

电子工程物理基础 (5)

聂萌

东南大学电子科学与工程学院

第5章 半导体中电子的控制

5.1 半导体与外界作用

5.2 半导体与半导体

5.3 半导体与金属

5.4 半导体与绝缘体

5.1 半导体与外界作用

一. 半导体与热

温度可以影响

载流子的浓度

低温弱电离

中温全电离

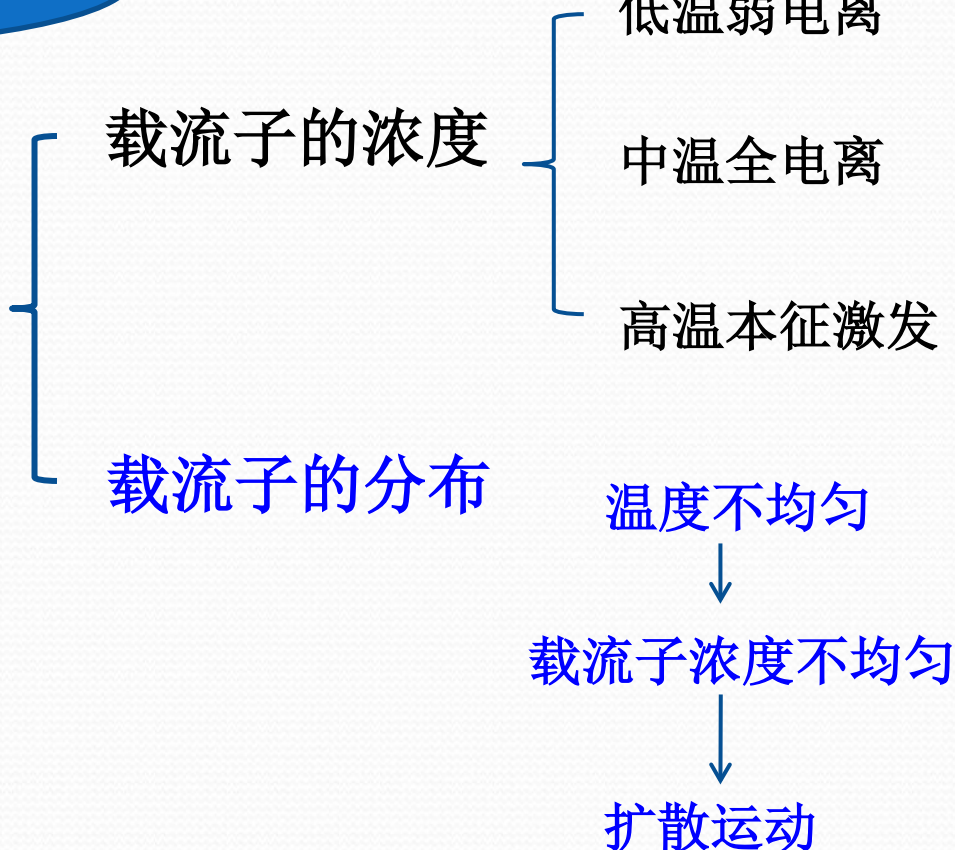
高温本征激发

载流子的分布

温度不均匀

载流子浓度不均匀

扩散运动



1. 温度对浓度的影响

由4.2得知



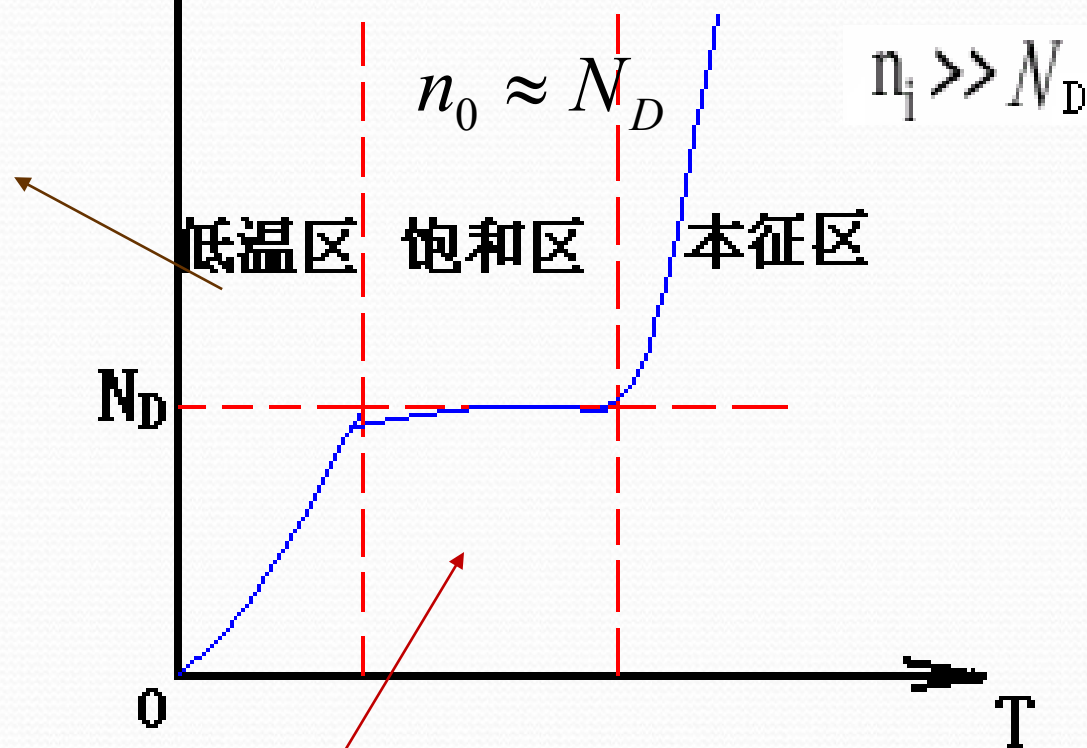
	费米能级	载流子浓度
低温	$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D) + \frac{1}{2}k_0T \ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right)$	$n_0 = \left(\frac{N_D N_C}{2}\right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E_D}{2k_0T}}$
中温	$E_F = E_C + k_0T \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$	$n_0 \approx N_D$
高温	$E_F = E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{1}{2}k_0T \ln\frac{N_V}{N_C}$	$n_0 \approx p_0 = n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_0T}}$

分析、讨论

(1) $n \sim T$

$$n_0 = \left(\frac{N_D N_C}{2} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{\Delta E_D}{2k_0 T}}$$

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}}$$



希望器件工作在此温区

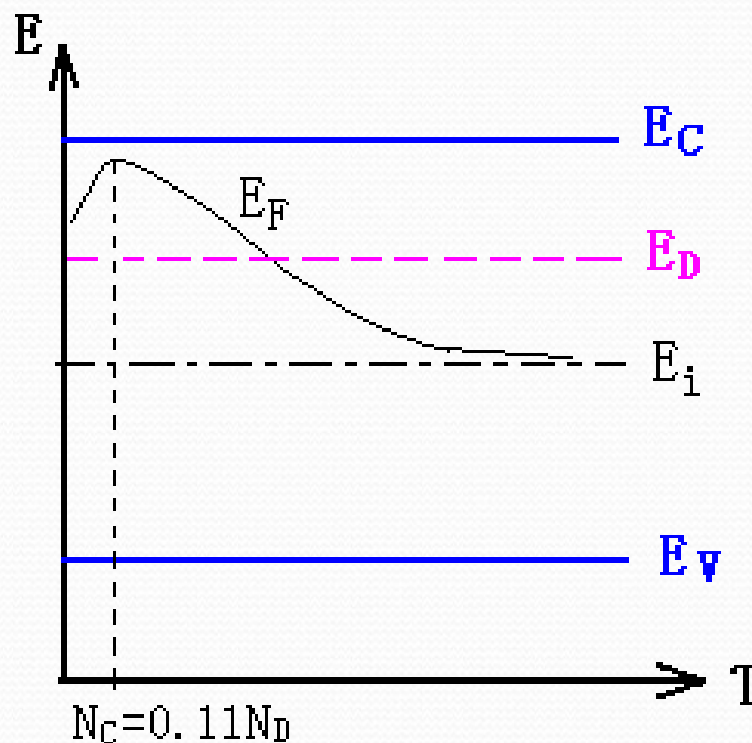
(2) $E_F \sim T$

(掺杂一定)

低温 $E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D) + \frac{1}{2}k_0T \ln\left(\frac{N_D}{2N_C}\right)$

中温 $E_F = E_C + k_0T \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$

$E_F \sim E_D$ 的相对位置反映了半导体中载流子的电离程度

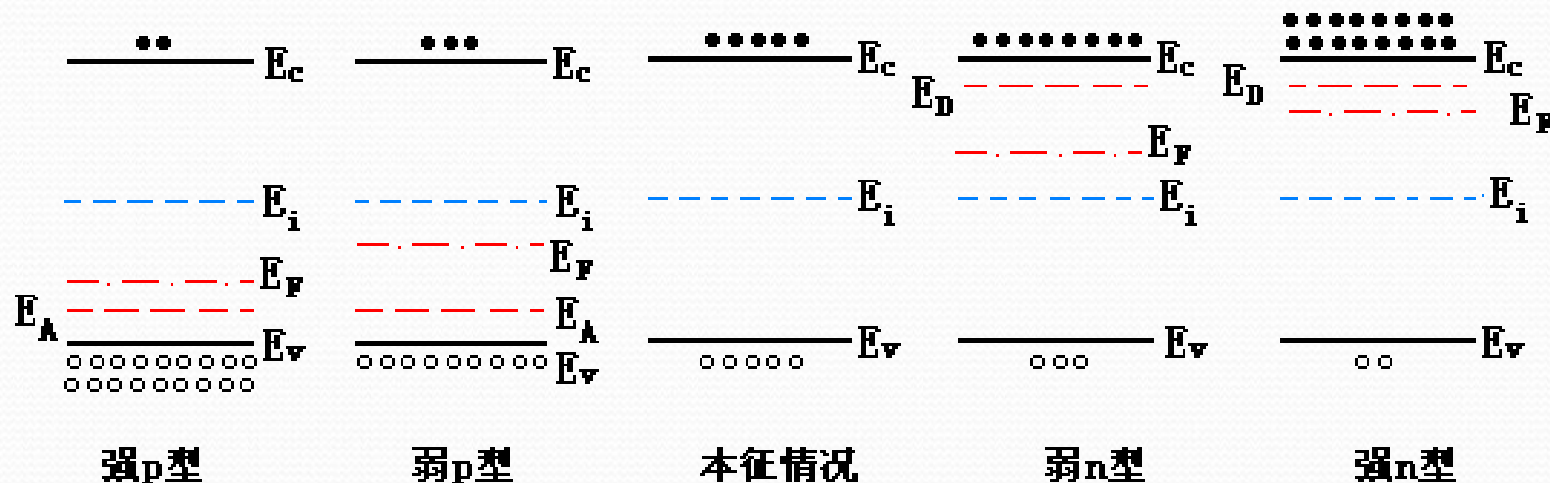


(3) $E_F \sim$ 掺杂 (T一定, 则 N_C 也一定)

T一定, N_D 越大, E_F 越靠近 E_C

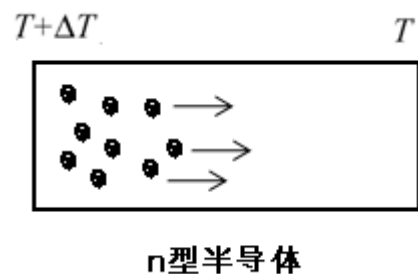
$$\boxed{\text{中温}} \quad E_F = E_C + k_0 T \ln\left(\frac{N_D}{N_C}\right)$$

T一定, N_A 越大, E_F 越靠近 E_V 。



2. 局部热对分布的影响

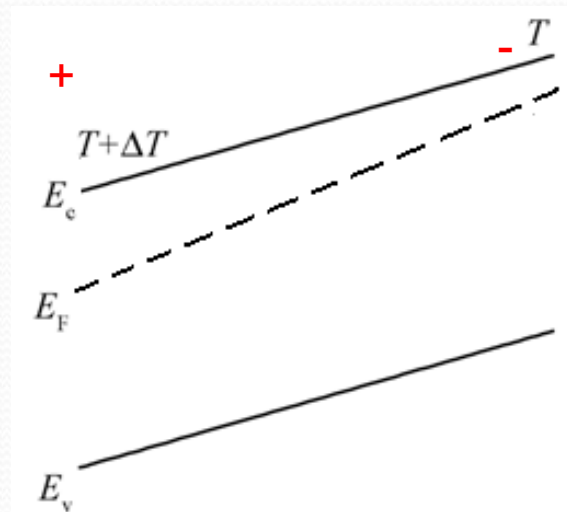
温度不均匀 \longrightarrow 载流子浓度不均匀 \longrightarrow 载流子扩散



温差电动势

内建电场

温差电动势的方向与半导体导电类型相关。所以可以利用热探针法判断半导体导电类型。



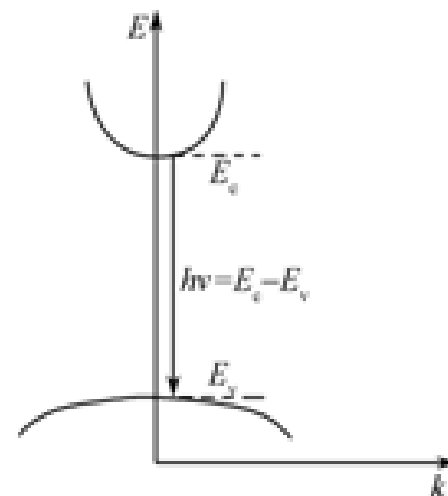
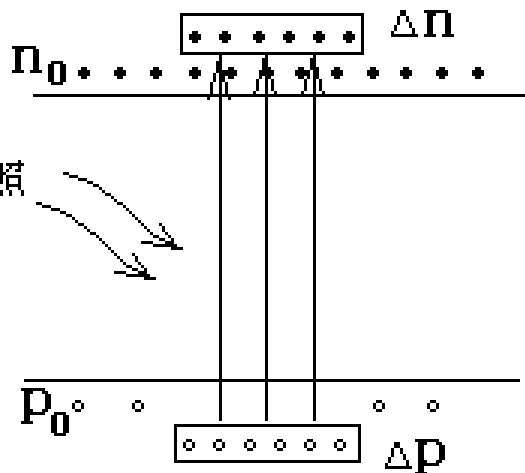
均匀温度梯度下的半导体的能带图

二. 半导体与光

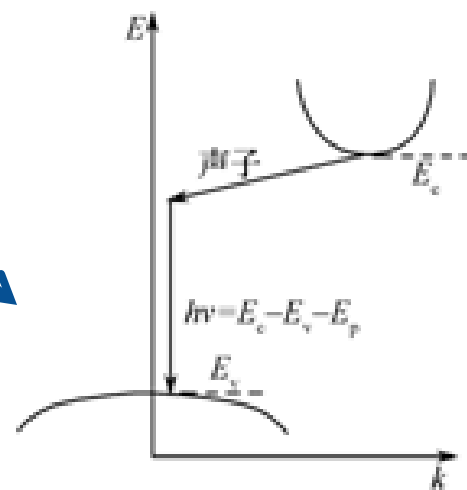
产生非平衡载流子

$$(h\nu \geq E_g)$$

光照

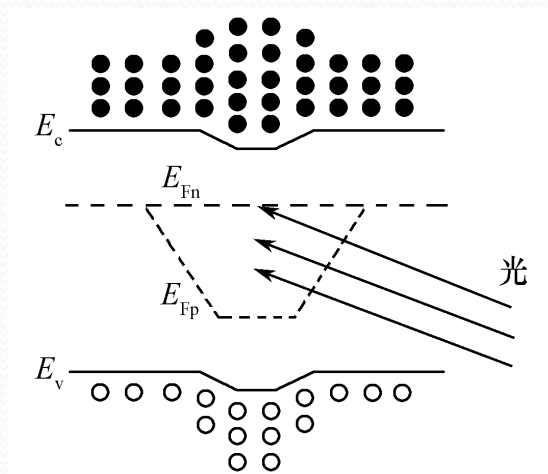


(a) 直接跃迁



(b) 间接跃迁

光生伏特效应



半导体中会出现阻碍多子扩散的内建电场，导致能带弯曲。但当光注入载流子量很小时，该内建电场可以忽略。

类似于温差电动势，半导体吸收光子也会产生电动势——光生伏特效应。

一类是发生在均匀半导体材料内部——**丹倍效应**

非平衡载流子扩散速度的差异而引起的光照方向产生电场和电位差。

一类是发生在半导体的界面——**pn结光生伏特效应**（常用于太阳能电池）

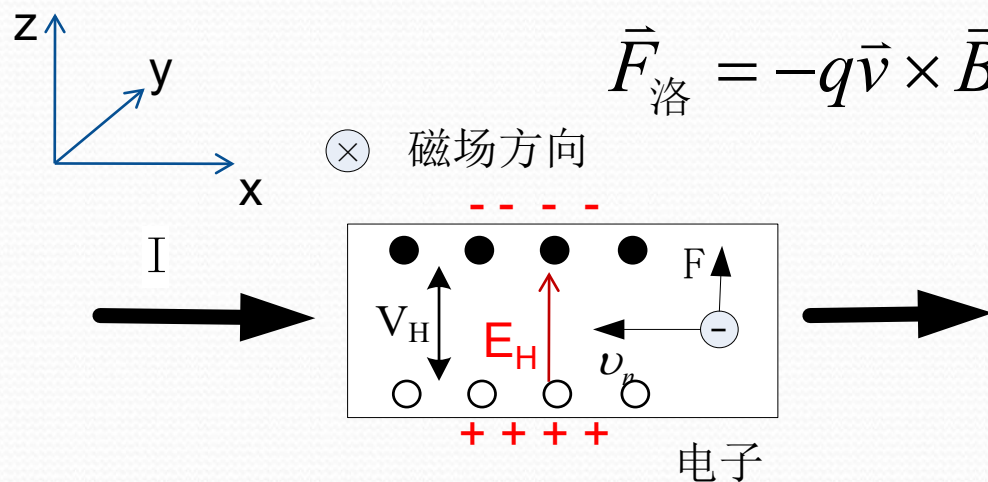
光在界面层被吸收，产生电子 - 空穴对。通过空间电荷的电场作用被相互分离。电子和空穴向相反方向运动。产生一个向外的可测试的电压。

三. 半导体与磁

磁场 \longrightarrow 洛伦兹力 \longrightarrow 改变载流子运动的方向

1. 霍耳效应

通了电流的半导体在垂直电流方向的磁场作用下，在与电流和磁场垂直的方向上形成电荷积累和出现电势差的现象。



磁场作用下的通电n型半导体的霍尔效应

$$E_H \propto JB$$
$$E_H = R_H JB$$

比例系数 R_H —霍尔系数

霍尔效应可以测定载流子浓度及载流子迁移率等重要参数，以及判断材料的导电类型。还可制作霍尔器件。

(1) 判断导电类型

{	n型	$R_H < 0$
	P型	$R_H > 0$

霍尔电压的正负相反

$$E_H = R_H JB$$

⊗ 磁场方向

n型

电场力

洛伦兹力

$$-qE_H = qvB$$

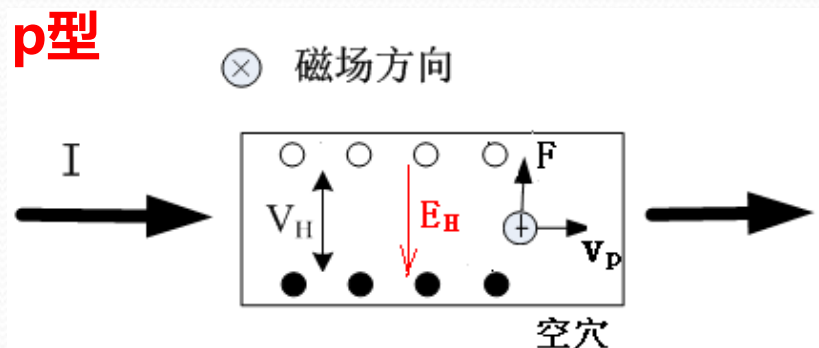
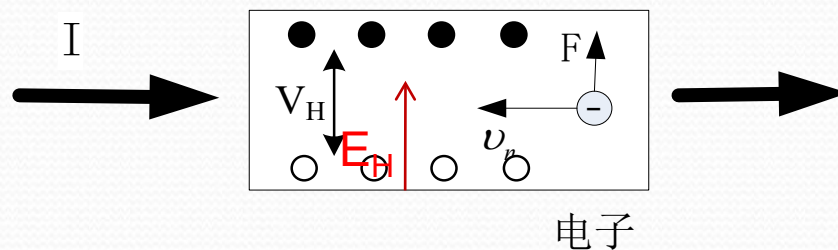


$$E_H = (-v) B = -\frac{J}{nq} B = R_H JB$$

$$R_H = -\frac{1}{nq} < 0$$

同理：

$$R_H = \frac{1}{pq} > 0$$



(2) 测定载流子浓度及迁移率

$$E_H = R_H J B \longrightarrow \frac{V_H}{b} = R_H \frac{I}{bd} B \longrightarrow R_H = \frac{V_H d}{I B}$$

(b-宽 d-厚)

$$R_H = -\frac{1}{nq} \quad \text{或} \quad R_H = \frac{1}{pq}$$

求出n或p

三参量已知，测出 V_H —求出 R_H

测出电导率

可求出霍尔迁移率

(3) 霍尔器件

$$V_H \propto I_x B_x$$

保持其中一个量不变，另一个或两个作变量，应用于不同场合。

2. 回旋共振

一些物质如半导体中的载(电)流子在一定的恒定(直流)磁场和高频磁场同时作用下会发生抗磁共振(常称回旋共振)

◆ Cyclotron
resonance experiments

测 m^*

$m^* \rightarrow$ 能带结构

原理

电子的初速度为 v ,在恒定磁场 (B) 中:

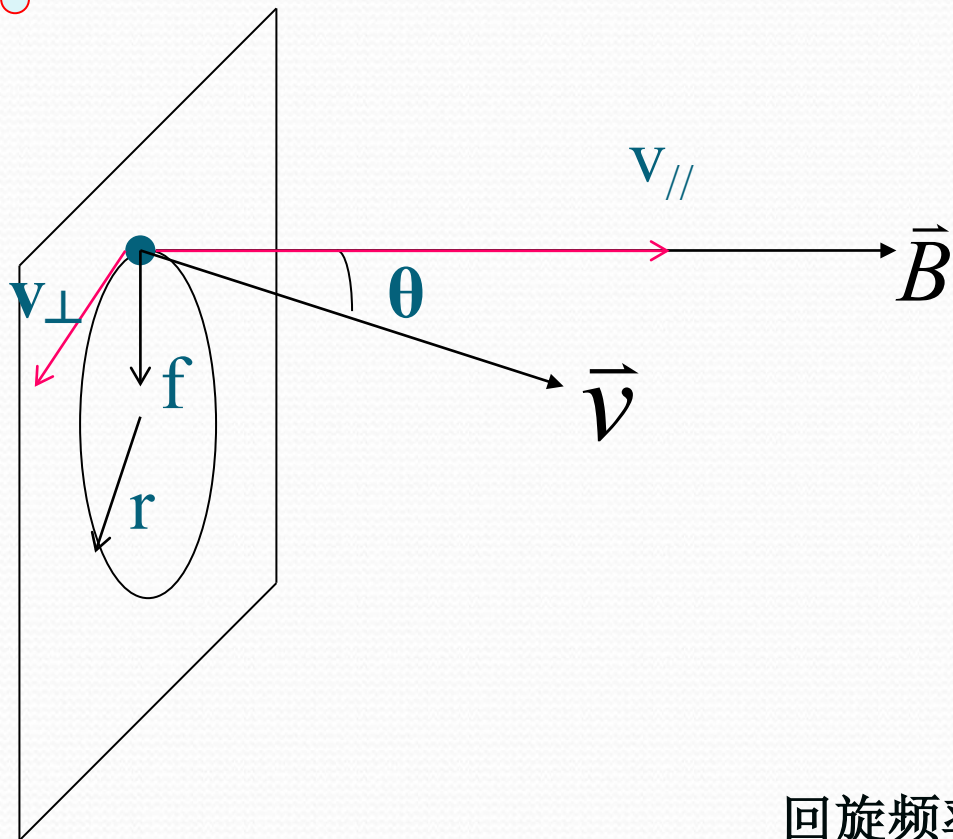
$$\vec{f} = -q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$f = qvB \sin \theta$$
$$= qv_{\perp} B$$

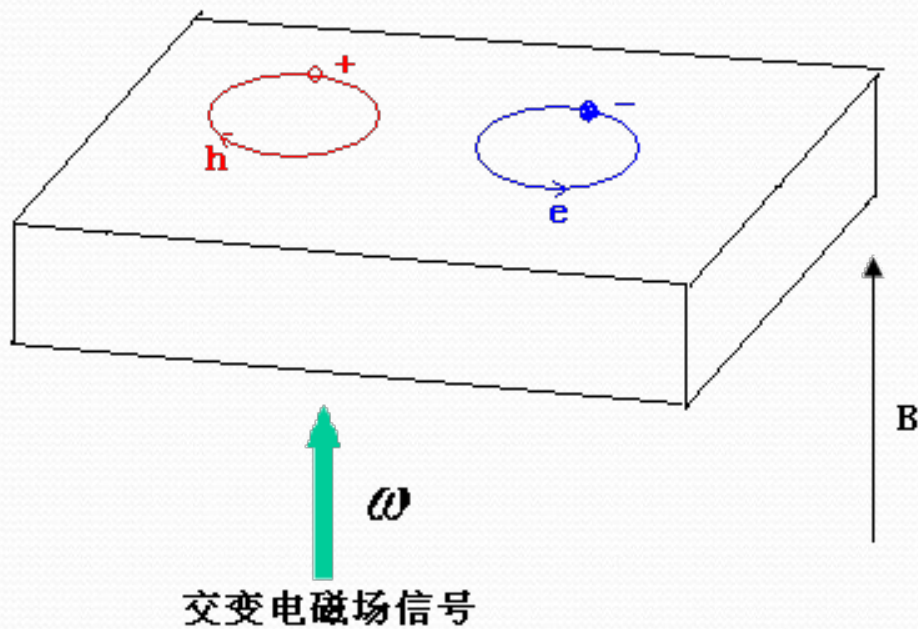
$$f = m_n^* \frac{v_{\perp}^2}{r}$$
$$v_{\perp} = r\omega_c$$

$$\omega_c = \frac{qB}{m_n^*}$$

回旋频率



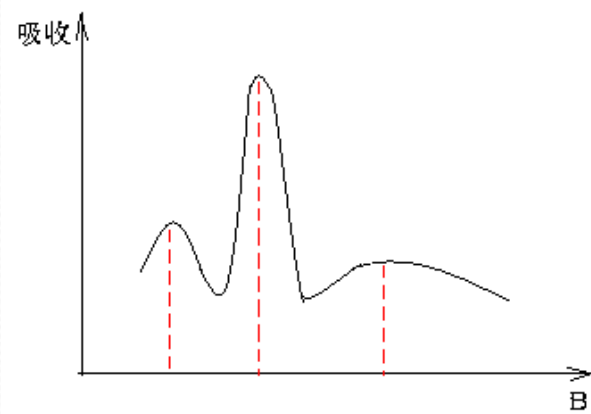
实验方法



均匀
磁场

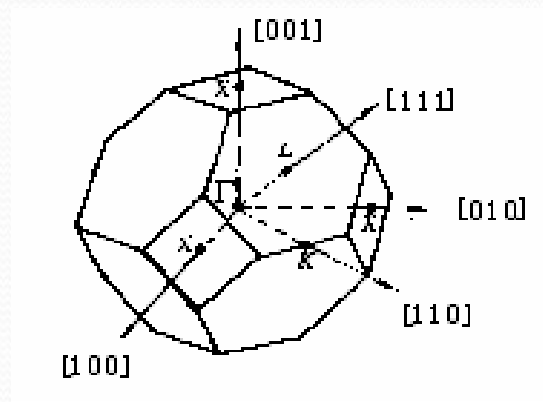
$$\omega_c = \frac{qB}{m_n^*}$$

$\omega = \omega_c$ 发生共振吸收



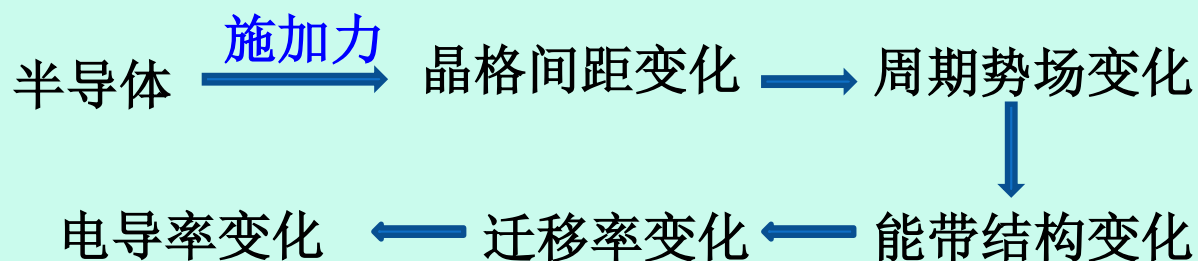
以硅为例,回旋共振实验现象:

