

# 第二章 PN结

§2.1 PN结的基本介绍

§2.2 PN结电流电压特性

§2.3 PN结的CV特性

§2.4 PN结的击穿特性

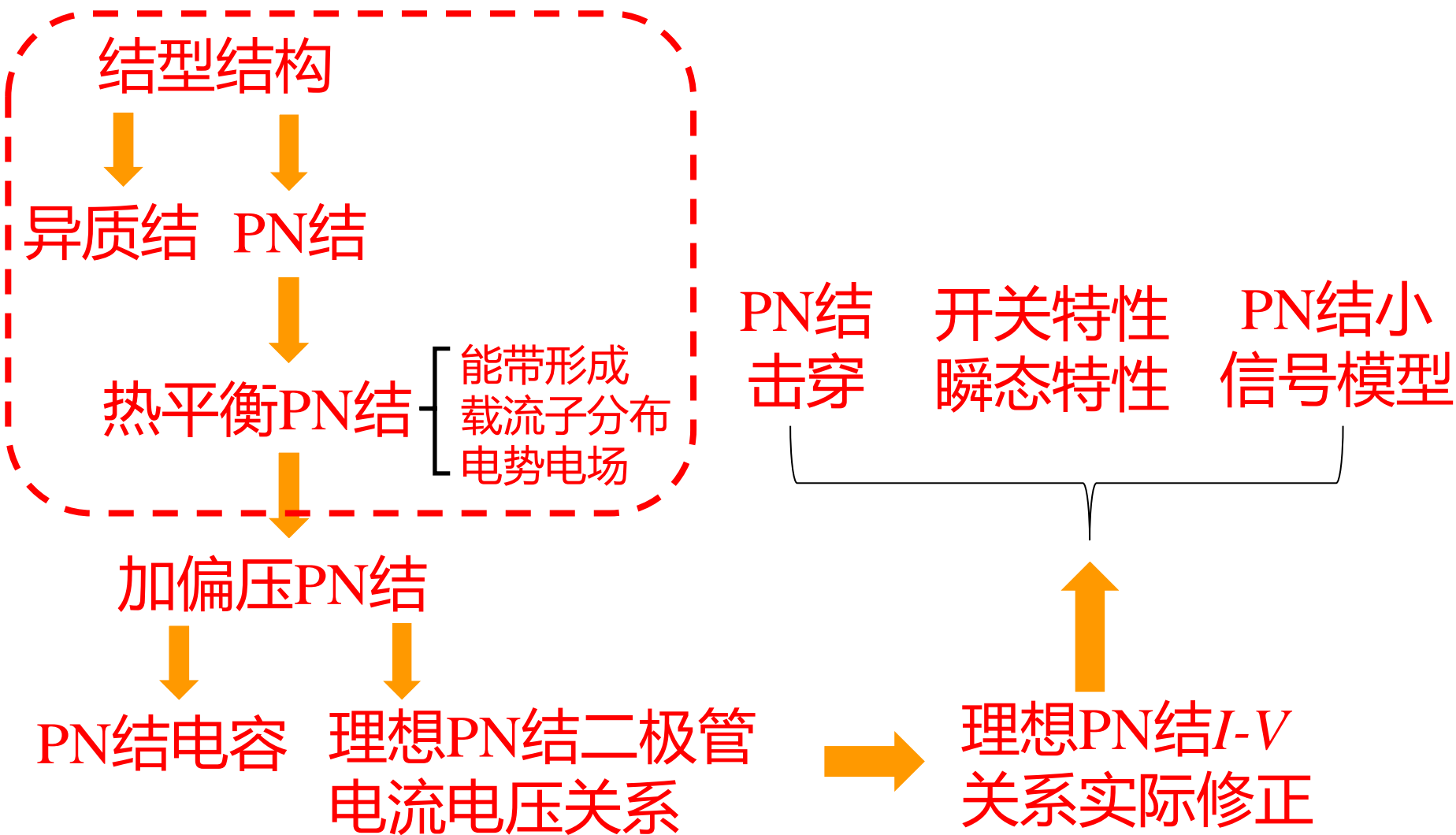
§2.5 PN结的小信号模型

§2.6 PN结的开关特性和瞬态特性

§2.7 异质结与高低结

§2.8 二极管的应用

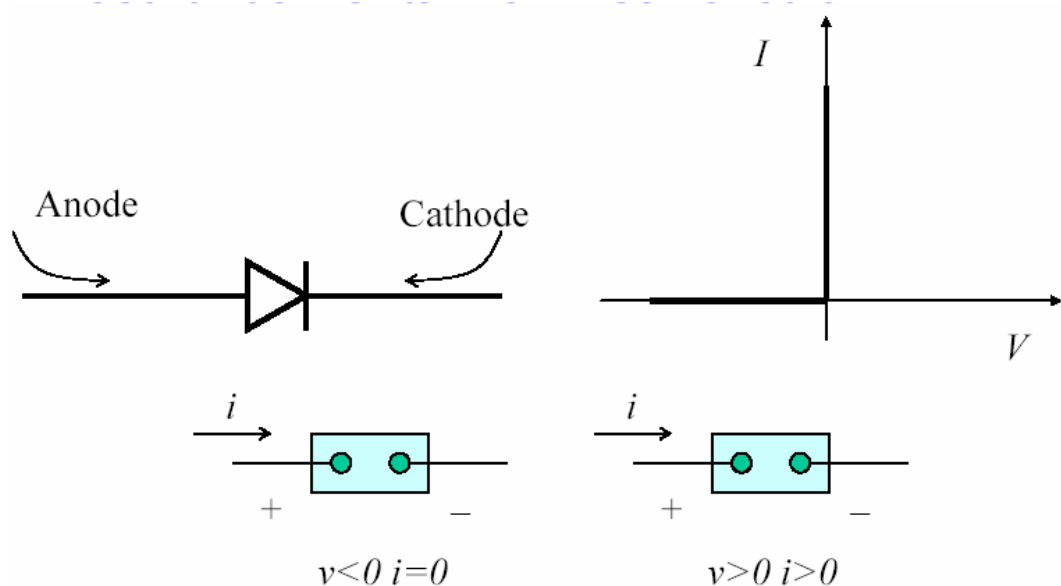
# PN结基本知识体系框架



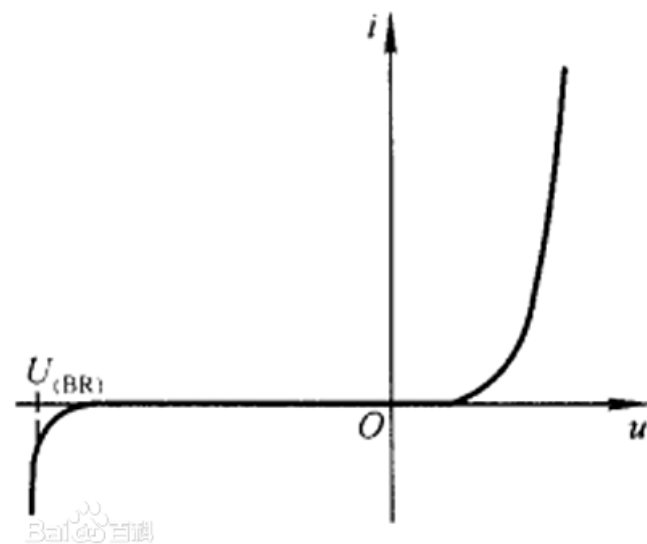
## §2.1 PN结的基本介绍

- ◆任何两种物质（绝缘体除外）的冶金学接触都称为结 (junction)，有时也称为接触 (contact)。
- ◆由P型半导体和N型半导体实现冶金学接触（原子级接触）所形成的结构称为PN结。
- ◆PN结是几乎所有半导体器件的基本单元。除金属-半导体接触器件外，所有结型器件都由PN结构成。且PN结本身就因拥有整流特性而成为一种器件——整流器。PN结包含丰富的半导体器件物理知识，掌握PN结的物理原理是学习其他半导体器件物理的基础。

