}$$

$$R = \frac{C_n C_p N_t (np - n_i^2)}{C_n (n + n') + C_p (p + p')}$$

$n \approx p \approx 0$ 。由式(8.74)给出的复合率变为

$$R = \frac{-C_n C_p N_t n_i^2}{C_n n' + C_p p'}$$

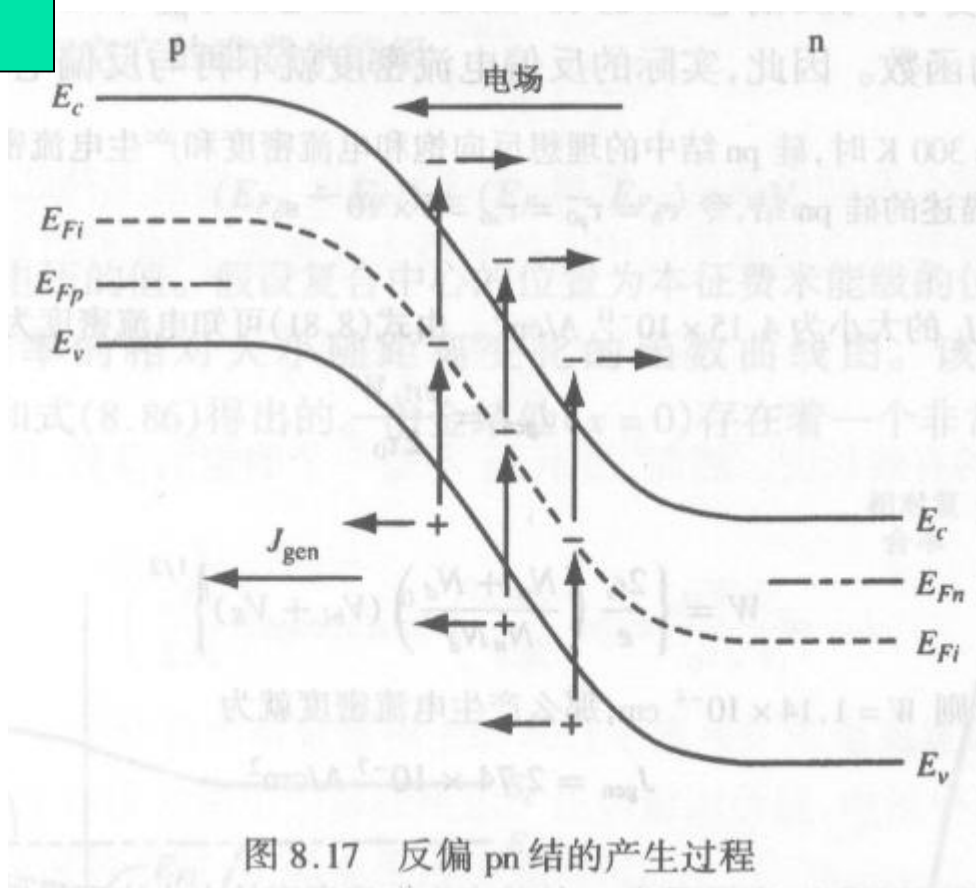


图 8.17 反偏 pn 结的产生过程

## 8.3 产生复合电流

### ■ 正偏

$$J_{\text{rec}} = \frac{eWn_i}{2\tau_0} \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right) = J_{r0} \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

