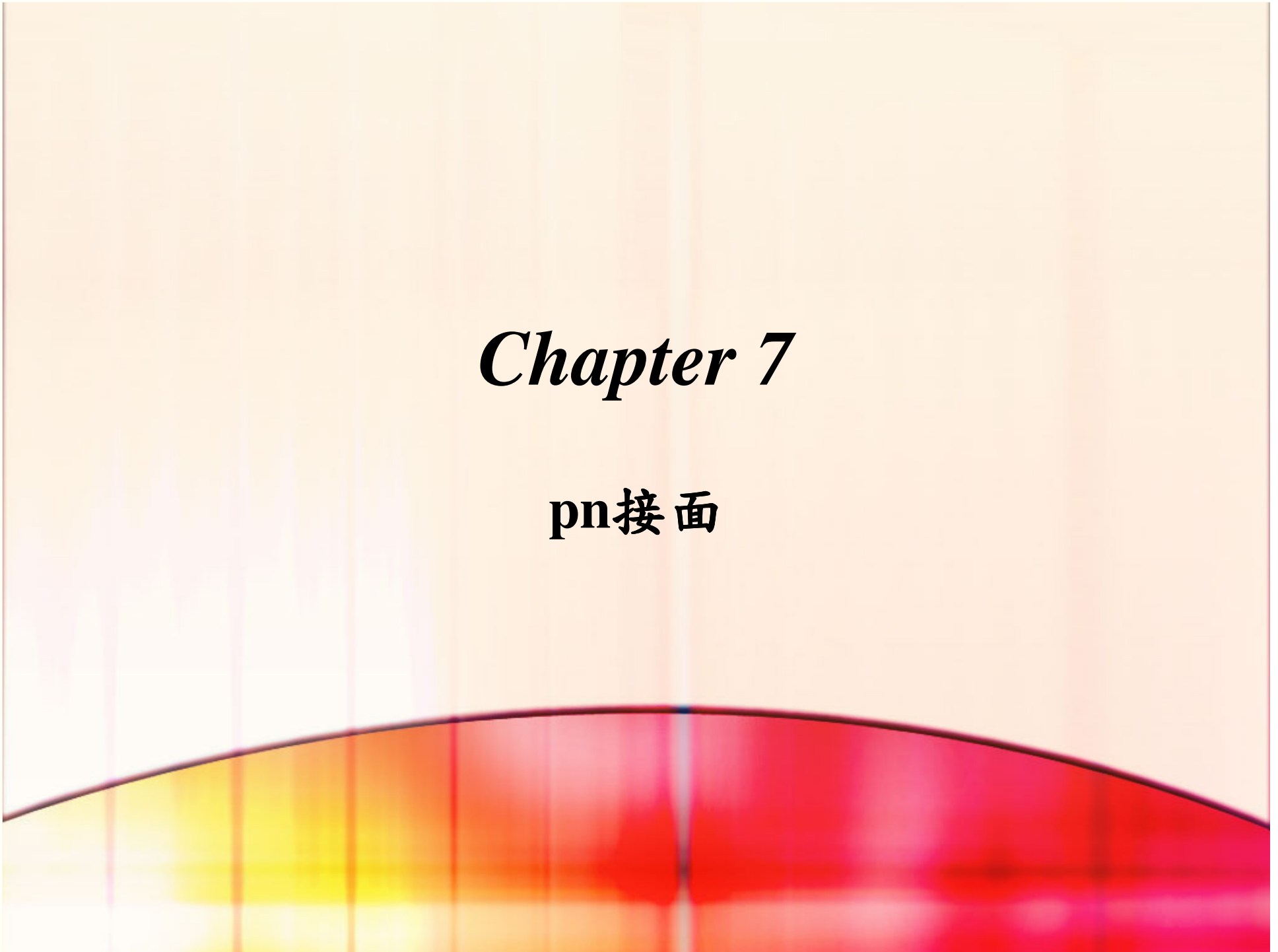


Chapter 7

pn接面



目次

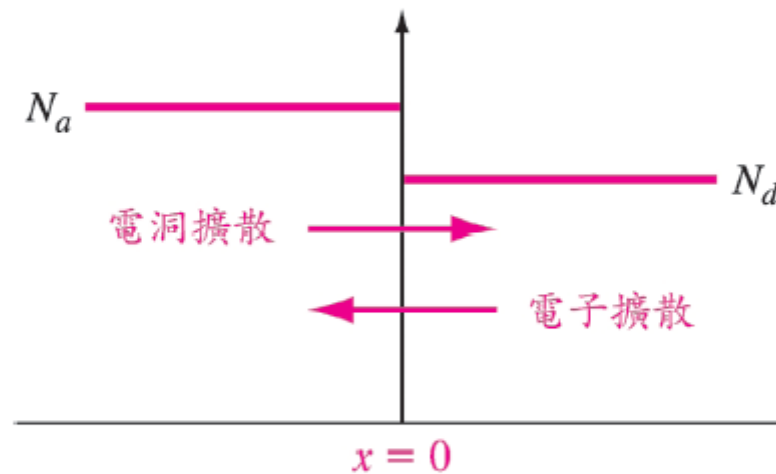
- 7.1 pn接面的基本結構
- 7.2 零外加偏壓
- 7.3 逆向偏壓
- 7.4 非均勻摻雜接面





冶金接面

(a)



(b)