- (1) B沿 $[111]$ 方向, 观察到一个吸收峰。
- (2) B沿 $[110]$ 方向, 观察到两个吸收峰。
- (3) B沿 $[100]$ 方向, 观察到两个吸收峰。
- (4) B沿任意轴方向, 观察到三个吸收峰。



四. 半导体与力

控制载流子的迁移率



半导体应变计
压敏二极管
压敏晶体管

压阻效应是指半导体受到应力作用时，由于载流子迁移率的变化，使其电阻率发生变化的现象。它是C.S史密斯在1954年对硅和锗的电阻率与应力变化特性测试中发现的。

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_{ab} T \quad (a, b = 1, 2, 3, 4) \quad T \text{—应力（单位截面所受力）}$$

压阻系数，四阶张量。反映压电效应的强弱。

应用：压阻式压力传感器、压阻式加速度计传感器

第5章 半导体中电子的控制

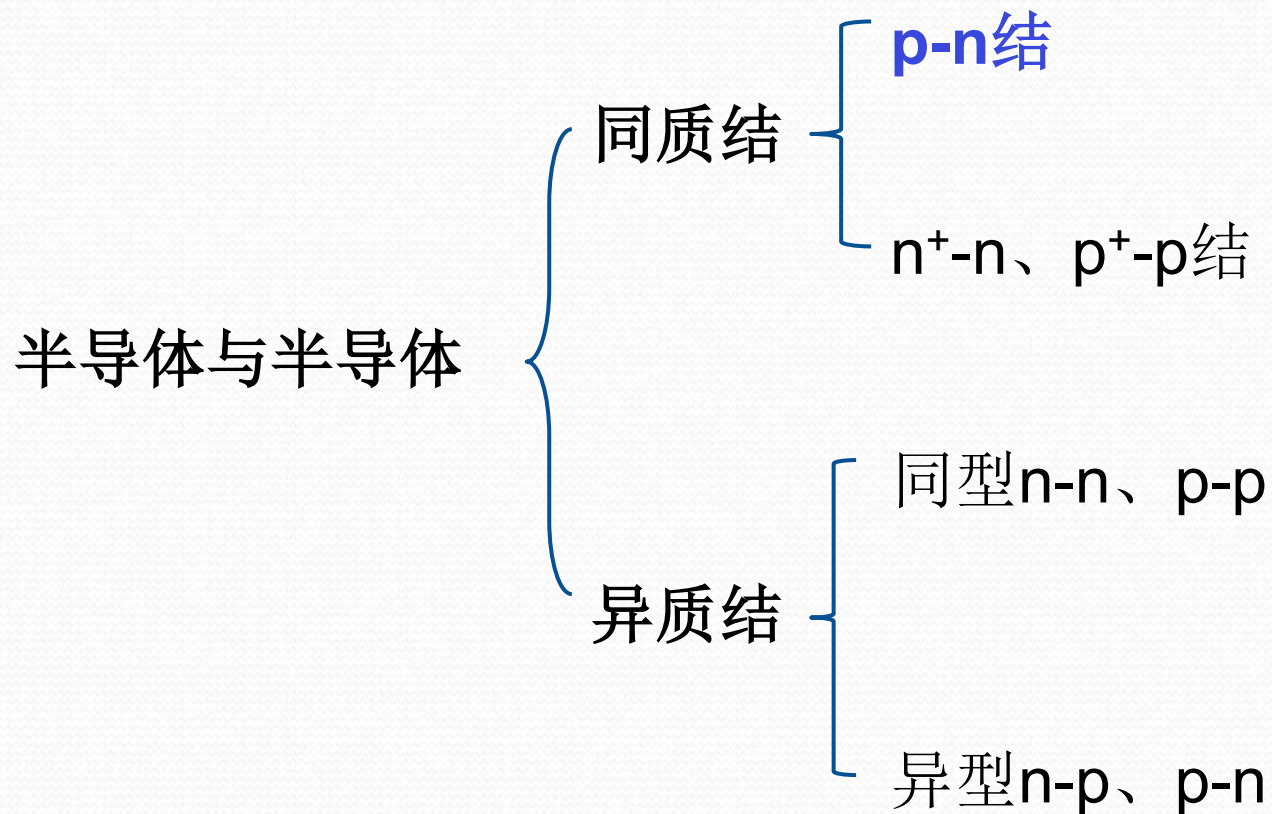
5.1 半导体与外界作用

5.2 半导体与半导体

5.3 半导体与金属

5.4 半导体与绝缘体

5.2 半导体与半导体



一. p-n结

1. 制备方法

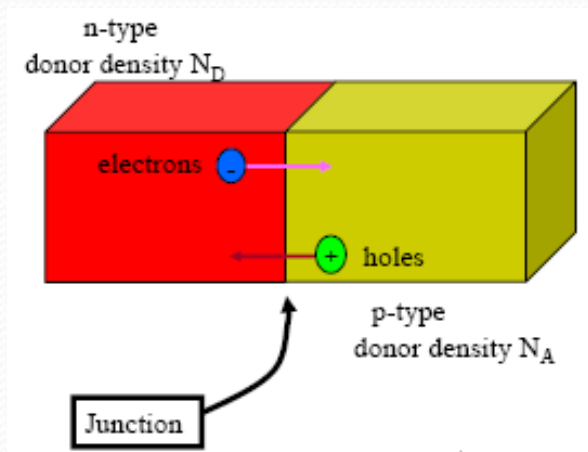
(1) Alloyed Junctions (合金结)

(2) Diffused Junctions (扩散结)

(3) Ion Implantation (离子注入)

(4) Epitaxial Growth (外延生长)

最常用



p-n结基本结构

(1) Alloyed Junctions (合金结)

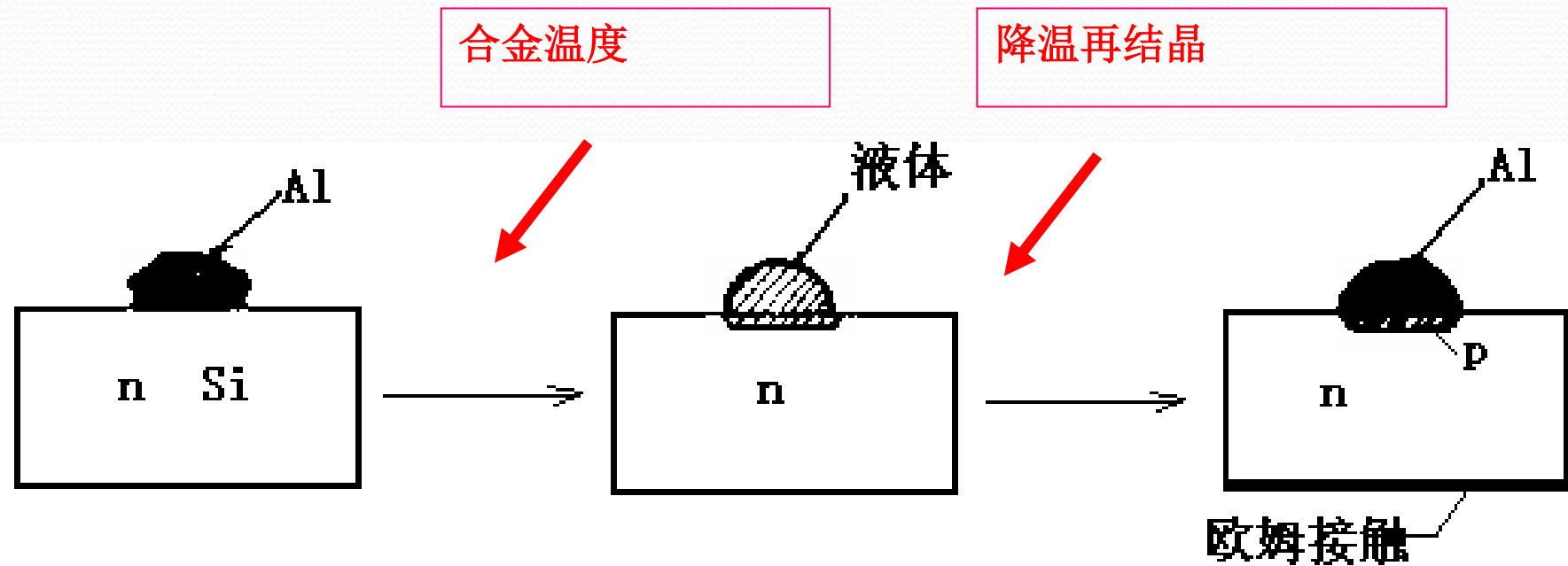
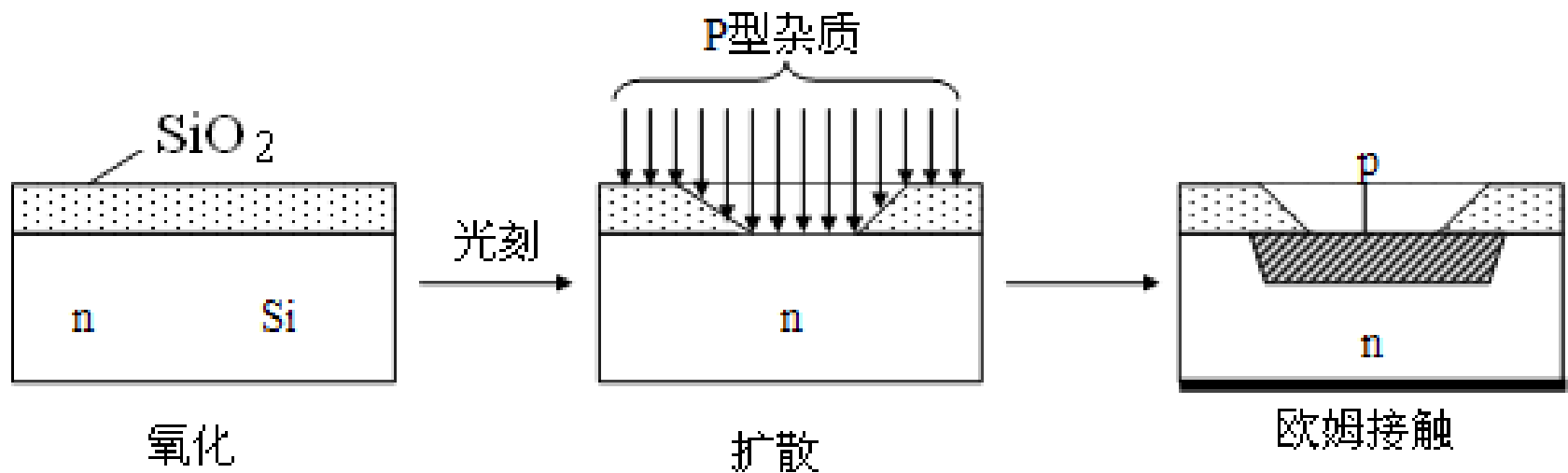


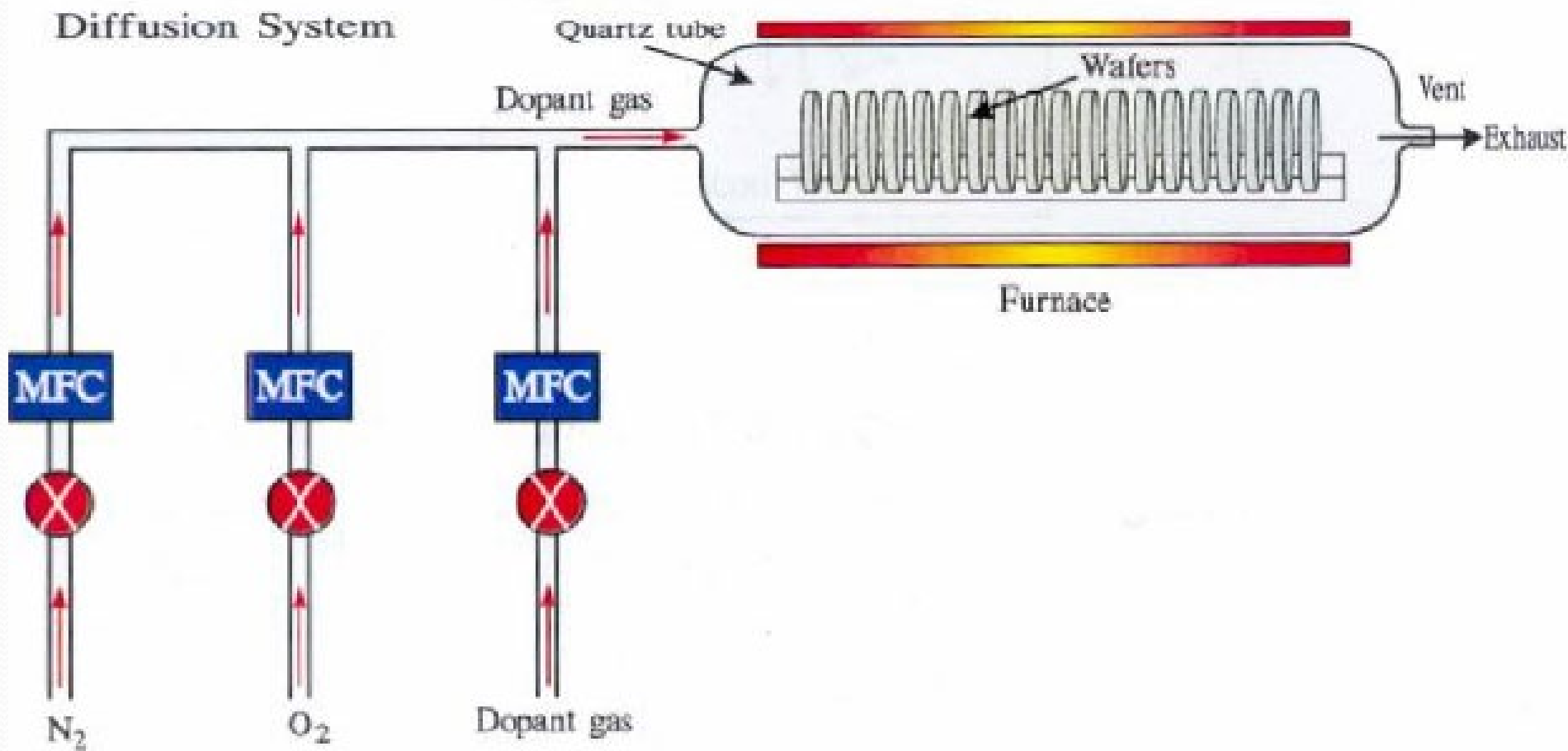
图2 合金法制造p-n结过程

(2) Diffused Junctions (扩散结)



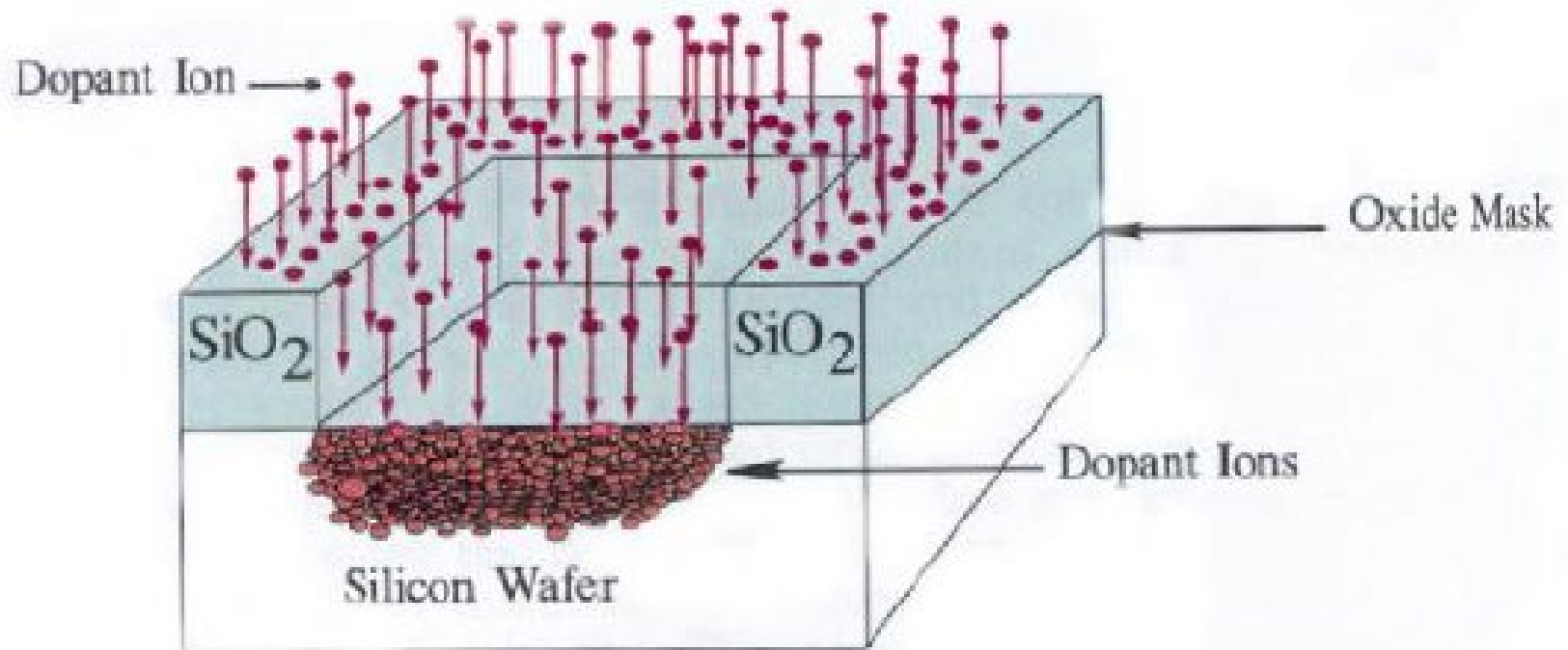
扩散法制造p-n结的过程

扩散系统

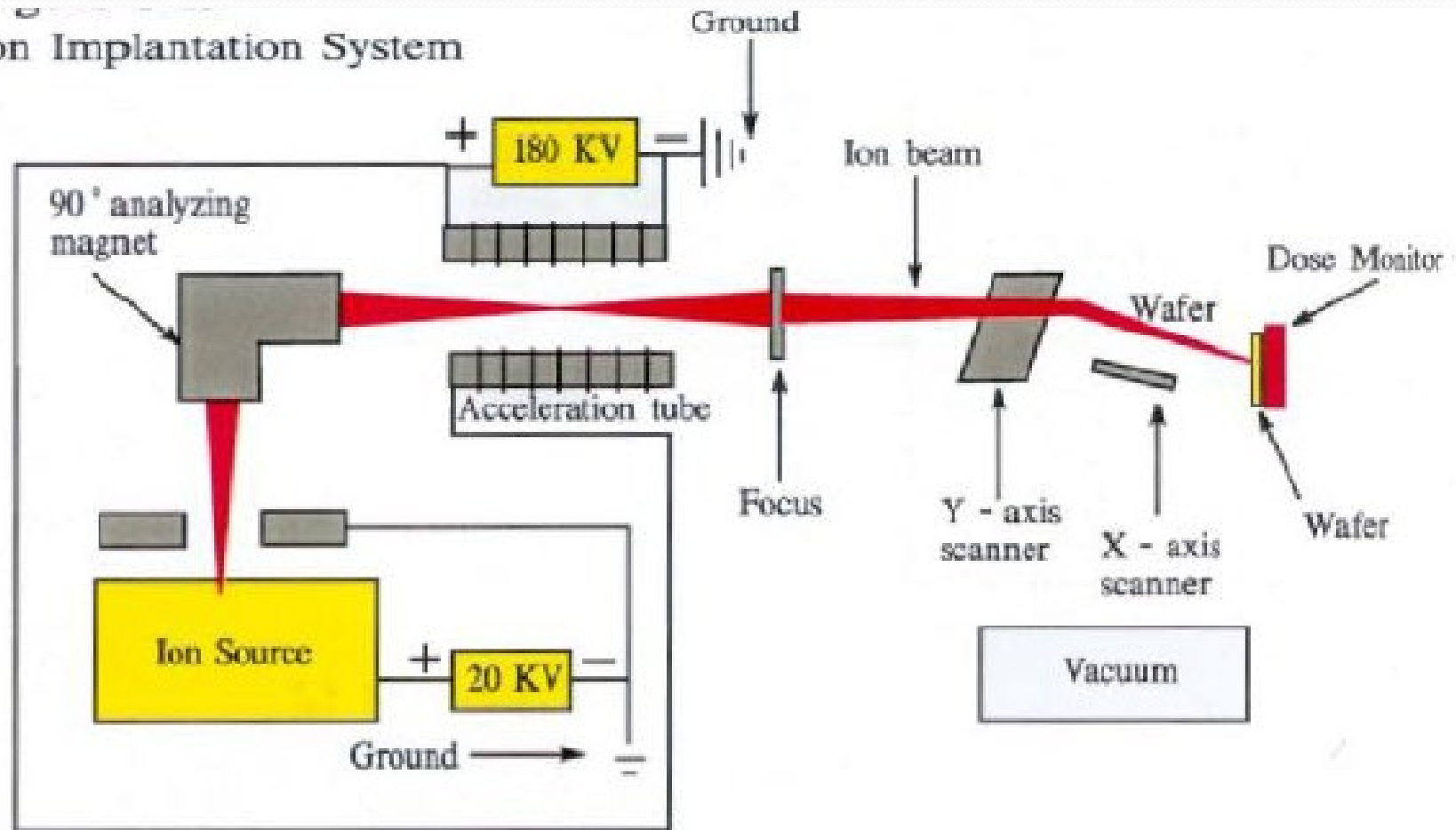


(3) Ion Implantation (离子注入)

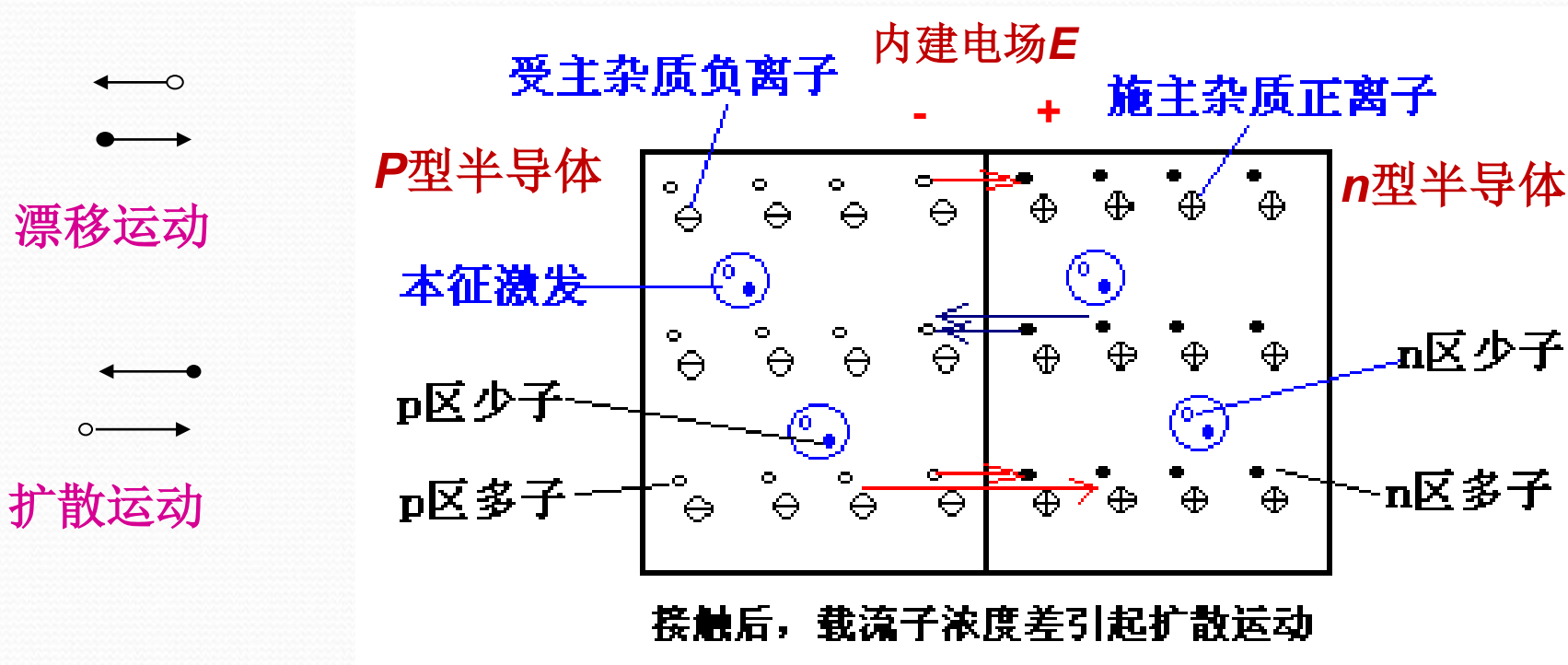
The dopant effects of ion implantation through a silicon dioxide layer



Ion Implantation System

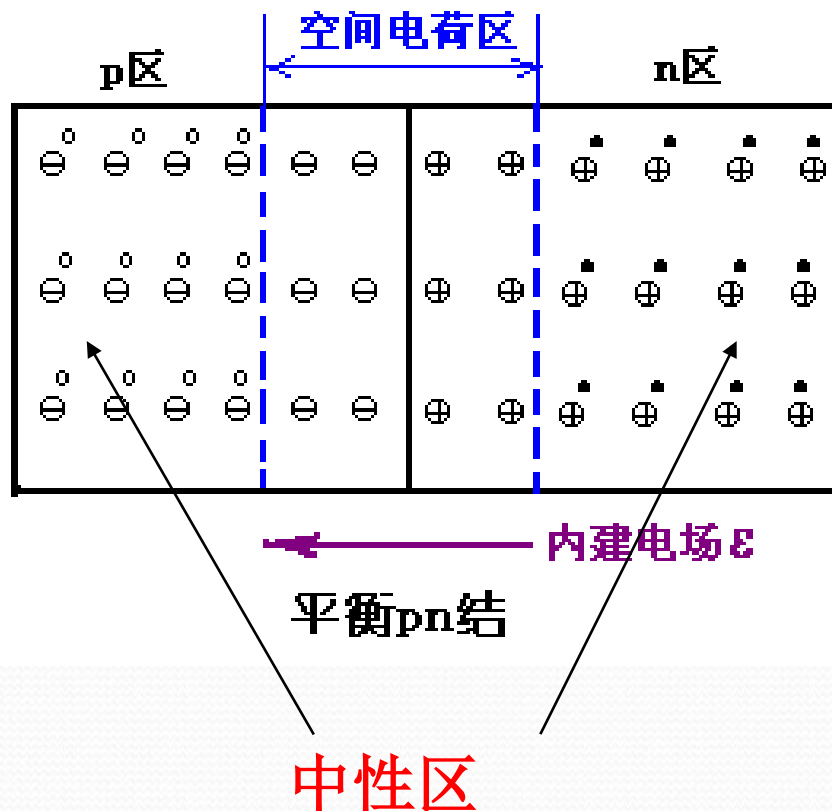


2. pn结区(Space charge region)的形成



刚接触, 扩散 \longrightarrow 建立内建电场 \longrightarrow 漂移 \uparrow \longrightarrow 扩散=漂移
(达到动态平衡)