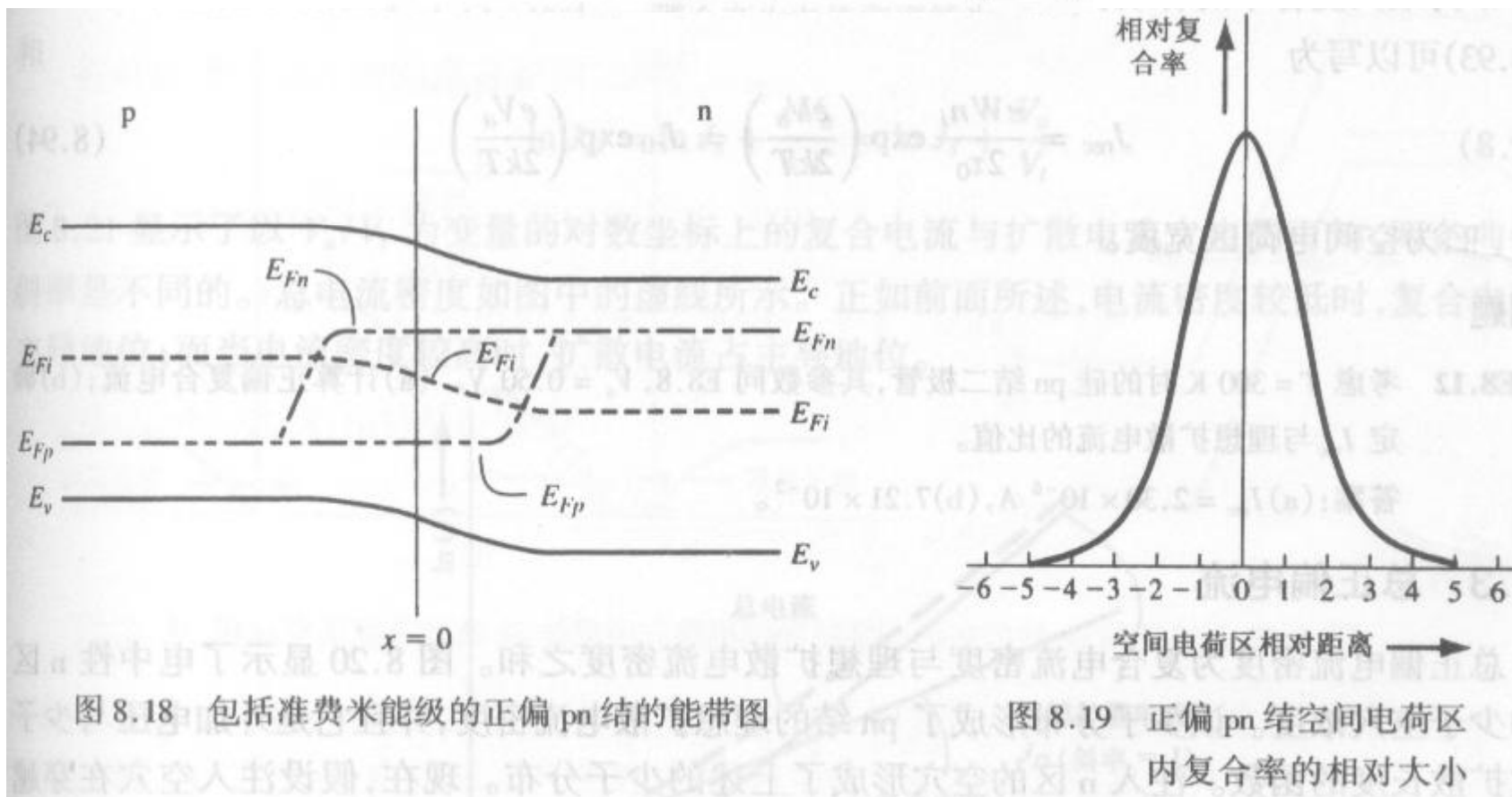


图 8.18 包括准费米能级的正偏 pn 结的能带图

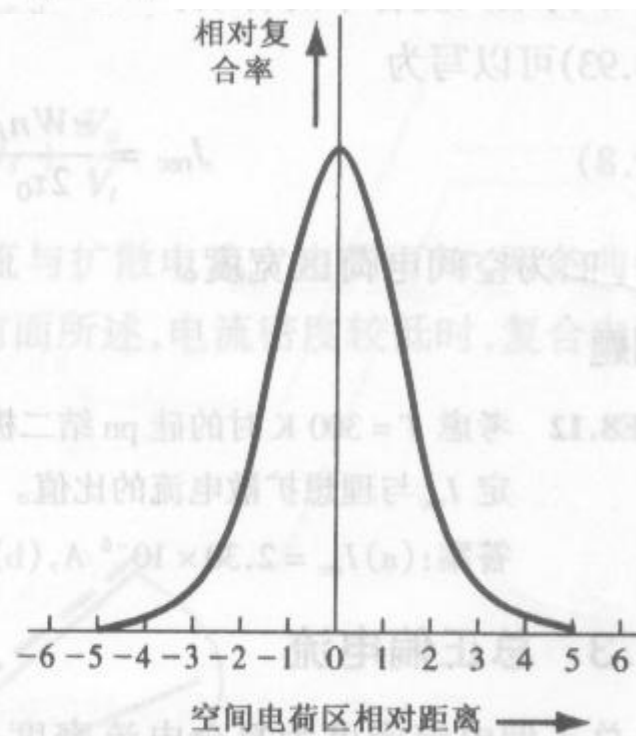


图 8.19 正偏 pn 结空间电荷区内复合率的相对大小

## 8.3 产生复合电流

### ■ 总正偏电流 $J_D$

$$J = J_{\text{rec}} + J_D$$