圖 7.1 | (a)簡化的 pn 接面的幾何結構；及(b)理想化的摻雜均勻的 pn 接面之雜質濃度分佈。



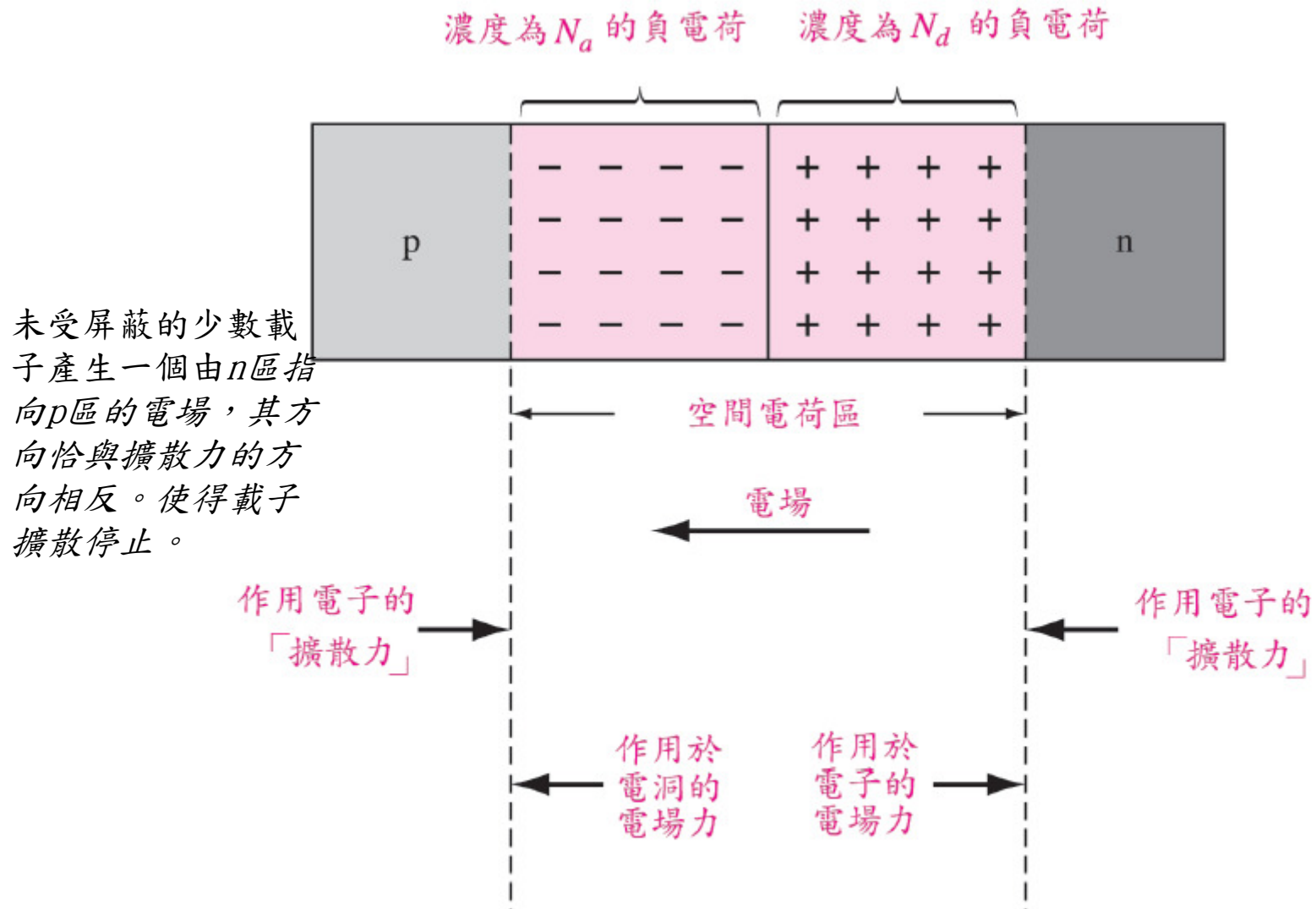


圖 7.2 | 空間電荷區、電場及電荷載子所受的作用力。



7.1 pn 接面的基本結構

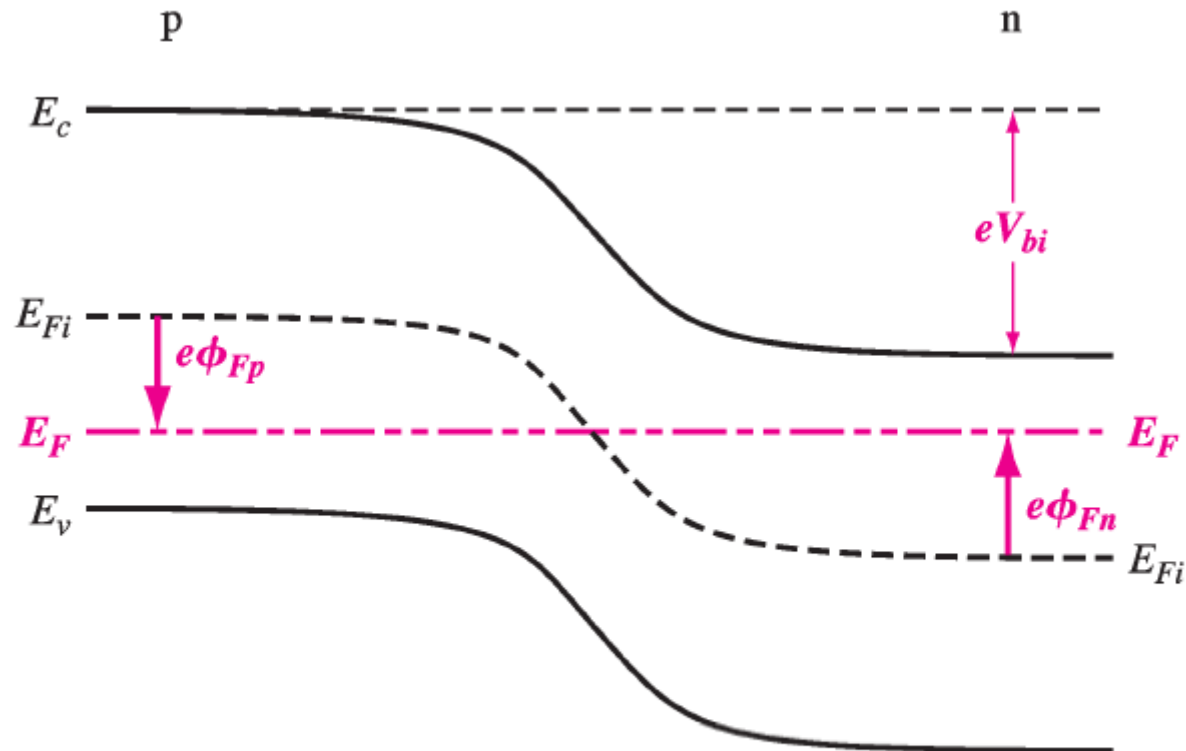


圖 7.3 | 熱平衡時，pn 接面的能帶圖。



7.2 零外加偏壓

7.2.1 內建電位障

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (7.1)$$

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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



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

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

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



例題 7.1

◎◎ 計算出 pn 接面的內建電位障。

◎◎ 在 $T=300\text{ K}$ 下，某一矽 pn 接面的雜質濃度分別為 $N_a=1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 及 $N_d=1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ，試求此 pn 接面的內建電位障。設 $n_i=1.5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ 。

◎◎ 由(7.10)式，我們可以求得內建電位障為

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

如果受體摻雜由 $N_a=1 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 變為 $N_a=1 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ ，而保持其他參數的值不變的話，則內建電位障變為 $V_{bi}=0.635\text{ V}$ 。