当p型半导体和n型半导体接触在一起时,扩散和漂移这一对相反的运动最终达到平衡,相当于两个区之间没有电荷运动,空间电荷区的厚度固定不变。在两者的交界面处存在着一个过渡区,通常称为p-n结。



空间电荷区

Space charge region

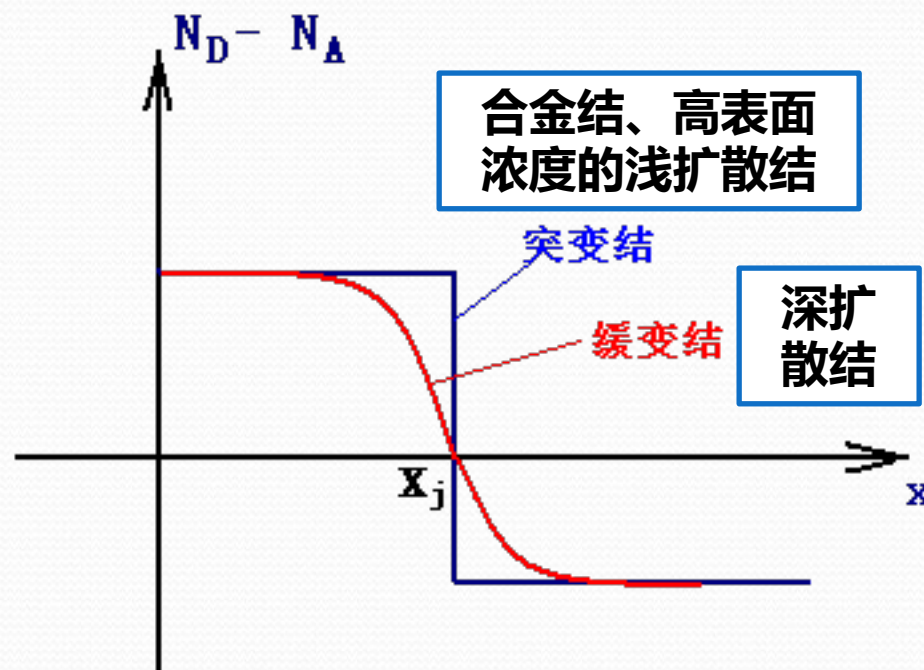
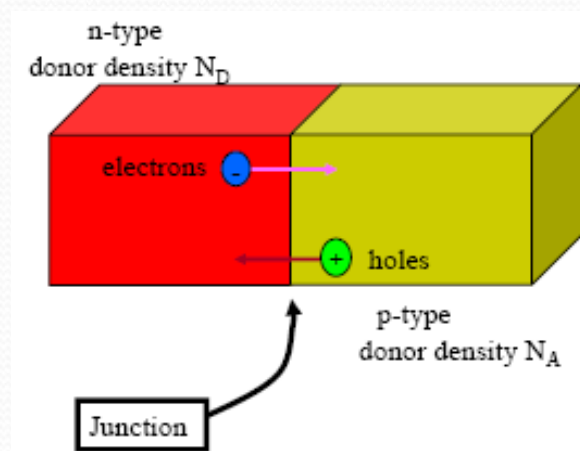
耗尽区
Depletion region

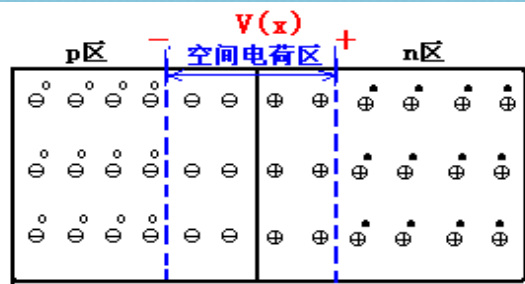
阻挡层



缓变结与突变结

1. Alloyed Junctions (合金结)
2. Diffused Junctions (扩散结)
3. Ion Implantation (离子注入)
4. Epitaxial Growth (外延生长)





突变结空间电荷区的电场
 $E(x)$ 、电势 $V(x)$ 、宽度 X_D

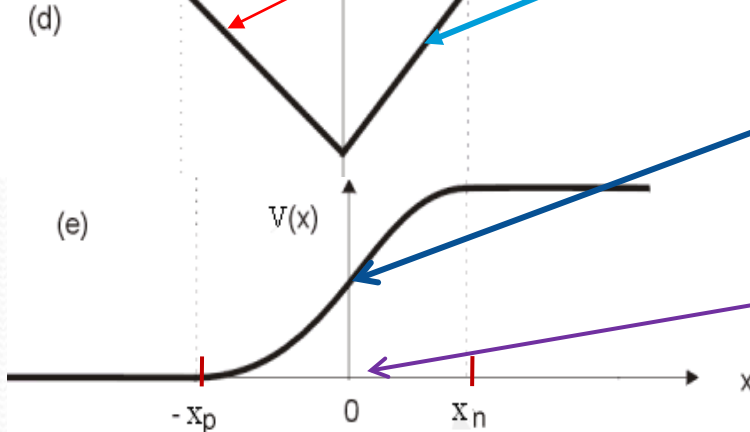
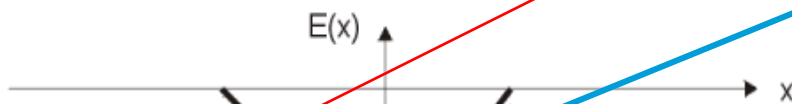
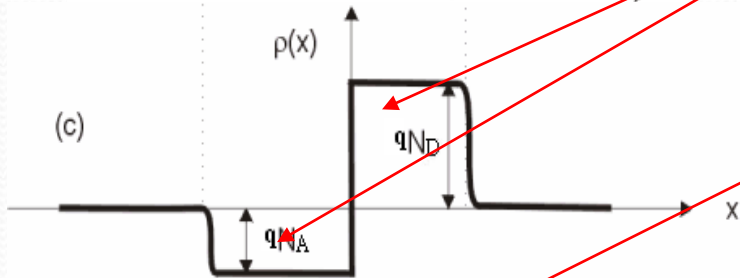
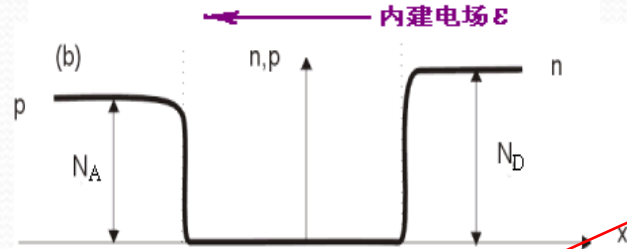
$$N_A x_p = N_D x_n$$

$$E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} (x + x_p)$$

$$E(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (x_n - x)$$

$$V(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (x_n \cdot x - \frac{x^2}{2}) + \frac{qN_A}{2\epsilon_r \epsilon_0} x_p^2$$

$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$



泊松方程
poisson's equation:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{-\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} = -\frac{dE}{dx}$$

In the p-region:

$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_r \epsilon_0} dx = -\int \frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} dx = -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} x + C_1$$

$$x = -x_p, E = 0 \quad C_1 = -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} x_p$$

所以

$$E = -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} (x + x_p)$$

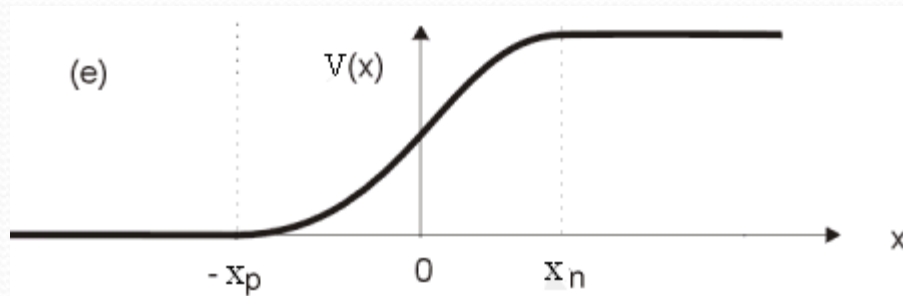
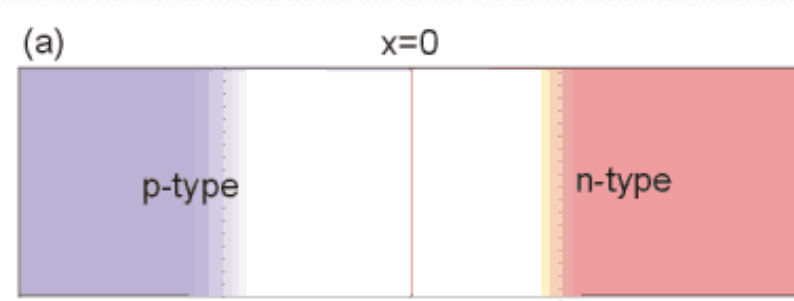
In the n-region:

$$E = -\frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} (x_n - x)$$

$$E_{\max} = -\frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} x_n$$

$$= -\frac{qN_A}{\epsilon_r \epsilon_0} x_p$$





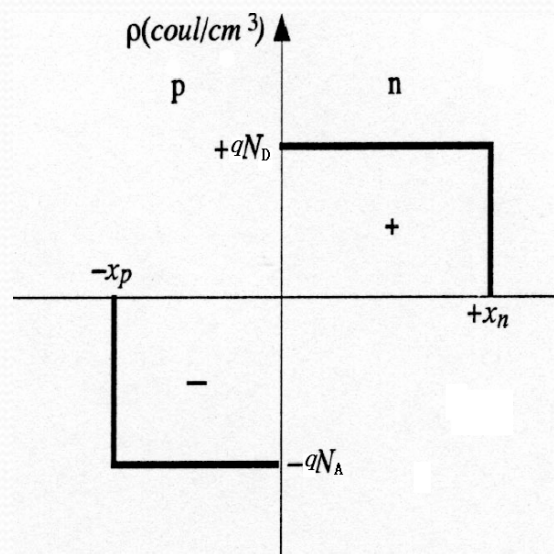
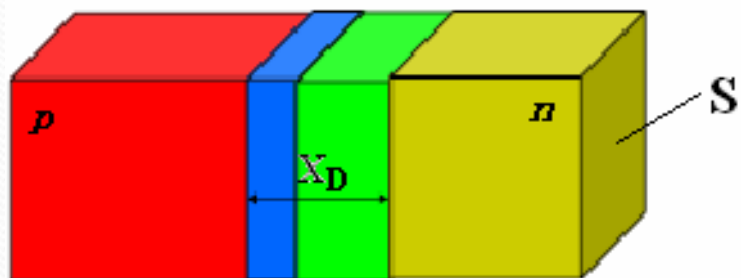
$$V(x) = -\int E dx, \quad \text{及} \quad x = -x_p, V = 0$$

$x = 0, V(x)$ 是连续函数

$$V(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{qN_A}{2\epsilon_r \epsilon_0} x_p^2$$



空间电荷区宽度 X_D



突变结

$$qN_A x_p \cdot S = qN_D x_n \cdot S$$

掺杂浓度高的一侧，空间电荷区域窄。

$$X_D = x_n + x_p$$



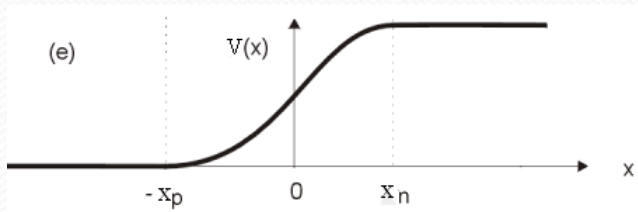
$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} X_D$$

$$x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} X_D$$

其中：

$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_r \epsilon_0} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{qN_A}{2\epsilon_r \epsilon_0} x_p^2$$



$$x = x_n, V = V_D$$

$$V_D = \frac{qN_D}{2\epsilon_r \epsilon_0} (N_D x_n^2 + N_A x_p^2)$$

$$x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} X_D$$

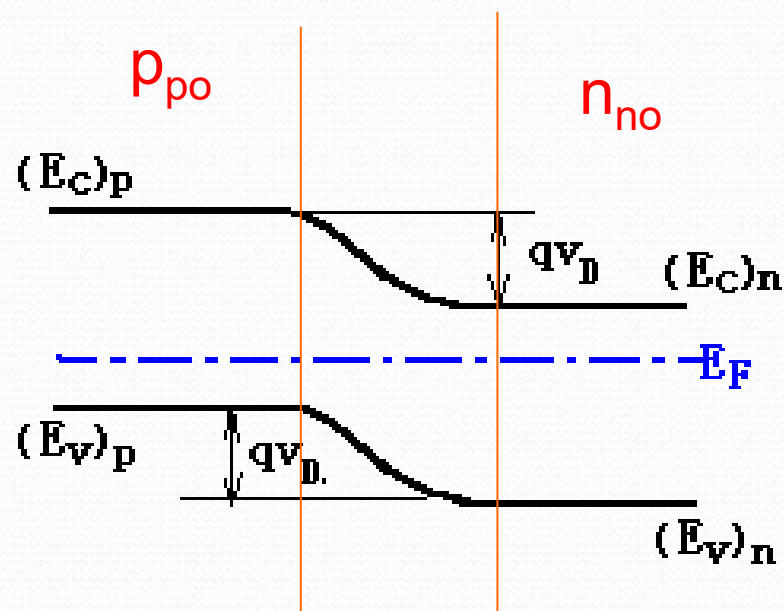
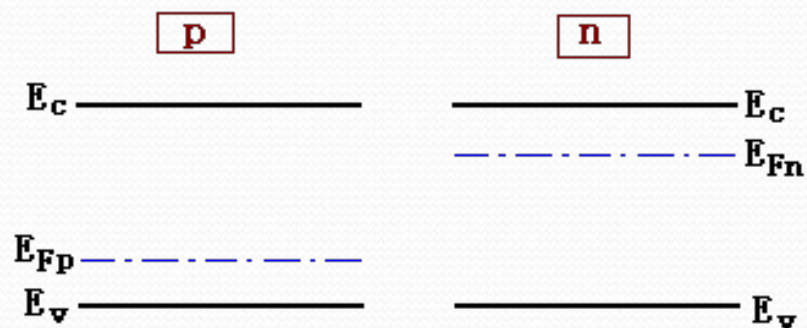
$$x_p = \frac{N_D}{N_A + N_D} X_D$$

$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

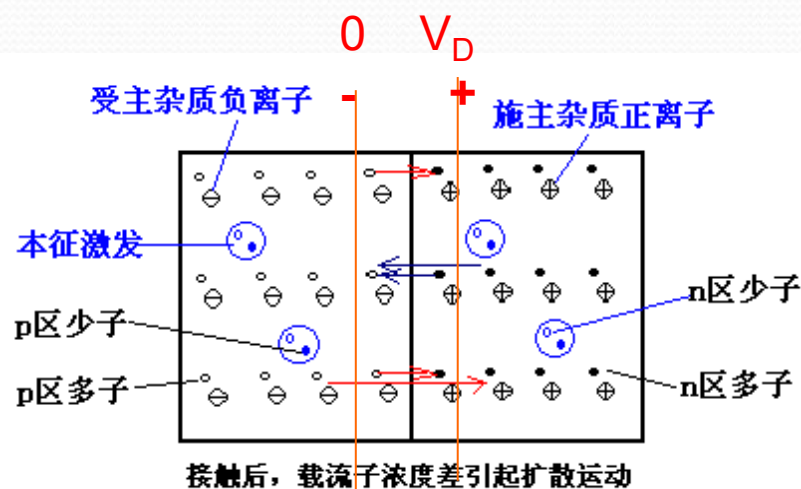
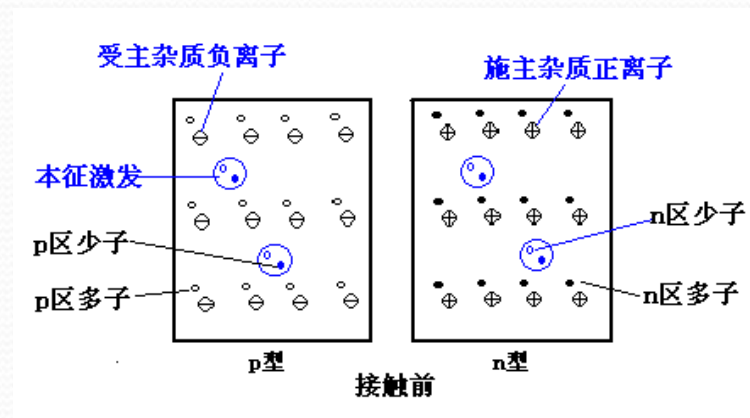
空间电荷区宽度
(Space charge
region width)



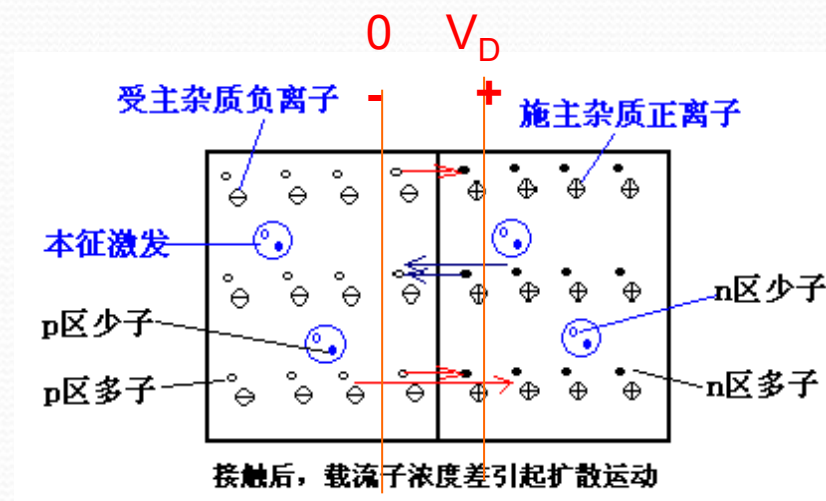
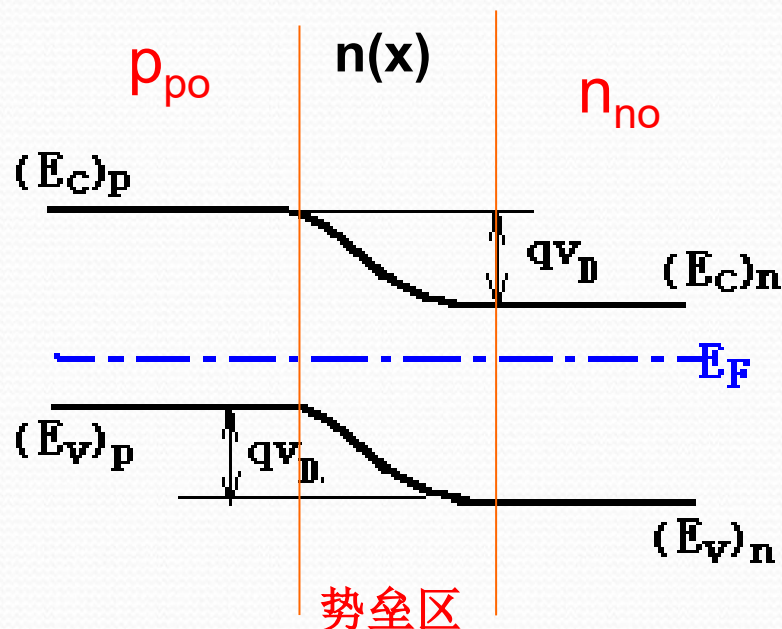
3. pn结能带 (Energy band)



势垒区



4. pn结的物理参量



势垒区 高度 qV ? \longleftrightarrow 空间电荷区的接触电势差 V ?

势垒区 宽度 X_D ? \longleftrightarrow 空间电荷区 宽度 X_D ?

各区域的载流子浓度分布 $n(X)$ 、 $p(X)$?

接触电势差 V_D

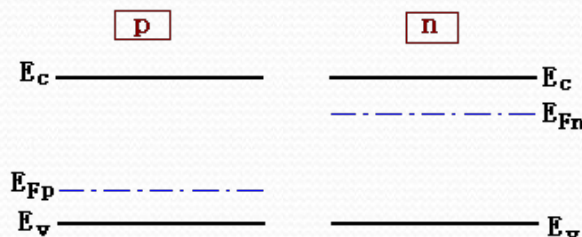
n型半导体中的电子浓度为

$$n_{n0} = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_i}{k_0 T}}$$

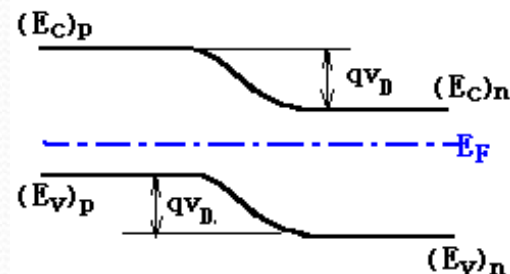
p型半导体中的电子浓度为

$$n_{p0} = n_i e^{\frac{E_{Fp} - E_i}{k_0 T}}$$

$$\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{k_0 T}}$$



$$qV_D = E_{Fn} - E_{Fp}$$



\therefore 平衡时

$$\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{qV_D}{k_0 T}} \Rightarrow$$

$$\frac{qV_D}{k_0 T} = \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}$$

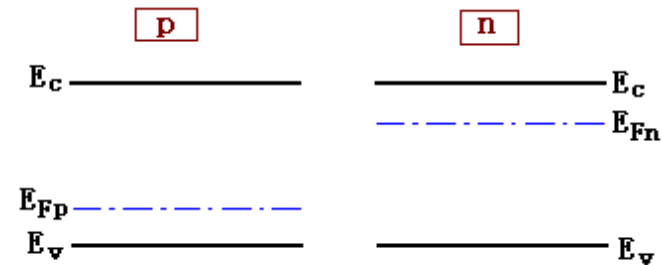
接触电势差 (The Contact Potential)

$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}$$

非简并, 全电离

$$n_{n0} \approx N_D \quad p_{p0} \approx N_A$$

$$\therefore V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$



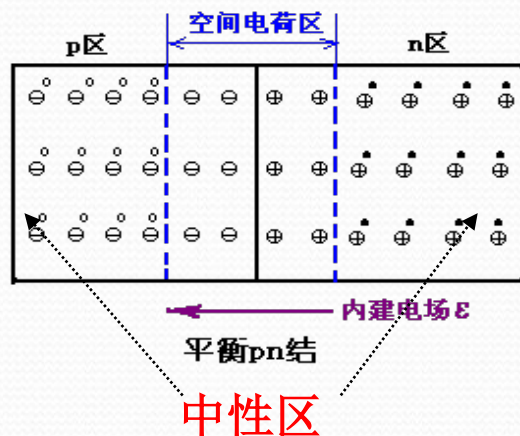
* 势垒高度 $qV_D \sim N_D, N_A, E_g$

势垒区或空间
电荷区宽度

$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

载流子分布

Carrier distributions



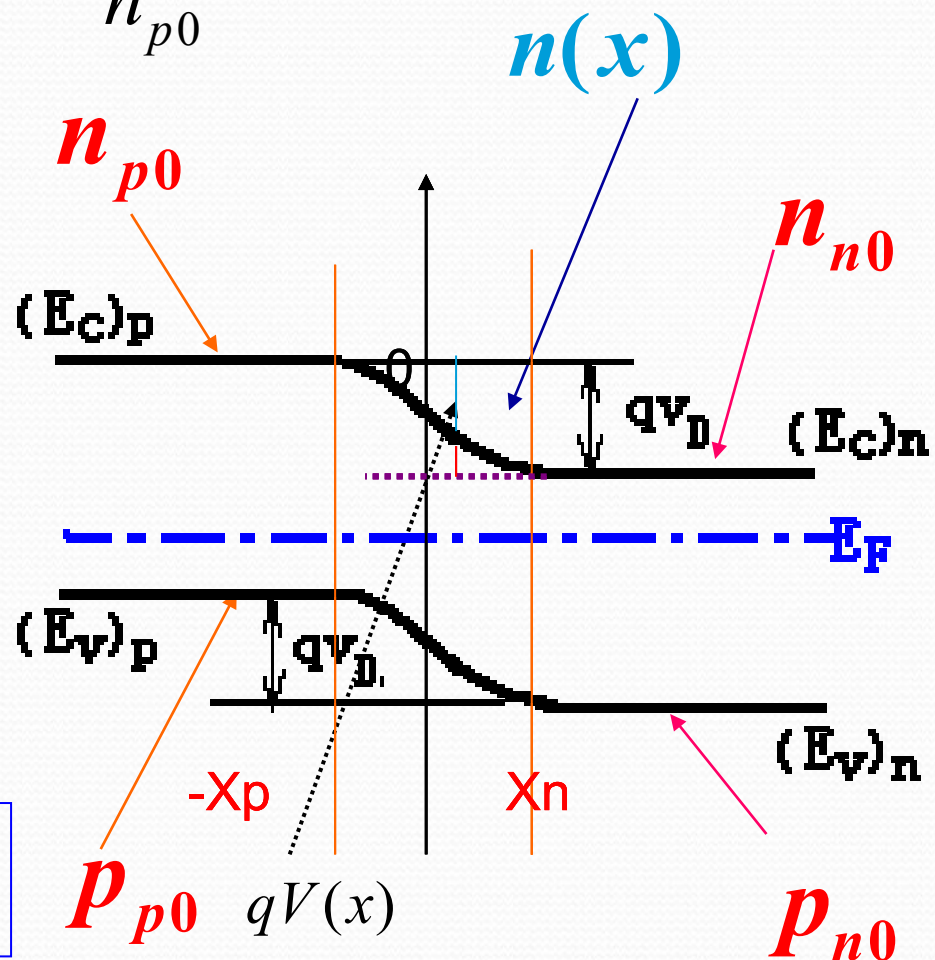
$$n(x) = n_{p0} e^{\frac{qV(x)}{k_0T}}$$

$$n(x) = n_{n0} e^{-\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}}$$

$$p(x) = p_{p0} e^{-\frac{qV(x)}{k_0T}}$$

$$p(x) = p_{n0} e^{\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}}$$

$$\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{qV_D}{k_0T}}$$



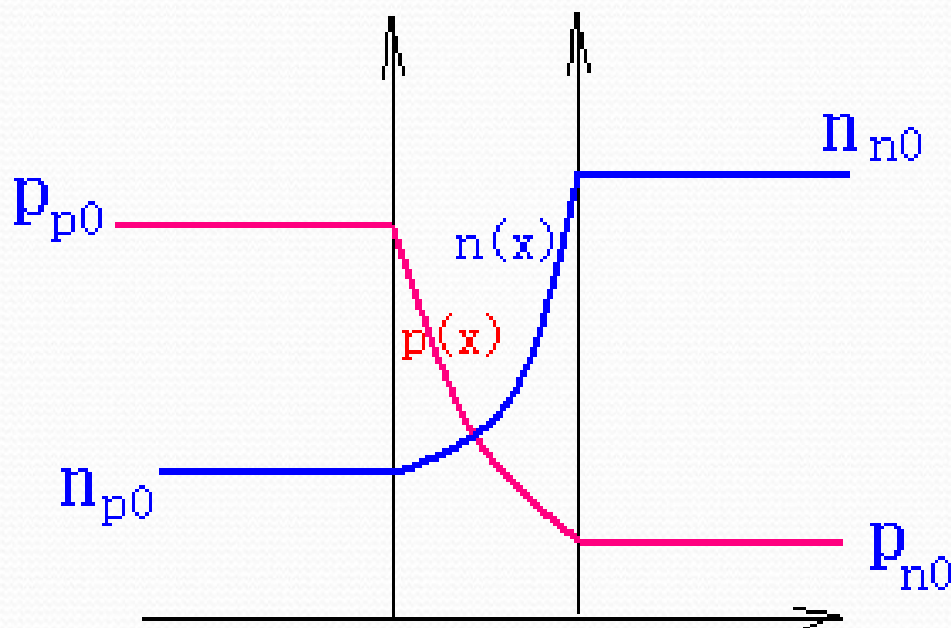
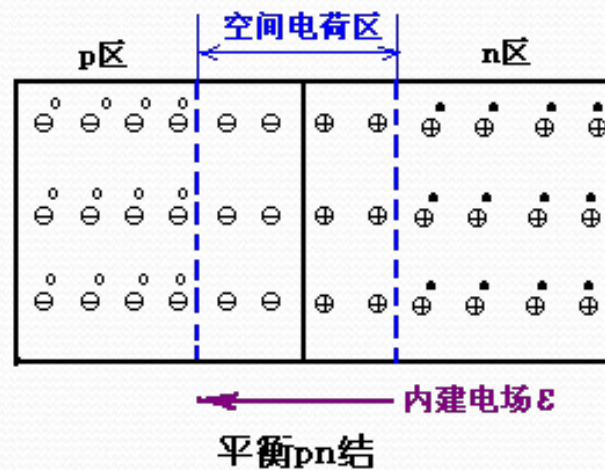
$$n(x) = n_{n0} e^{\frac{qV_D - qV(x)}{k_0 T}}$$

$$p(x) = p_{n0} e^{\frac{qV_D - qV(x)}{k_0 T}}$$

或

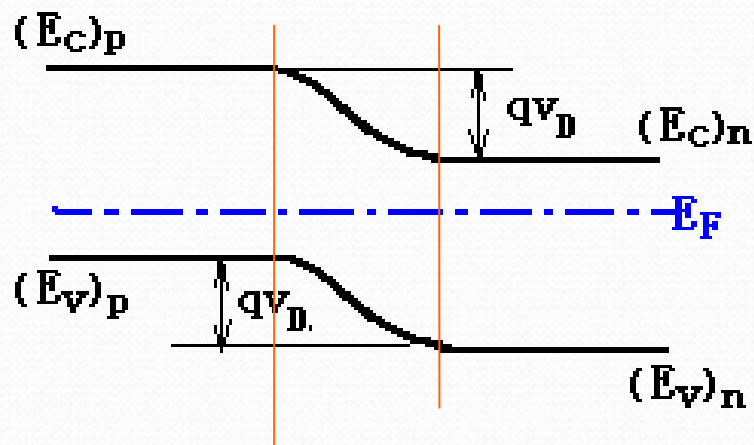
$$n(x) = n_{p0} e^{\frac{qV(x)}{k_0 T}}$$

$$p(x) = p_{p0} e^{-\frac{qV(x)}{k_0 T}}$$



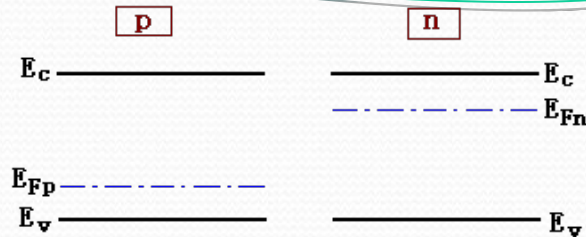
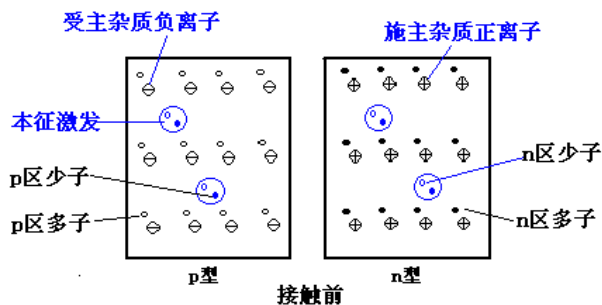
二. p-n结的常规特性