$J_D$  由下式给出:

$$J_D = J_s \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

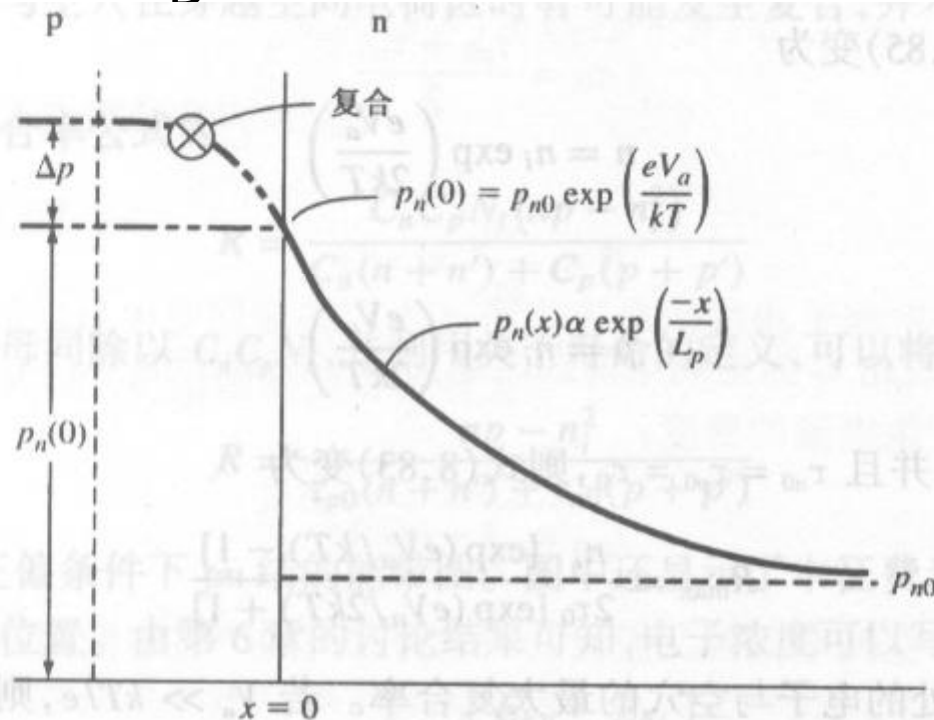
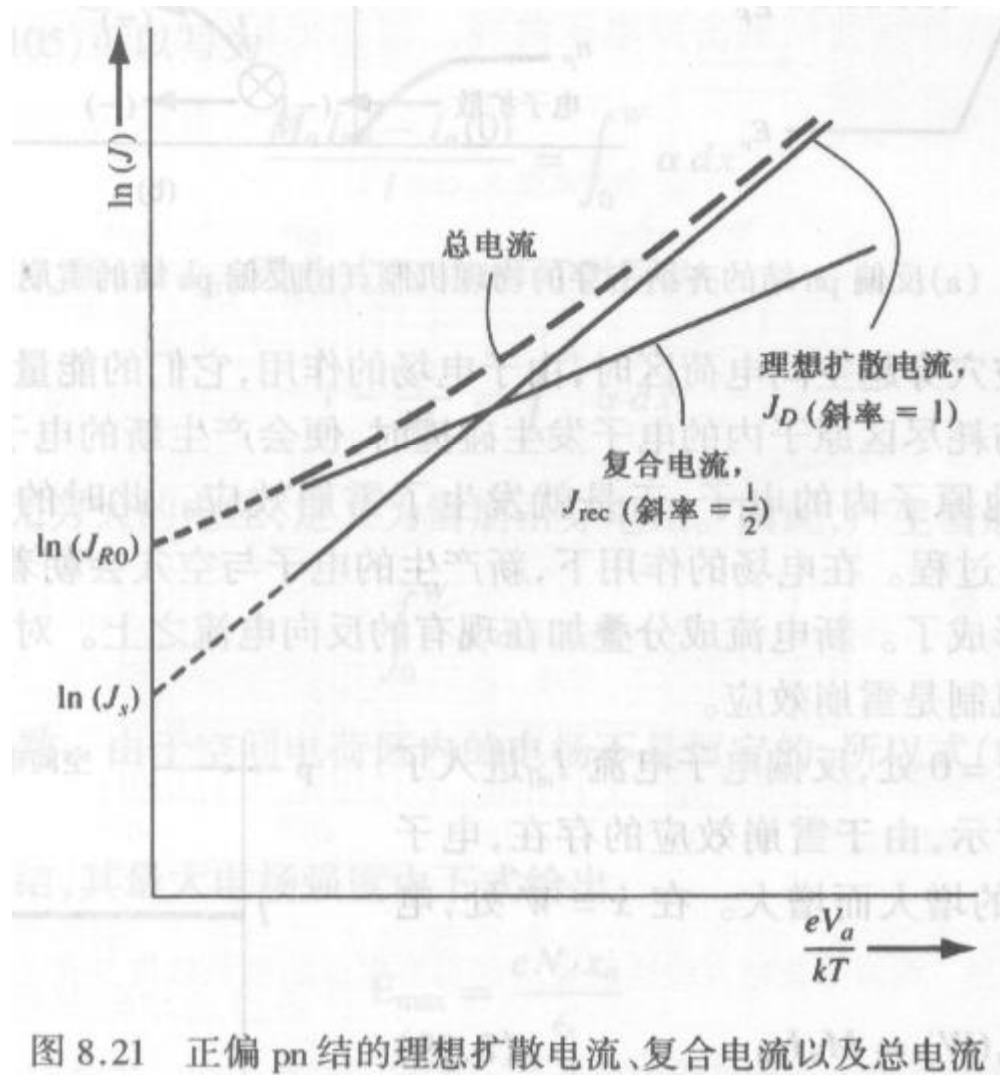