◎◎ 由於是對數的關係，因此當摻雜濃度改變數個數量級時，內建電位障只有稍微的改變。

7.2.2 電場

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

$$\rho(x) = -eN_a \quad -x_p < x < 0 \quad (7.12a)$$

$$\rho(x) = eN_d \quad 0 < x < x_n \quad (7.12b)$$

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

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

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



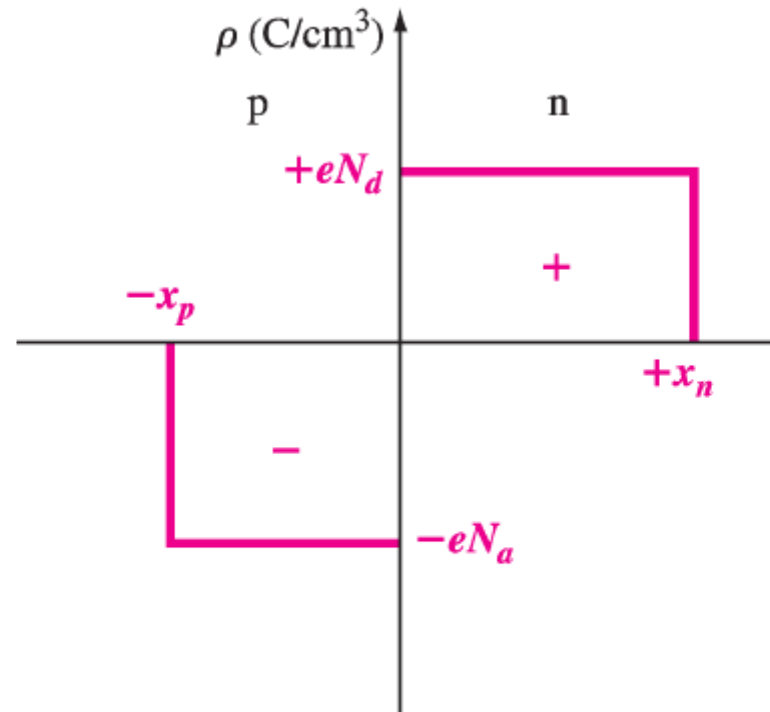


圖 7.4 | 均勻摻雜的 pn 接面空間電荷密度圖。假設其為陡峭式的接面。



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

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

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

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

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

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



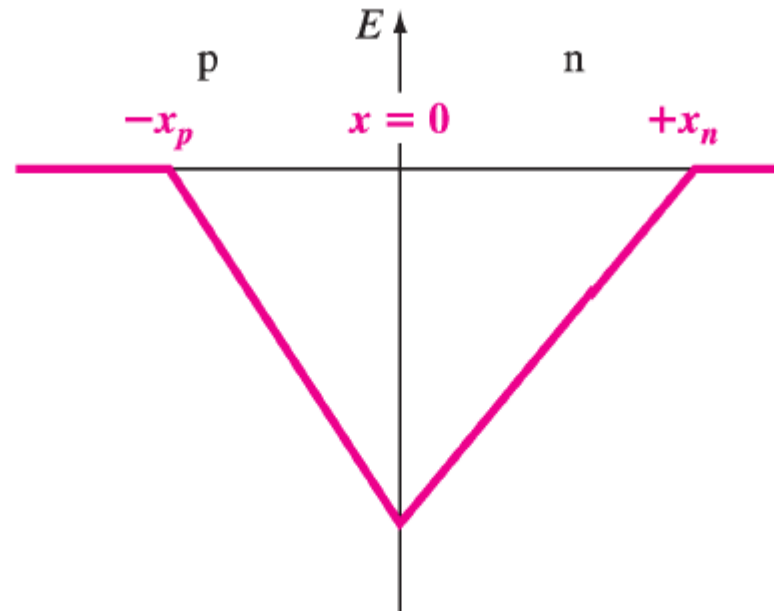


圖 7.5 | 均勻摻雜 pn 的接面在空間電荷區的電場。



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

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

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

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

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



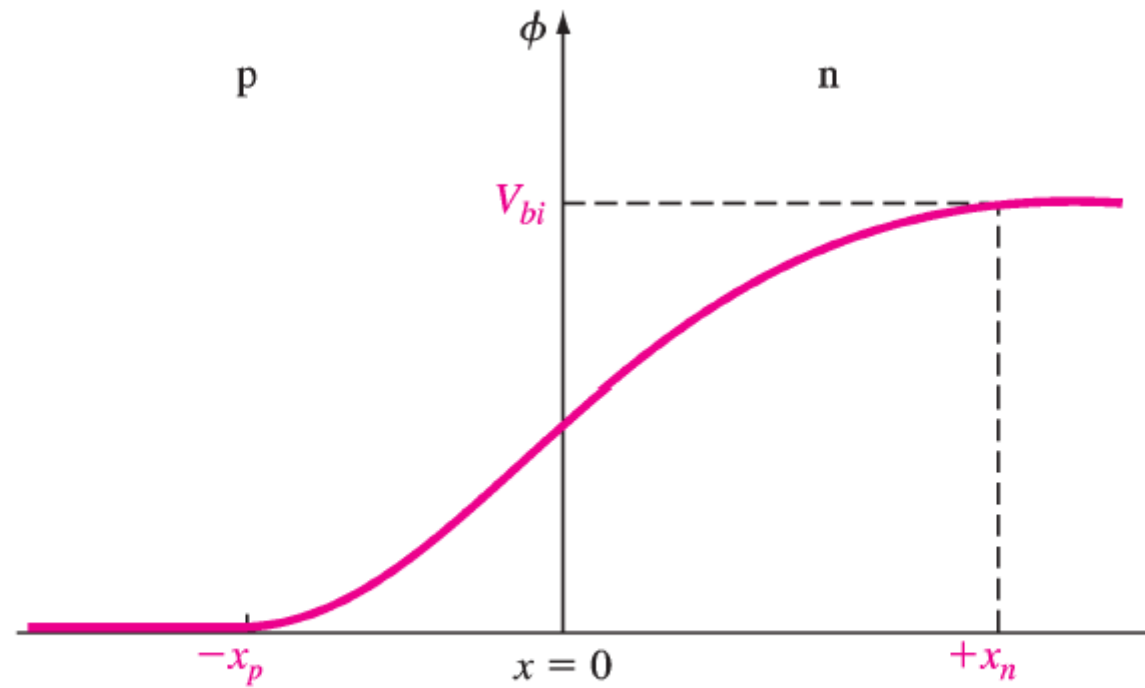


圖 7.6 | 均勻摻雜 pn 的接面在整個空間中的電位變化。



7.2.3 空間電荷寬度 ■

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

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

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

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

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



例題 7.2

◎◎ 計算出 pn 接面空間電荷區寬度及電場強度。

◎◎ 考慮在 $T=300\text{ K}$ 下，某一矽 pn 接面的雜質濃度分別為 $N_a=10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 及 $N_d=10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ，求此 pn 接面空間電荷區寬度及電場強度。

◎◎ 在例題 7.1 之中，我們已計算其內建電位障為 0.635 V 。由 (7.31) 式，可知空間電荷寬度為

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



使用(7.28)式及(7.29)式，我們可求得 $x_n = 0.864 \mu\text{m}$ 及 $x_p = 0.086 \mu\text{m}$ 。

使用(7.16)式，在冶金接面處的峰值電場為

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

◎◎ 對一個 pn 接面而言，空間電荷區中的峰值電場是相當大的。然而，我們需要牢記的是，在這個區域之中並沒有可以移動的電荷，因此不會有漂移電流。由這個例題，我們亦可以注意到，各個空間電荷區的寬度為各區摻雜濃度的倒數函數。因此，空乏區將會延伸更多得到摻雜較低的區域之中。