# PN结二极管的整流特性



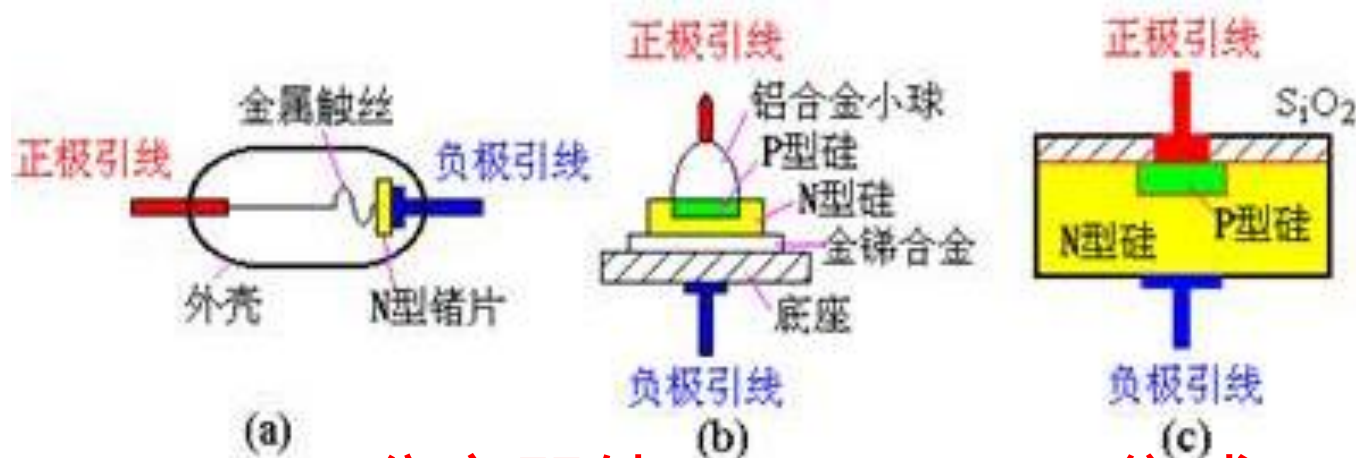
理想二极管



实际二极管

- ◆ 整流特性：只允许电流一个方向通过
- ◆ 加正压时，电压随偏压增加而迅速增大，通常偏压  $< 1V$
- ◆ 加反压时，开始几乎没有电流，继续增大电压，电流很小，当电压达到极限值，电流突然增大，这种现象称为结击穿，击穿电压与掺杂及器件其他参数有关。

# PN结二极管的类型



分立器件

集成

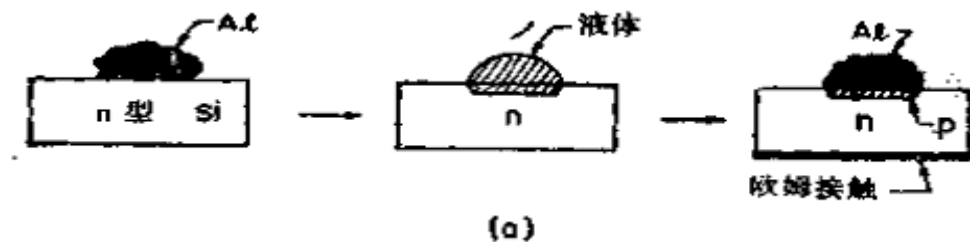


- (1) 点接触型二极管：PN结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。
- (2) 面接触型二极管：PN结面积大，用于工频大电流整流电路。
- (3) 平面型二极管：往往用于集成电路制造工艺中。PN结面积可大可小，用于高频整流和开关电路中。

