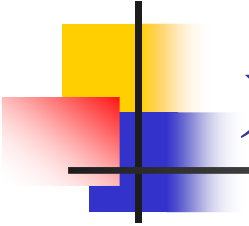


P N 结

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

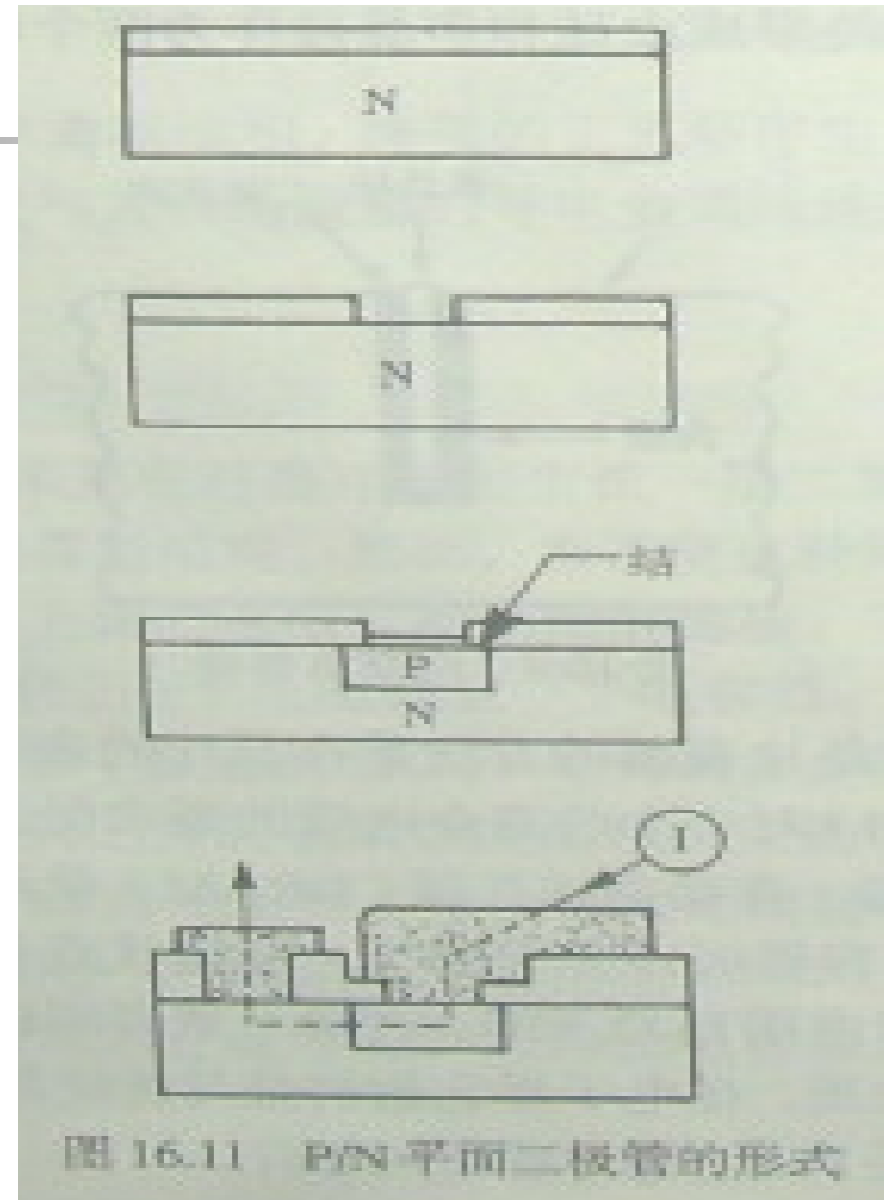


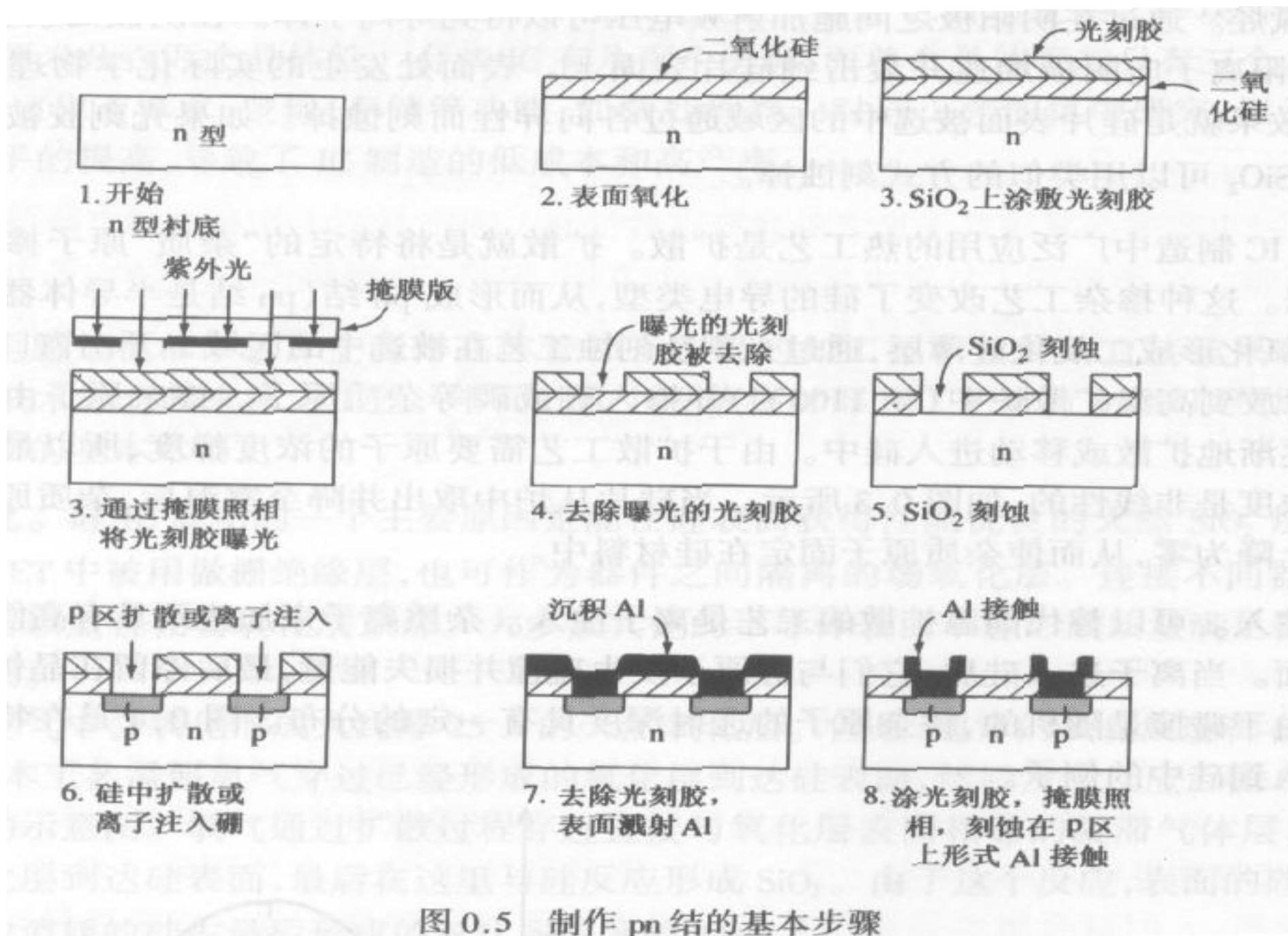
本次课内容

- 第7章pn结
- 7. 1 pn结的基本结构
- 7. 2零偏
- 7. 3反偏
- *7. 4非均匀掺杂pn结
- 7. 5小结

PN结的形成

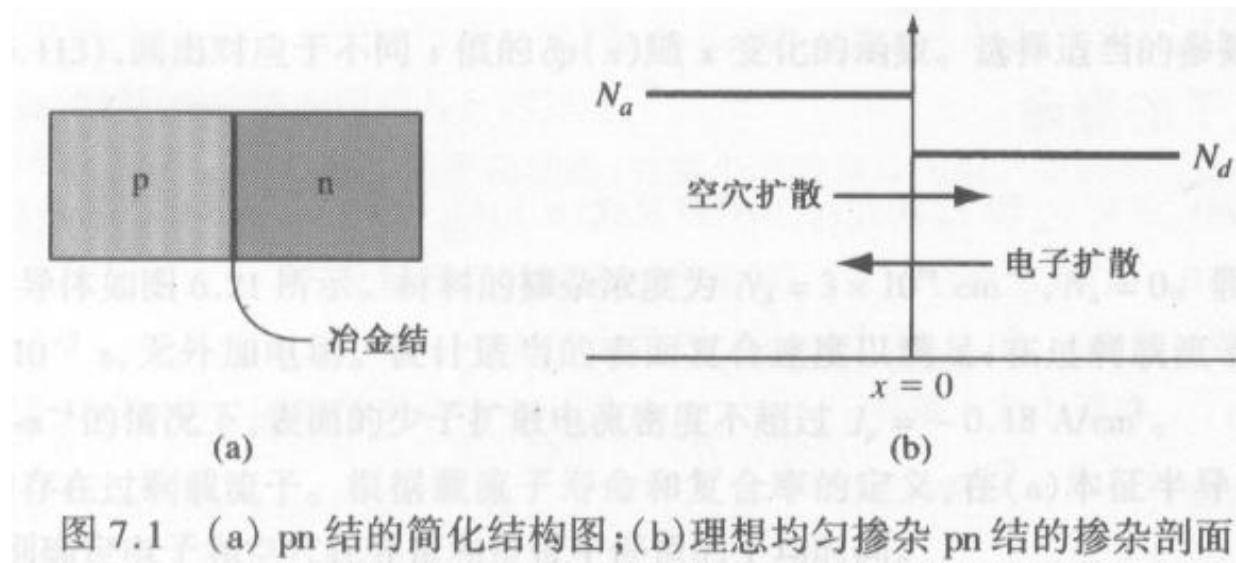
1. N型衬底
2. 开孔
3. 注入或扩散p
4. 做接触孔