图 8.20 由于复合作用, p 区要向空间电荷区注入额外的空穴, 以建立 n 区的少子空穴浓度分布

## 8.3 产生复合电流

- J小时复合主导
- J大时扩散主导



## 8.4 结击穿

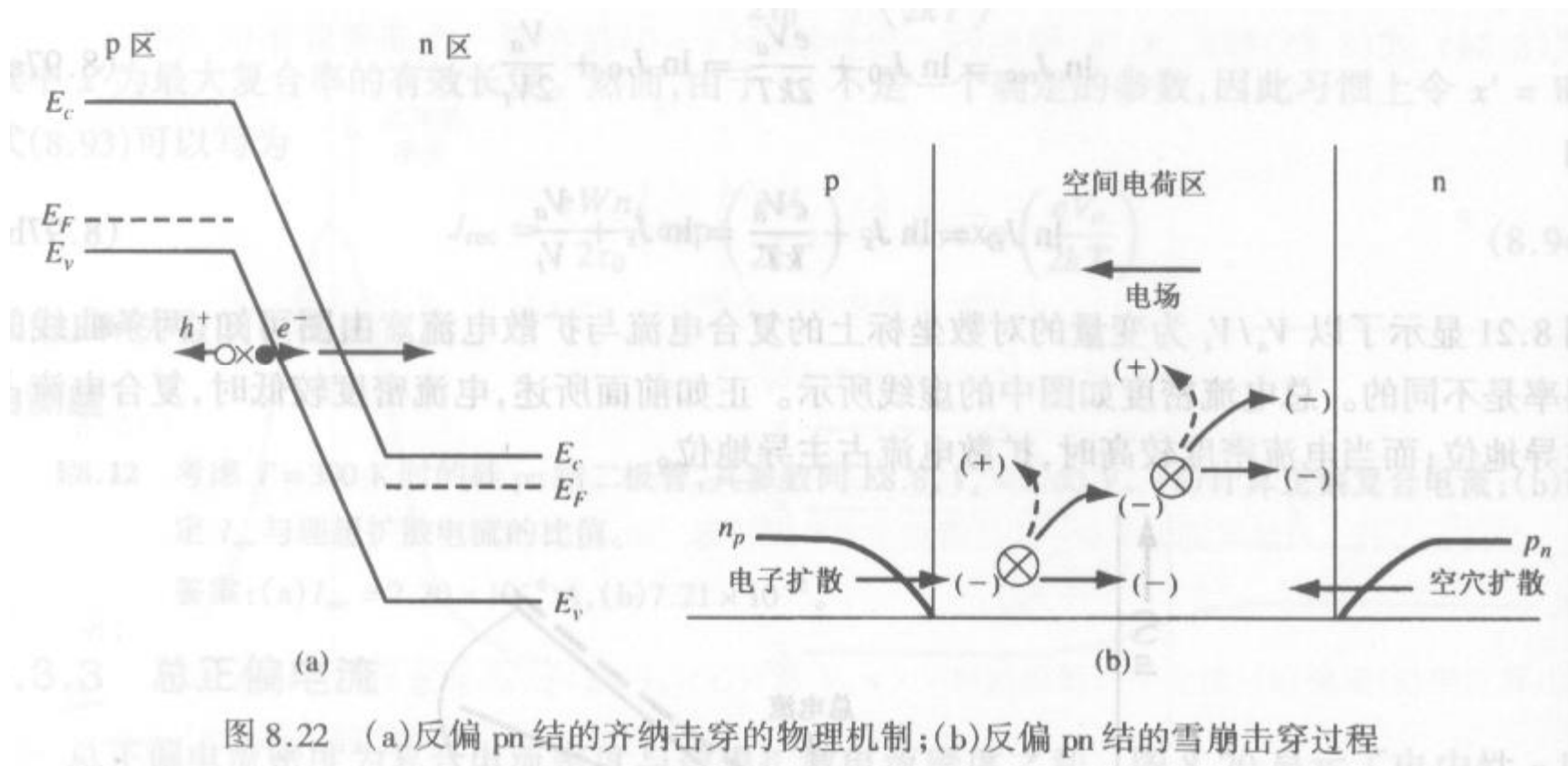


图 8.22 (a)反偏 pn 结的齐纳击穿的物理机制;(b)反偏 pn 结的雪崩击穿过程