1. Pn结的I-V特性



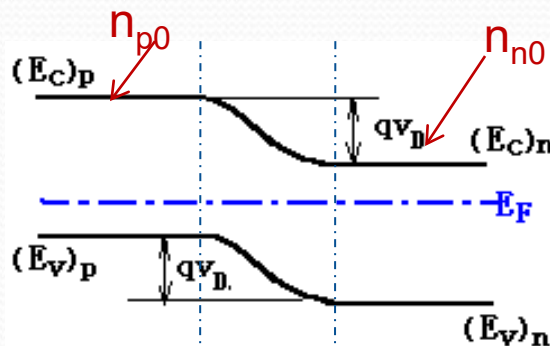
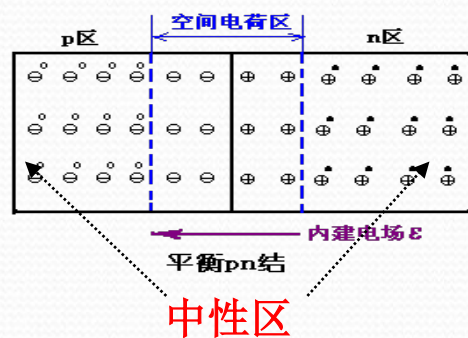
现假设：

1. 势垒区的自由载流子全部耗尽,并**忽略**势垒区中载流子的**产生和复合**。
2. 小注入:注入的少数载流子浓度远小于半导体中的多数载流子浓度。在注入时, **扩散区的漂移电场可忽略**。

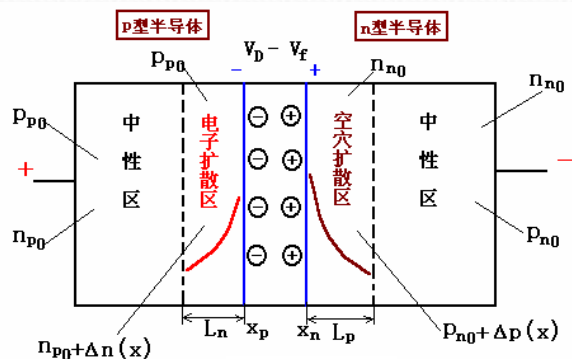


$$n_{n0} = N_C e^{\frac{E_C - E_{Fn}}{k_0 T}}$$

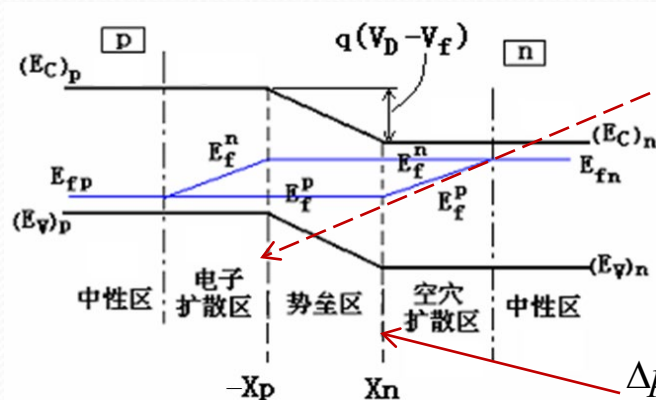
$$n_{p0} = N_C e^{\frac{E_C - E_{Fp}}{k_0 T}}$$



$$\frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{\frac{qV_D}{k_0 T}}$$



正向偏压下

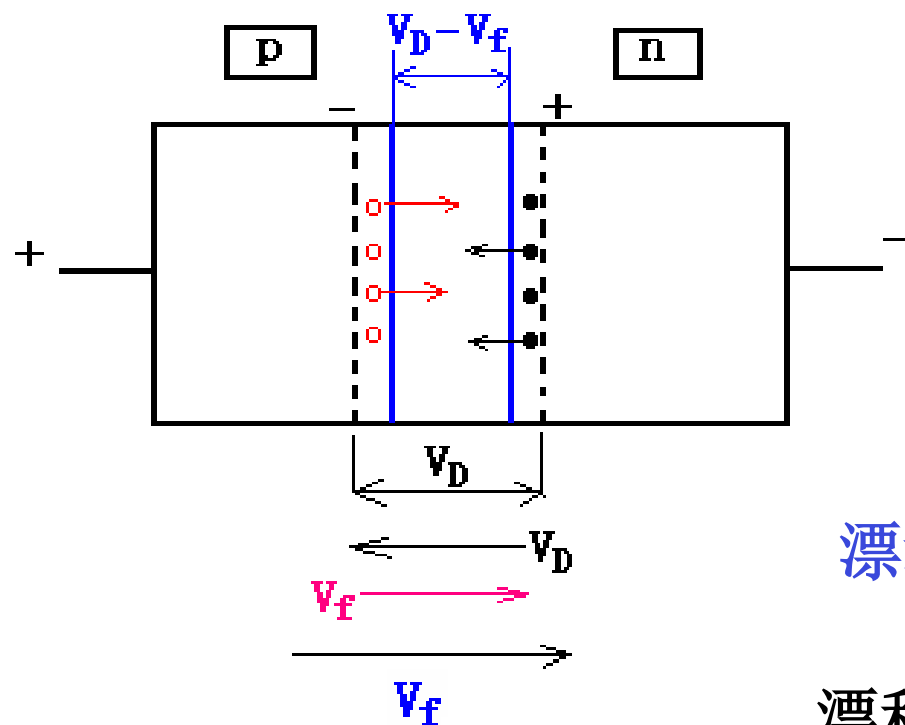


$$\Delta n(-x_p) = n_p(-x_p) - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0 T}} - 1 \right)$$

$$\Delta p(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0 T}} - 1 \right)$$

(1) 正向偏置 (Forward bias)

外加电场与内建电场方向相反，削弱了内建电场，因而使势垒两端的电势差由 V_D 减小为 $(V_D - V_f)$ ，相应地势垒区变薄。



$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

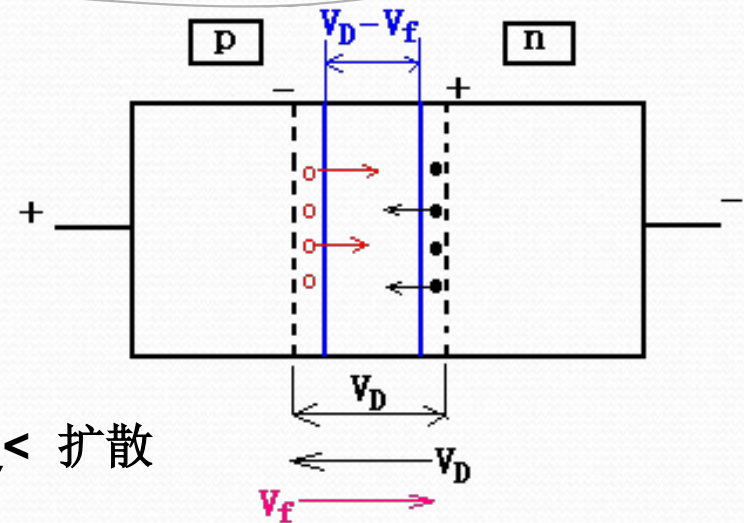
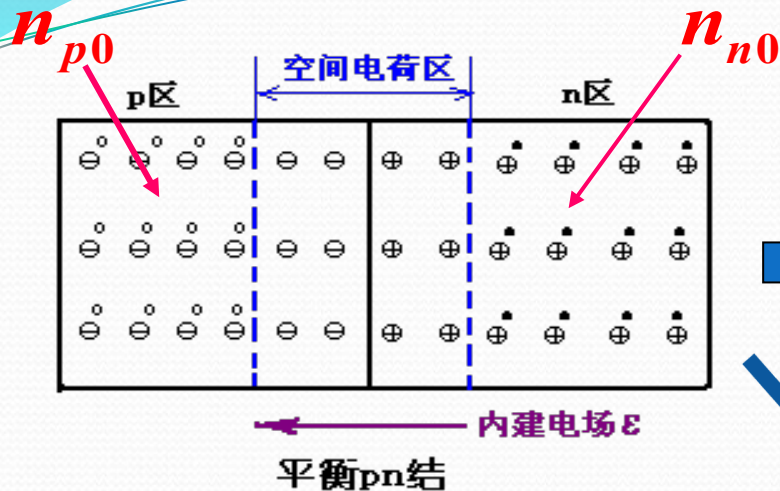
$$X_D = \left[(V_D - V_f) \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

漂移=扩散

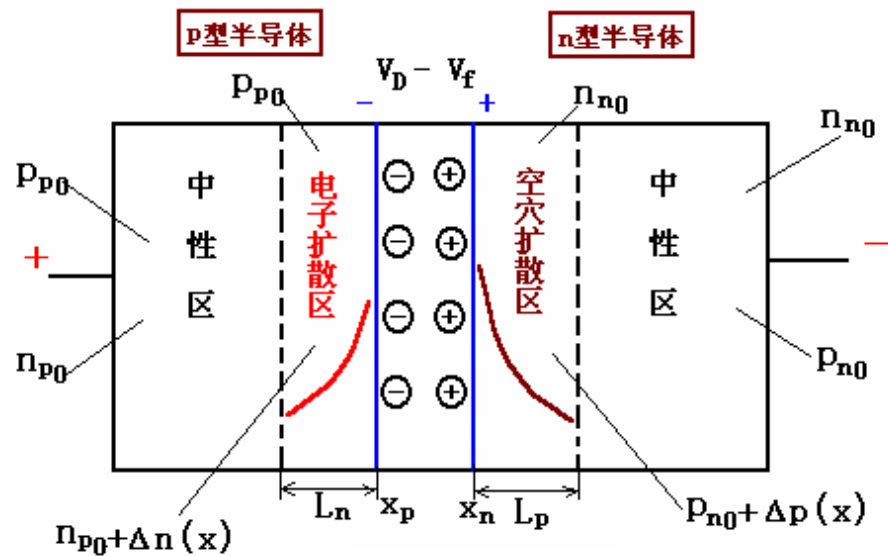
漂移 \downarrow < 扩散

非平衡态

由于电场作用而使非平衡载流子进入半导体的过程称为-电注入



漂移 \downarrow 扩散

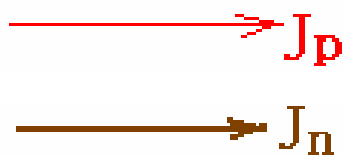
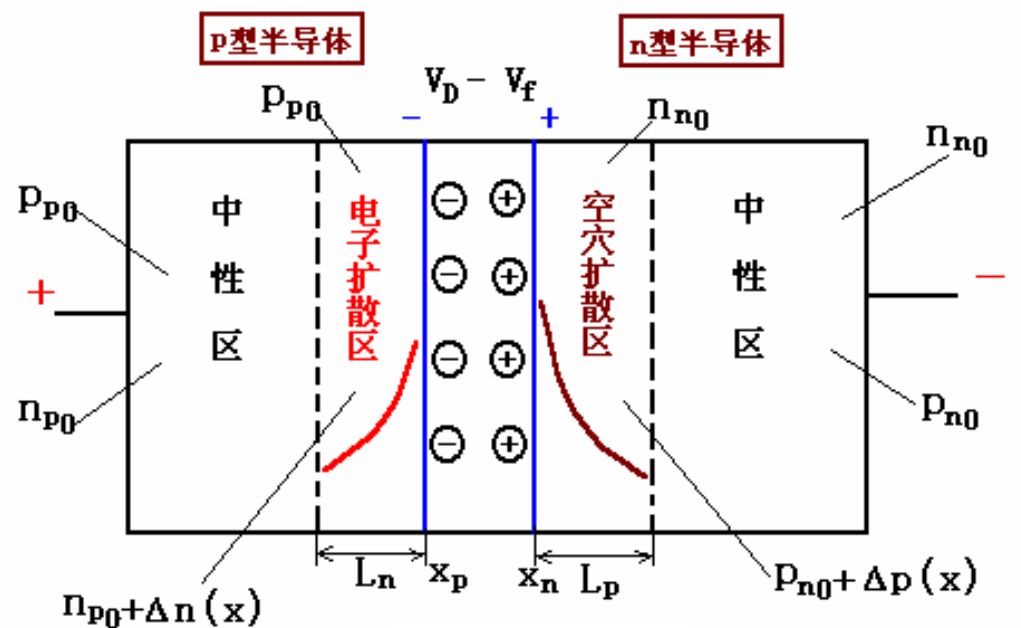


外加正向偏压

Space charge region

Diffusion region

Neutral region



P区空穴向n区扩散——空穴扩散电流

n区电子向P区扩散——电子扩散电

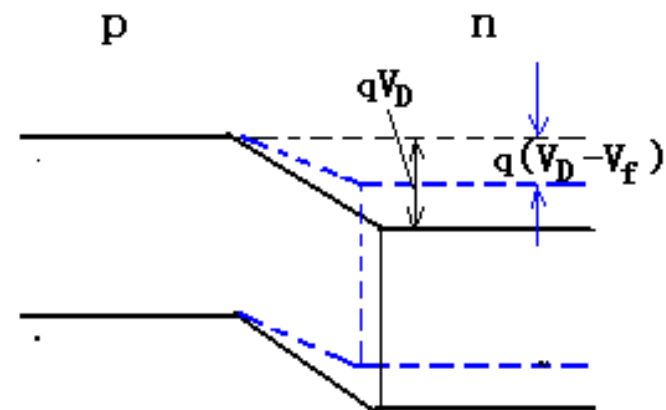
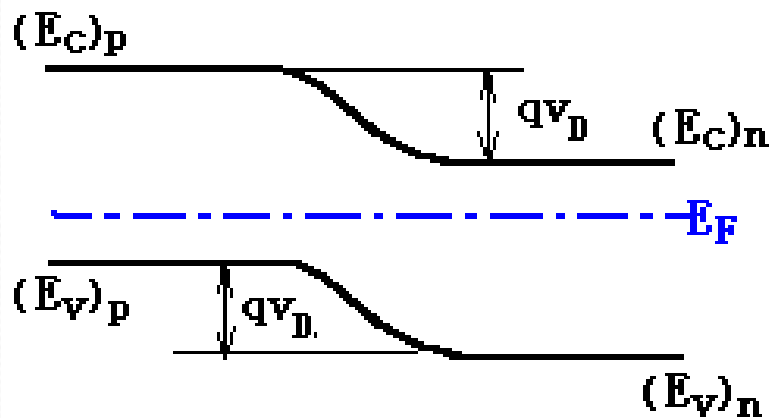
流

这两股电流之和就是正向偏置下流过p-n结的电流。

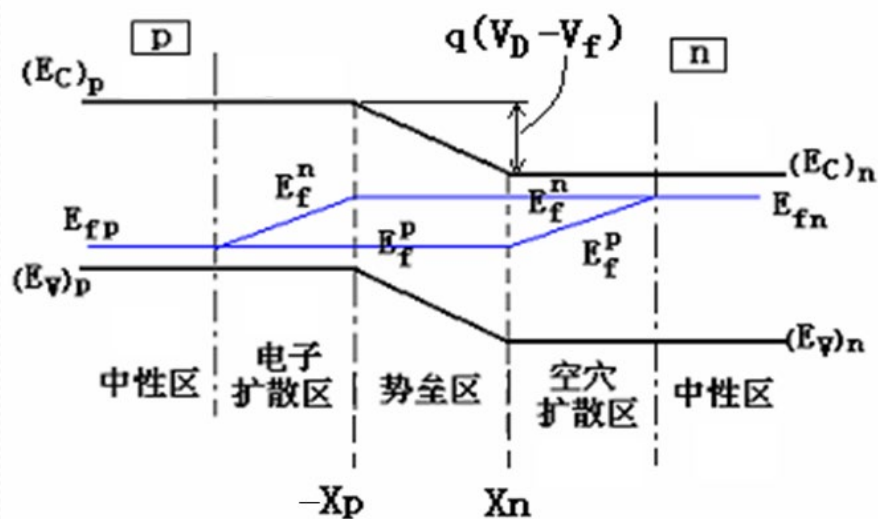
与外加电压关系是什么？

正向偏置下的能带图

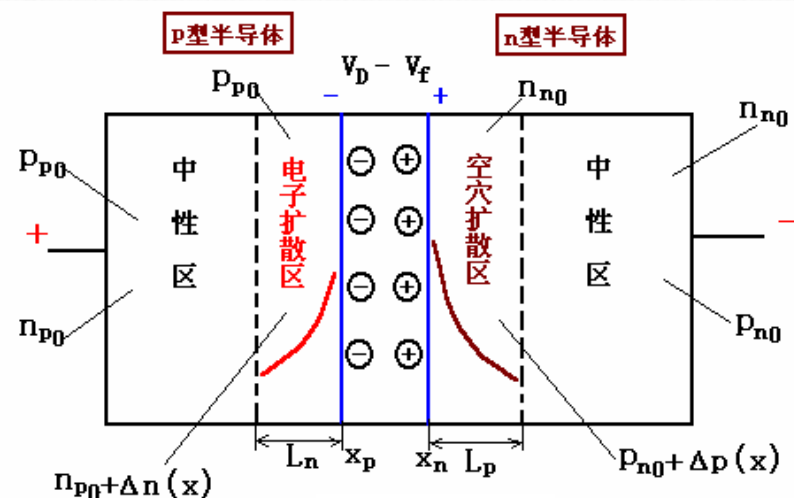
平衡时



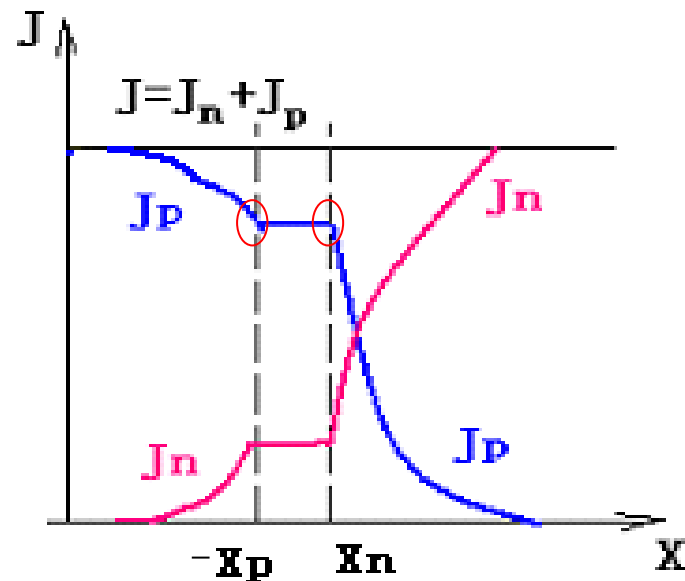
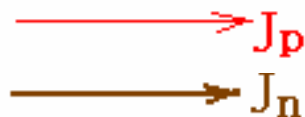
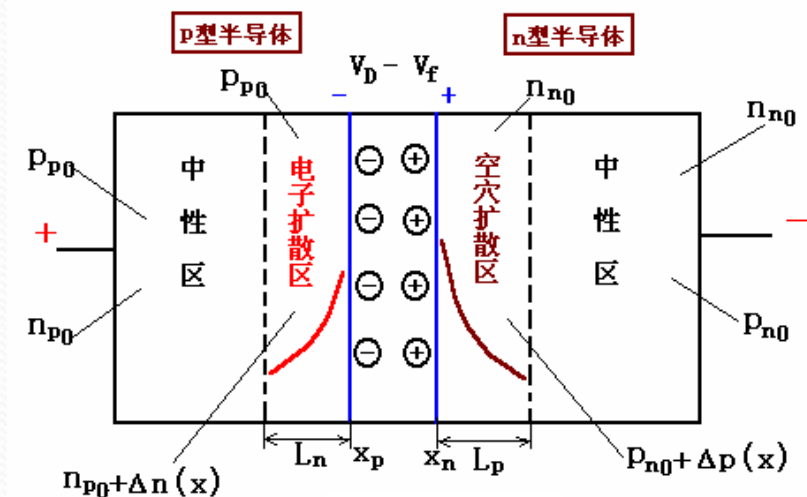
外加正向偏置时p-n结势垒变化



正向偏置



正向偏置下的电流



样品足够厚

考虑 $-x_p$ 截面:

$$J = J_n(-x_p) + \underline{J_p(-x_p)}$$

忽略了势垒区载流子的产生和复合:

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n)$$

$$J_n(-x_p) = qD_n \left. \frac{d\Delta n(x)}{dx} \right|_{x_p} = q \frac{D_n}{L_n} \Delta n(-x_p)$$

$$J_p(x_n) = -qD_p \left. \frac{d\Delta p(x)}{dx} \right|_{x_n} = q \frac{D_p}{L_p} \Delta p(x_n)$$

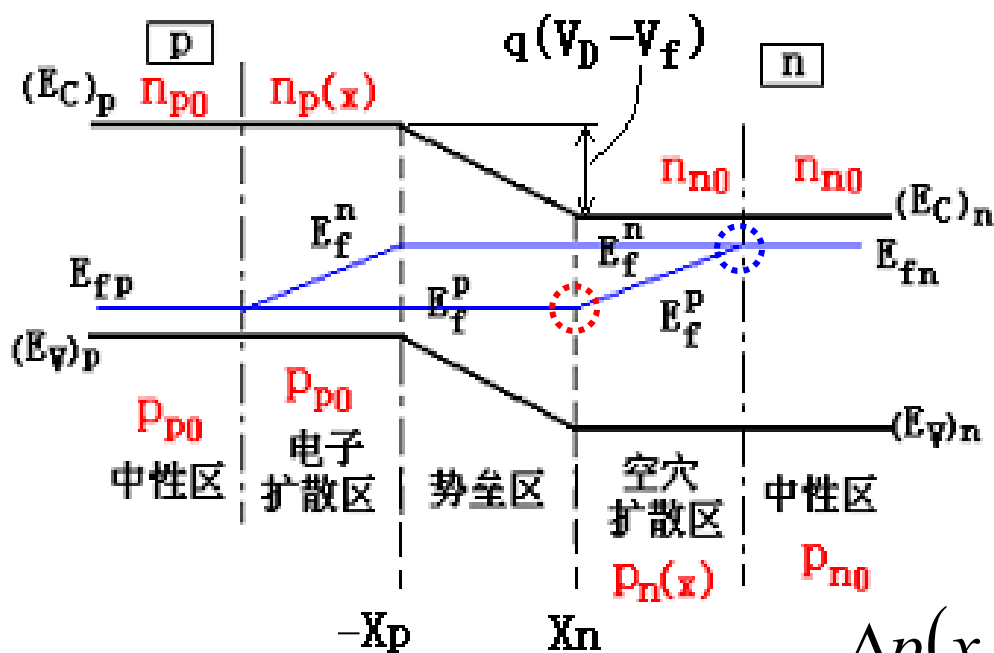
$$J_p(x_n) = -qD_p \left. \frac{d\Delta p(x)}{dx} \right|_{x_n} = q \frac{D_p}{L_p} \Delta p(x_n)$$

$$\Delta p(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0}$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{\frac{qV_f}{k_0T}}$$

$$\Delta p(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0T}} - 1 \right)$$

$$J_p(x_n) = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0T}} - 1 \right)$$



同理：

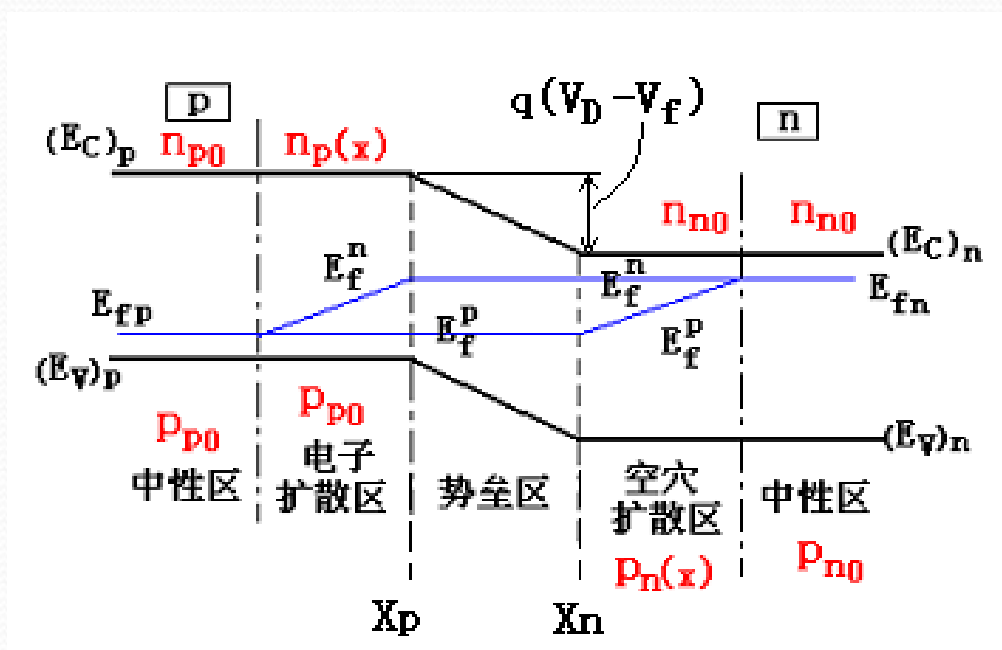
$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{\frac{qV_f}{k_0T}}$$