7.1 pn结的基本结构

- 冶金结__P区和n区的交界面
 - 突变结 线性缓变结 超突变结
 - 突变结__均匀分布，交界处突变



7.1 pn结的基本结构

- 空间电荷区=耗尽区（没有可动电荷）

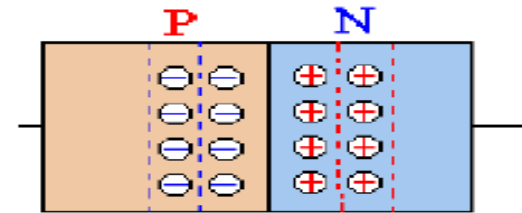
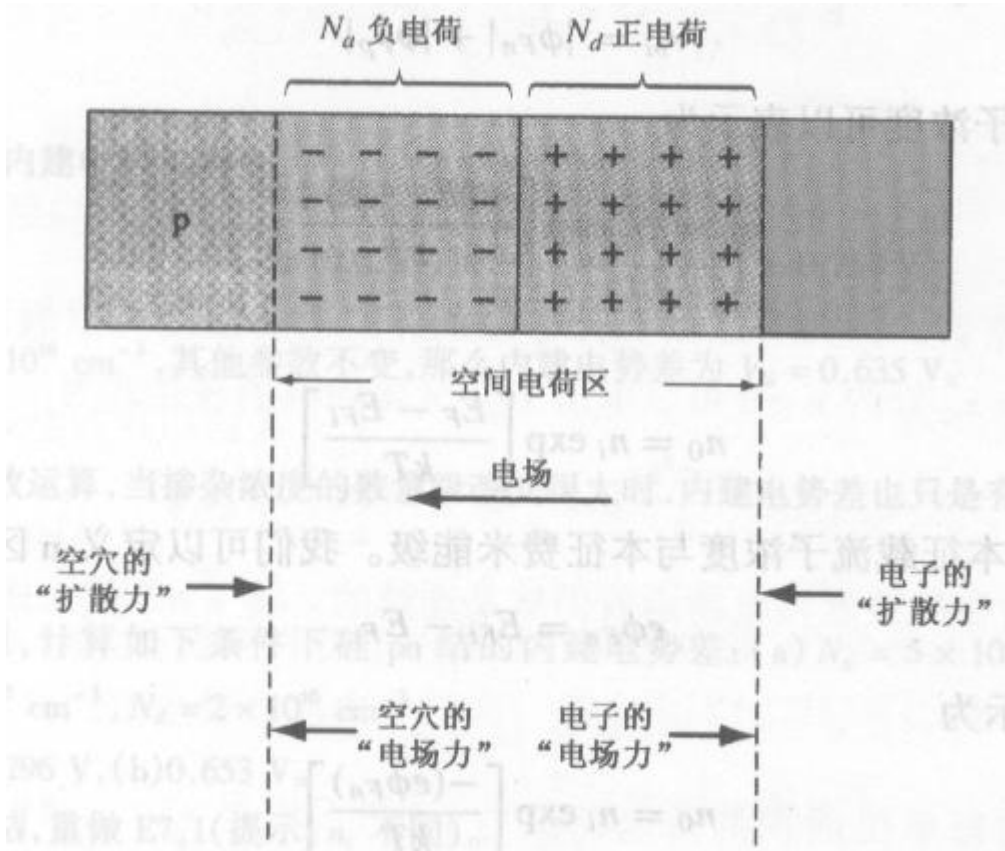


图 7.2 空间电荷区、电场,以及施加在载流子上的两种力

7.2 零偏

■ 内建电势差

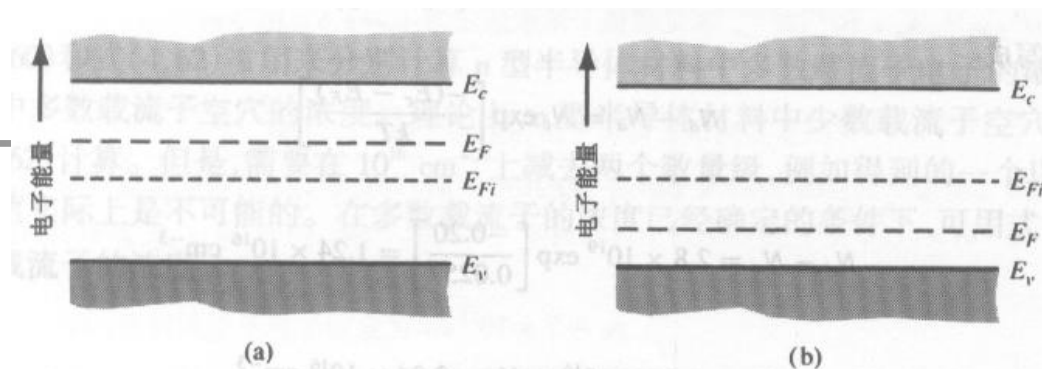


图 4.17 两种类型半导体的费米能级位置:(a)n 型($N_d > N_a$);(b)p 型($N_a > N_d$)