7.3 逆向偏壓

$$V_{\text{total}} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R \quad (7.32)$$

$$V_{\text{total}} = V_{bi} + V_R \quad (7.33)$$



若在p區與n區之間加上一個電壓，則半導體就不再處於平衡狀態，因此 E_F 在整個區域不再是一個常數。

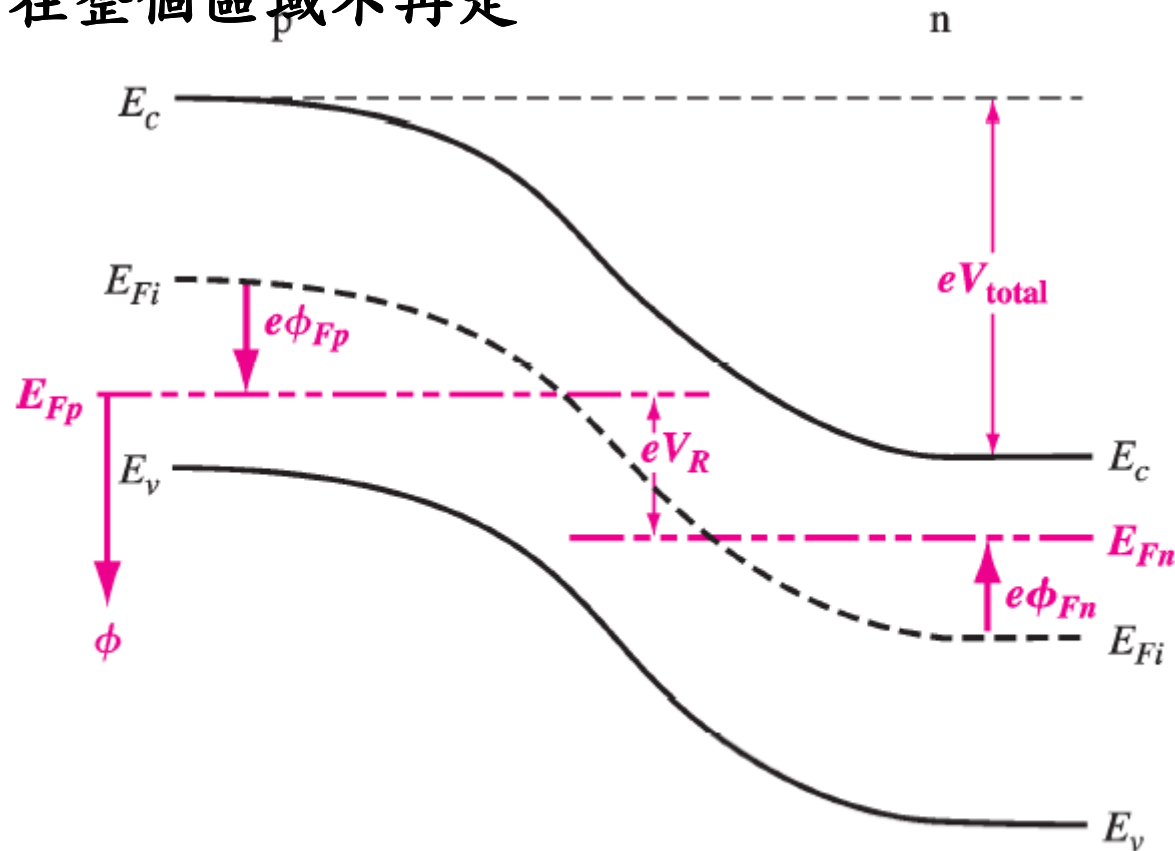


圖 7.7 | 逆向偏壓 pn 接面的能帶圖。



7.3.1 空間電荷寬度及電場

$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2} \quad (7.34)$$

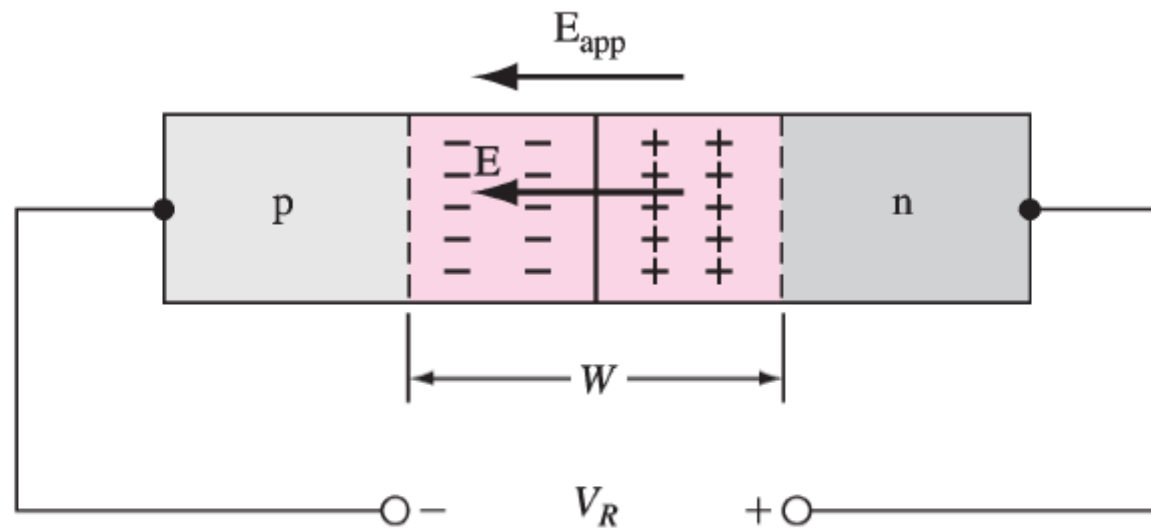


圖 7.8 | 逆向偏壓的 pn 接面，圖中標示出 V_R 所引導出的電場之方向及空間電荷的電場方向。



例題 7.3

◎◎ 計算出逆向偏壓時 pn 接面的空間電荷區的寬度。

◎◎ 在 $T=300\text{ K}$ 下，某一矽 pn 接面的雜質濃度分別為 $N_a = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 及 $N_d = 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ，求在逆向偏壓下，該 pn 接面的空間電荷區的寬度。假設 $n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ，並令 $V_R = 5\text{ V}$ 。

◎◎ 例題 7.1 已計算出 $V_{bi} = 0.635\text{ V}$ ，將 $V_{\text{total}} = V_{bi} + V_R$ 代入 (7.34) 式可得

$$W = \left\{ \frac{2(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(0.635 + 5)}{1.6 \times 10^{-19}} \left[\frac{10^{16} + 10^{15}}{(10^{16})(10^{15})} \right] \right\}^{1/2}$$

因此得

$$W = 2.83 \times 10^{-4}\text{ cm} = 2.83\text{ }\mu\text{m}$$

◎◎ 當外加 5 V 的逆向偏壓於該 pn 接面後，其空間電荷寬度自 $0.951\text{ }\mu\text{m}$ 增加為 $2.83\text{ }\mu\text{m}$ 。

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

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

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



設計型例題 7.4

- ◎◎ 設計出一個 pn 接面使其滿足所定的最大電場強度及逆向偏壓值。
- ◎◎ 在 $T=300\text{ K}$ 下，某一個矽 pn 接面，其 p 型雜質濃度為 $N_a = 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。試決定其 n 型雜質的濃度，使此一 pn 接面可在 $V_R = 25\text{ V}$ 逆向偏壓的條件下有 $|E_{\max}| = 3 \times 10^5\text{ V/cm}$ 的最大電場強度。
- ◎◎ 最大電場強度可由 (7.36) 式求得。因遠小於 V_R ，故 V_{bi} 可忽略不計，得

$$|E_{\max}| \approx \left\{ \frac{2eV_R}{\epsilon_s} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right\}^{1/2}$$