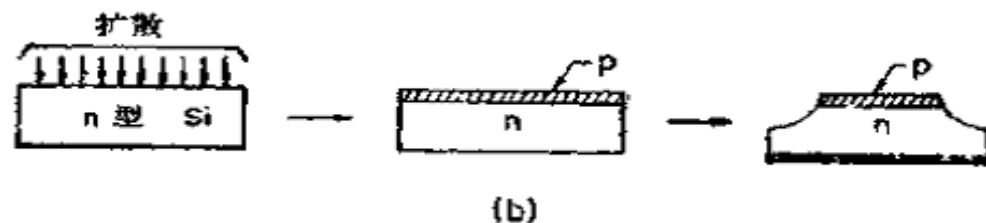
# 平面工艺中主要工序

- (1) 晶体生长、外延
- (2) 氧化、薄膜淀积
- (3) 扩散
- (4) 离子注入
- (5) 光刻、刻蚀

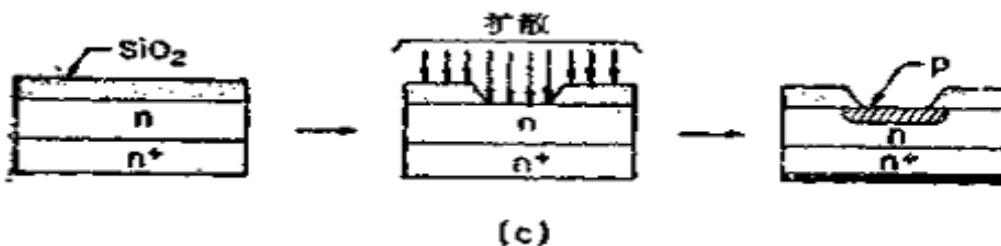
# PN结基本工艺制造方法



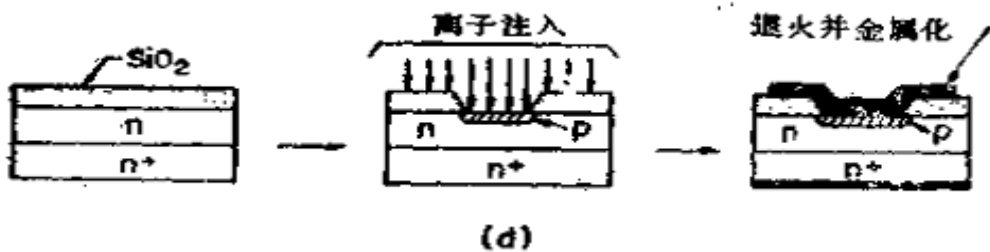
合金法



扩散法



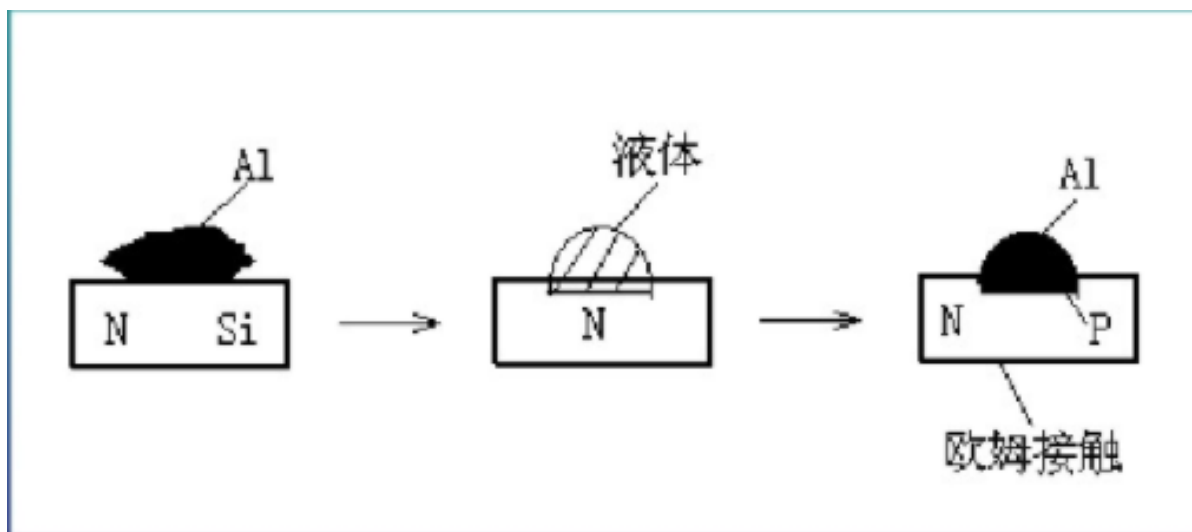
扩散法



离子注入法

# 合金法

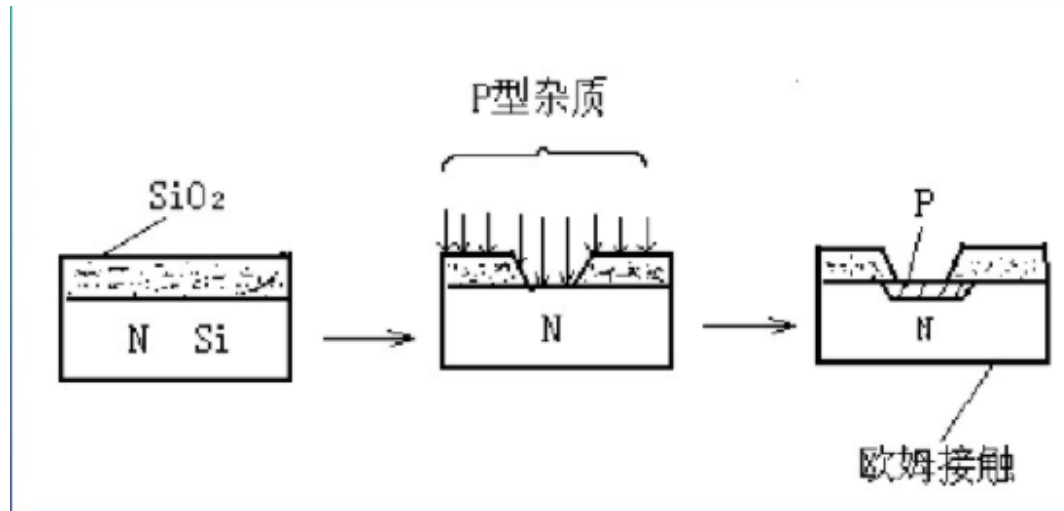
- ◆ 把一小粒铝放在一块N型单晶硅片上，加热到一定温度，形成铝硅的熔融体，然后降低温度，熔融体开始凝固，在N型硅片上形成一含有高浓度铝的P型硅薄层，它和N型硅衬底的交界面即为PN结（称之为铝硅合金结）





# 扩散法

- ◆ 在N型单晶硅片上，通过氧化、光刻、扩散等工艺制得PN结。其杂质分布由扩散过程及杂质补偿决定。