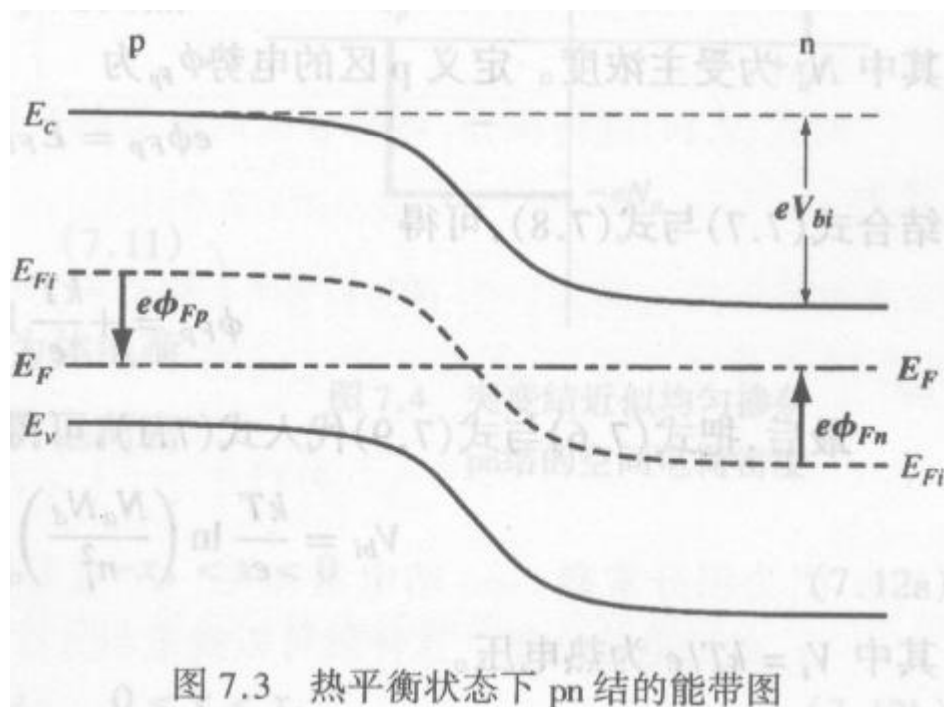


图 7.3 热平衡状态下 pn 结的能带图

内建电势差, 记为 V_{bi}

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}|$$

7.2 零偏

n 区内的导带电子浓度可以表示为

$$n_0 = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT} \right] \quad (7.2)$$

也可以表示为

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT} \right] \quad (7.3)$$

其中 n_i 与 E_{Fi} 分别为本征载流子浓度与本征费米能级。我们可以定义 n 区内的电势 ϕ_{Fn} 为

$$e\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (7.4)$$

那么式(7.3)可以表示为

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{-(e\phi_{Fn})}{kT} \right] \quad (7.5)$$

式(7.5)的两边取自然对数,使 $n_0 = N_d$, 求解电势 ϕ_{Fn} 可得

$$\phi_{Fn} = \frac{-kT}{e} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (7.6)$$

7.2 零偏

类似地,在 p 区内,空穴的浓度可以表示为

$$p_0 = N_a = n_i \exp \left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT} \right] \quad (7.7)$$

其中 N_a 为受主浓度。定义 p 区的电势 ϕ_{Fp} 为

$$e\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (7.8)$$

结合式(7.7)与式(7.8),可得

$$\phi_{Fp} = +\frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (7.9)$$

最后,把式(7.6)与式(7.9)代入式(7.1),可得突变结的内建电势差的表达式,即

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (7.10)$$

其中 $V_t = kT/e$ 为热电压。

从本章开始, N_d 与 N_a 分别指 n 区与 p 区内的净施主与受主浓度

7.2 零偏

■ 内建电势的大小

例 7.1 计算 pn 结中的内建电势差。

硅 pn 结的环境温度为 $T = 300 \text{ K}$, 掺杂浓度分别为 $N_a = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。假设 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

■ 解

由式(7.10)可知, 内建电势差为

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \left[\frac{(10^{18})(10^{15})}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right] = 0.754 \text{ V}$$

若将 N_a 改为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 其他参数不变, 那么内建电势差为 $V_{bi} = 0.635 \text{ V}$ 。

■ 说明

由于进行的是对数运算, 当掺杂浓度的数量级改变很大时, 内建电势差也只是有微小的变化。

7.2 零偏

电场强度

- 电荷密度（均匀）
- 电场强度（ $x=0$ 处 E 最大）

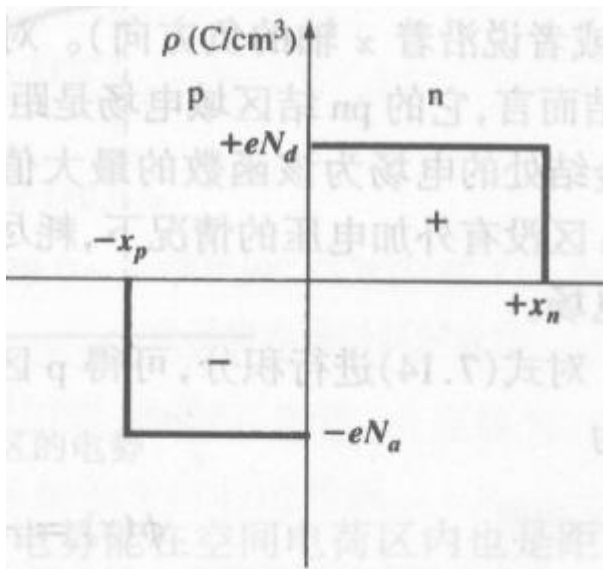


图 7.4 突变结近似均匀掺杂
pn结的空间电荷密度

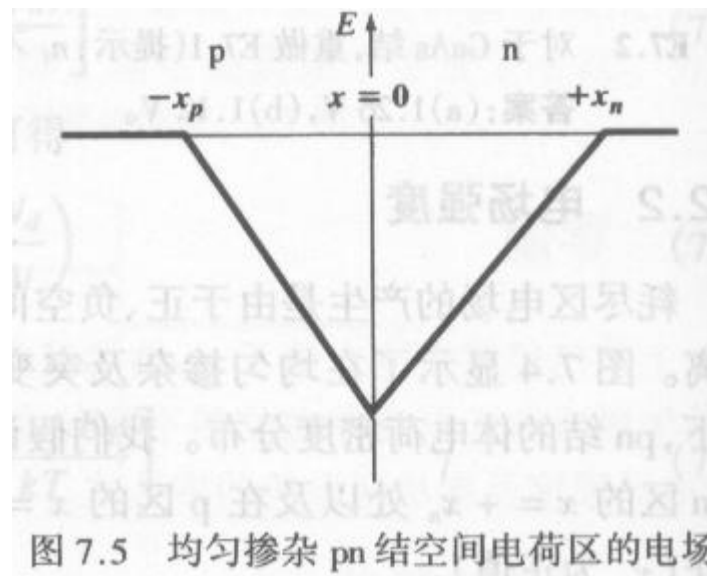


图 7.5 均匀掺杂 pn 结空间电荷区的电场

7.2 零偏

电场强度

半导体内的电场由一维泊松方程确定：

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{dE(x)}{dx} \quad (7.11)$$

其中 $\phi(x)$ 为电势, $E(x)$ 为电场的大小, $\rho(x)$ 为体电荷密度, ϵ_s 为半导体的介电常数。由图 7.4 可知,电荷密度 $\rho(x)$ 为

$$\rho(x) = -eN_a \quad -x_p < x < 0$$

与

$$\rho(x) = eN_d \quad 0 < x < x_n$$

7.2 零偏

电场强度

对式(7.11)进行积分,可得电场的表达式为

$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} x + C_1 \quad (7.13)$$

其中 C_1 为积分常数。由于热平衡状态下没有电流流过半导体,因此我们认为 $x < -x_p$ 的电中性 p 型区内电场为零。由于 pn 结不存在表面电荷密度,因此电场函数是连续的。令 $x = -x_p$ 处的 $E = 0$, 就可以求出积分常数 C_1 。因此 p 区内的电场表达式为

$$E = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0 \quad (7.14)$$

在 n 型区内,电场的表达式由下式给出:

$$E = \int \frac{(eN_d)}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + C_2 \quad (7.15)$$