## 8.4 结击穿

### ■ 电流倍增

$$I_n(W) = M_n I_{n0}$$

$M_n$  为倍增因子

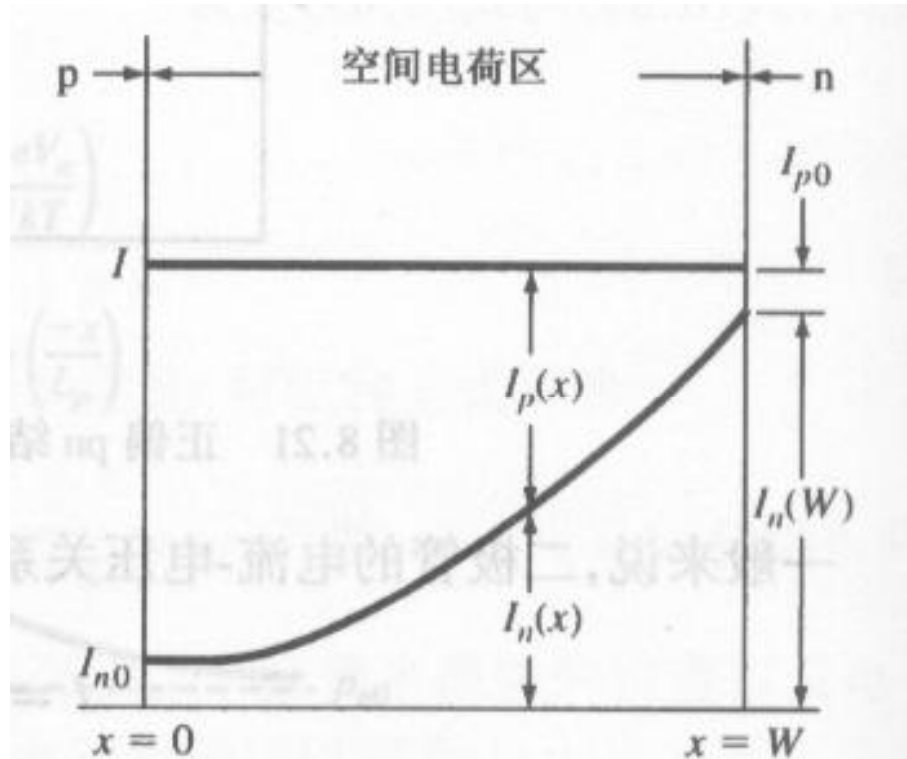
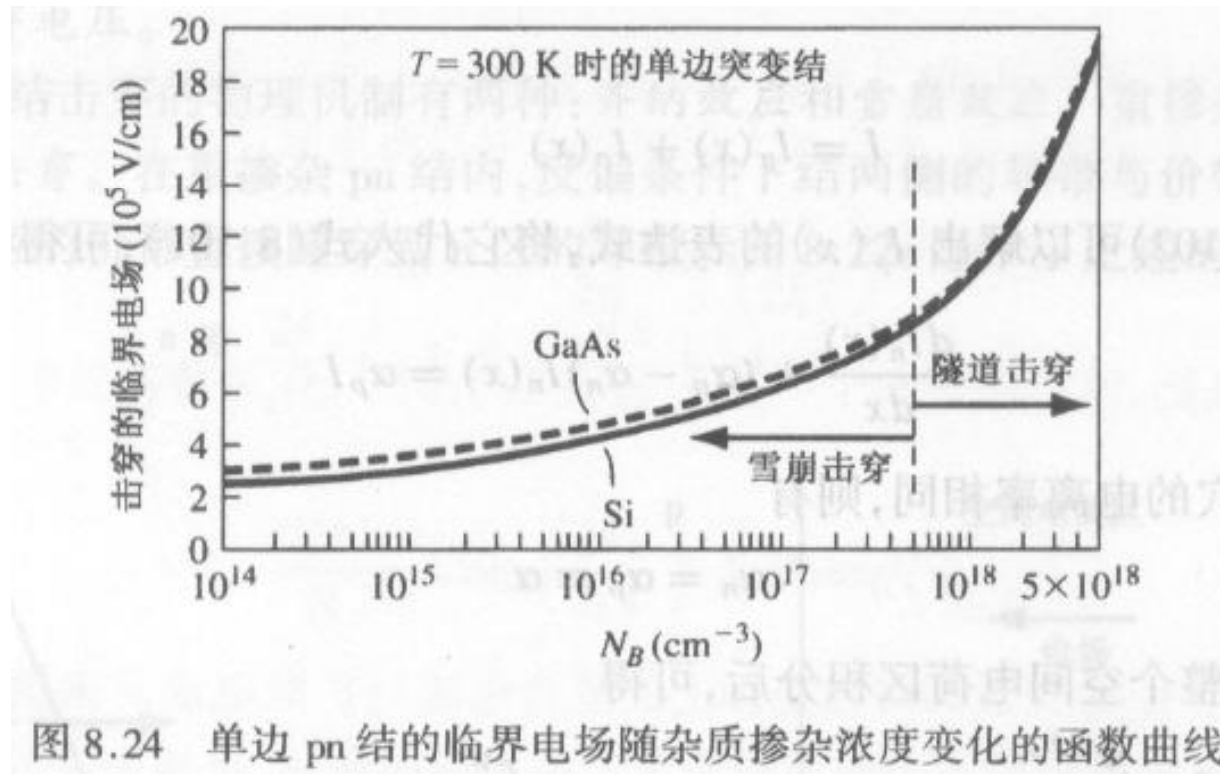