在N型硅单晶上，生长一层二氧化硅，通过光刻对硅表面图案化，将需要形成P型的区域空出来，其他区域以二氧化硅作为掩模防止P型杂质进入。扩散过程一般分为两步：预沉积、再分布，首先将硅片放入扩散炉中，使P型杂质源在一定温度下浓度稳定的正对硅片表面扩散，使硅片表面浅层含有P型杂质原子，表面达到一定浓度后加高温使P型杂质均匀向N型硅单晶内部推进，形成PN结（也称为扩散结）。



# 扩散

## 用可控制数量的杂质掺入半导体

- ◆ 扩散：掺杂分布主要由扩散温度及扩散时间决定，用于形成深结：

扩散流密度F (单位时间通过单位面积的杂质原子数)：

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

C为杂质浓度，D是扩散系数

- ◆ 扩散过程的基本起因是浓度梯度
- ◆ 扩散效果评价：结深（染色法）、薄层电阻（四探针法）、扩散层杂质分布（二次离子质谱仪SIMS）
- ◆ 杂质再分布

# 离子注入

离子注入：掺杂分布主要由离子质量和注入离子的能量决定（典型的离子能量是30-300keV，注入剂量是在 $10^{11}$ - $10^{16}$ 离子数/cm<sup>2</sup>范围），用于形成浅结