其中 C_2 仍然是积分常数。因为 n 区除了耗尽区以外的电场强度可以假设为零,且电场强度是连续的,所以令 $x = x_n$ 处的 $E = 0$ 可以求出 C_2 。n 区内电场表达式为

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (7.16)$$

在 $x = 0$ 处(冶金结所在的位置),电场函数仍然是连续的。将 $x = 0$ 代入式(7.14)与式(7.16),并令它们相等可得

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (7.17)$$

7.2 零偏

电场强度

对式(7.14)进行积分,可得 p 区内电势的表达式为

$$\phi(x) = - \int E(x) dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) dx \quad (7.18)$$

即

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x \right) + C'_1 \quad (7.19)$$

其中 C'_1 为积分常数。pn 结电势差是一个重要的参数,它比电势绝对值重要,因此我们设 $x = -x_p$ 处的电势为零。这样就可以确定积分常数 C'_1 的值为

$$C'_1 = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (7.20)$$

因此 p 区内的电势表达式可以写为

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad (-x_p \leq x \leq 0) \quad (7.21)$$

7.2 零偏

电场强度

同样,对 n 区内的电势表达式积分,可以求出 n 区内的电势表达式为

$$\phi(x) = \int \frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) dx \quad (7.22)$$

即

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + C'_2 \quad (7.23)$$

其中 C'_2 是积分常数。由于电势函数是连续的,因此将 $x = 0$ 分别代入式(7.21)与式(7.23),并令它们相等,这样便可以求出 C'_2 的表达式,即

$$C'_2 = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (7.24)$$

那么 n 区内电势的表达式可以写为

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (0 \leq x \leq x_n) \quad (7.25)$$

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

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

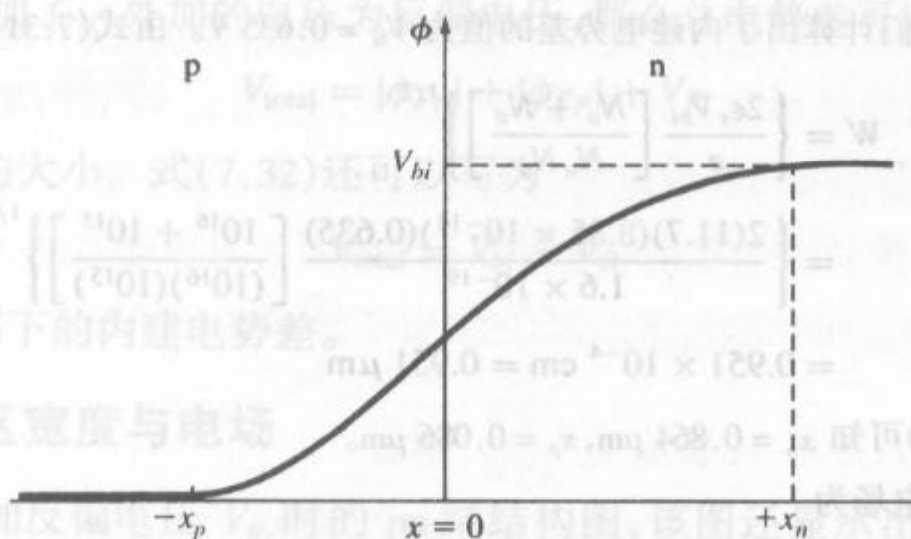


图 7.6 均匀掺杂 pn 结空间电荷区的电势

7.2 零偏

空间电荷区宽度

$$x_p = \frac{N_d x_n}{N_a} \quad (7.27)$$

然后将式(7.27)代入式(7.26),求解 x_n 得

$$x_n = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (7.28)$$

式(7.28)给出了零偏置电压下,n型区内空间电荷区的宽度。

同样,若我们由式(7.17)解出 x_n ,并将 x_n 的表达式代入式(7.26),则可得

$$x_p = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (7.29)$$

式(7.29)给出了零偏置电压情况下,p型区内的空间电荷区宽度。

总耗尽区的宽度是 x_n 与 x_p 的和,即

$$W = x_n + x_p \quad (7.30)$$

由式(7.28)和式(7.29)可知

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (7.31)$$

内建电势差可由式(7.10)得到,而总空间电荷区宽度可由式(7.31)确定。

7.2 零偏

空间电荷区宽度

例 7.2 计算 pn 结中的空间电荷区宽度和电场。

硅 pn 结所处的环境温度为 $T = 300\text{ K}$, 掺杂浓度为 $N_a = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ 。

■ 解

在前述的例 7.1 中, 我们计算出了内建电势差的值为 $V_{bi} = 0.635\text{ V}$ 。由式(7.31)可知, 空间电荷区宽度为

$$\begin{aligned} W &= \left\{ \frac{2\epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \\ &= \left\{ \frac{2(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(0.635)}{1.6 \times 10^{-19}} \left[\frac{10^{16} + 10^{15}}{(10^{16})(10^{15})} \right] \right\}^{1/2} \\ &= 0.951 \times 10^{-4}\text{ cm} = 0.951\text{ }\mu\text{m} \end{aligned}$$

由式(7.28)与式(7.29)可知 $x_n = 0.864\text{ }\mu\text{m}$, $x_p = 0.086\text{ }\mu\text{m}$ 。

冶金结处的最大电场为

$$E_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-(1.6 \times 10^{-19})(10^{15})(0.864 \times 10^{-4})}{(11.7)(8.85 \times 10^{-14})} = -1.34 \times 10^4\text{ V/cm}$$