图 8.23 雪崩倍增效应发生时,空间电荷区内的电子电流及空穴电流成分

## 8.4 结击穿

- 低浓度雪崩，高浓度隧穿



## 8.5 电荷存储与二极管瞬态

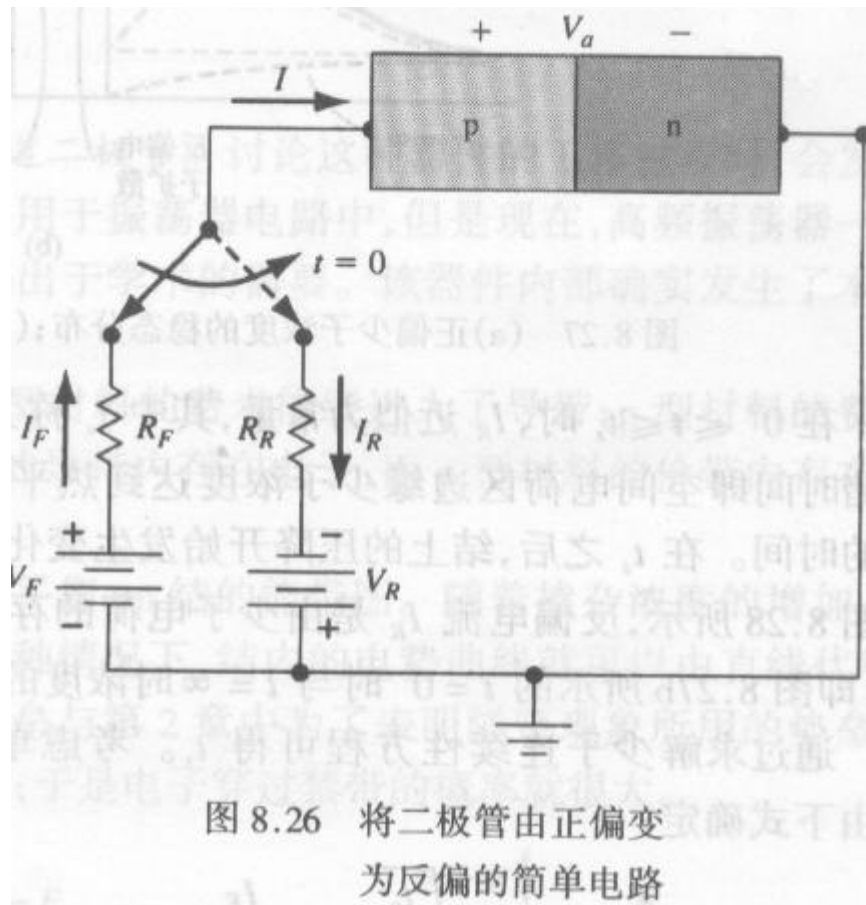
### ■ 开一>关

正偏电流为

$$I = I_F = \frac{V_F - V_a}{R_F}$$

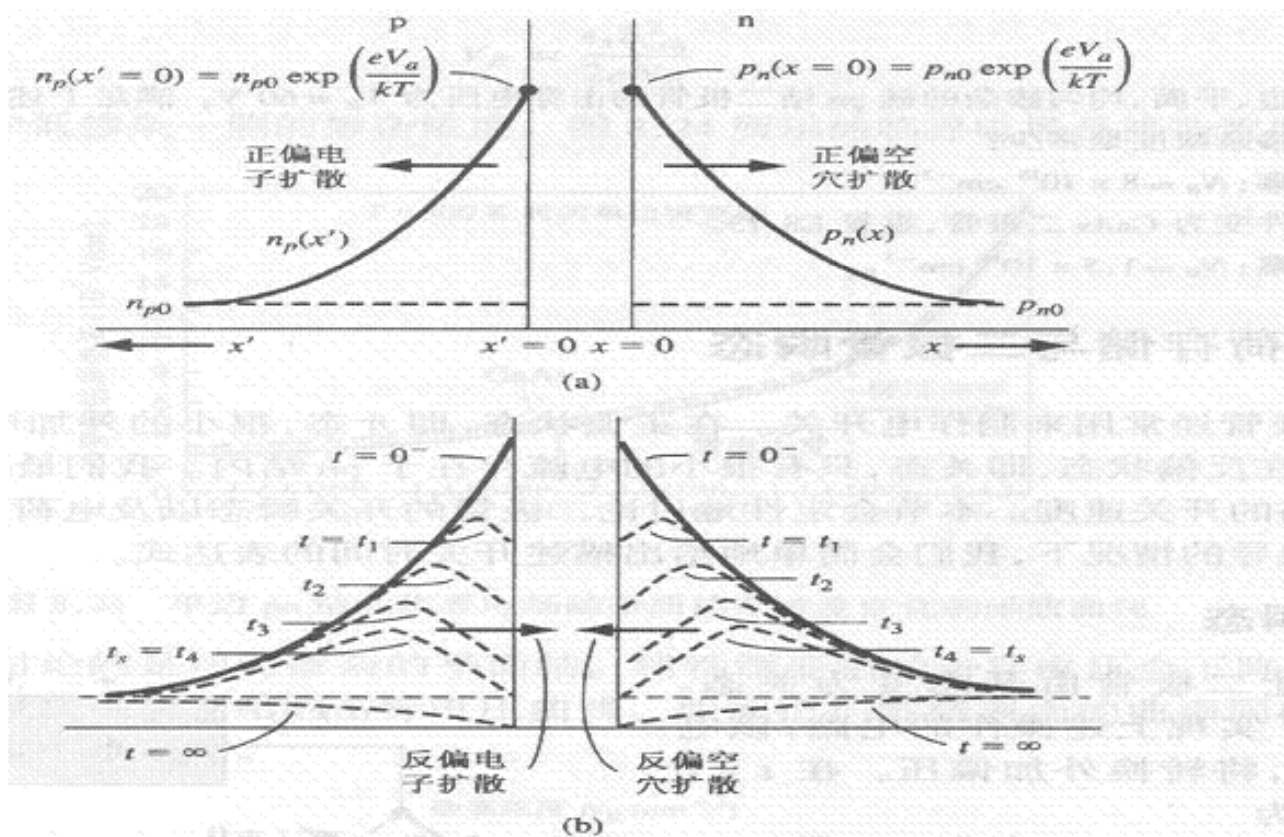
反偏电流近似为

$$I = -I_R \approx \frac{-V_R}{R_R}$$



## 8.5 电荷存储与二极管瞬态

### ■ 开—>关



(a) 正偏少子浓度的稳态分布; (b) 开关过程中少子浓度随时间的变化

## 8.5 电荷存储与二极管瞬态

■  $t_s$

$0^+ \leq t \leq t_s$  时,  $I_R$  近似为常量, 其中  $t_s$  称为存储时间

即空间电荷区边缘少子浓度达到热平衡值时所经历的时间

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_s}{\tau_{p0}}} = \frac{I_F}{I_F + I_R}$$