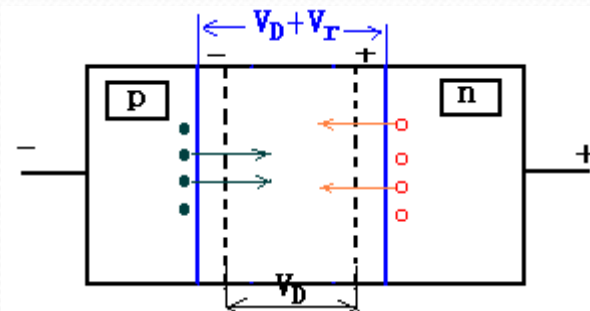
$$\Delta n(-x_p) = n_p(-x_p) - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0T}} - 1 \right)$$



$$J_n(-x_p) = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{\frac{qV_f}{k_0T}} - 1 \right)$$



(2) 反向偏置 (Reverse bias)



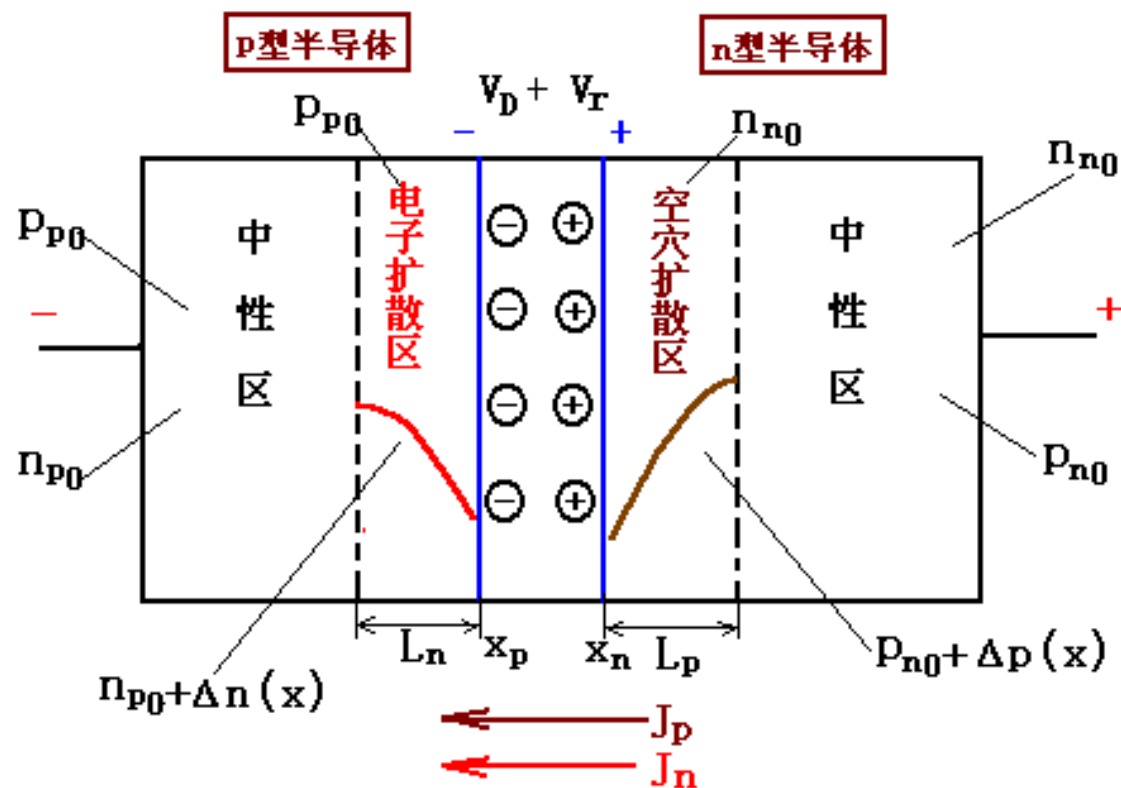
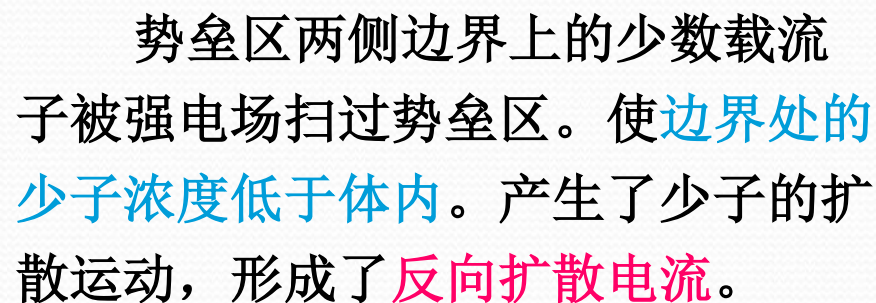
外加电场 V_r 与内建电场方向一致

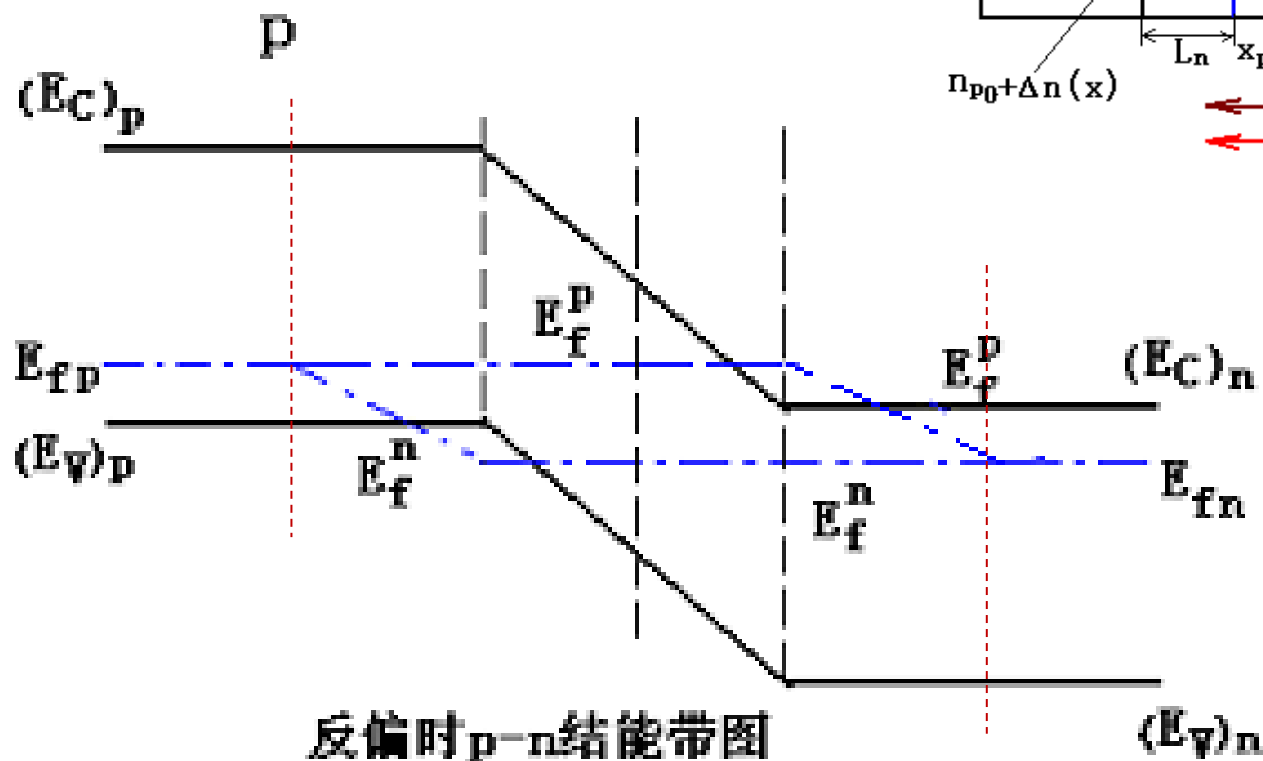
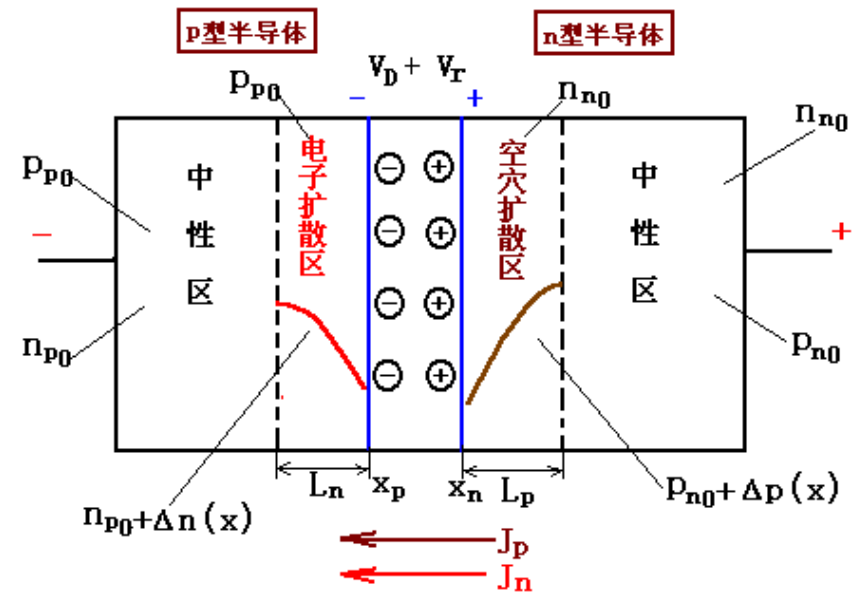
$$X_D = \left[V_D \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

V_D 增大为 $(V_D + V_r)$ ，相应地势垒区加宽

$$X_D = \left[(V_D + V_r) \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{q} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

漂移 > 扩散





类似于正向偏置的方法，可求得反向电流密度

$$\therefore J_r = J_s \left(e^{\frac{-qV_r}{k_0T}} - 1 \right)$$

一般 $qV_r \gg k_0T$, 那么 $J_r = -J_s$

式中， J_s 不随反向电压变化，称为反向饱和电流密度；负号表示反向电流方向与正向电流方向相反。

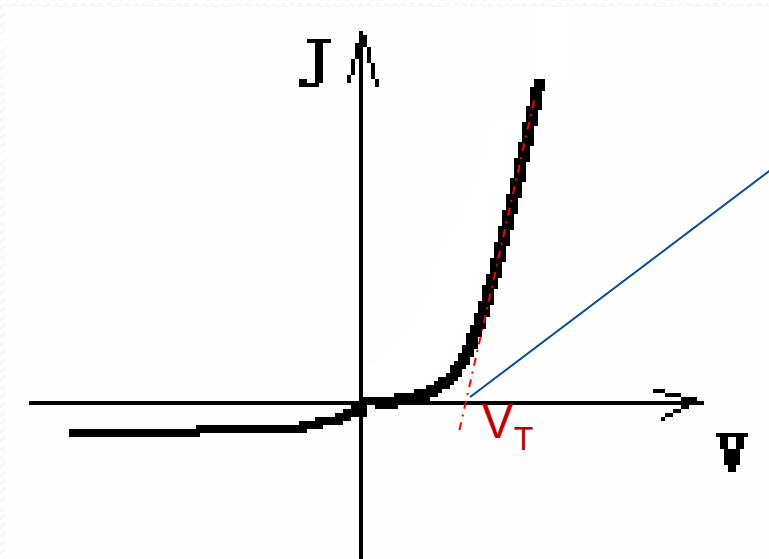
(3) I-V characteristic of a p-n junction

p-n结的正向和反向电流密度公式可统一用下列公式表示：

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right) \quad \begin{array}{l} \text{正向: } V = V_f \\ \text{反向: } V = -V_r \end{array}$$

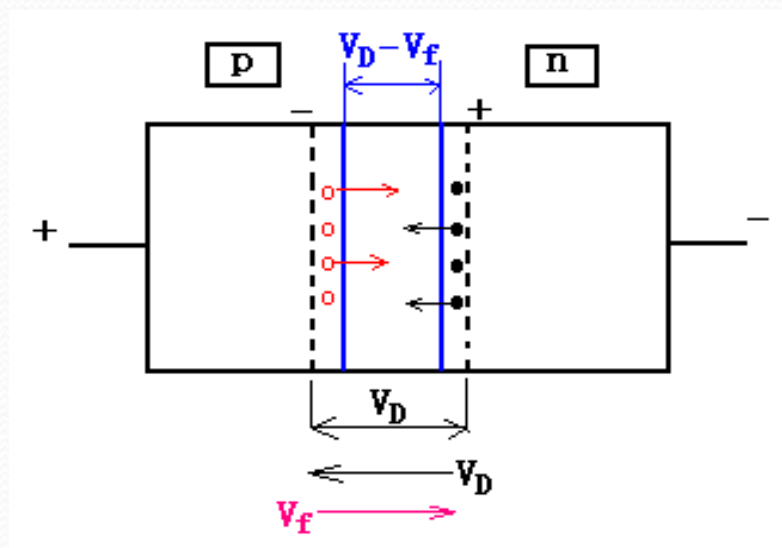
$$J_s = q \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right)$$

p-n结的单向导电性---整流



Ge、Si、GaAs:
0.3、0.7、1V

p-n结的伏-安特性



结论

❖ 单向导电性---整流

❖ 具有可变电阻性

$$E_g \uparrow \rightarrow V_D \uparrow \rightarrow V_T \uparrow$$

p-n结的温度效应

均与T有关

$$J = J_s \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right) \quad \text{其中:} \quad J_s = q \left(\frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right)$$

正向电流密度随温度上升而增加。

2. p-n结电容 (Capacitance of p-n Junctions)

❖ p-n结的直流伏-安特性表明：

1. 具有单向导电性。
2. 具有可变电阻性。

❖ p-n结的交流特性表明：

p-n结还具有可变电容的性质

特别是在高频运用时，这个电容效应更为显著。

p-n结电容包括势垒电容和扩散电容两部分

(1) 势垒电容 C_T

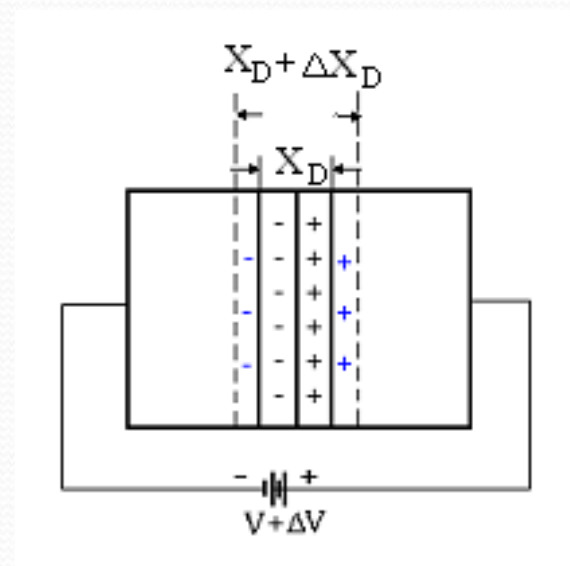
$V \uparrow \rightarrow X_D \downarrow \rightarrow$ 意味着存入部分电子和空穴

$V \downarrow \rightarrow X_D \uparrow \rightarrow$ 意味着取出部分电子和空穴

$$\Delta V \rightarrow \Delta X_D \rightarrow \Delta Q$$

由于势垒区电荷的变化表现出来的电容效应-势垒电容
也称结电容 (**Junction capacitance**)

$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon A}{X_D}$$

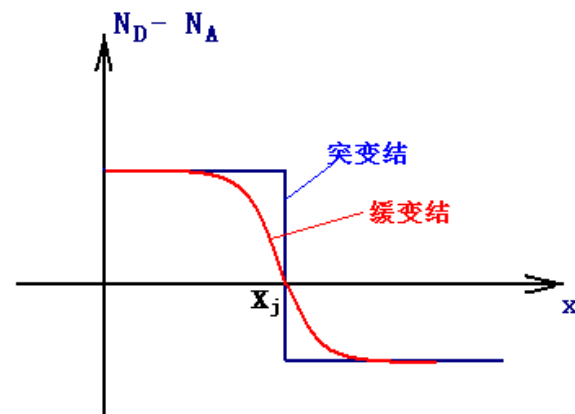
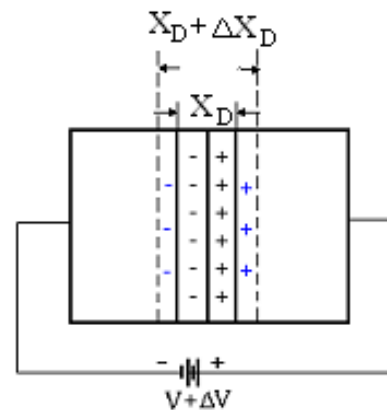


势垒电容

$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{\varepsilon A}{X_D}$$

对于突变结

$$X_D = \left[(V_D - V) \frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0}{q} \times \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]^{1/2}$$



对于线性缓变结:

$$X_D = \left[\frac{12\varepsilon_r \varepsilon_0 (V_D - V)}{q \alpha_j} \right]^{1/3}$$

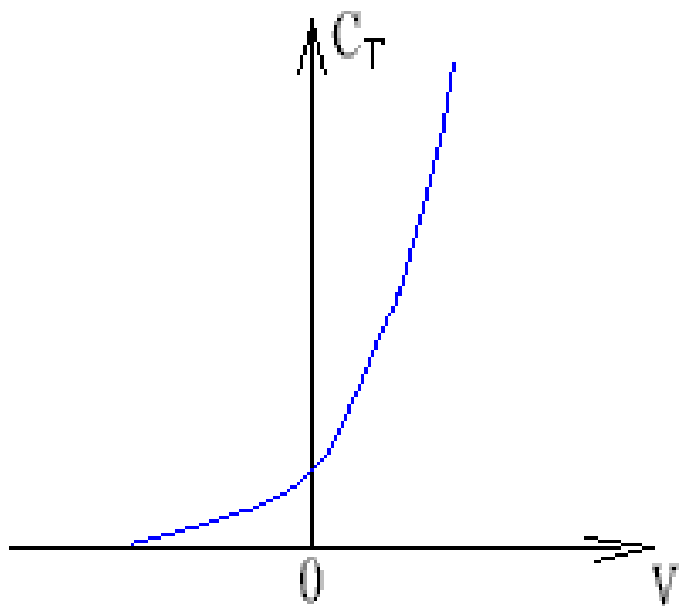
对于突变结:

$$C_T = A \left[\frac{\varepsilon q}{2} \times \frac{1}{V_D - V} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

* 耗尽层近似条件成立

正偏下:

$$C_T = 4C_T(0) = 4A \left[\frac{\varepsilon q}{2} \times \frac{1}{V_D} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

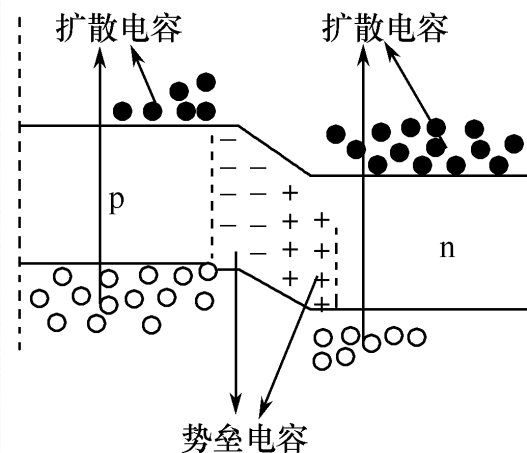
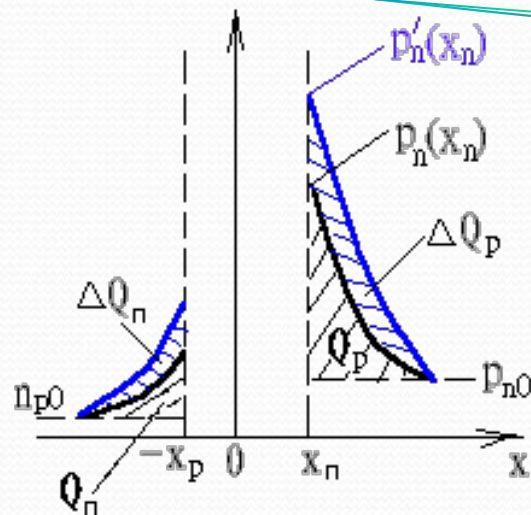


对于线性缓变结：

$$\therefore C_T = A \left[\frac{q \alpha_j \varepsilon^2}{12(V_D - V)} \right]^{1/3} \quad \text{其中：}$$

α_j - 杂质浓度梯度

(2) 扩散电容



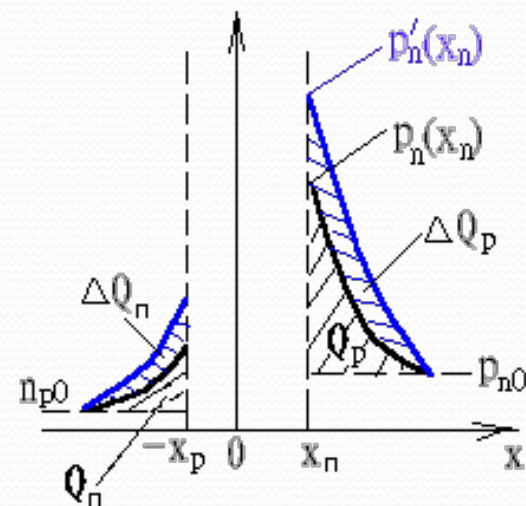
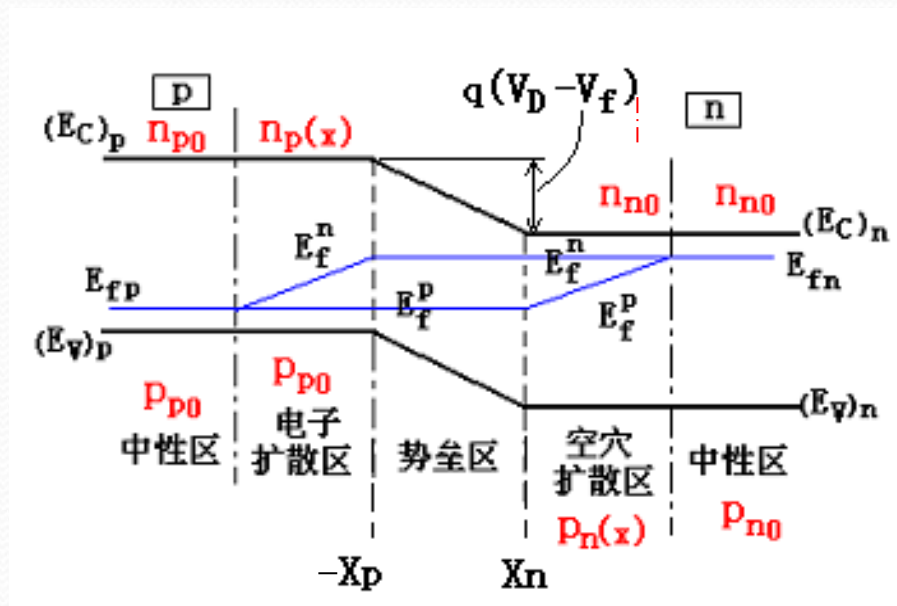
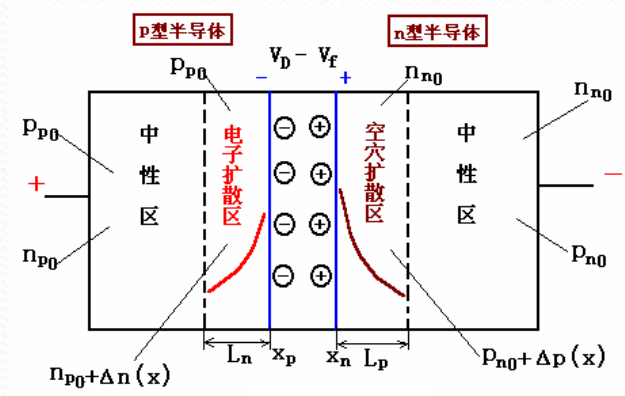
$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_p}{dV} + \frac{dQ_n}{dV}$$

ΔV 变化 $\rightarrow \Delta Q$ (扩散区内储存电荷量) 变化

——扩散电容

也称电荷存储电容 (**charge storage capacitance**)

$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_p}{dV} + \frac{dQ_n}{dV}$$



$$Q_p = \int_{x_n}^{+\infty} q \Delta p(x) dx = \int_{x_n}^{+\infty} q p_{n0} (e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1) e^{-\frac{x - x_n}{L_p}} dx = q L_p p_{n0} (e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1)$$

同理：

$$Q_n = \int_{x_n}^{+\infty} q \Delta n(x) dx = q L_n n_{p0} (e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1)$$

那么，

$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_p}{dV} + \frac{dQ_n}{dV}$$

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dn}$$

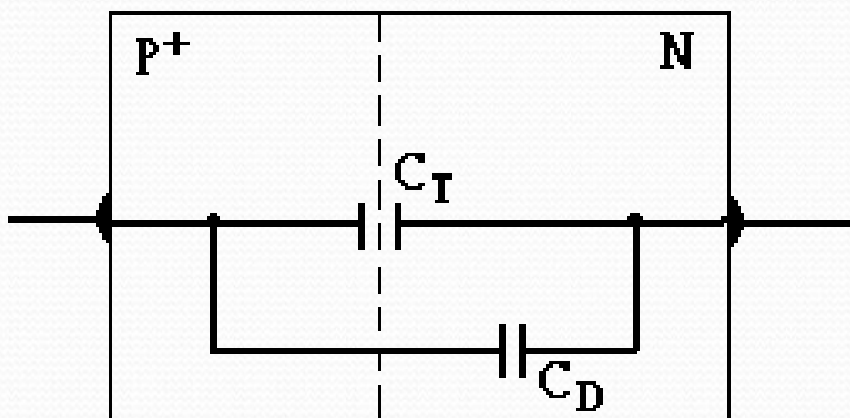
$$= \frac{A q^2}{kT} (L_p p_{n0} + L_n n_{p0}) e^{\frac{q}{kT} V}$$

显然， C_T 与 C_D 都与p-n结的面积**A**成正比，且随外加电压而变化。

(3) 总电容

p-n结的总电容为两者之和：

$$C_j = C_T + C_D$$



p-n结电容的等效电路

$$C_T = A \left[\frac{\varepsilon q}{2} \times \frac{1}{V_D - V} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

$$C_D = \frac{Aq^2}{kT} (L_p p_{n0} + L_n n_{p0}) e^{\frac{q}{kT} V}$$

大正向偏置p-n结时，以 C_D 为主， $C_j \approx C_D$

小正向偏置或反向偏置p-n结时，以 C_T 为主， $C_j \approx C_T$

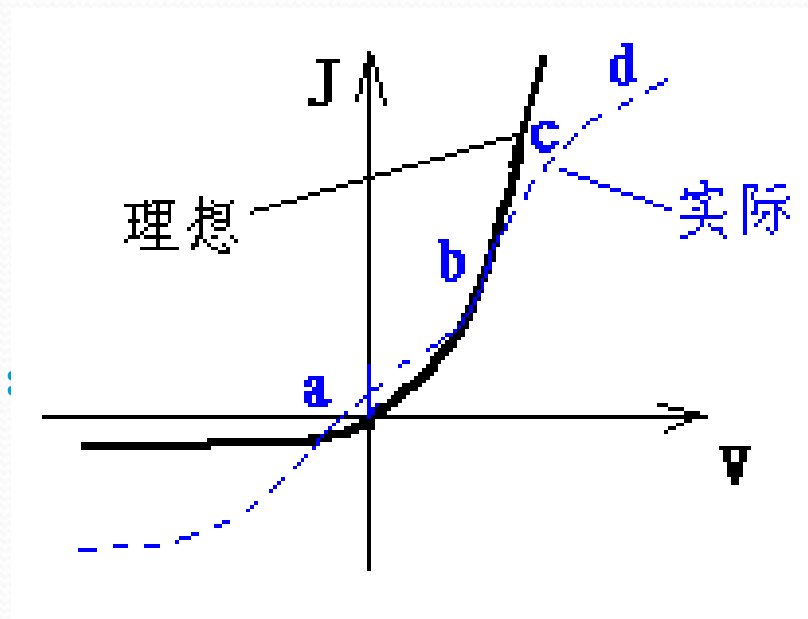
三. p-n结的异常特性

1.p-n结I-V特性的非理想因素

影响p-n结伏-安特性的主要因素:

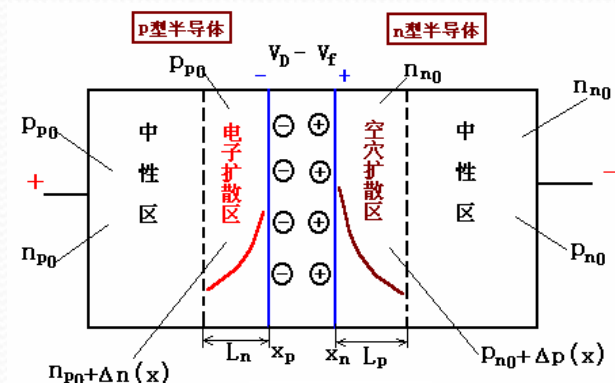
产生偏差的原因:

- (1) 正向小电压时忽略了势垒区的复合电流；正向大电压时忽略了扩散区的漂移电流和体电阻上的压降。
- (2) 在反向偏置时忽略了势垒区的产生电流。



➤空间电荷区的复合电流（正向）

$$J_r = q \int_0^{x_D} U dx \approx \frac{qn_i X_D}{2\tau} e^{\frac{qV}{2k_0T}}$$



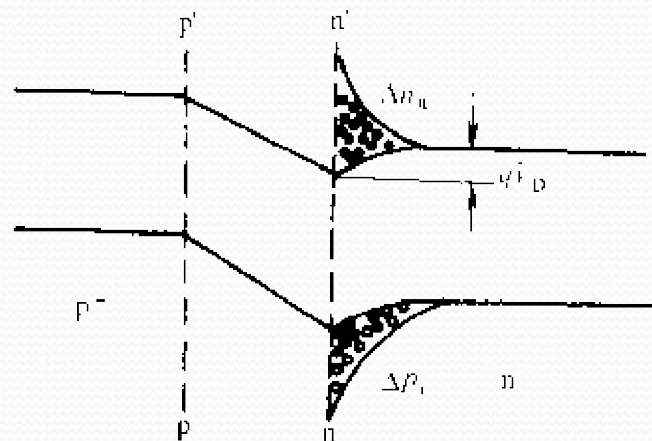
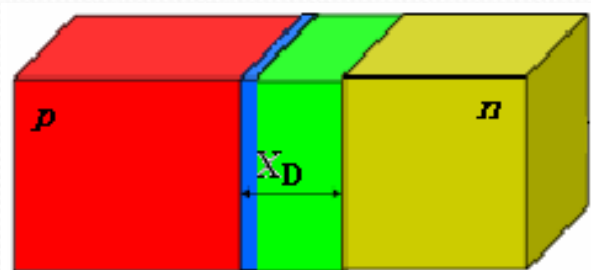
$$U = \frac{N_t C(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i ch \left(\frac{E_t - E_i}{k_0T} \right)} \xrightarrow{E_t = E_i} U_{\max} = \frac{N_t C(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i}$$

$$\xrightarrow{n=p} U_{\max} = \frac{N_t C(n^2 - n_i^2)}{2(n + n_i)} \xrightarrow{} U_{\max} = \frac{N_t C n_i (e^{\frac{qV}{2k_0T}} - 1)}{2}$$

$$np = n_0 p_0 e^{\frac{E_F - E_F^n}{k_0T}} = n_i^2 e^{\frac{qV}{k_0T}}$$



➤大注入（正向）



扩散区产生内建电场

注入 p^+ - n 结的 n 侧的空穴及其所造成的电子分布

➤空间电荷区的产生电流（反向）

$$J_G = qGX_D \approx \frac{qn_i X_D}{2\tau}$$

$$U = \frac{N_t C(np - n_i^2)}{n + p + 2n_i ch \left(\frac{E_t - E_i}{k_0 T} \right)}$$

$$\longrightarrow G = \frac{n_i}{2\tau}$$

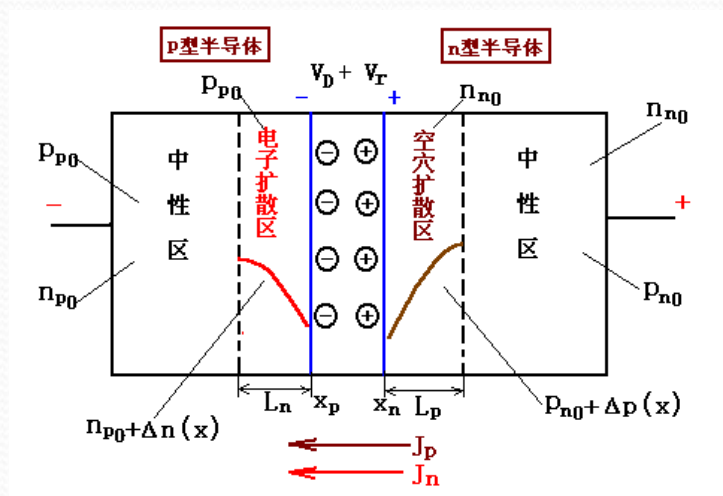
势垒区由热激发通过复合中心产生的电子-空穴对来不及复合就被强电场驱走了，存在净产生。

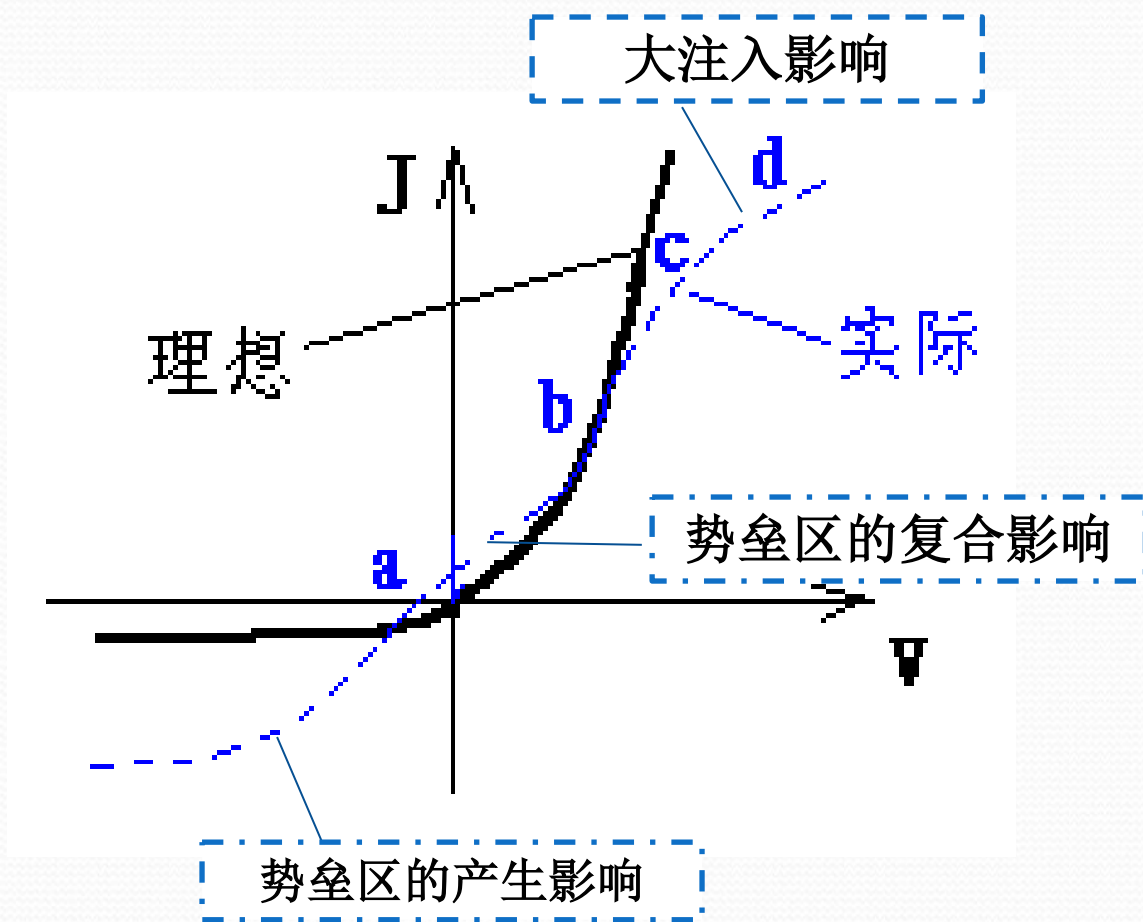
$$J_{RD} = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{n_{n0} L_p} \right)$$

$$E_t = E_i$$

$$\longrightarrow n_i \gg n, p$$

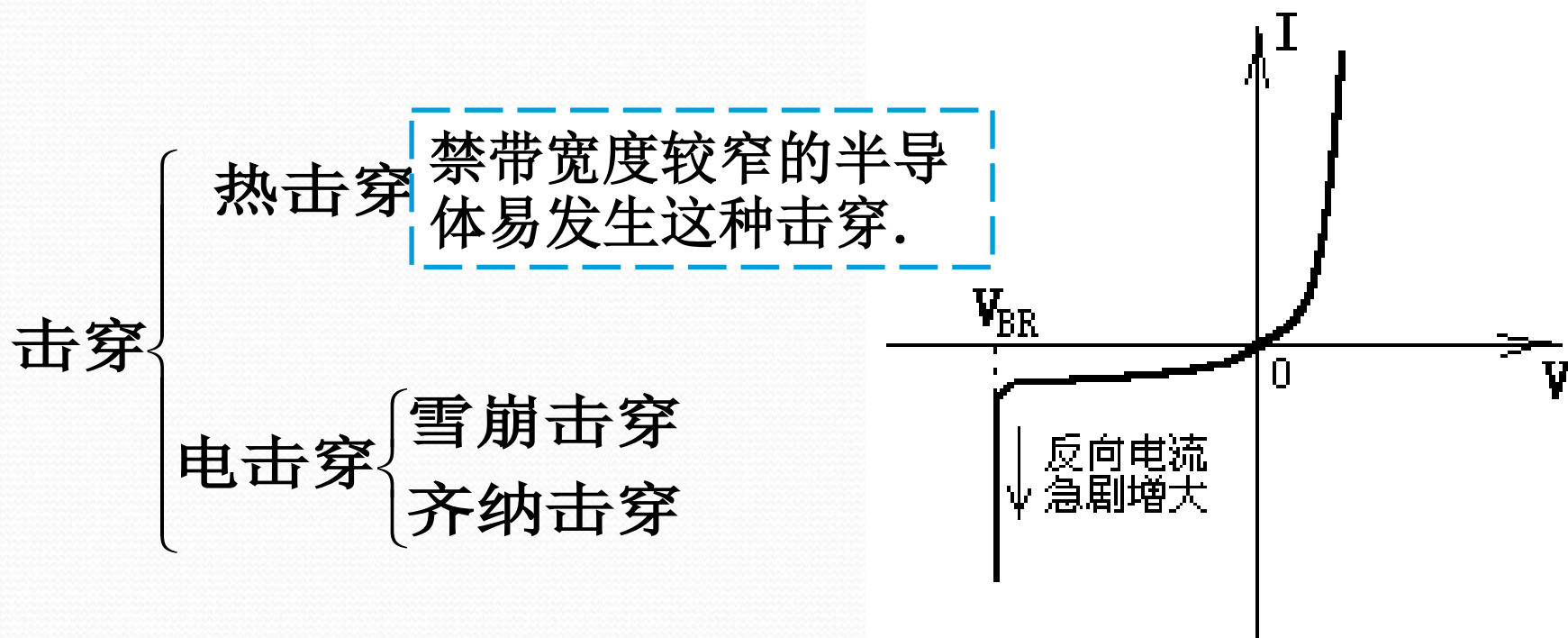
$$U = -\frac{n_i}{2\tau}$$



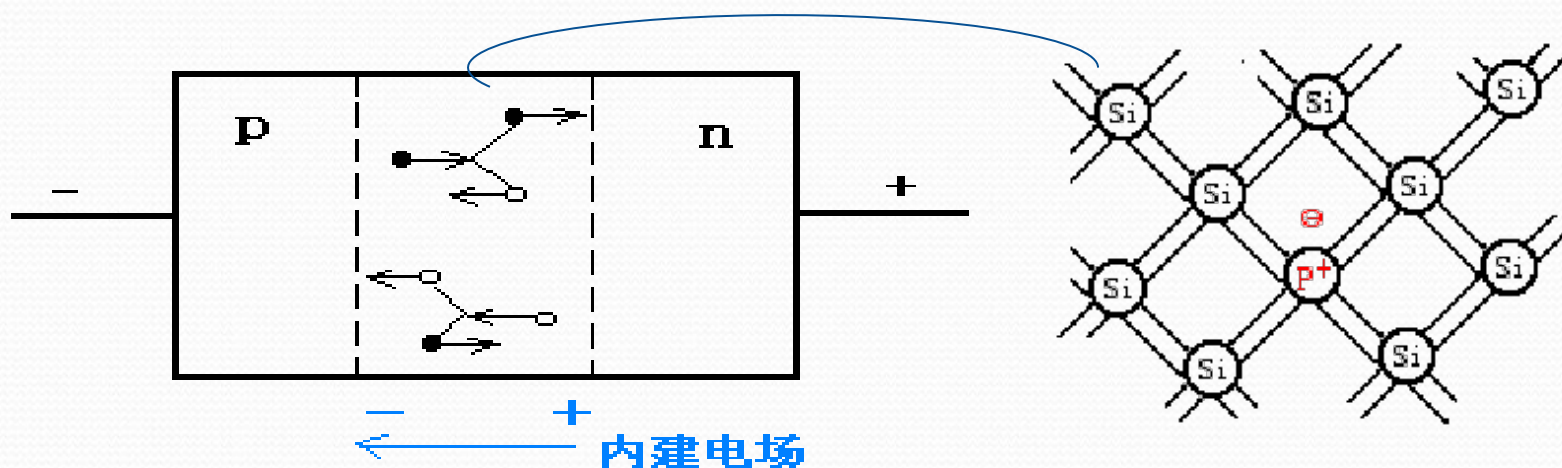


2. p-n结的击穿(Breakdown)

在反向偏置下，当反向电压很大时，p-n结的反向电流突然增加，从而破坏了p-n结的整流特性-- p-n结的击穿。



(1)雪崩击穿(Avalanche breakdown)



p-n结中的电场随着反向电压的增加而增加，少数载流子通过反向扩散进入势垒区时获得的动能也就越来越大，当载流子的动能大到一定数值后，与中性原子碰撞时，可以把中性原子的价电子激发到导带，形成电子-空穴对——碰撞电离。

连锁反应，使载流子的数量倍增式的急剧增多，因而p-n结的反向电流也急剧增大，形成了雪崩击穿。

影响雪崩击穿电压的主要因素：

1.掺杂浓度：掺杂浓度大,击穿电压小。

杂质浓度高—接触电势差大—载流子能够获得更大动能—利于雪崩倍增

但，杂质浓度很高—势垒区宽度小—不易完成载流子加速过程—不利于雪崩倍增

2.禁带宽度：禁带宽度越宽,击穿电压越大。

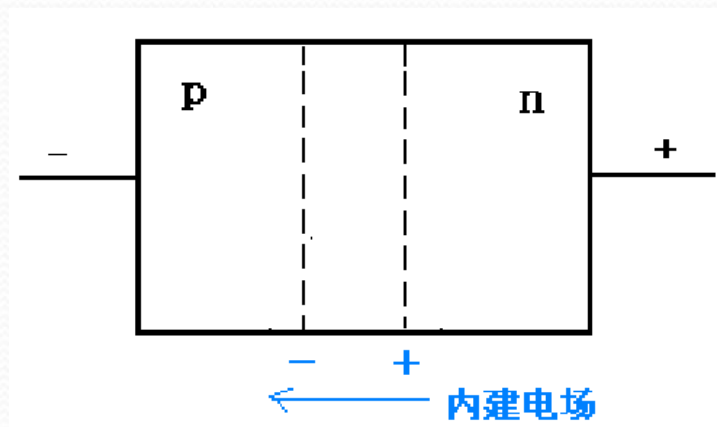
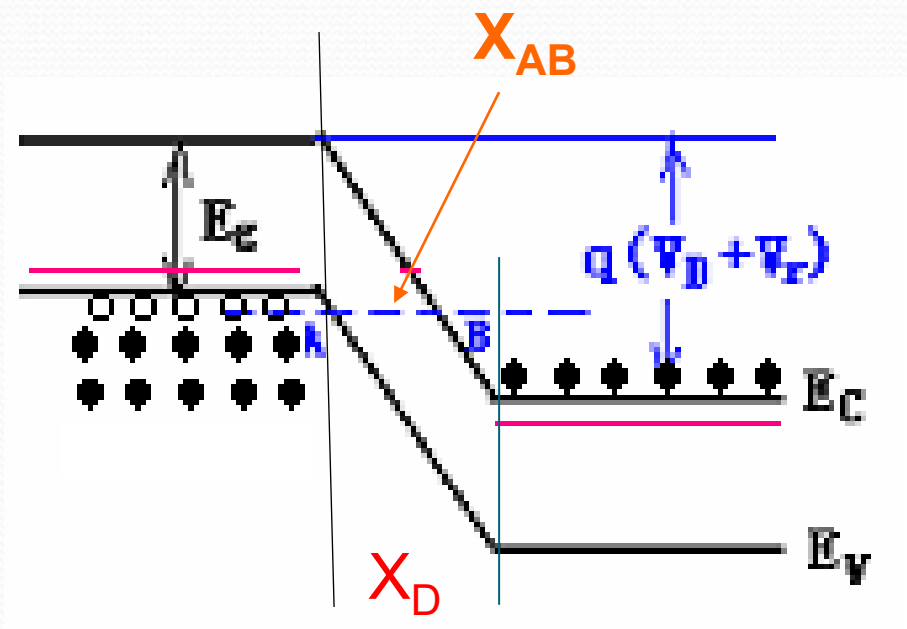
禁带宽度大—碰撞电离产生电子-空穴对所需能量大—不利于雪崩倍增

3.温度：温度升高,击穿电压增大。 正温度系数

温度升高—晶格振动散射增加—电子、空穴获得的能量易损失—不利于雪崩倍增效应

(2) 齐纳击穿(Zener breakdown)或隧道击穿

是掺杂浓度较高的非简并p-n结中的击穿机制。



根据量子力学的观点,当隧道长度 X_{AB} 足够窄时,将有p区电子穿透禁带.当外加反向电压很大时,能带倾斜严重,势隧道长度 X_{AB} 变得更窄.造成很大的反向电流.使p-n结击穿.

影响齐纳击穿电压的主要因素：

1. 掺杂浓度: 掺杂浓度大, 击穿电压小.

杂质浓度高—势垒区宽度窄—隧道长度短—易发生隧道击穿

2. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大.

禁带宽度大—势垒区宽度大—隧道长度变长—不易隧道击穿

3. 温度: 温度升高, 击穿电压下降。 负温度系数

温度升高—禁带宽度变窄—势垒区宽度变小—隧道长度变短

结 论

齐纳击穿电压具有**负**的温度系数,**而雪崩击穿**电压具有**正**的温度系数,这种温度效应是区分两种击穿机构的重要方法.

掺杂浓度高,反向偏压不高的情况下,易发生齐纳击穿
反向偏压较高的情况下, 易发生雪崩击穿.

例, Si、Ge: $V_{BR} < 4E_g / q$

齐纳击穿 (隧道击穿)

$V_{BR} > 6E_g / q$

雪崩击穿

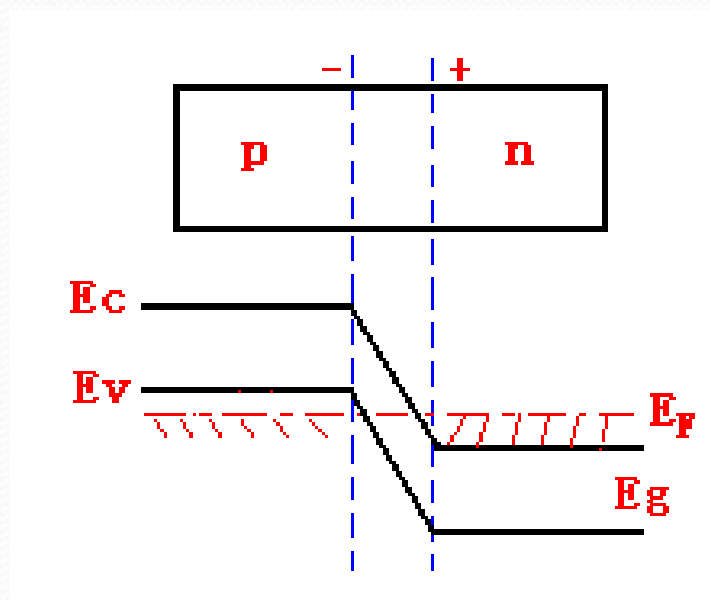
$4E_g / q < V_{BR} < 6E_g / q$

两者均存在

四. p-n结中的隧道效应

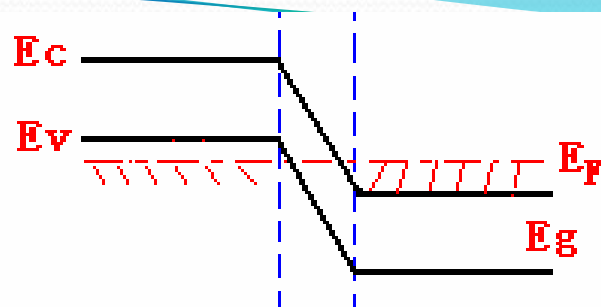
当p-n结的两边都是重掺杂时: (1) 费米能级分别进入导带和价带. (2) 势垒十分薄.

平衡时

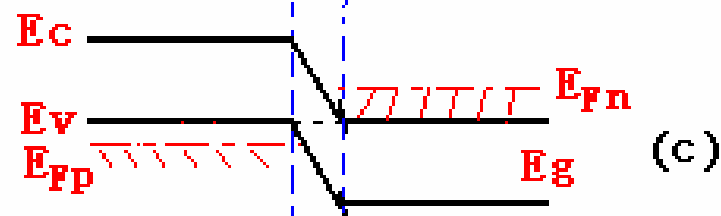
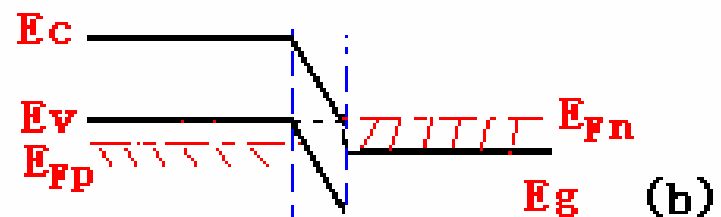
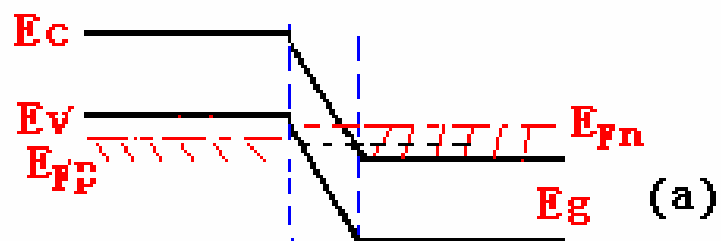


在外加正向或反向电压下,有些载流子将可能穿透势垒产生额外的电流. —**隧道电流**

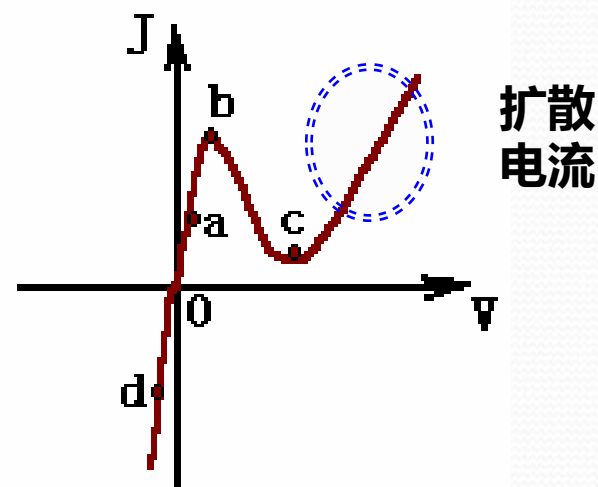
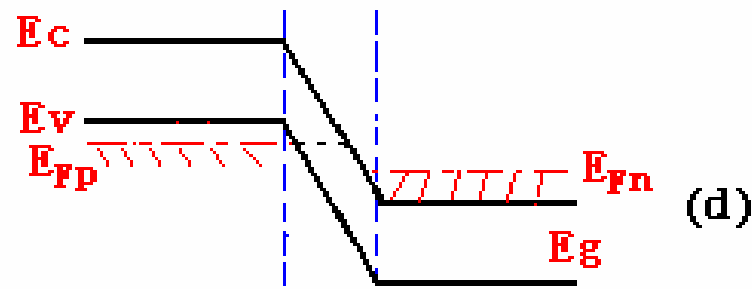
热平衡（无外加电压）



加正向电压的情况



加反向电压的情况



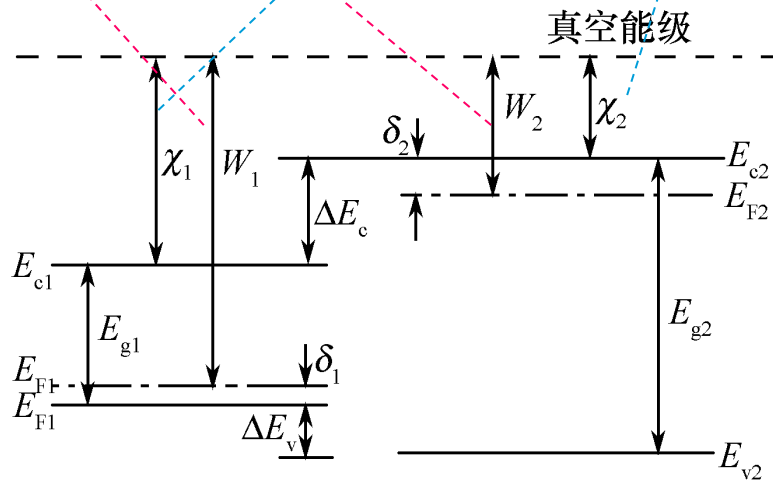
五. 异质结

异质结 { $\begin{cases} \text{异型异质结} \begin{cases} p-n \text{型} \\ n-p \text{型} \end{cases} \\ \text{同型异质结} \begin{cases} p-p \text{型} \\ n-n \text{型} \end{cases} \end{cases}$