亦即

$$3 \times 10^5 = \left\{ \frac{2(1.6 \times 10^{-19})(25)}{(11.7)(8.85 \times 10^{-14})} \left(\frac{10^{18} \cdot N_d}{10^{18} + N_d} \right) \right\}^{1/2}$$

如此可得

$$N_d = 1.18 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

◎◎ 在一固定的逆向偏壓大小條件下，愈小的 n 型雜質濃度 N_d 會得到愈小的 $|E_{\max}|$ 。本例所求得的 N_d 值，為能滿足預定規格條件下的最大值。



7.3.2 接面電容

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

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

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

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

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

$$C' = \frac{\epsilon_s}{W} \quad (7.43)$$



當 pn 接面分別有 V_R 及 $V_R + dV_R$ 兩個逆向偏壓電壓時，其空乏區中的電荷分佈。

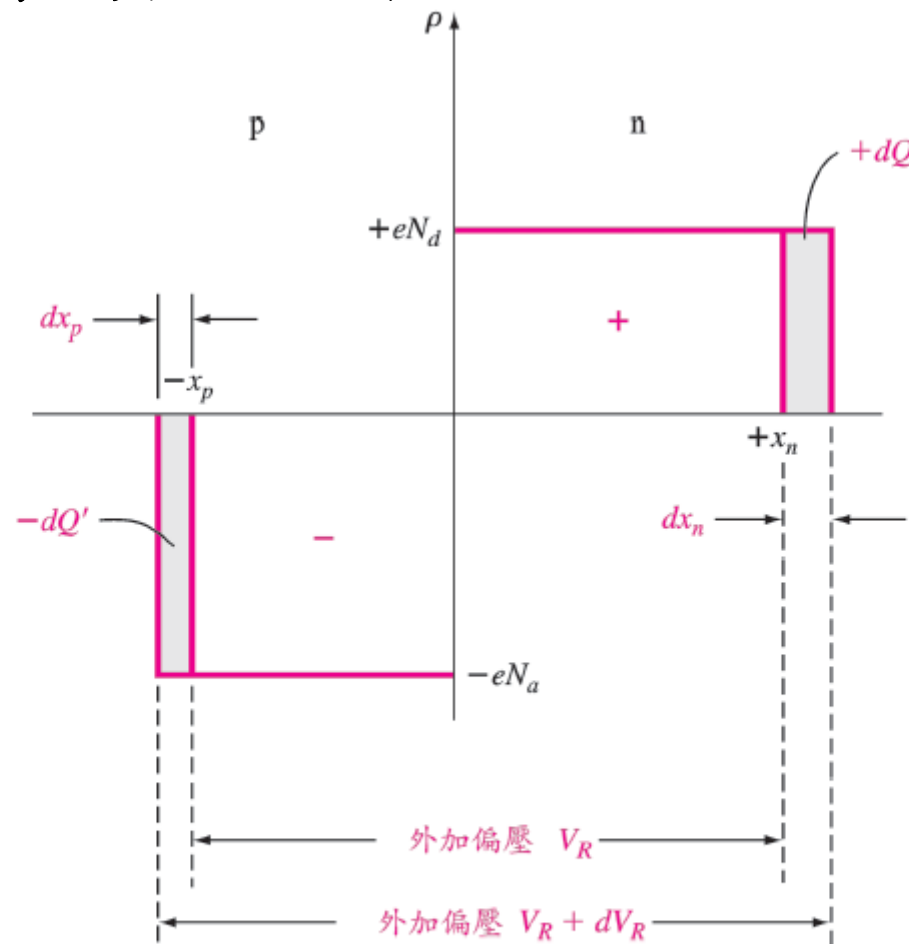


圖 7.9 | 在均勻摻雜 pn 接面中，微量的逆向偏壓變化，造成微量的空間電荷寬度變化。



例題 7.5

◎◎ 計算出 pn 接面的接面電容。

◎◎ 同例題 7.3 的 pn 接面，當 $V_R = 5 \text{ V}$ 時，求該 pn 接面的接面電容。

◎◎ 由(7.42)式，我們可求得接面電容為

$$C' = \left\{ \frac{(1.6 \times 10^{-19})(11.7)(8.85 \times 10^{-14})(10^{16})(10^{15})}{2(0.635 + 5)(10^{16} + 10^{15})} \right\}^{1/2}$$

所以

$$C' = 3.66 \times 10^{-9} \text{ F/cm}^2$$

如果此一 pn 接面的截面積為 $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$ ，則其總接面電容為

$$C = C' \cdot A = 0.366 \times 10^{-12} \text{ F} = 0.366 \text{ pF}$$

◎◎ 接面總電容量通常是在 pF 或更小的範圍。

7.3.3 單邊接面

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

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

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

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

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



p^n 接面一邊的雜質濃度遠大於另一邊者稱為單邊接面。

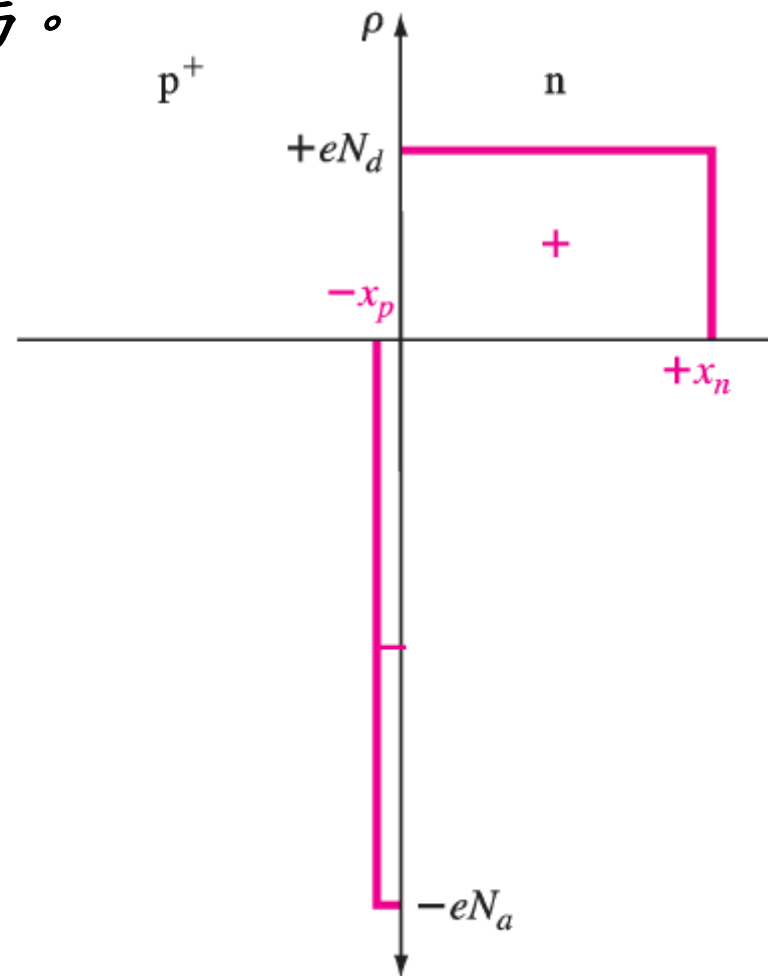


圖 7.10 | 單邊 p^+n 接面的空間電荷密度。



$(1/C)^2$ 對 V_R 的關係曲線可求得
內建電位障 V_{bi} .

