第四章　半导体器件原理
semiconductor device
4.1 pn结特性概述

4.1.1 平衡pn结the pn junction in thermal equilibrium

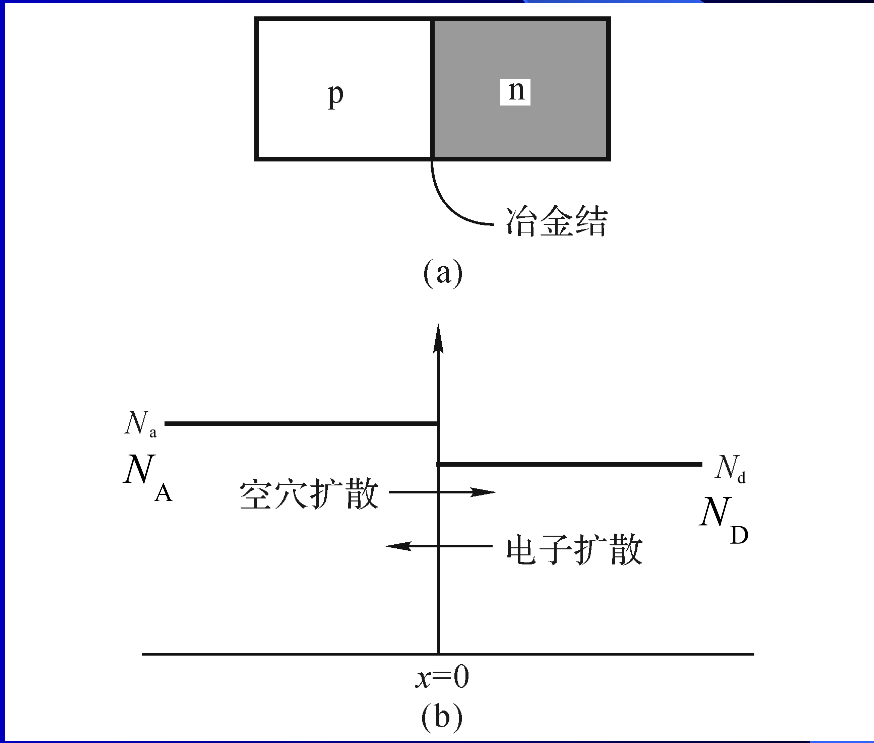
pn结：由单晶半导体上相邻两个区（p型区和n型区）的交界面附近的过渡区构成

n区掺施主杂质，浓度N_D，提供导带电子

p区掺受主杂质，浓度N_A，提供价带空穴

空穴从p区向n区扩散

电子从n区向p区扩散



- 同质结：以两种相同的半导体单晶材料为基础
- 异质结：以两种不同的半导体单晶材料为基础
- pn结：　在导电类型相反的半导体单晶材料交界处形成
- 高低结：在导电类型相同的半导体单晶材料交界处形成

n区：（导带）电子多、（价带）空穴少，

载流子带负电
施主离子带正电
→ 电中性

p区：（价带）空穴多、（导带）电子少，

载流子带正电
受主离子带负电
→ 电中性

（空穴多、电子少）p区　　n区（电子多、空穴少）

结合

p区 n区

p区 - + n区

载流子

浓度差

空穴从p区向n区扩散　　电子从n区向p区扩散

结p区侧聚集负离子(电离受主)　　结n区侧聚集正离子(电离施主)