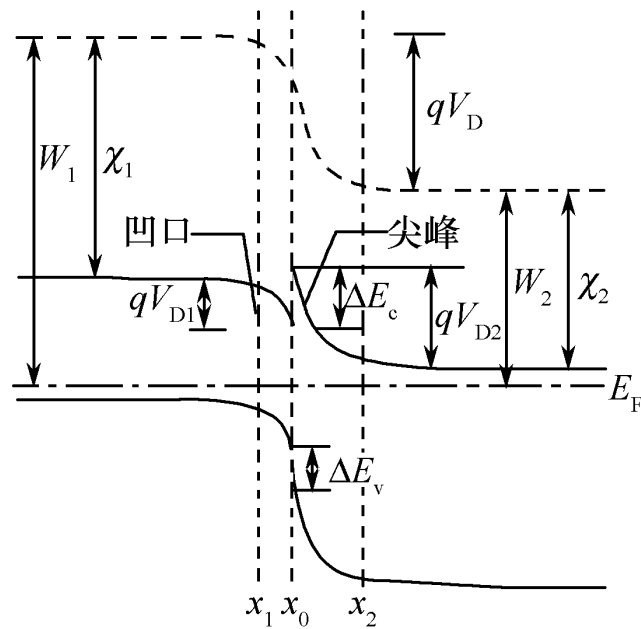
1. p-n型

功函数

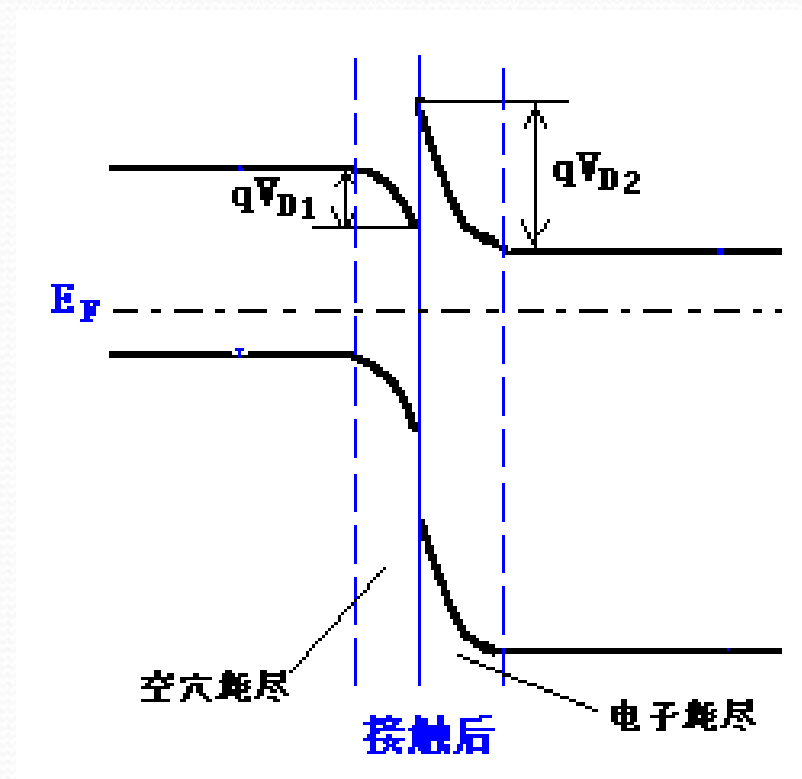
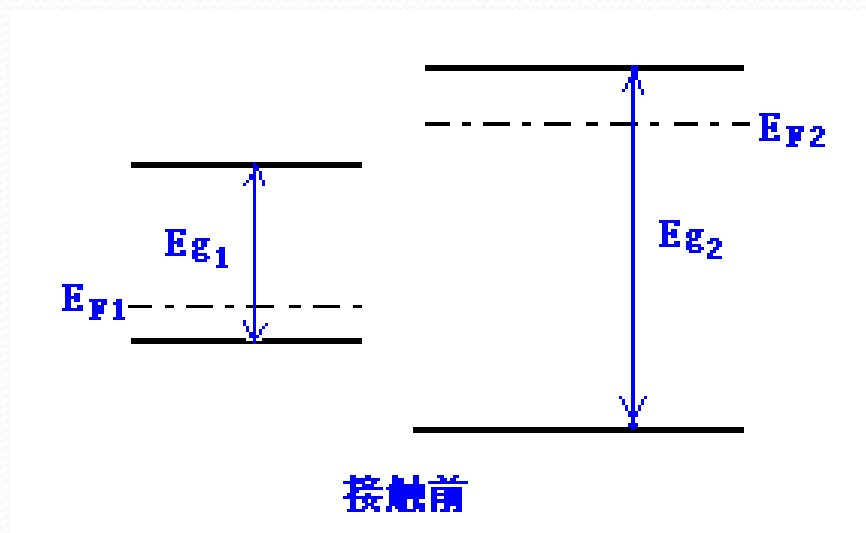
电子亲和能



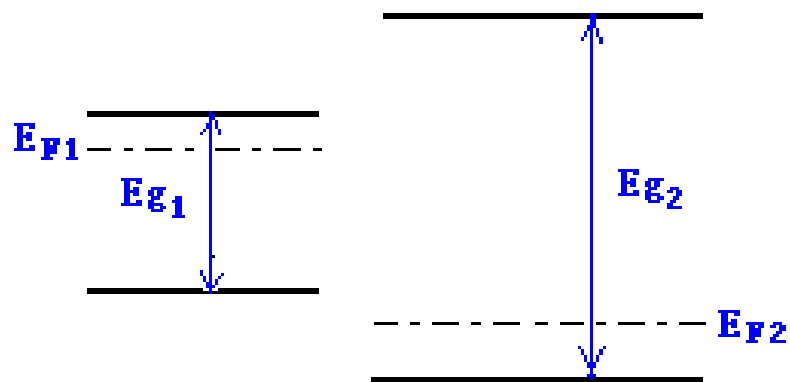
(a) 接触前能带图



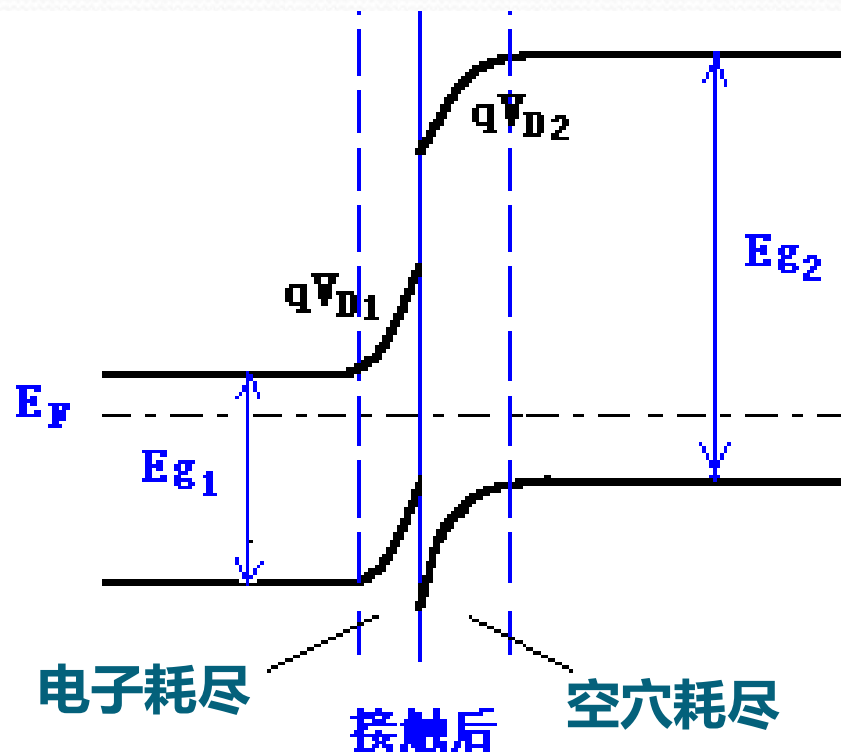
(b) 接触后能带图



2. n-p型



接触前

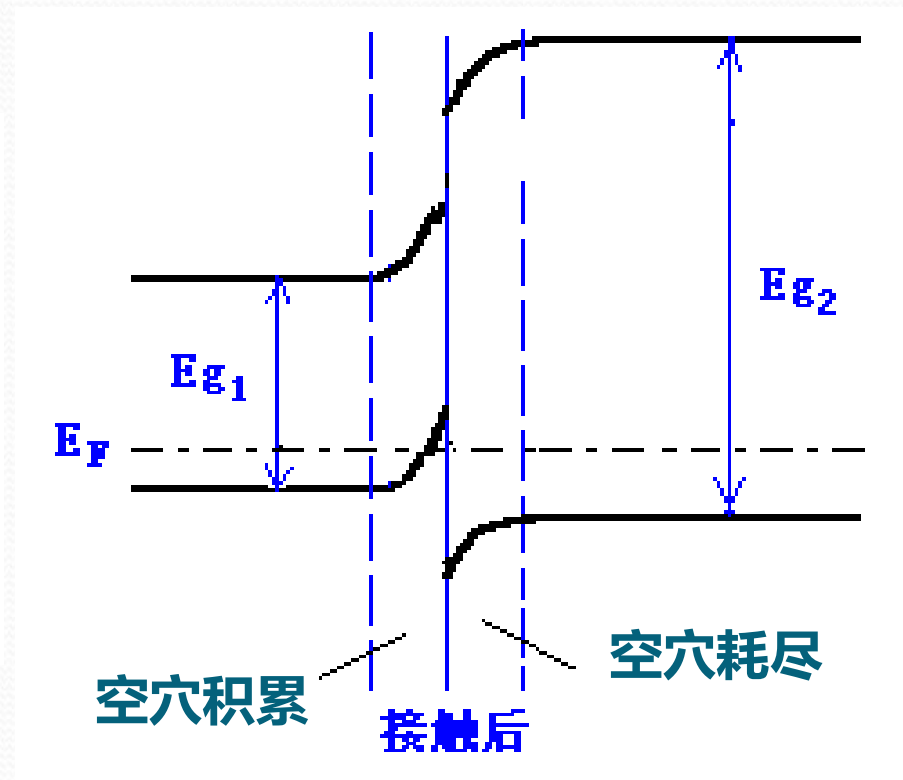
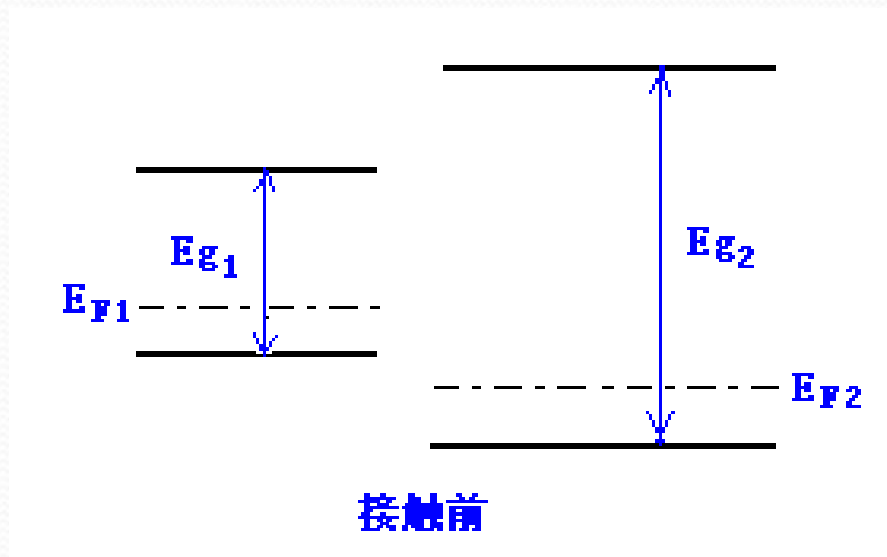


电子耗尽

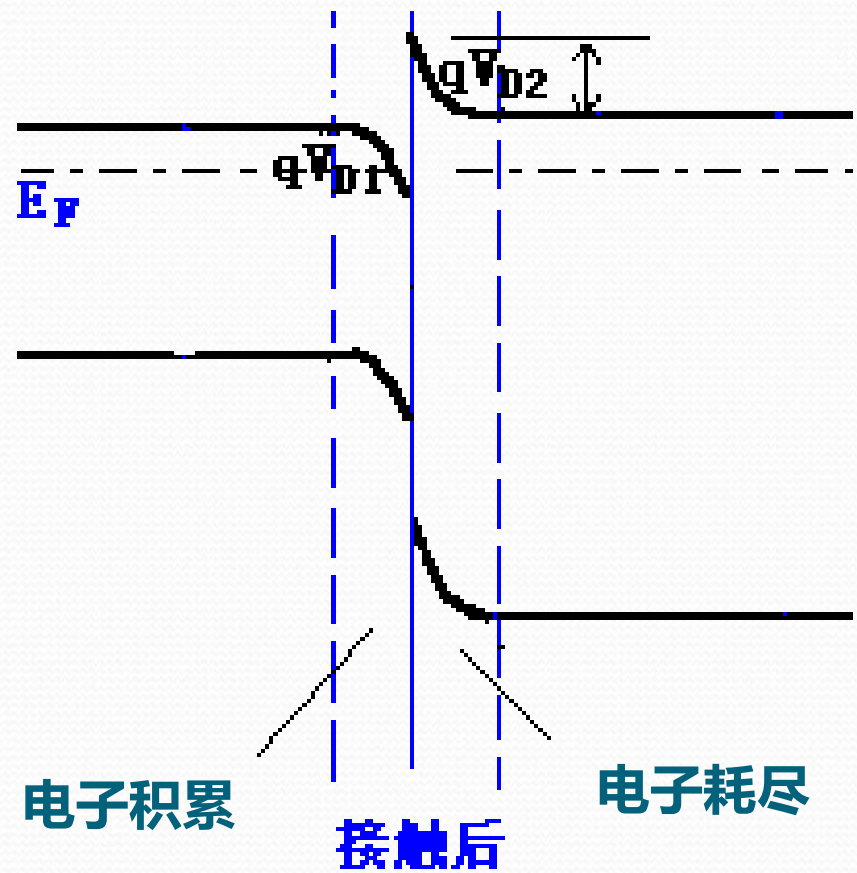
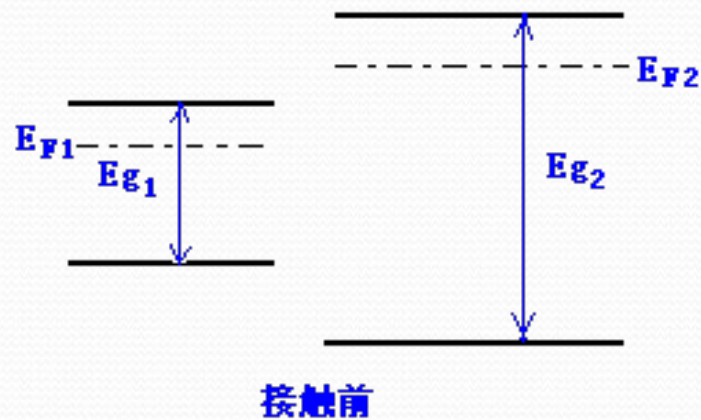
接触后

空穴耗尽

3. p-p型



4. n-n 型



异质结的主要性质

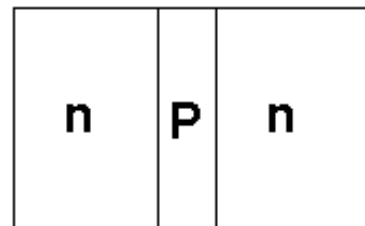
- 1. 可提高注入比**
- 2. 窗口效应**
- 3. 限制光子的光波导壁界**
- 4. 限制载流子的势垒**

1. 可提高注入比

在总电流中电子电流与空穴电流之比，称为电子的**注入比**。

下面以p-n型为例，并借用同质p-n结的电流表达式，做些定性的讨论。

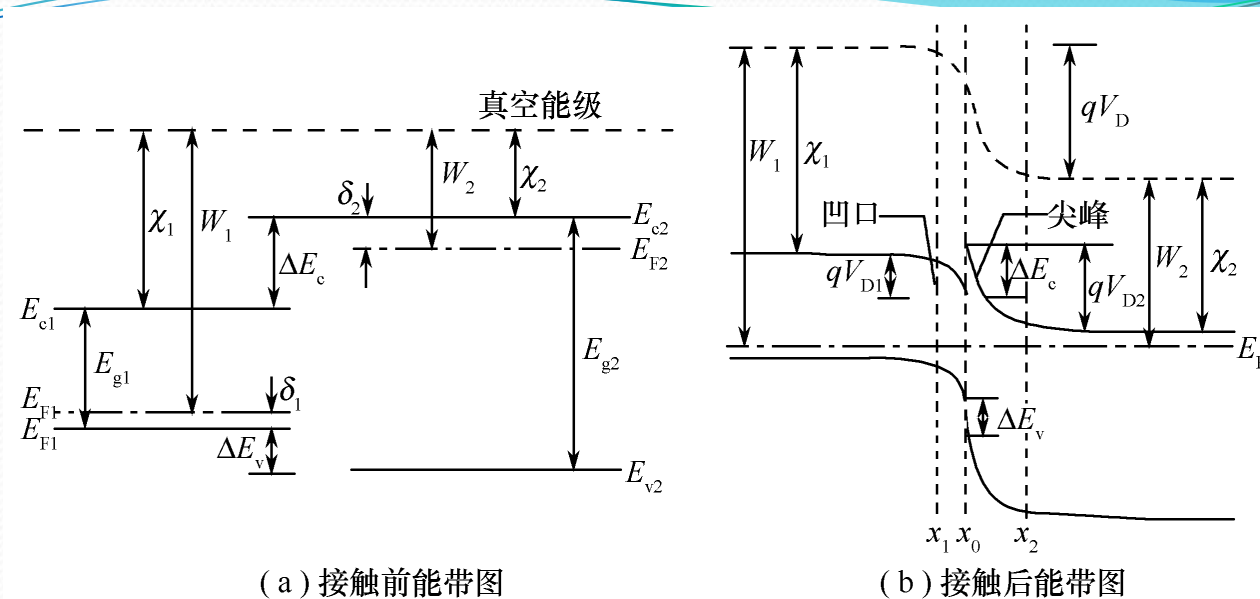
外加正偏：



$$J_n = q \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

$$\Rightarrow \frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{n_{p0}}{p_{n0}}$$

$$J_p = q \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left(e^{\frac{qV}{k_0 T}} - 1 \right)$$

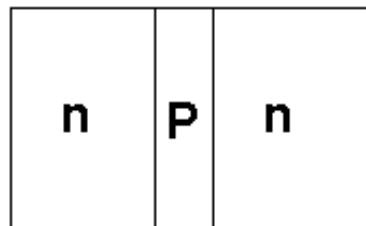


(a) 接触前能带图

(b) 接触后能带图

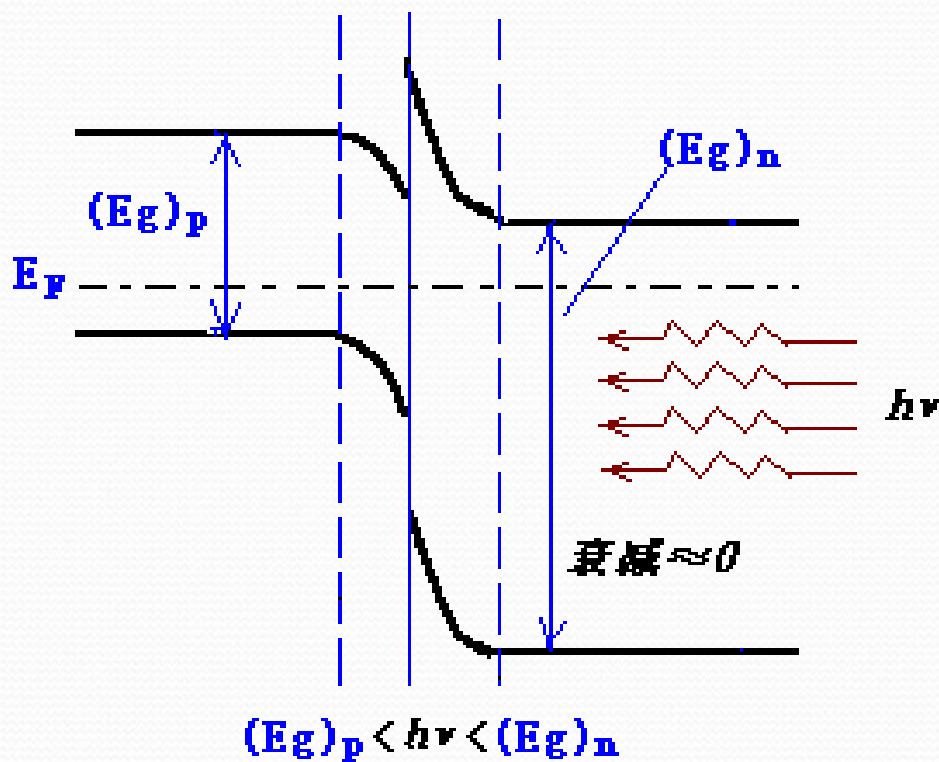
$$\frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{n_{p0}}{p_{n0}} = \frac{D_n L_p}{D_p L_n} \cdot \frac{(n_i^2)_p}{(n_i^2)_n} \cdot \frac{n_{n0}}{p_{p0}} = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} e^{\frac{\Delta E}{k_0 T}}$$

同质pn结



$$\Delta E = \Delta E_C + \Delta E_V = (E_g)_n - (E_g)_p$$

2. 窗口效应



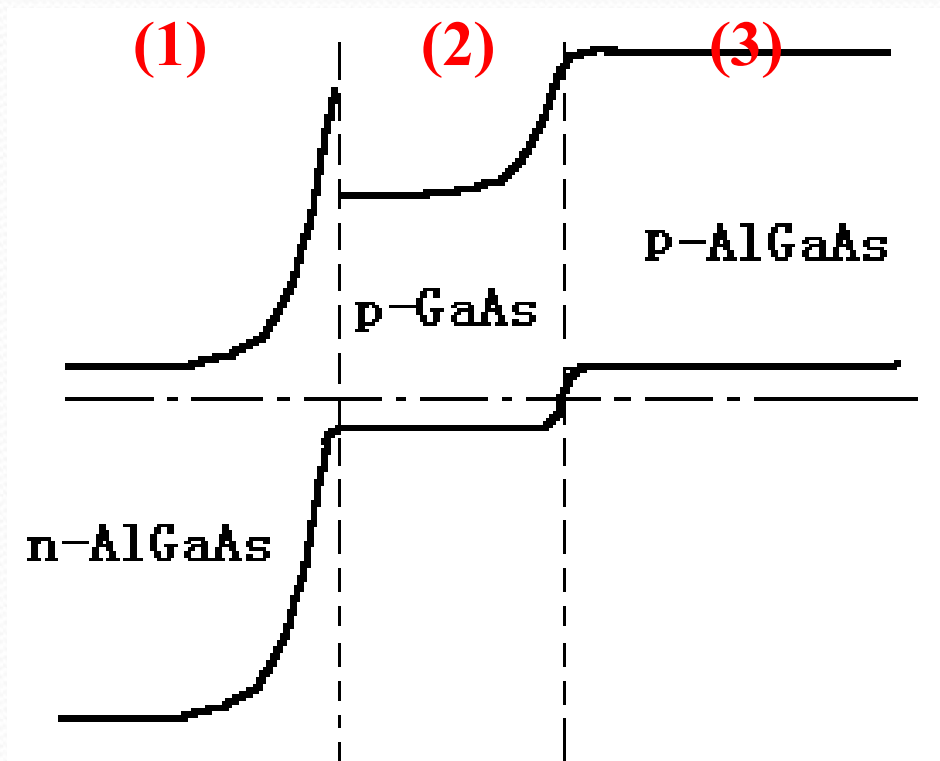
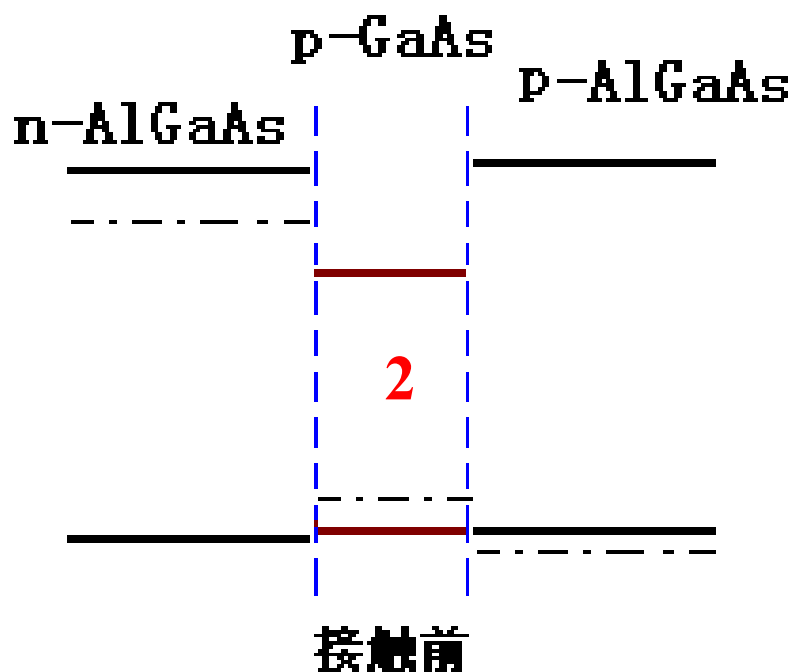
异质结的窗口效应

应用:

- # 1. 太阳能电池
- ## 2. 发光二极管

3. 限制光子的光波导壁界

4. 限制载流子的势垒



↑ 折射率



第5章 半导体中电子的控制

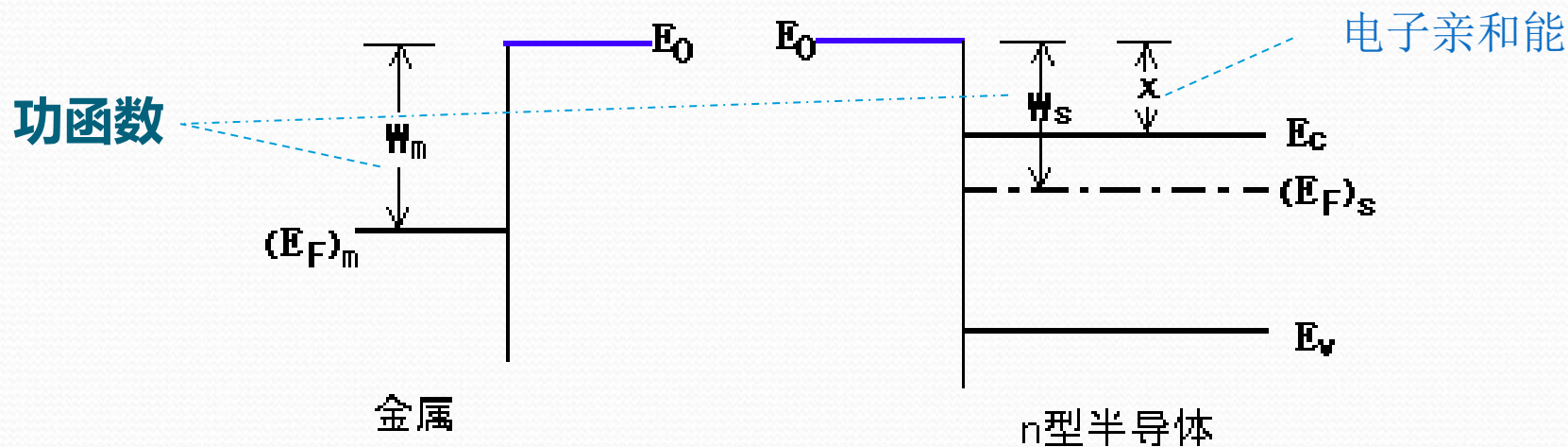
5.1 半导体与外界作用

5.2 半导体与半导体

5.3 半导体与金属

5.4 半导体与绝缘体

5.3 半导体与金属 (metal-semiconductor contact)