該曲線的斜率反比於低參雜區的
雜質濃度 (N_d)

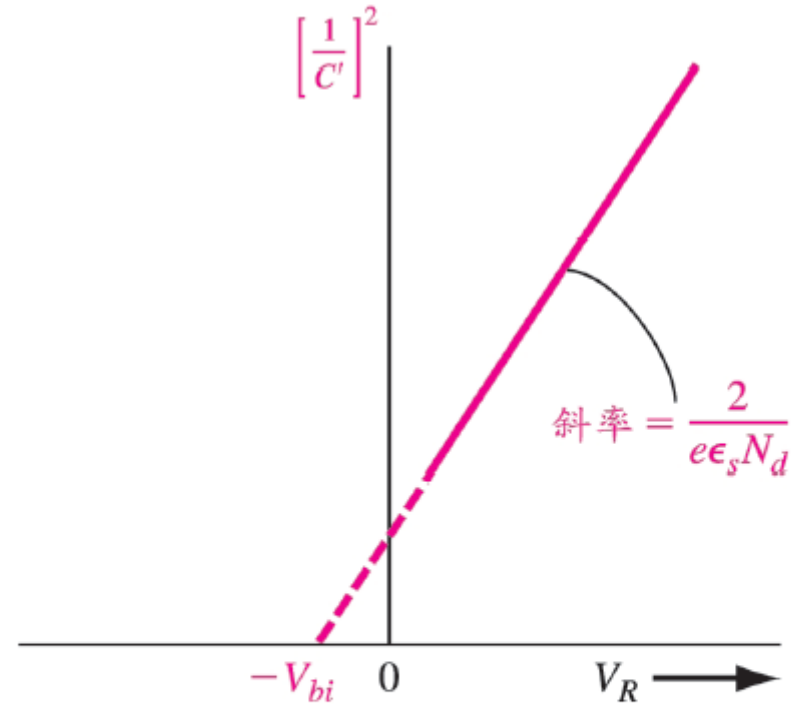


圖 7.11 | 均勻摻雜 pn 接面的 $(1/C')$ ²
對 V_R 圖。



例題 7.6

◎◎ 從圖 7.11 的曲線，解得 p⁺n 接面的雜質濃度。

◎◎ 在 $T=300\text{ K}$ 下，設有某矽的 p⁺n 接面，經以 C-V 方式測量而得如圖 7.11 的曲線結果，該曲線與橫軸相交於 $V_{bi} = 0.855\text{ V}$ 處，且其斜率為 $1.32 \times 10^{15} (\text{F}/\text{cm}^2)^{-2} (\text{V})^{-1}$ 。試求 n 區的雜質濃度。假設 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。

◎◎ 圖 7.11 曲線的斜率為 $2/e\epsilon_s N_d$ ，則

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

所以

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



再從 V_{bi} 的關係式

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

可求 N_a 為

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

得

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

◎◎ 以上結果確有 $N_a \gg N_d$ 的關係，是為一個 p⁺n 的接面。



* 7.4 非均勻摻雜界面

7.4.1 線性漸變界面

$$\rho(x) = eax \quad (7.49)$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \frac{eax}{\epsilon_s} \quad (7.50)$$

$$E = \int \frac{eax}{\epsilon_s} dx = \frac{ea}{2\epsilon_s} (x^2 - x_0^2) \quad (7.51)$$