$\operatorname{erf}(x)$  为误差函数。上式关于  $t_s$  的近似解为

$$t_s \approx \tau_{p0} \ln \left[ 1 + \frac{I_F}{I_R} \right]$$

■  $t_2$  为 pn 结达到稳定反偏状态所用的时间

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_2}{\tau_{p0}}} + \frac{\exp(-t_2/\tau_{p0})}{\sqrt{\pi t_2/\tau_{p0}}} = 1 + 0.1 \left( \frac{I_R}{I_F} \right)$$

总关断时间为  $t_s$  与  $t_2$  的和。

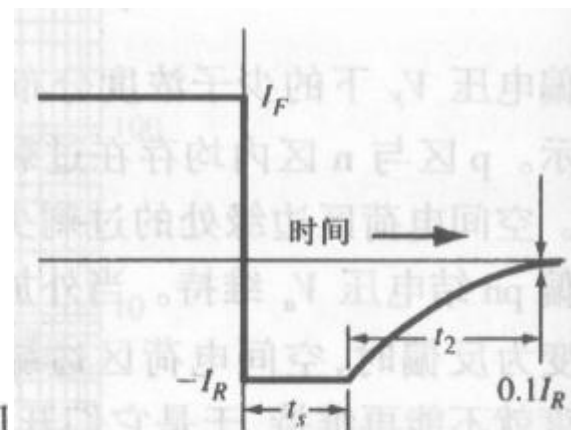


图 8.28 开关过程中电流随时间变化的曲线

## 8.6 隧道二极管

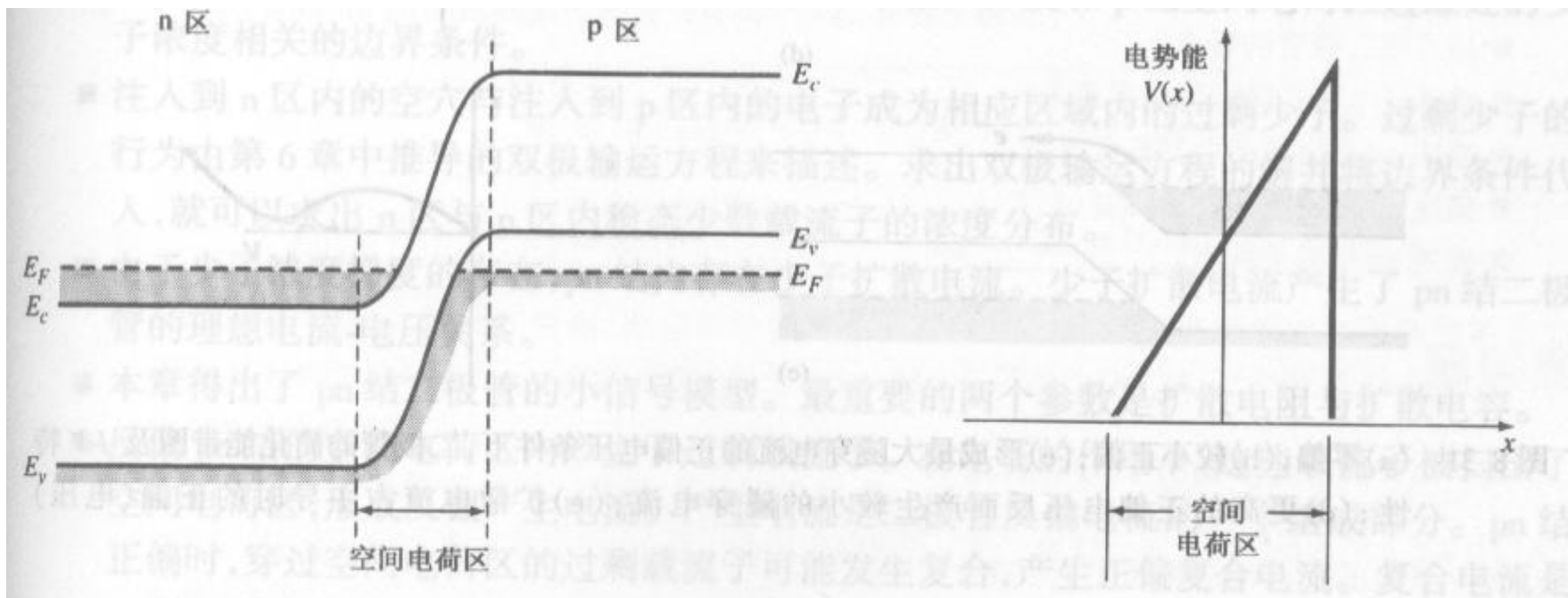
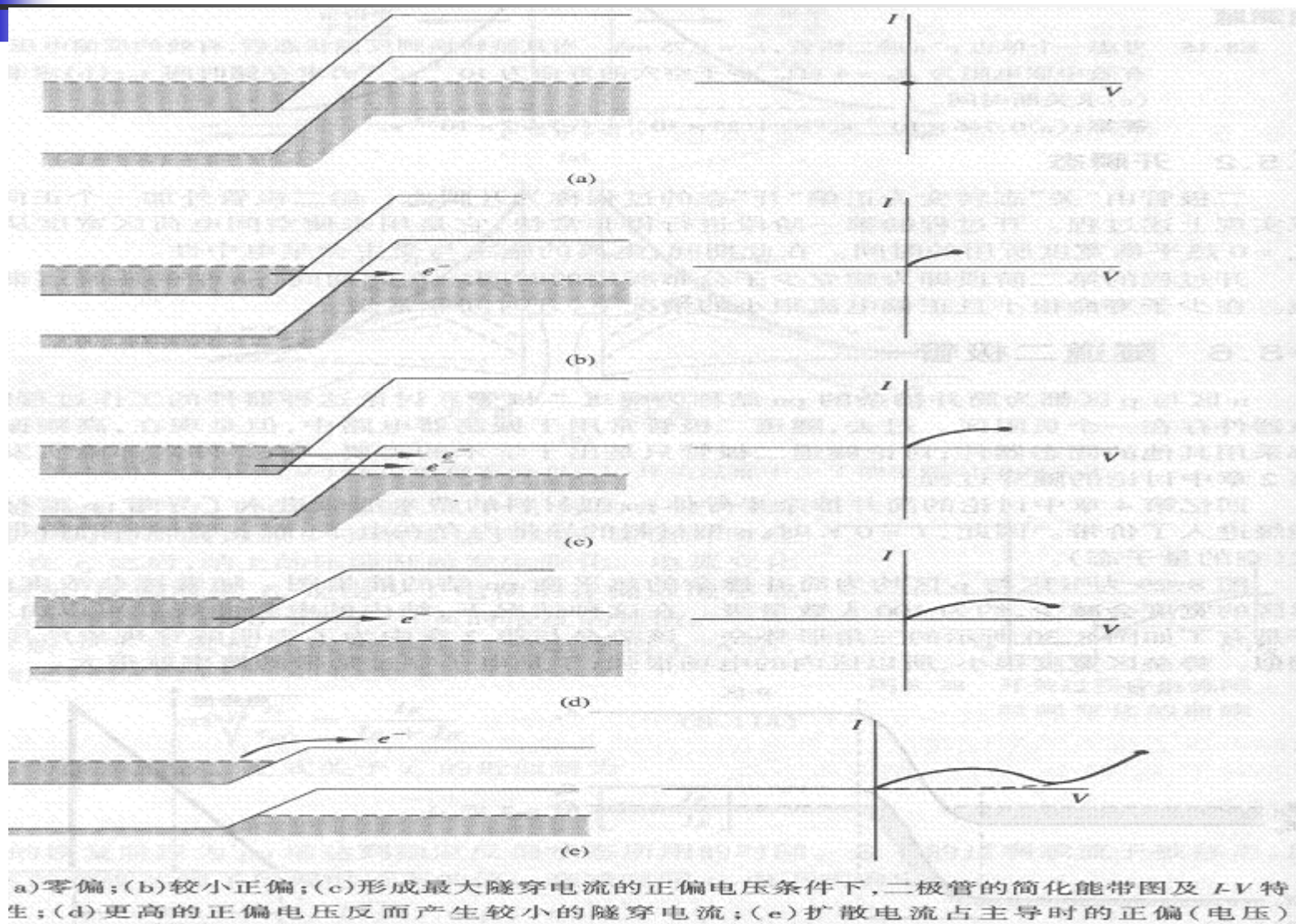