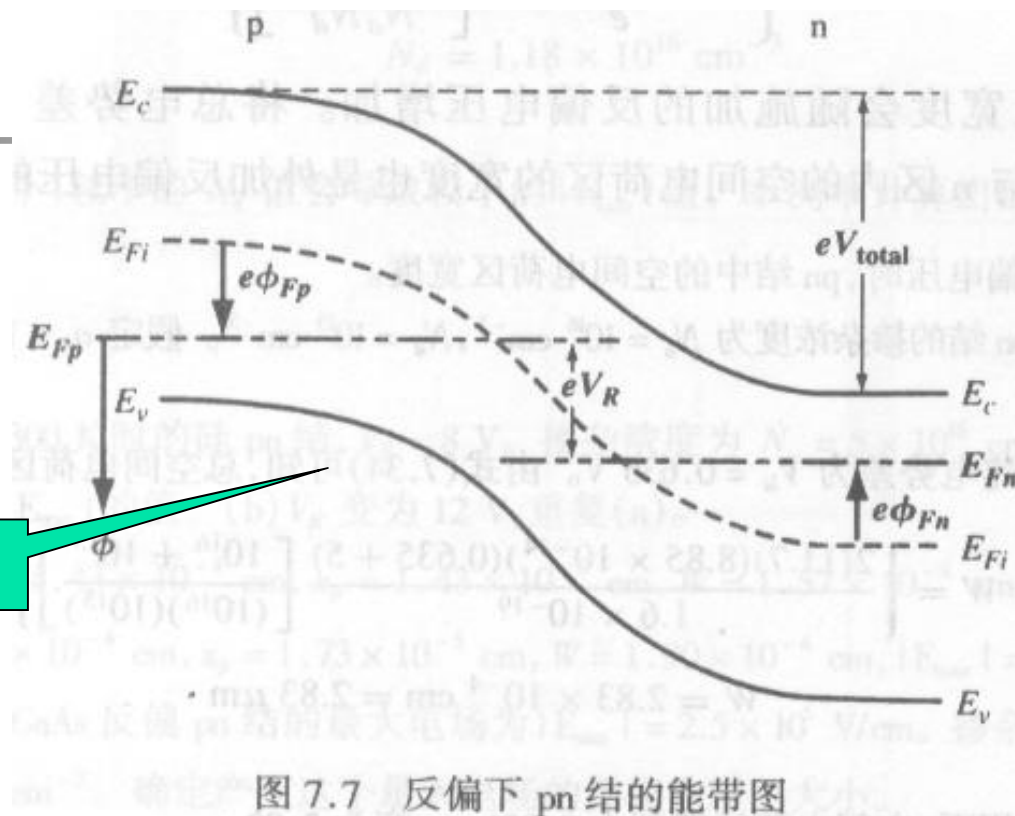
■ 说明

pn 结内空间电荷区的最大电场是很大的。但我们必须记住, 空间电荷区内没有可以移动的电荷, 因此该区也没有漂移电流存在。从该例可知, p 区与 n 区内的空间电荷区的宽度分别与其所在区域内的掺杂浓度成倒数关系, 即耗尽区主要扩展在低掺杂区域。

7.3 反偏

- 反偏
- 与内建电场方向相同

EF不再统一



总电势差 V_{total} 增加了。外加的电压为反偏电压,那么总电势差可以表示为

$$V_{\text{total}} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R$$

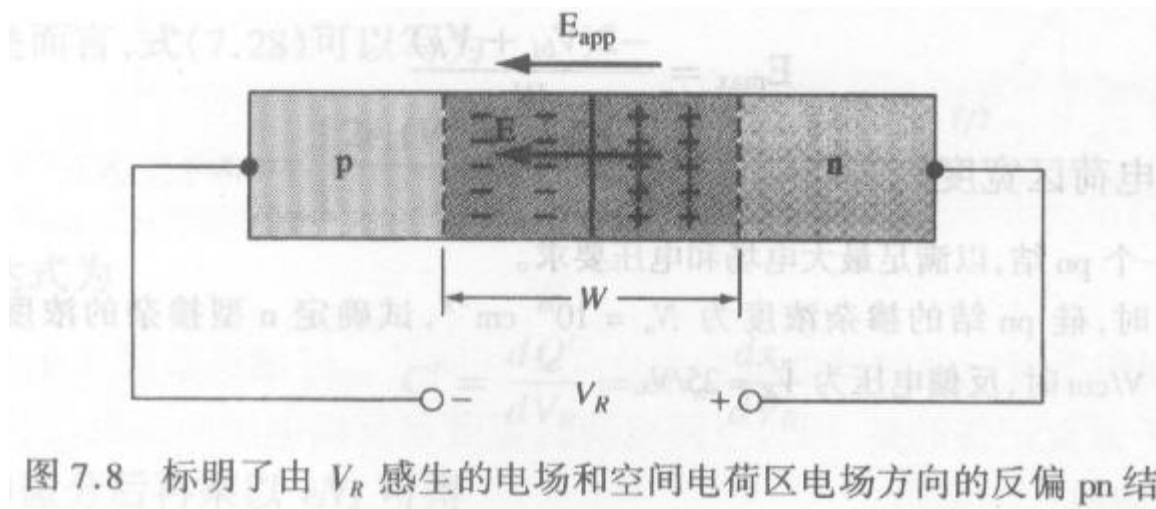
其中 V_R 是反偏电压的大小。式(7.32)还可以写为

$$V_{\text{total}} = V_{bi} + V_R$$

其中 V_{bi} 是热平衡状态下的内建电势差。

7.3 反偏

- $V = V_{bi} + V_R$



$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

7.3反偏

■ X=0处

由式(7.14)与式(7.16)可知,冶金结处的最大电场为

$$E_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_a x_p}{\epsilon_s} \quad (7.35)$$

使用式(7.28)或式(7.29),并将 V_{bi} 换成 $V_{bi} + V_R$, 则有

$$E_{\max} = - \left\{ \frac{2e(V_{bi} + V_R)}{\epsilon_s} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right\}^{1/2} \quad (7.36)$$

pn 结内的最大电场也可以写为

$$E_{\max} = \frac{-2(V_{bi} + V_R)}{W} \quad (7.37)$$

其中 W 为总空间电荷区宽度。

7.3反偏

结电容

$$C' = \frac{dQ'}{dV_R} \quad (7.38)$$

其中,

$$dQ' = eN_d dx_n = eN_a dx_p \quad (7.39)$$

微分电荷 dQ' 的单位是 C/cm^2 , 所以电容 C' 的单位就是 F/cm^2 , 或者说是单位面积电容。

对于总势垒而言, 式(7.28)可以写为

$$x_n = \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (7.40)$$

势垒电容的表达式为

$$C' = \frac{dQ'}{dV_R} = eN_d \frac{dx_n}{dV_R} \quad (7.41)$$

所以将式(7.40)微分后再乘以 eN_d 可得

$$C' = \left\{ \frac{e\epsilon_s N_a N_d}{2(V_{bi} + V_R)(N_a + N_d)} \right\}^{1/2} \quad (7.42)$$

对 x_p 的表达式进行微分, 然后乘以 eN_a , 可得与上式相同的 C' 的表达式。势垒电容也称为耗尽层电容。

7.3 反偏

结电容

- 突变结耗尽层电容

$$C' = \left\{ \frac{e\epsilon_s N_a N_d}{2(V_{bi} + V_R)(N_a + N_d)} \right\}^{1/2}$$