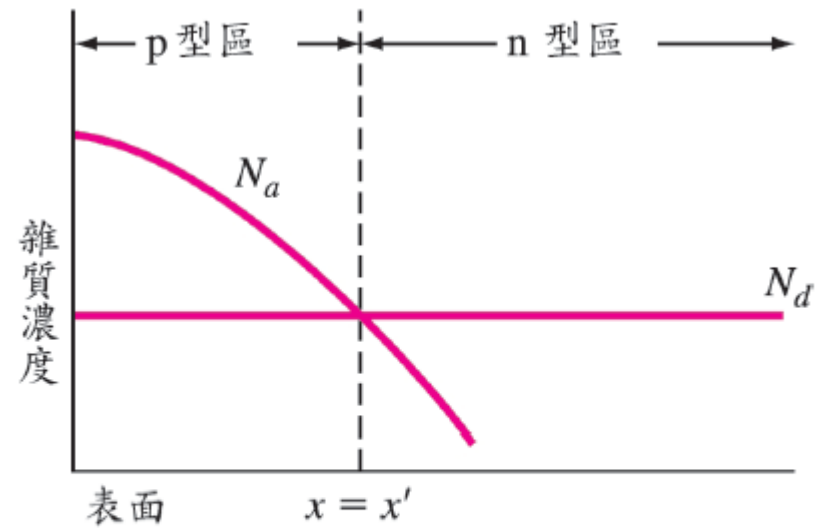


圖 7.12 | 具有不均勻 p 型摻雜的 pn 接面之雜質濃度分佈。



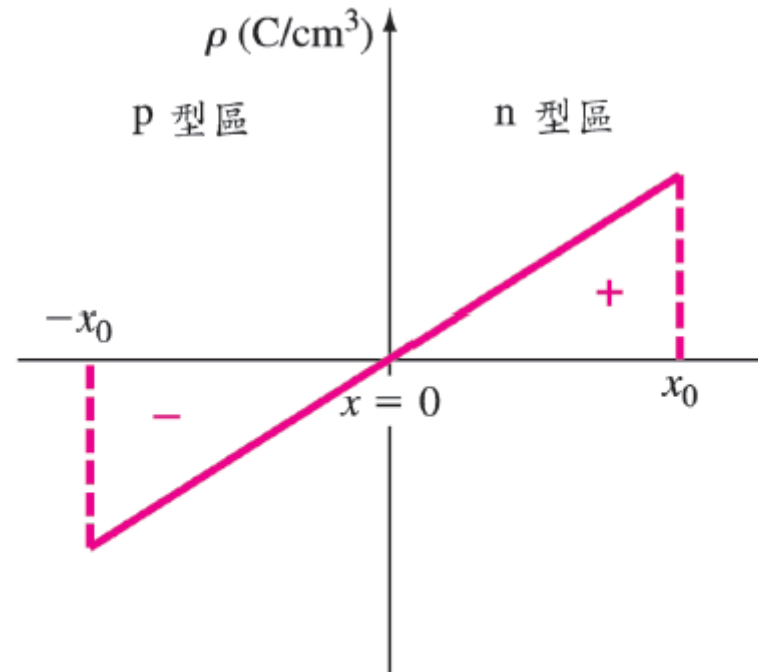


圖 7.13 | 線性漸變接面的空間電荷密度變化情形。



Nonuniformly doped junction— linearly graded junction 線性漸變接面

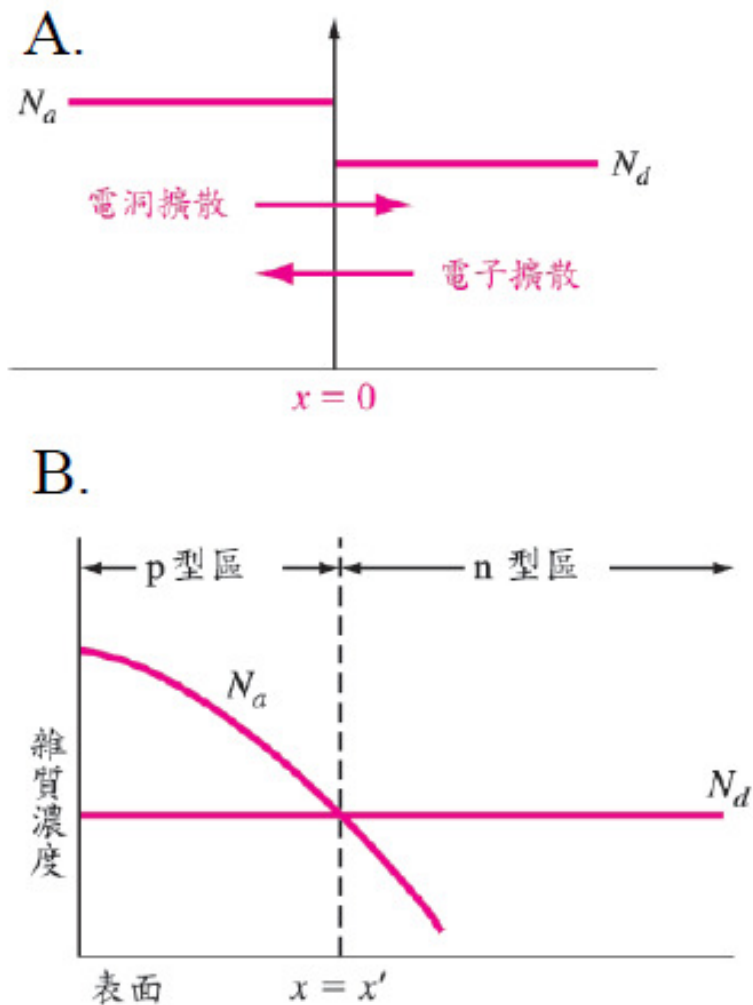


圖 7.12 | 具有不均勻 p 型摻雜的 pn 接面之雜質濃度分佈。

- A. 均勻分布
- B. 非均勻分布
- C. 線性漸變分布

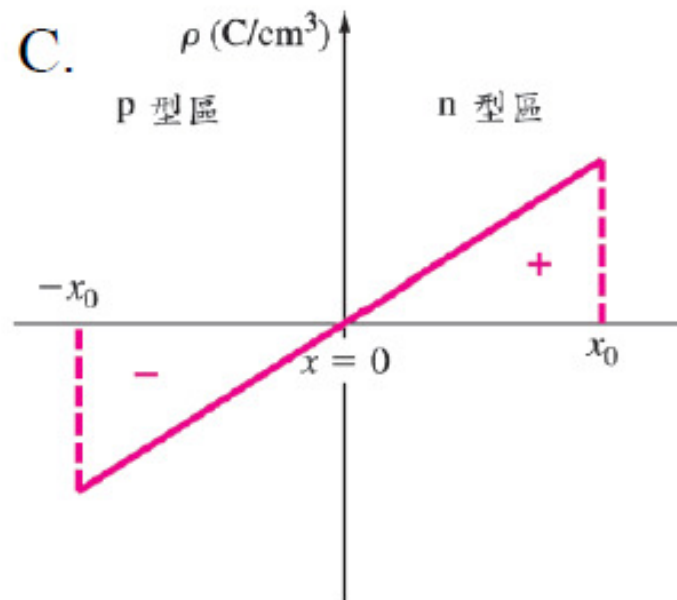


圖 7.13 | 線性漸變接面的空間電荷密度變化情形。

$$\phi(x) = - \int E dx \quad (7.52)$$

$$\phi(x) = \frac{-ea}{2\epsilon_s} \left(\frac{x^3}{3} - x_0^2 x \right) + \frac{ea}{3\epsilon_s} x_0^3 \quad (7.53)$$

$$\phi(x_0) = \frac{2}{3} \cdot \frac{e a x_0^3}{\epsilon_s} = V_{bi} \quad (7.54)$$

$$V_{bi} = V_t \ln \left[\frac{N_d(x_0) N_a(-x_0)}{n_i^2} \right] \quad (7.55)$$

$$N_d(x_0) = a x_0 \quad (7.56a)$$

$$N_a(-x_0) = a x_0 \quad (7.56b)$$



$$V_{bi} = V_t \ln \left(\frac{ax_0}{n_i} \right)^2 \quad (7.57)$$

$$x_0 = \left\{ \frac{3}{2} \cdot \frac{\epsilon_s}{ea} (V_{bi} + V_R) \right\}^{1/3} \quad (7.58)$$

$$C' = \frac{dQ'}{dV_R} = (eax_0) \frac{dx_0}{dV_R} \quad (7.59)$$

$$C' = \left\{ \frac{ea\epsilon_s^2}{12(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/3} \quad (7.60)$$