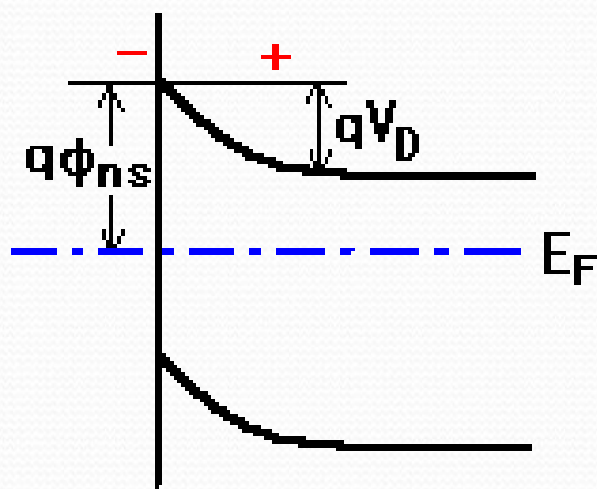
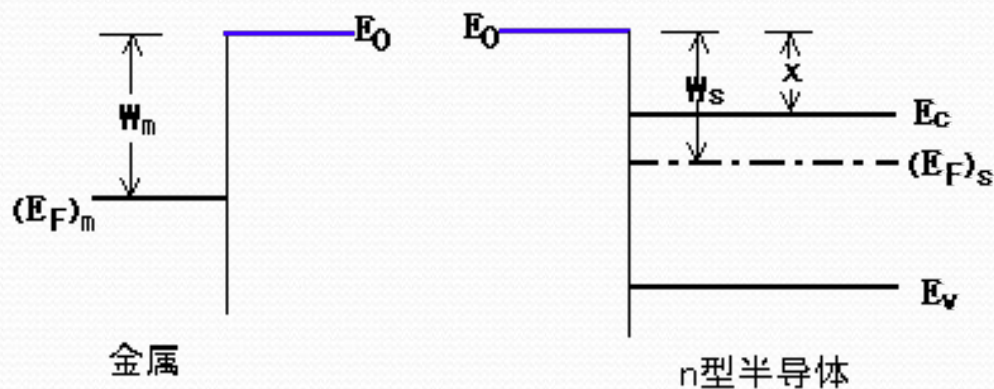


四种类型 {

- 金属-n型半导体 { $W_m > W_s$
 $W_m < W_s$
- 金属-p型半导体 { $W_m > W_s$
 $W_m < W_s$

1. 能带图

(1) M-S(n型), $W_m > W_s$

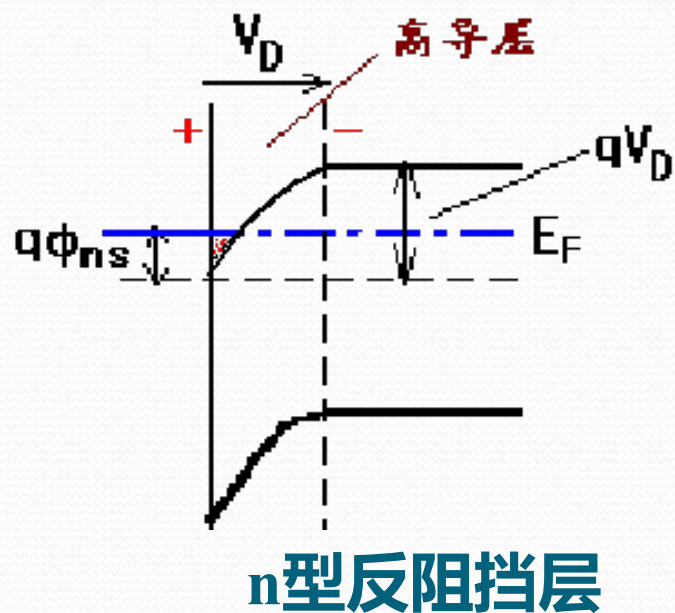
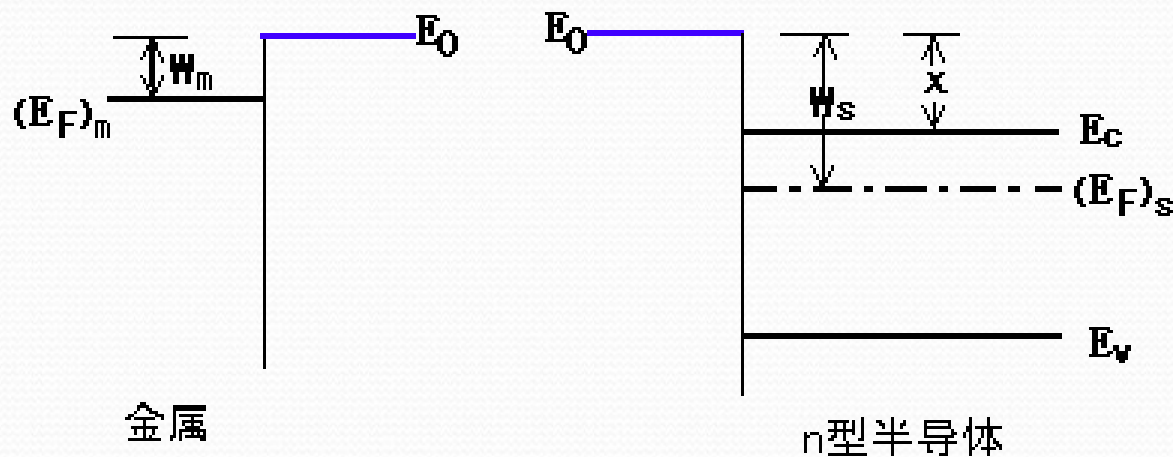


n型阻挡层

$$qV_D = W_m - W_s$$

$$\begin{aligned} q\phi_{ns} &= qV_D + W_s - \chi_s \\ &= W_m - \chi_s \end{aligned}$$

(2) M-S(n型), $W_m < W_s$

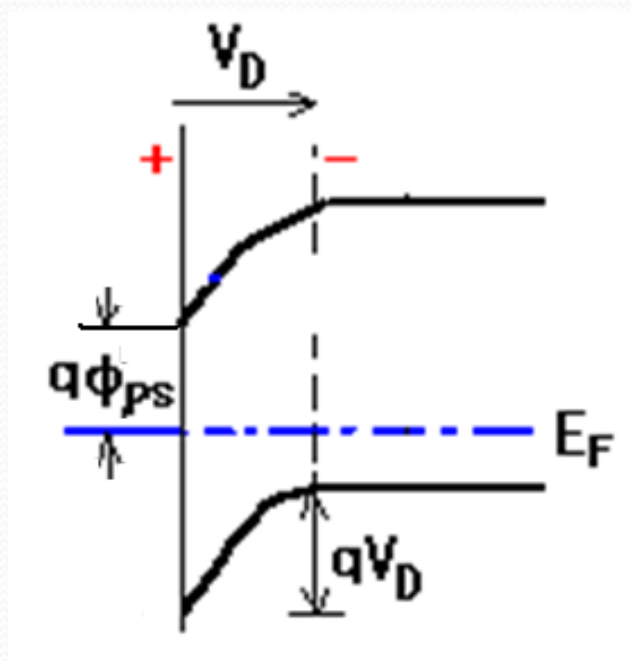
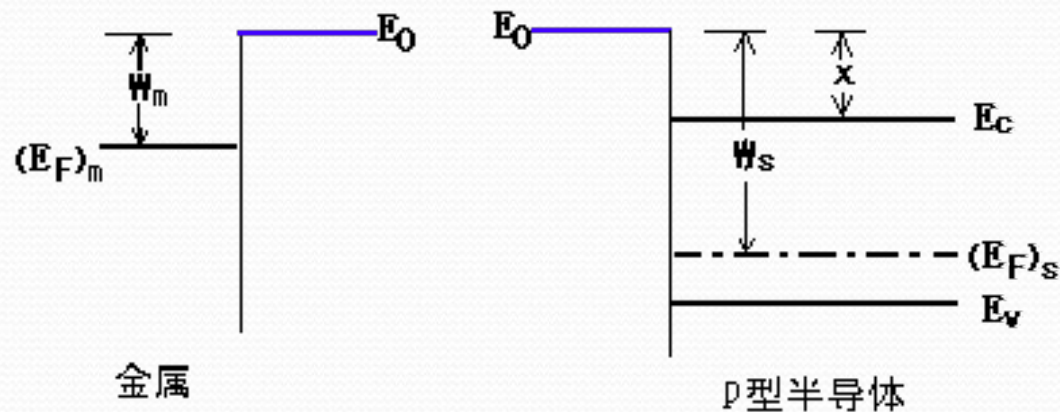


$$qV_D = W_s - W_m$$

$$q\phi_{ns} = qV_D - (W_s - \chi_s)$$

$$= \chi_s - W_m$$

(3) M-S(p型), $W_m < W_s$

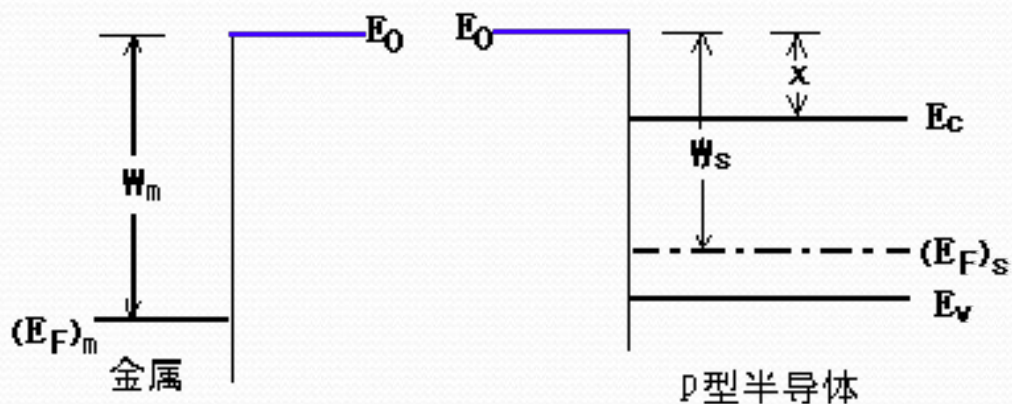


p型阻挡层

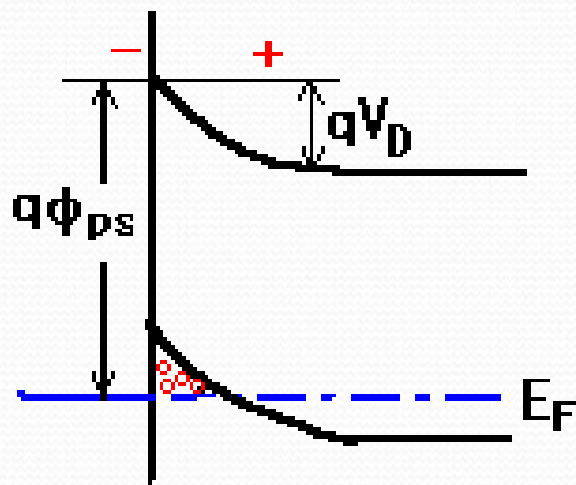
$$qV_D = W_s - W_m$$

$$q\phi_{ps} = W_m - \chi_s$$

(4) M-S(p型), $W_m > W_s$



P型半导体的价带电子向金属一侧转移



$$qV_D = W_m - W_s$$

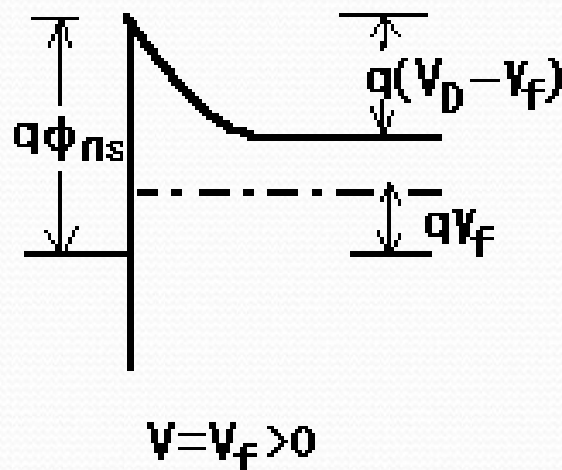
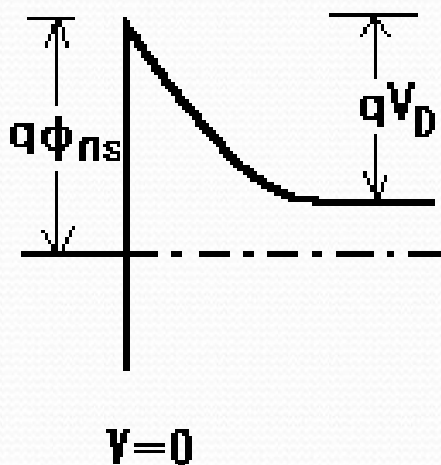
$$q\varphi_{ps} = qV_D + (W_s - \chi_s)$$

$$= W_m - \chi_s$$

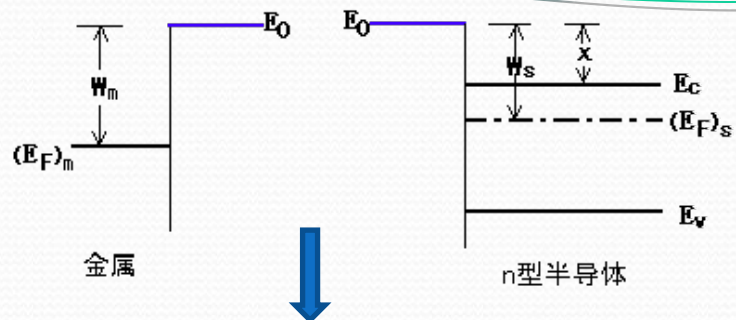
2. 整流特性（对阻挡层而言）

金属与半导体接触可以形成阻挡层（肖特基势垒Schottky Barrier）与反阻挡层，前者具有与p-n结相似的整流特性，而后者具有欧姆特性。

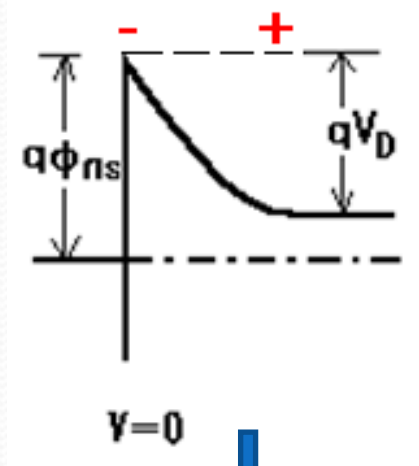
(1) 加正电压（金属接“+”）



金-半接触前

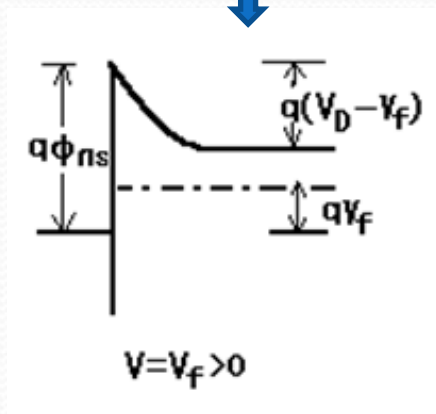


金-半接触后
平衡时



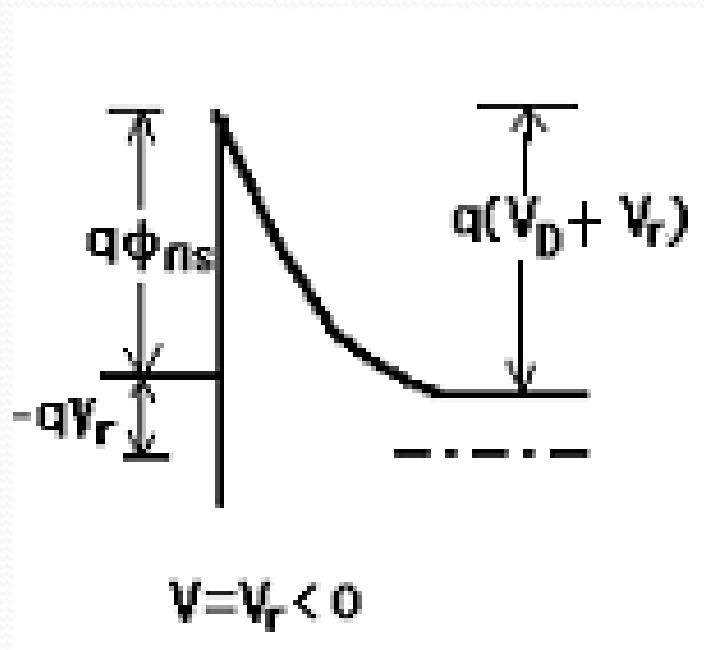
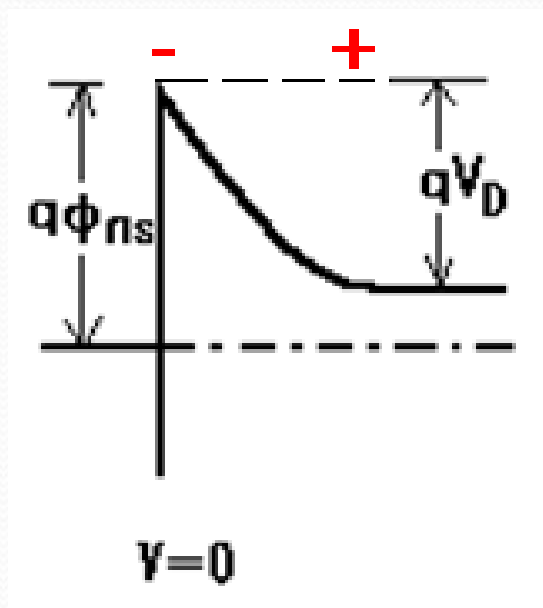
净电流=0

金-半接触后
非平衡时



势垒高度随外加正电压的增加而降低,因此由半导体流向金属的净电子流增加.

(2) 加反向电压（金属接“-”）



反向电流: $j_{m-s} - j_{s-m}$

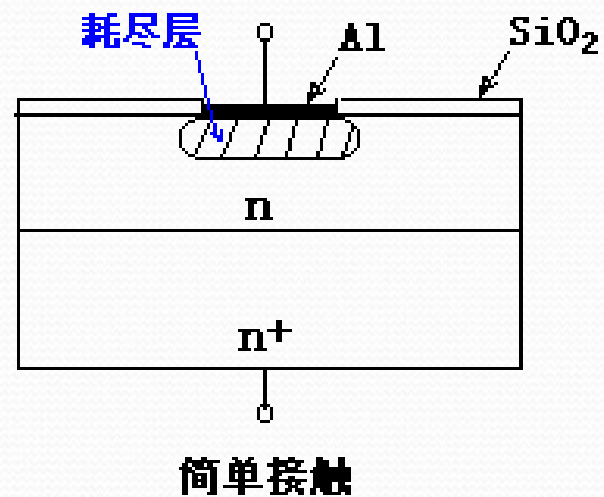
其中, j_{m-s} 恒定不变

势垒高度随外加反电压的增加而升高,因而从半导体到金属的电子减少,反向电流变大,主要由金属到半导体的电子流构成。

反向电压继续增大,致使 j_{s-m} 近似为零,反向电流趋于饱和。

3.肖特基势垒二极管

(1) 结构

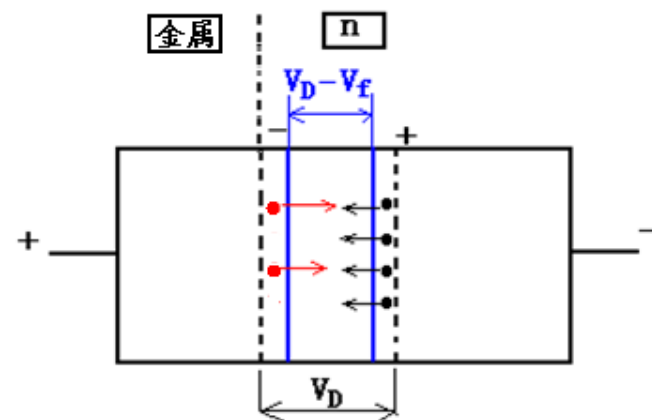
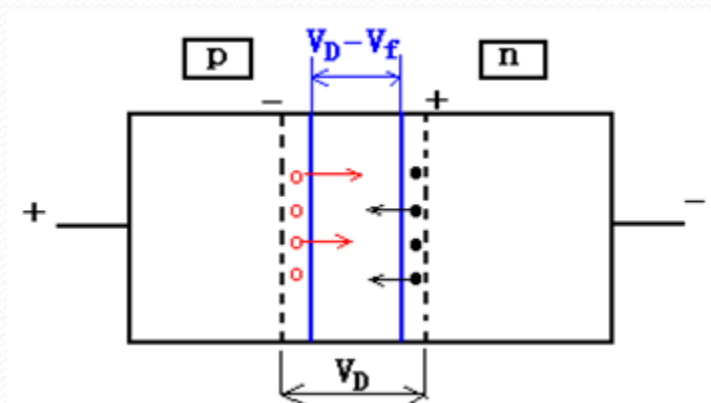


(2)与p-n结二极管的比较

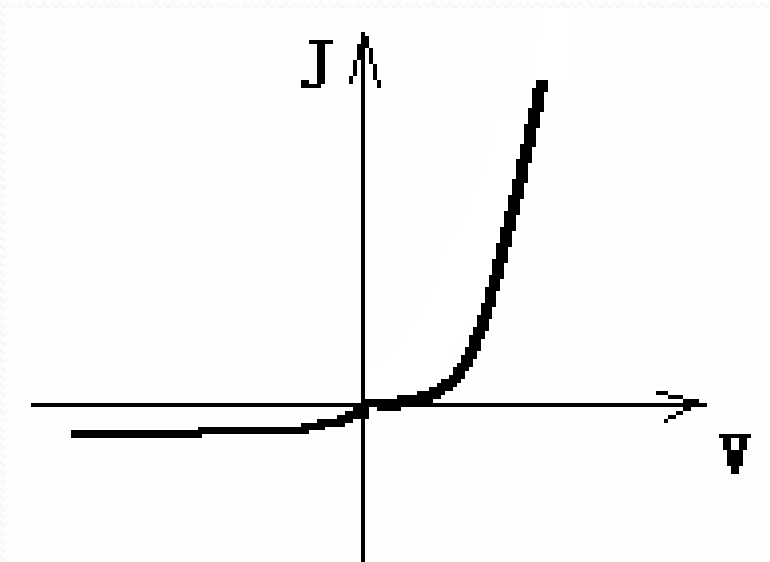
主要特点是:

1.SDB是多数载流子器件,而p-n结二极管电流取决于非平衡少数载流子的扩散运动.

2. p-n结二极管中,少数载流子注入造成非平衡载流子在势垒区两侧界面的积累,外加电压变化,电荷积累和消失需有一弛豫过程(电荷存储效应),严重影响了p-n结二极管的高频性能.SDB器件不发生电荷存储现象,使得它在高频、高速器件中有重要作用。



3.SDB的正向开启电压比p-n的低；而反向饱和电流比p-n的大。这是因为多数载流子电流远高于少数载流子电流。SDB中通常存在额外的漏电流。



4. 欧姆接触 (Ohmic Contact)

从电学上讲，理想的欧姆接触的接触电阻应当很小，同时还应具有线性的和对称的电流—电压关系。

由于表面态的影响，不能通过选择金属的功函数来实现欧姆接触（理论上说， $W_m < W_{ns}$ 或 $W_m > W_{ps}$ 可形成反阻挡层）。

在生产实际中，主要是利用隧道效应的原理在半导体上制造欧姆接触。采用重掺杂半导体与金属接触。

三、表面态对接触势垒的影响

金-半（n型）接触：金属一边形成的势垒高度：

$$q\phi_{ns} = W_m - \chi_s \begin{cases} \chi_s : \text{对同一种半导体, 保持定值} \\ W_m : \text{随不同金属而变化} \end{cases}$$

实验表明：不同金属与同一种半导体接触，各种金属的功函数虽然相差很大，但与半导体接触时形成的势垒高度却相差很小。

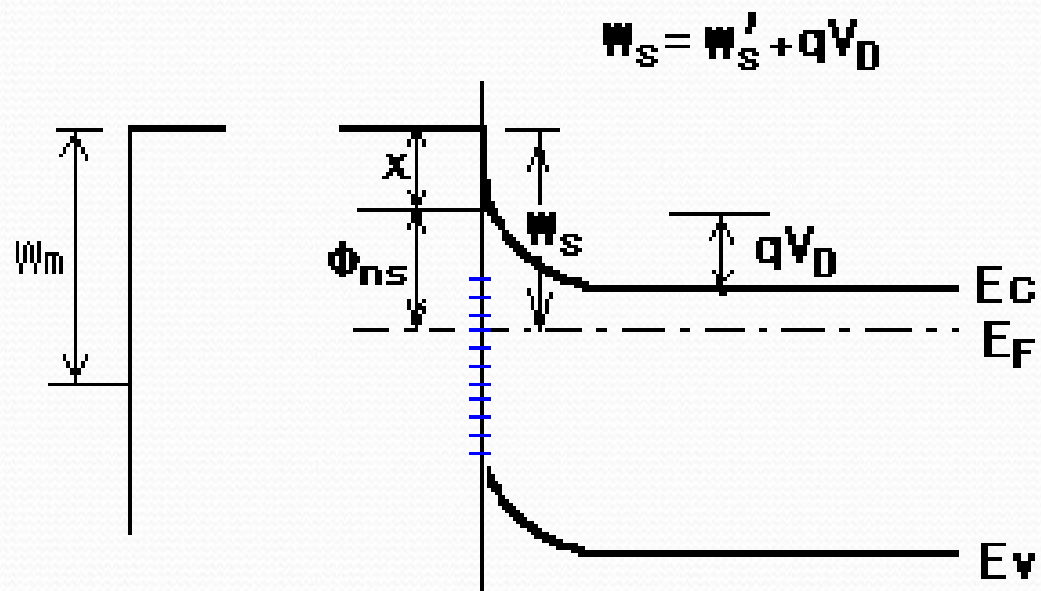
原因：半导体表面的禁带中存在表面态（表面能级）

□表面态：局域在表面附近新电子态。

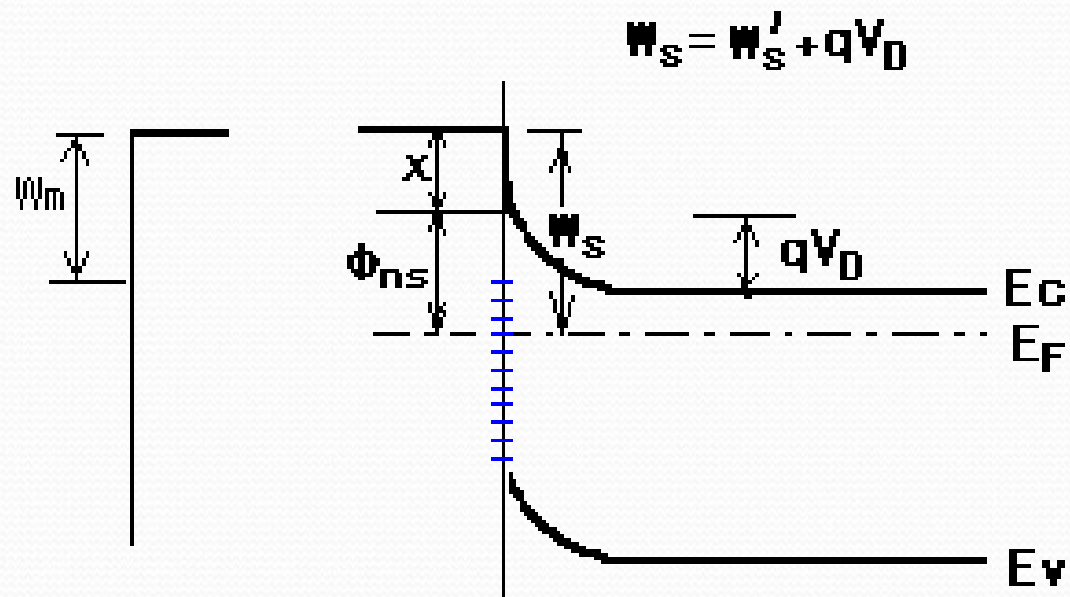
□表面能级：与表面态相应的能级称为表面能级。

- 在界面处晶格的断裂产生大量能量状态，称为界面态或表面态，位于禁带内，表面态通常按能量连续分布。
- 表面态分为施主型和受主型。
- 表面处存在一个距离价带顶为 $q\Phi_0$ 的能级（中性能级 E_0 ）。电子正好填满 $q\Phi_0$ 以下所有的表面态时，表面呈电中性。若 $q\Phi_0$ 以下表面态为空，表面带正电，类似施主作用； $q\Phi_0$ 以上表面态被电子填充，表面带负电，类似受主作用。
- 对于大多数半导体，中性能级 $E_0=q\Phi_0$ 约为禁带宽度的三分之一。

$$W_m > W_s$$



$$W_m < W_s$$



(2) 欧姆接触的实现

尤其在超高频和大功率器件中，欧姆接触是设计和制造的关键问题之一

用重掺杂的半导体与金属接触