$$C' = \frac{\epsilon_s}{W}$$

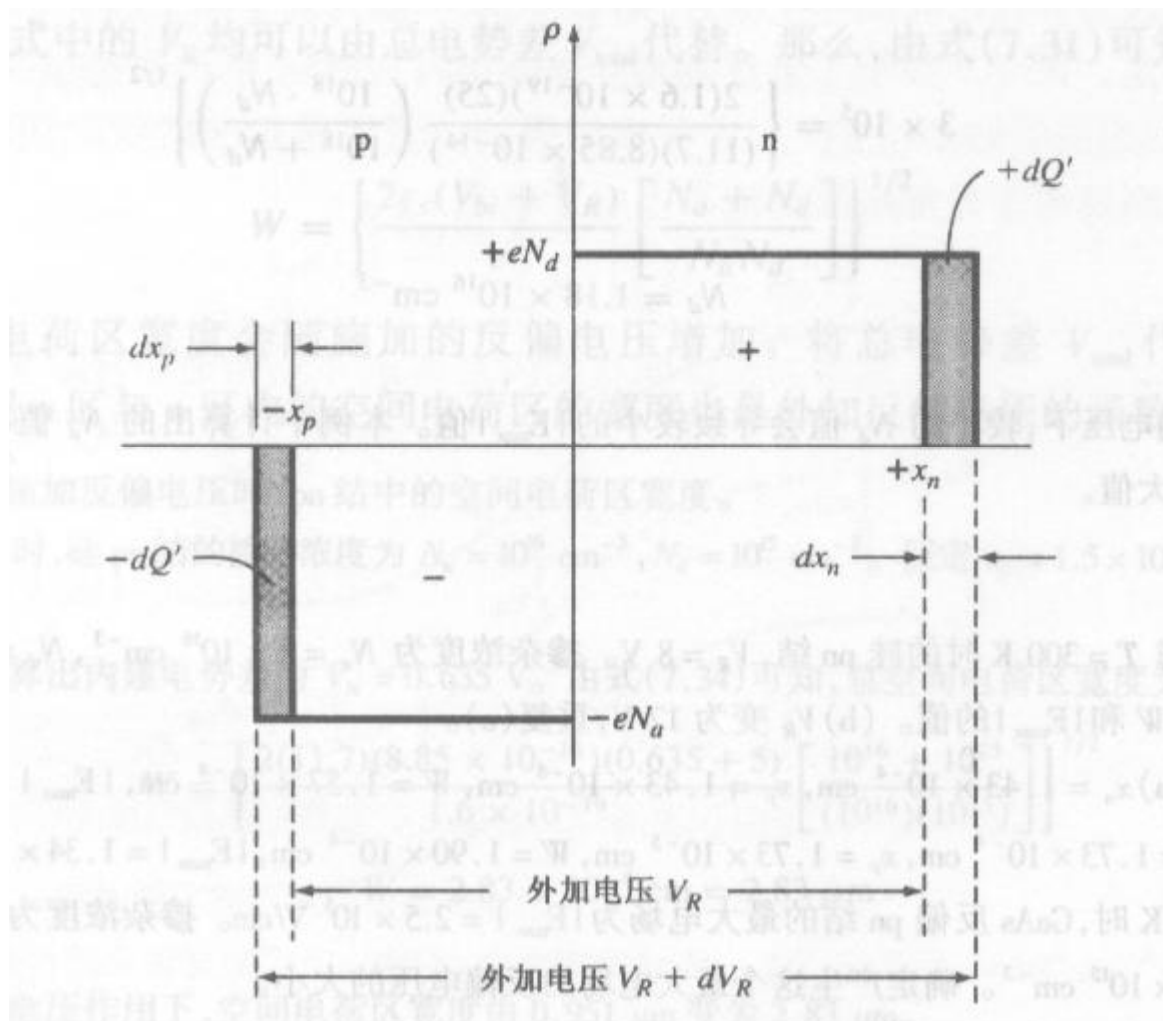


图 7.9 均匀掺杂 pn 结空间电荷区宽度随反偏电压改变的微分变化量

7.3 反偏

单边突变结

考虑一种称为单边突变结的特殊 pn 结。若 $N_a \gg N_d$, 则这种结称为 p^+n 结。于是总空间电荷区宽度表达式(7.34)就可以化简为

$$W \approx \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{eN_d} \right\}^{1/2} \quad (7.44)$$

考虑到 x_n 与 x_p 的表达式, 对于 p^+n 结, 我们有

$$x_p \ll x_n \quad (7.45)$$

并且

$$W \approx x_n \quad (7.46)$$

几乎所有的空间电荷层均扩展到 pn 结轻掺杂的区域。图 7.10 显示了这种效应。

p^+n 结的势垒电容表达式也可以化简为

$$C' \approx \left\{ \frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/2} \quad (7.47)$$

单边突变结的耗尽层电容是低掺杂区掺杂浓度的函数。将式(7.47)进行一下变换, 得到

$$\left(\frac{1}{C'} \right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e\epsilon_s N_d} \quad (7.48)$$

式(7.48)说明电容倒数的平方是外加反偏电压的线性函数。

7.3反偏

单边突变结

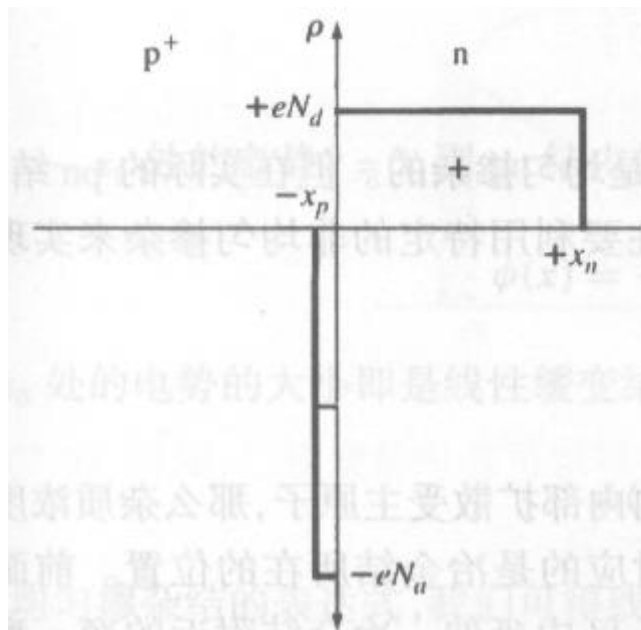


图 7.10 单边 p⁺n 结的空间电荷密度

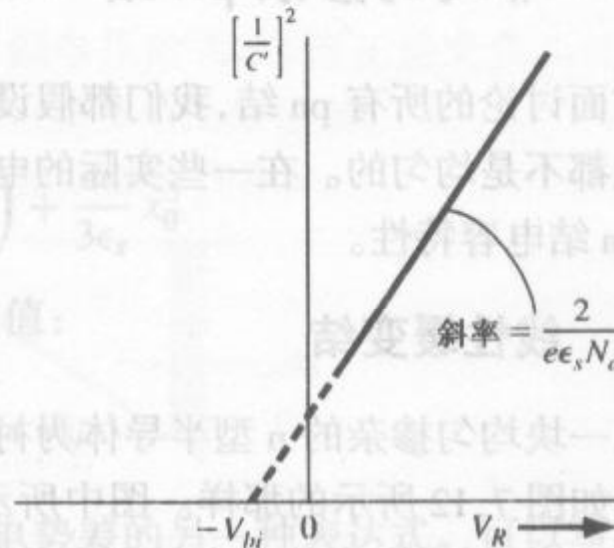


图 7.11 均匀掺杂 pn 结的 $(1/C')^2 - V_R$ 曲线

$$C' \approx \left\{ \frac{e\epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/2}$$

$$\left(\frac{1}{C'} \right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e\epsilon_s N_d}$$

7.3 反偏

单边突变结

图 7.11 中所示曲线的斜率为 $k = 2/e\epsilon_s N_d$, 那么

$$N_d = \frac{2}{e\epsilon_s (\text{斜率})} = \frac{2}{(1.6 \times 10^{-19})(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(1.32 \times 10^{15})}$$