负空间电荷区　　正空间电荷区

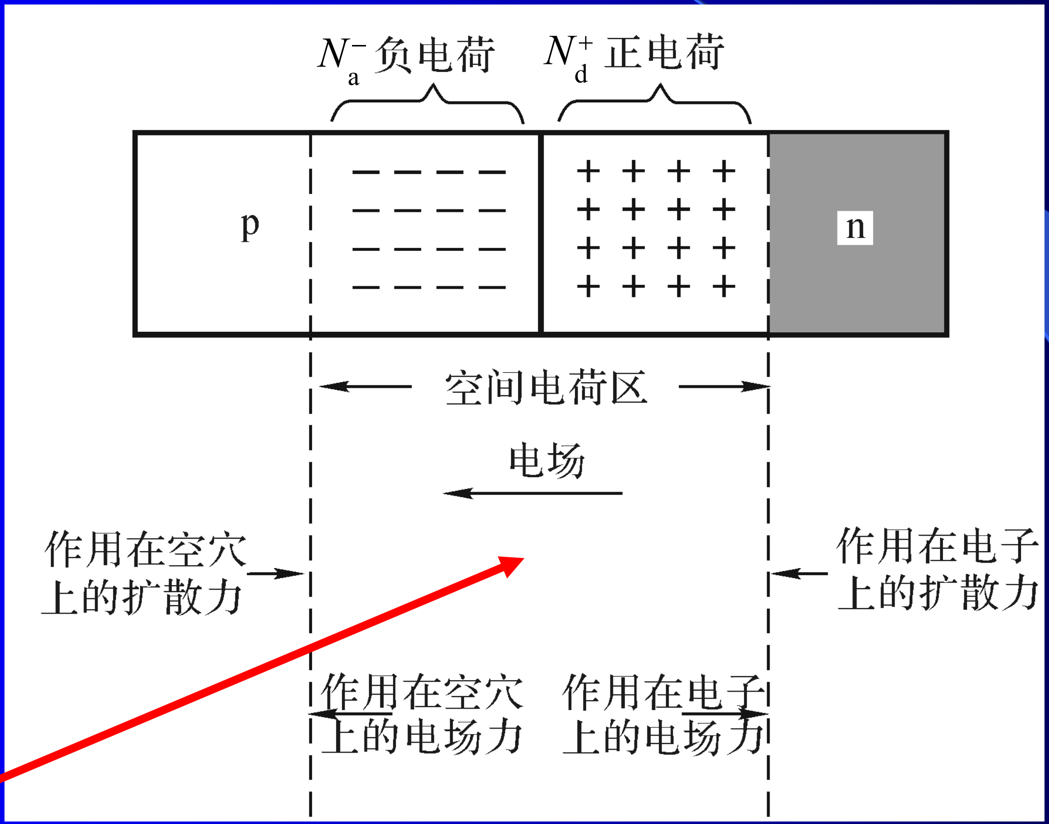
阻止进一步扩散，形成并增强相反方向的漂移运动

动态平衡

扩散与漂移的动态平衡

空间电荷区导致内建电场built-in field

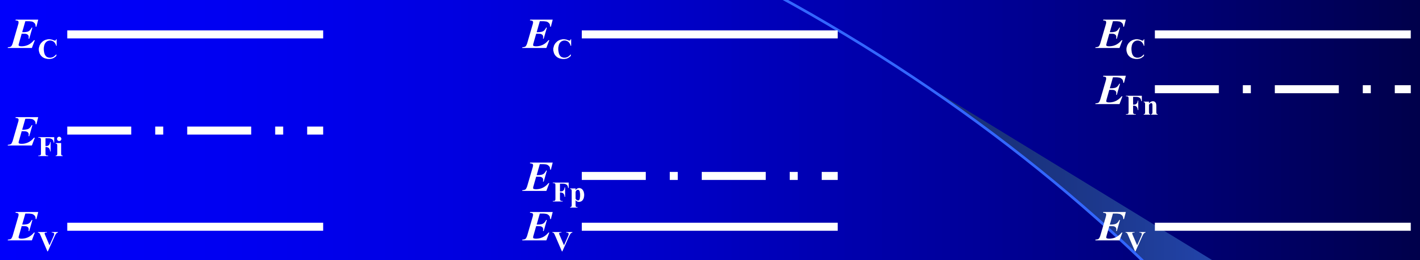
热平衡、无外场不产生净电流



空间电荷区space charge region的正负空间电荷分离，内建电场，“耗尽”了可动的载流子，空间电荷区也称耗尽区depletion region

同质pn结能带：

本征半导体　　　　p型半导体　　　　n型半导体



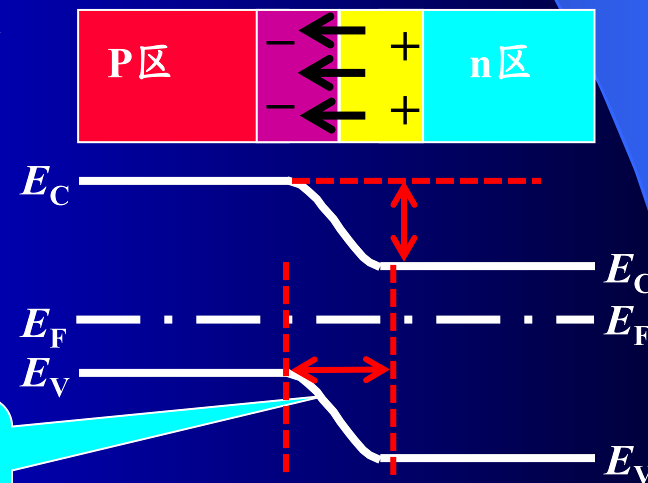
结合

热平衡，统一的E_F

pn结

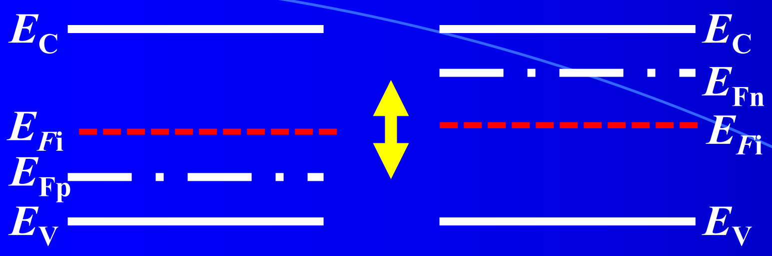
电子从高E_F区流向低E_F区，E_F下降（从n区向p区运动）

空穴从低E_F区流向高E_F区，E_F 上升（从p区向n区运动）



横坐标为空间位置

如何求解空间电荷区的宽度和势垒高度



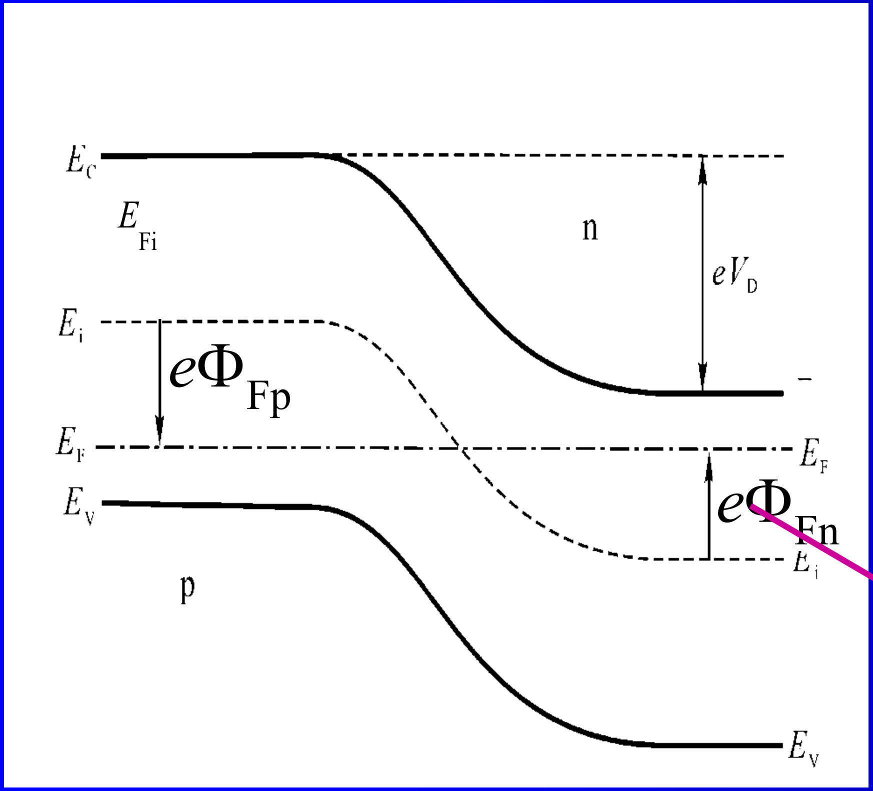
$$eV_D = e\left|\Phi_{Fn}\right| + e\left|\Phi_{Fp}\right|$$

$$e\Phi_{Fn} = E_{Fi}(\text{n区}) - E_F$$

$$e\Phi_{Fp} = E_{Fi}(\text{p区}) - E_F$$

空间位置的函数

n区导带电子浓度:



$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_B T}\right)$$

本征半导体

$$n_i = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_{Fi}}{k_B T}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_{Fi}}{k_B T}\right)$$

完全电离

$$n \approx N_D$$

$$\Phi_{Fn} = \frac{E_{Fi} - E_F}{e} \approx -\frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

施主浓度donor concentration

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{k_B T}\right)$$

本征

半导体

$$p_i = N_V \exp\left(-\frac{E_{Fi} - E_V}{k_B T}\right) = n_i$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_{Fi} - E_F}{k_B T}\right)$$

完全

电离

$$p \approx N_A$$

$$\Phi_{Fp} = \frac{E_{Fi} - E_F}{e} \approx \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

受主浓度acceptor concentration

室温热电压thermal voltage:

$V_T = 0.026$ V

n区导带电子电位:

$$\Phi_{Fn} \approx -\frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

p区价带空穴电位:

$$\Phi_{Fp} \approx \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

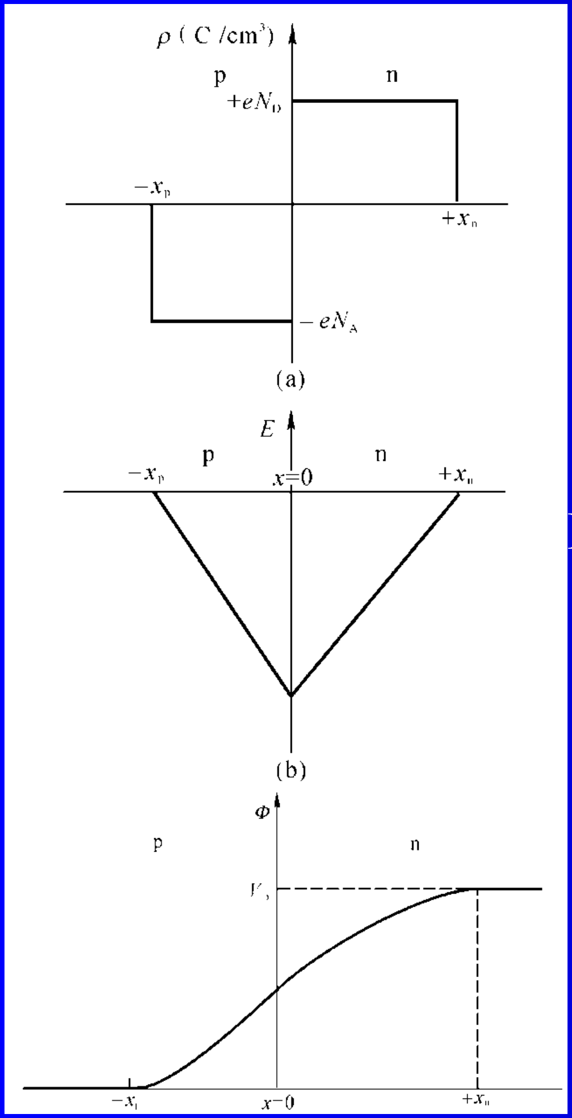
接触电位差:

同质pn结

$$V_D = |\Phi_{Fn}| + |\Phi_{Fp}| = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$V_T = \frac{k_B T}{e}$$ （热电压）

同质突变pn结



- 空间电荷区用泊松（Poisson）方程

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$$

P区$\rho(x)=-eN_A$　N区$\rho(x)=eN_D$

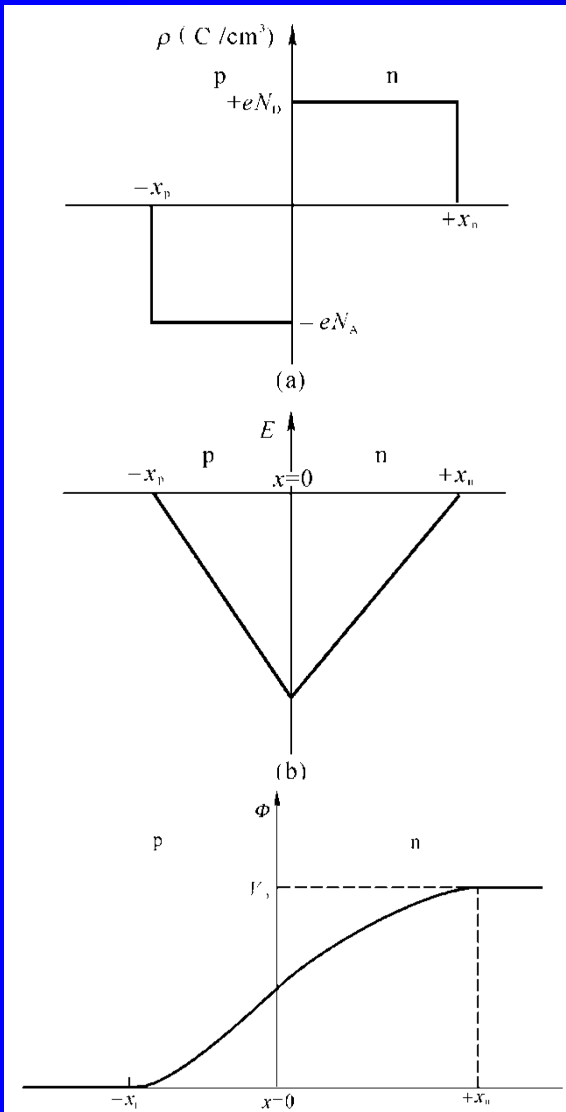
$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}dx$$

P区 $E(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x + x_p)$　N区 $E(x) = -\frac{eN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x_n - x)$