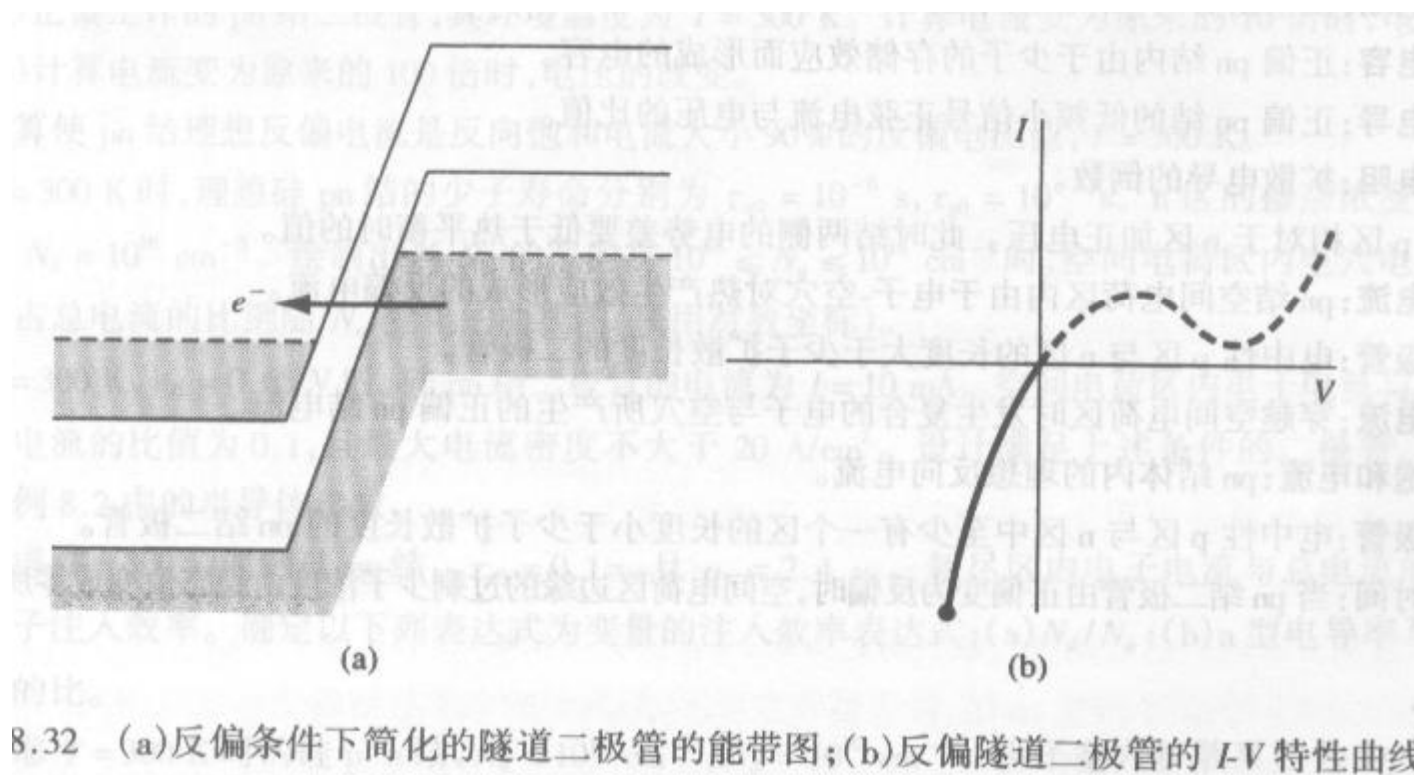
图 8.29 n 区与 p 区均为简并掺杂的 pn 结的热平衡能带图

图 8.30 隧道二极管势垒的三角形势垒近似

## 8.6 隧道二极管



## 8.6 隧道二极管



8.32 (a)反偏条件下简化的隧道二极管的能带图;(b)反偏隧道二极管的  $I-V$  特性曲线

# 小结

- 当 pn 结外加正偏电压时(p 区相对于 n 区为正),pn 结内部的势垒就会降低,于是 p 区空穴与 n 区电子就会穿过空间电荷区流向相应的区域。
- 本章推导出了与 n 区空间电荷区边缘处的少子空穴浓度和 p 区空间电荷区边缘处的少子浓度相关的边界条件。
- 注入到 n 区内的空穴与注入到 p 区内的电子成为相应区域内的过剩少子。过剩少子的行为由第 6 章中推导的双极输运方程来描述。求出双极输运方程的解并将边界条件代入,就可以求出 n 区与 p 区内稳态少数载流子的浓度分布。
- 由于少子浓度梯度的存在,pn 结内存在少子扩散电流。少子扩散电流产生了 pn 结二极管的理想电流-电压关系。
- 本章得出了 pn 结二极管的小信号模型。最重要的两个参数是扩散电阻与扩散电容。
- 反偏 pn 结的空间电荷区内产生了过剩载流子。在电场的作用下,这些载流子被扫出了空间电荷区,形成反偏产生电流。产生电流是二极管反偏电流的一个组成部分。pn 结正偏时,穿过空间电荷区的过剩载流子可能发生复合,产生正偏复合电流。复合电流是 pn 结正偏电流的另一个组成部分。
- 当 pn 结的外加反偏电压足够大时,就会发生雪崩击穿。此时,pn 结体内产生一个较大的反偏电流。击穿电压为 pn 结掺杂浓度的函数。在单边 pn 结中,击穿电压是低掺杂一侧掺杂浓度的函数。
- 当 pn 结由正偏状态转换到反偏状态时,pn 结内存储的过剩少数载流子会被移走,即电容放电。放电时间称为存储时间,它是二极管开关速度的一个限制因素。



# 重要术语解释

**雪崩击穿:**电子和(或)空穴穿越空间电荷区时,与空间电荷区内原子的电子发生碰撞产生电子-空穴对,在 pn 结内形成一股很大的反偏电流,这个过程就称为雪崩击穿。

**载流子注入:**外加偏压时, pn 结体内载流子穿过空间电荷区进入 p 区或 n 区的过程。

**临界电场:**发生击穿时 pn 结空间电荷区的最大电场强度。

**扩散电容:**正偏 pn 结内由于少子的存储效应而形成的电容。

**扩散电导:**正偏 pn 结的低频小信号正弦电流与电压的比值。

**扩散电阻:**扩散电导的倒数。

**正偏:**p 区相对于 n 区加正电压。此时结两侧的电势差要低于热平衡时的值。

**产生电流:**pn 结空间电荷区内由于电子-空穴对热产生效应形成的反偏电流。

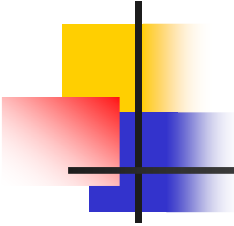
**长二极管:**电中性 p 区与 n 区的长度大于少子扩散长度的二极管。

**复合电流:**穿越空间电荷区时发生复合的电子与空穴所产生的正偏 pn 结电流。

**反向饱和电流:**pn 结体内的理想反向电流。

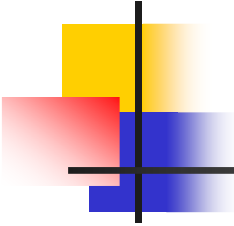
**短二极管:**电中性 p 区与 n 区中至少有一个区的长度小于少子扩散长度的 pn 结二极管。

**存储时间:**当 pn 结二极管由正偏变为反偏时,空间电荷区边缘的过剩少子浓度由稳态值变成零所用的时间。



# 知识点

- 描述外加正偏电压的 pn 结内电荷穿过空间电荷区流动的机制。
- 说出空间电荷区边缘少数浓度的边界条件。
- 推出 pn 结内稳态少数浓度的表达式。
- 推出理想 pn 结的电流-电压关系。
- 描述短二极管的特点。
- 描述什么是扩散电阻与电容。
- 描述 pn 结内的产生与复合电流。
- 描述 pn 结的雪崩击穿机制。
- 描述 pn 结的关断瞬态。



# 复习题

1. 为什么正偏 pn 结的势垒高度会下降？
2. 在(a)正偏、(b)反偏状态下,写出过剩少数载流子浓度的边界条件。
3. 画出正偏 pn 结的稳态少数载流子浓度分布图。
4. 解释 pn 结二极管的理想  $I-V$  关系。
5. 画出正偏 pn 结二极管的电子和空穴电流图。
6. 什么是短二极管？
7. (a)解释扩散电容的形成机制;(b)什么是扩散电阻？
8. 解释(a)产生电流与(b)复合电流的形成机制。
9. 为什么随着掺杂浓度的增大,击穿电压反而下降？
10. 解释什么是存储时间。



END

---