或

$$N_d = 9.15 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

由 V_{bi} 的表达式可知

$$V_{bi} = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

那么

$$N_a = \frac{n_i^2}{N_d} \exp \left(\frac{e V_{bi}}{kT} \right) = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{9.15 \times 10^{15}} \exp \left(\frac{0.855}{0.0259} \right)$$

$$N_a = 5.34 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

■ 说明

该题的结果说明 $N_a \gg N_d$, 所以前述的单边突变结假设是正确的。单边突变结假设对于实验上确定掺杂浓度以及内建电势时是非常有用的。

单边 pn 结可用于确定掺杂浓度和内建电势。

7.4 非均匀掺杂pn结

■ 线形缓变结 $x=x'$ 处

$$V_{bi} = V_i \ln \left(\frac{ax_0}{n_i} \right)^2$$

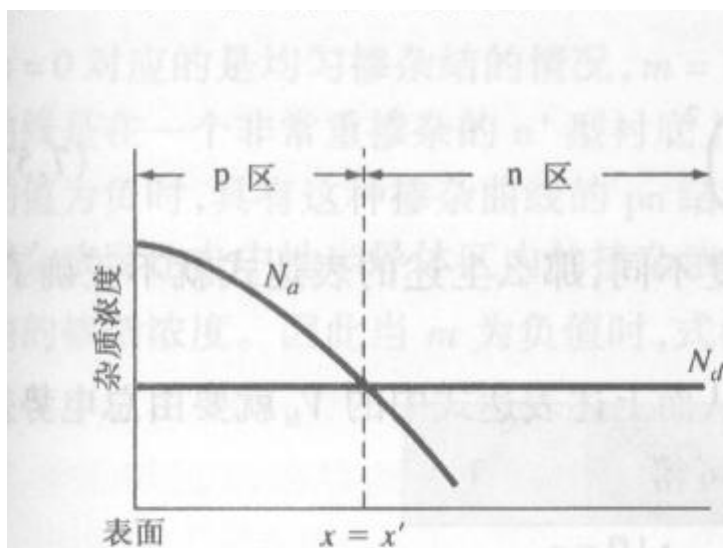


图 7.12 p 区为非均匀掺杂的 pn 结的杂质浓度

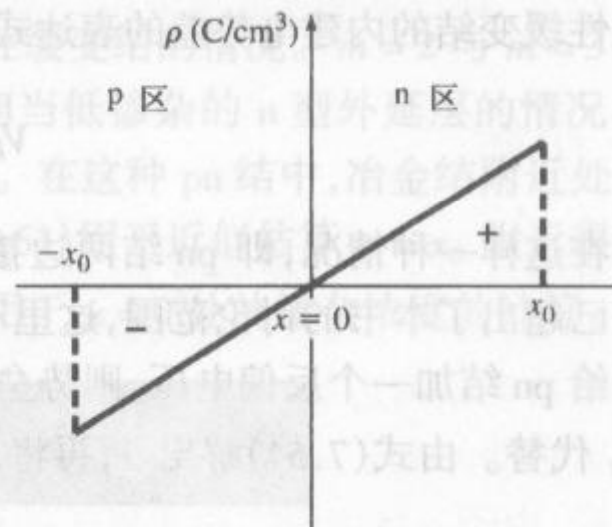


图 7.13 线性缓变结的空间电荷密度

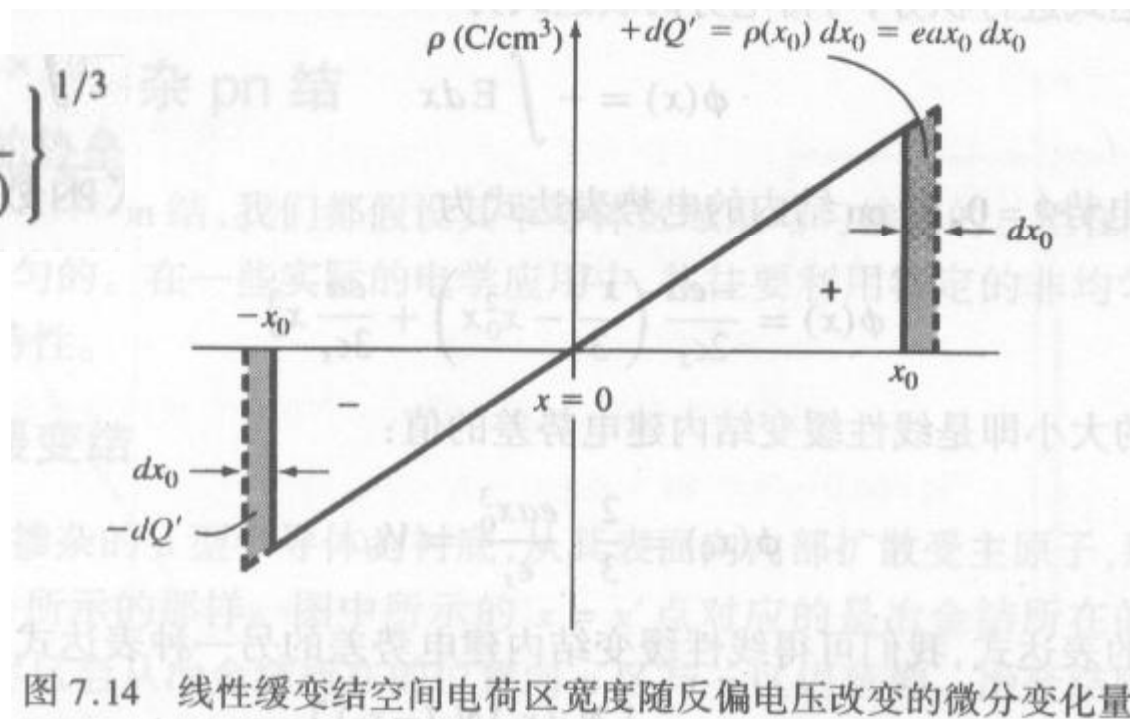
$$\rho(x) = eax$$

其中 a 为净杂质浓度的梯度。

7.4非均匀掺杂pn结

■ 线形缓变结

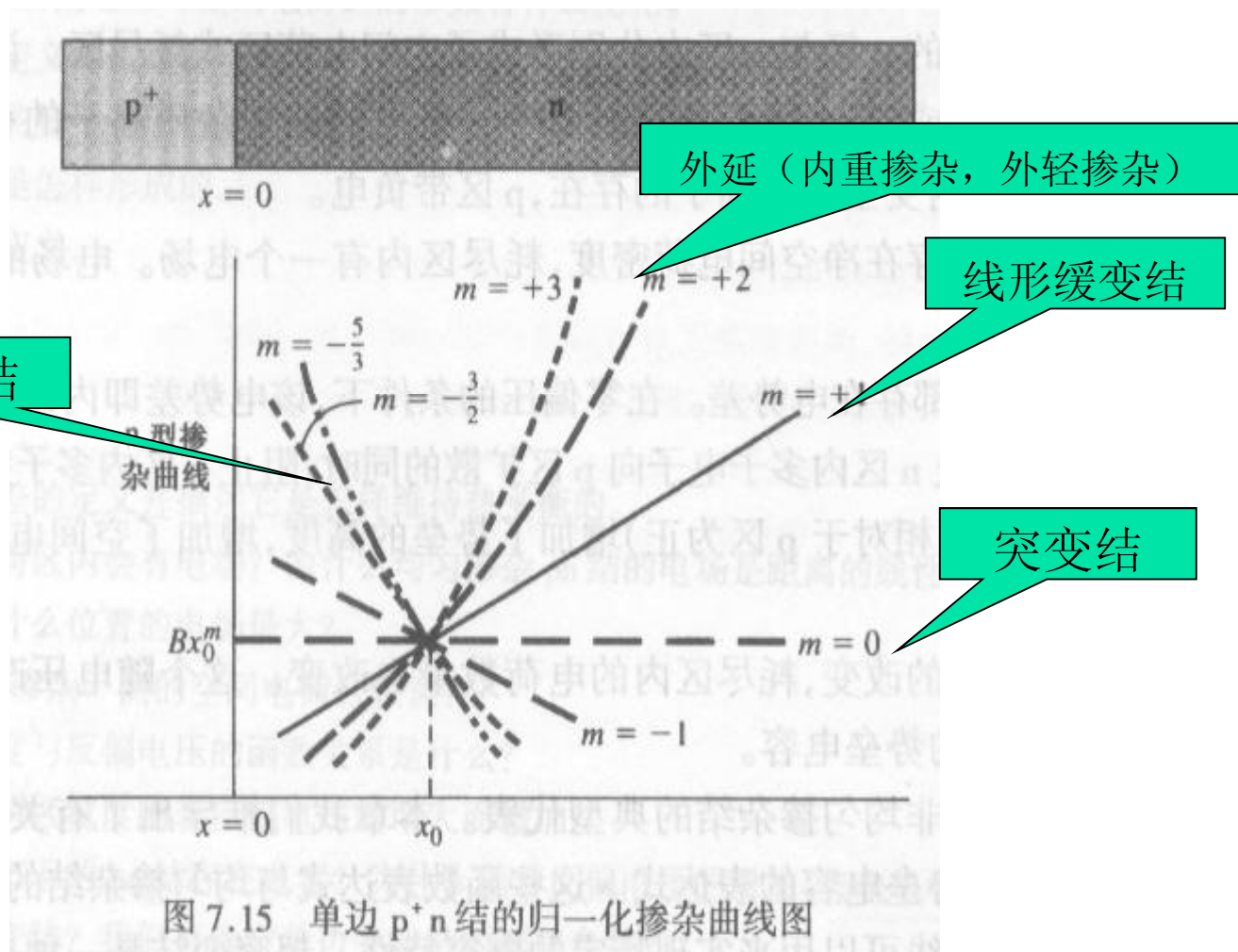
$$C' = \left\{ \frac{ea\epsilon_s^2}{12(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/3}$$