線性漸變接面的電容比均勻參雜
接面的電容較不受逆向偏壓的影
響

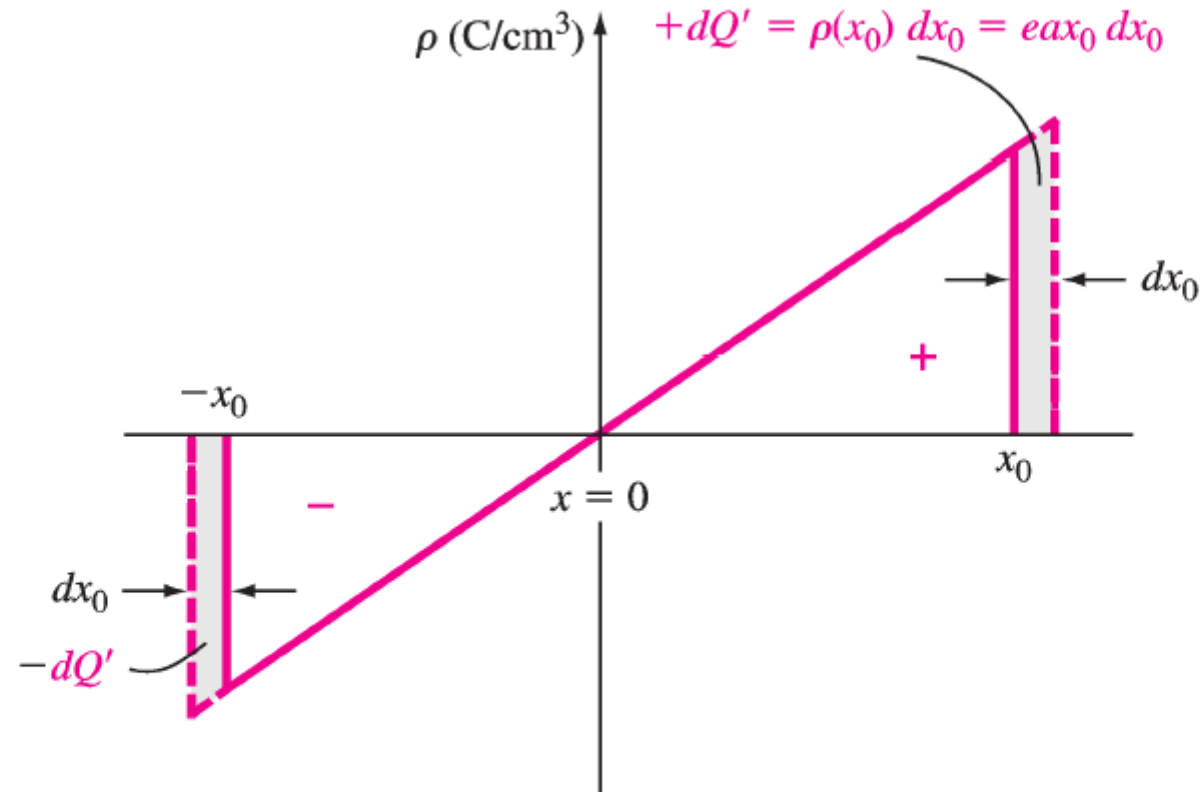


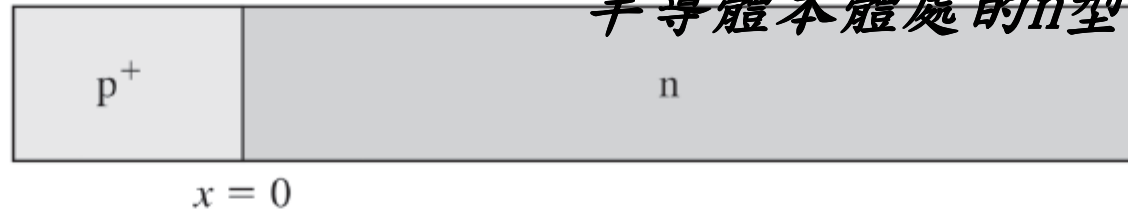
圖 7.14 | 線性漸變 pn 接面的空間電荷寬度隨著逆向偏壓的微量改變而跟著微量的變化。



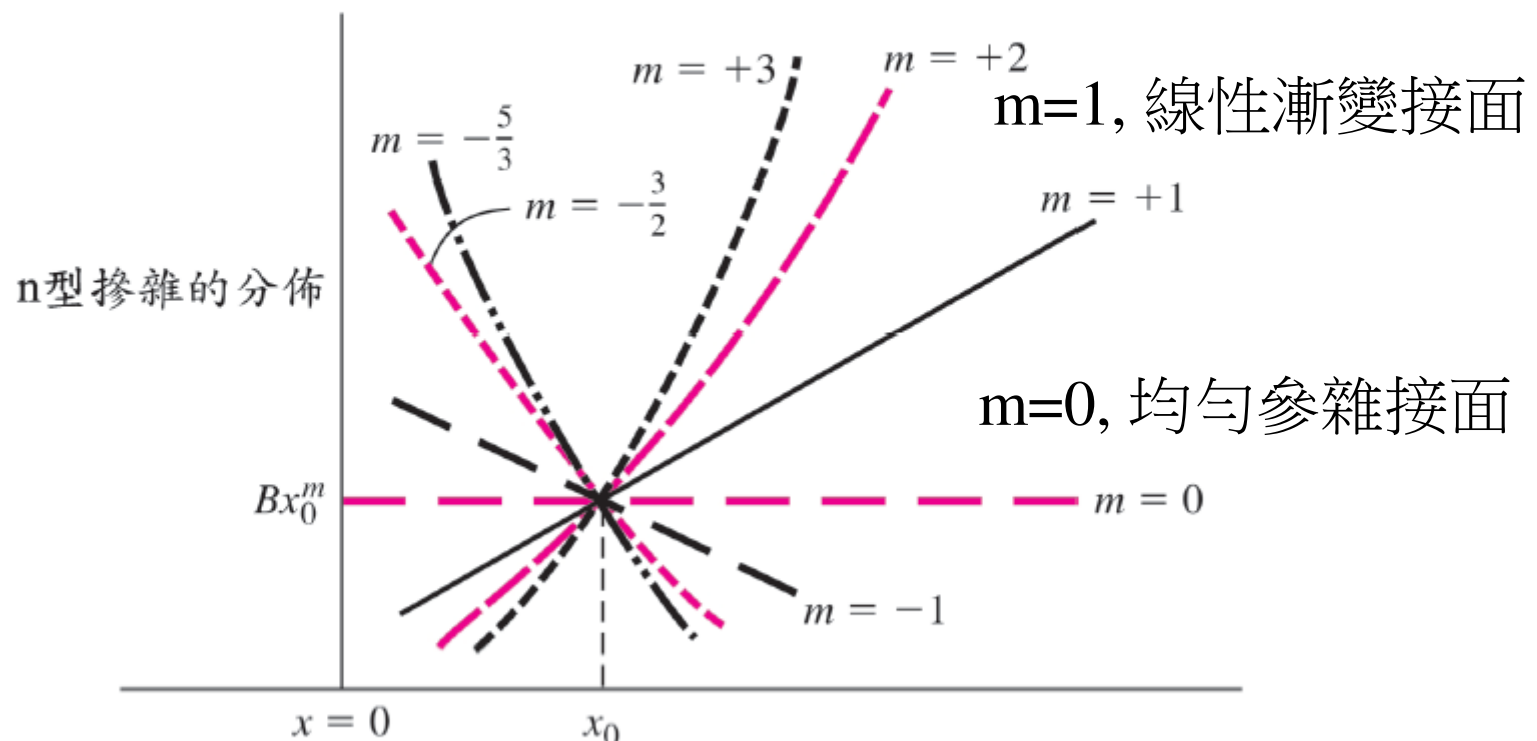
7.4.2 超陡峭式接面

超陡峭式接面

靠近冶金接面處的 n 型參雜比在半導體本體處的 n 型參雜大



$m=1$, 線性漸變接面



$m=1$, 線性漸變接面

$m=0$, 均勻參雜接面

在 $x>0$ 處的 n 型參雜濃度可表示為 $N=Bxm$
接面電容量

圖 7.15 | 各種單邊 p^+n 接面的參雜濃度分佈。(取自 Sze[14])

$$N = Bx^m \quad (7.61)$$

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

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

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

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

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

$$m = -\frac{3}{2} \quad (7.66b)$$