电场在0位置连续

$$N_A x_p = N_D x_n$$

- 电中性条件;
- 电场与位置呈线性关系;
- 最大电场在结平面处。



P区 $E(x) = -\frac{eN_A}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x + x_p)$ N区 $E(x) = -\frac{eN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x_n - x)$

$$\Phi(x) = -\int E(x)\mathrm{d}x$$

假设$-x_p$位置电位为零

P区 $\Phi(x) = \frac{eN_A}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}(x + x_p)^2$ N区 $\Phi(x) = \frac{eN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x_n x - \frac{x^2}{2}) + \frac{eN_A}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}x_p^2$

位能在空间电荷区随位置呈平方律变化

x_n位置的势垒总高度为 $V_D = \frac{e(N_A x_p^2 + N_D x_n^2)}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}$

空间电荷区宽度space charge width:

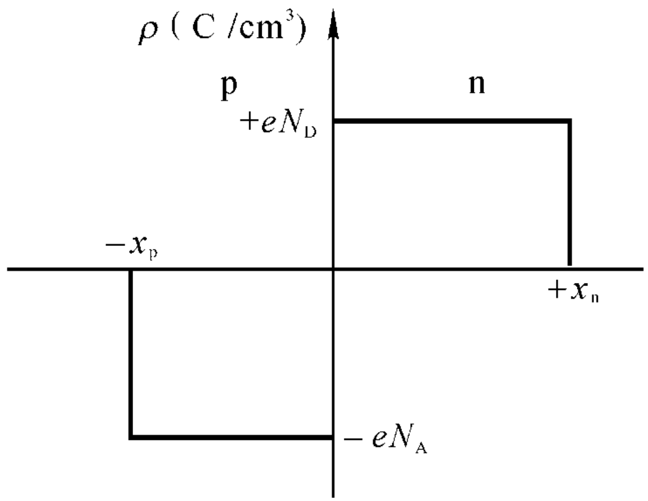
$$X_D = x_n + x_p = \sqrt{V_D\left(\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{e}\right)\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)}$$

突变pn结:

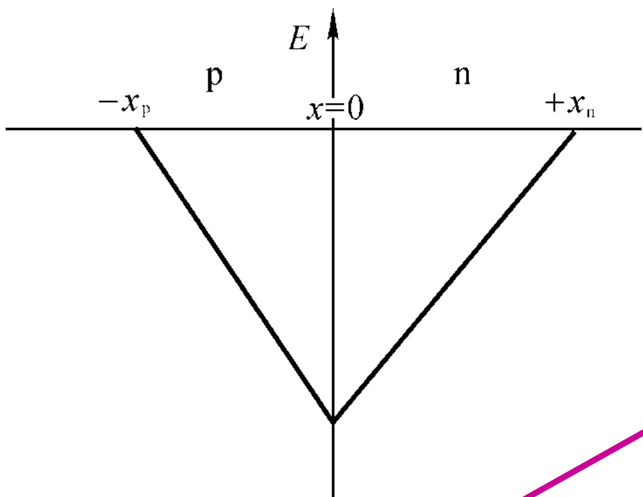
- 空间电荷区用泊松（Poisson）方程

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2}=-\frac{\Delta\rho(x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$$

- 电中性



(a)



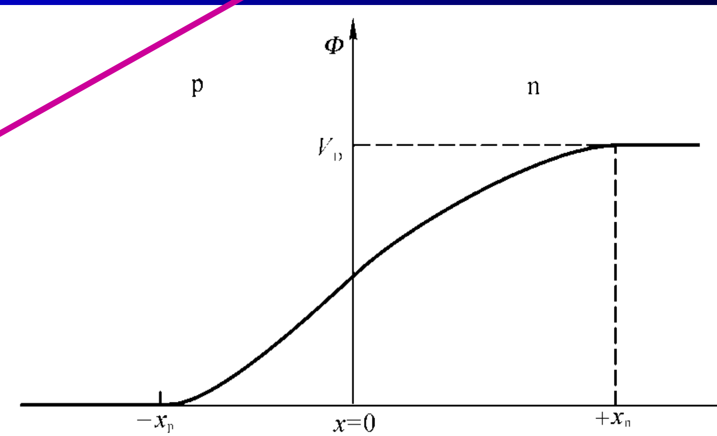
(b)

空间电荷区宽度space charge width:

$$X_D=x_n+x_p=\sqrt{V_D\left(\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0}{e}\right)\left(\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right)}$$

接触电位差:

$$V_D=\frac{e(N_A x_p^2+N_D x_n^2)}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}$$



同质突变pn结