7.4非均匀掺杂pn结

■ 超突变结

$$N = Bx^m$$



7.4非均匀掺杂pn结

■ 超突变结

$$C' = \left\{ \frac{eB\epsilon_s^{(m+1)}}{(m+2)(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/(m+2)} \quad (7.62)$$

当 m 的值为负时,势垒电容在很大程度上都取决于反偏电压的大小,这正是变容二极管所应该具有的特性。电容可变意味着一个器件的电容可以由偏置电压来控制。

7.4非均匀掺杂pn结

超突变结应用

若一个变容二极管与一个电感并联,则这个 LC 电路的共振频率为

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.63)$$

由式(7.62)可知,二极管的电容可以写为

$$C = C_0(V_{bi} + V_R)^{-1/(m+2)} \quad (7.64)$$

在电路应用中,一般情况下我们希望共振频率是反偏电压 V_R 的线性函数,所以要求

$$C \propto V^{-2} \quad (7.65)$$

由式(7.64)可知, m 可由

$$\frac{1}{m+2} = 2 \quad (7.66a)$$

$$m = -\frac{3}{2}$$

求出。因此,特定的掺杂曲线可以实现所要求的电容特性。

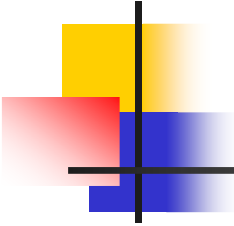
7.5小结

- 首先介绍了均匀掺杂的 pn 结。均匀掺杂 pn 结是指:半导体的一个区均匀掺杂了受主杂质,而相邻的区域均匀掺杂了施主杂质。这种 pn 结称为同质结。
- 在冶金结两边的 p 区与 n 区内分别形成了空间电荷区或耗尽区。该区内不存在任何可以移动的电子或空穴,因而得名。由于 n 区内的施主杂质离子的存在,n 区带正电;同样,由于 p 区内受主杂质离子的存在,p 区带负电。
- 由于耗尽区内存在净空间电荷密度,耗尽区内有一个电场。电场的方向为由 n 区指向 p 区。
- 空间电荷区内部存在电势差。在零偏压的条件下,该电势差即内建电势差维持热平衡状态,并且在阻止 n 区内多子电子向 p 区扩散的同时,阻止 p 区内多子空穴向 n 区扩散。
- 反偏电压(n 区相对于 p 区为正)增加了势垒的高度,增加了空间电荷区的宽度,并且增强了电场。
- 随着反偏电压的改变,耗尽区内的电荷数量也改变。这个随电压改变的电荷量可以用来描述 pn 结的势垒电容。
- 线性缓变结是非均匀掺杂结的典型代表。本章我们推导出了有关线性缓变结的电场、内建电势差、势垒电容的表达式。这些函数表达式与均匀掺杂结的情况是不同的。
- 特定的掺杂曲线可以用来实现特定的电容特性。超突变结是一种掺杂浓度从冶金结处开始下降的特殊 pn 结。这种结非常适用于制作谐振电路中的变容二极管。



重要术语解释

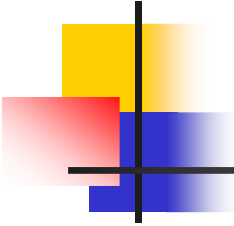
- 突变结近似:**认为从中性半导体区到空间电荷区的空间电荷密度有一个突然的不连续。
- 内建电势差:**热平衡状态下 pn 结内 p 区与 n 区的静电电势差。
- 耗尽层电容:**势垒电容的另一种表达。
- 耗尽区:**空间电荷区的另一种表达。
- 超突变结:**一种为了实现特殊电容-电压特性而进行冶金结处高掺杂的 pn 结,其特点为 pn 结一侧的掺杂浓度由冶金结处开始下降。
- 势垒电容(结电容):**反向偏置下 pn 结的电容。
- 线性缓变结:**冶金结两侧的掺杂浓度可以由线性分布近似的 pn 结。
- 冶金结:**pn 结内 p 型掺杂与 n 型掺杂的分界面。
- 单边突变结:**冶金结一侧的掺杂浓度远大于另一侧的掺杂浓度的 pn 结。
- 反偏:**pn 结的 n 区相对于 p 区加正电压,从而使 p 区与 n 区之间势垒的大小超过热平衡状态时势垒的大小。
- 空间电荷区:**冶金结两侧由于 n 区内施主电离和 p 区内受主电离而形成的带净正电与负电的区域。
- 空间电荷区宽度:**空间电荷区延伸到 p 区与 n 区内的距离,它是掺杂浓度与外加电压的函数。
- 变容二极管:**电容随着外加电压的改变而改变的二极管。



知识点

学完本章后,读者应具备如下能力:

- 描述空间电荷区是怎样形成的。
- 画出零偏与反偏状态下 pn 结的能带图。
- 推导出 pn 结内建电势差的表达式。
- 推导出 pn 结空间电荷区电场的表达式。
- 描述当 pn 结外加反偏电压时空间电荷区的参数有什么变化。
- 给出势垒电容的定义并做出解释。
- 描述单边突变结的特性与属性。
- 描述线性缓变结是怎样形成的。
- 给出超突变结的定义。



复习题

1. 给出内建电势差的定义并描述它是怎样维持热平衡的。
2. 为什么空间电荷区内会有电场？为什么均匀掺杂 pn 结的电场是距离的线性函数？
3. 空间电荷区内什么位置的电场最大？
4. 为什么 pn 结低掺杂一侧的空间电荷区较宽？
5. 空间电荷区宽度与反偏电压的函数关系是什么？
6. 为什么空间电荷区宽度随着反偏电压的增大而增加？
7. 为什么反偏状态下的 pn 结存在电容？为什么随着反偏电压的增加，势垒电容反而下降？
8. 什么是单边突变结？我们可确定单边突变结的哪些参数？
9. 什么是线性缓变结？
10. 什么是超突变结？这种结的优点或特性是什么？



本次课回顾