由于离子注入形成损伤区和畸变团，为了激活注入的离子：退火

# 晶体生长与外延

- ◆ 从熔体中生长单晶：直拉法(Si)和布里奇曼法(GaAs)

原材料：石英砂



冶金级硅

电子级硅 (ppb量级)

- ◆ 硅片成形：前处理→切片→双面研磨→抛光

- ◆ 外延：除常规外延工艺（如气相外延VPE）外，还有液相生长法（广泛应用于化合物半导体）及分子束外延(MBE)等。

# 氧化与薄膜淀积

—四大类薄膜：

热氧化膜、电介质膜、多晶硅膜和金属膜

—热氧化膜：如栅氧化层、场氧化层

—介质膜：如淀积的 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 膜（绝缘层、掩蔽膜、覆盖在掺杂的薄膜上、钝化）

—多晶硅膜：MOS栅、多层金属化的导电材料、浅结器件的接触材料

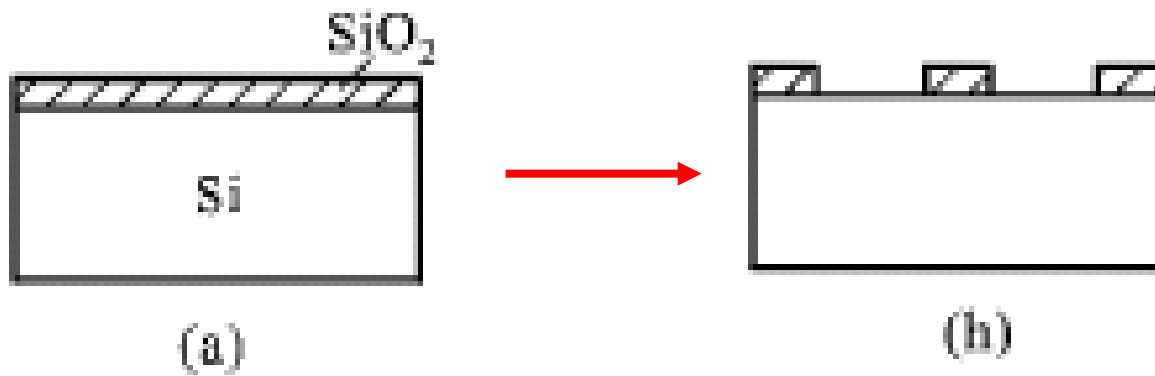
—金属膜：如铝和硅化物（欧姆接触、整流、互连线）

# 光刻—图形定义

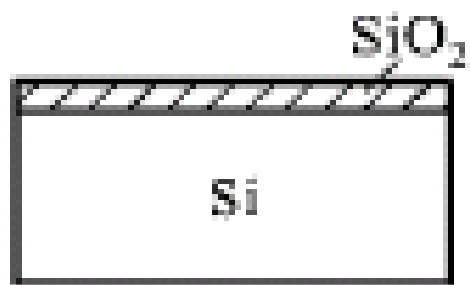
—0.1 $\mu\text{m}$ 以内仍采用光学光刻技术

—短波长的射线：1nm波长软X射线、13nm波长极紫外线、电子束曝光

# 光刻工艺



# 光刻工艺



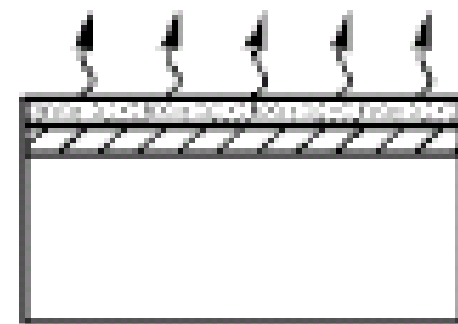
(a)

晶片清洗



(b)

涂敷光刻胶



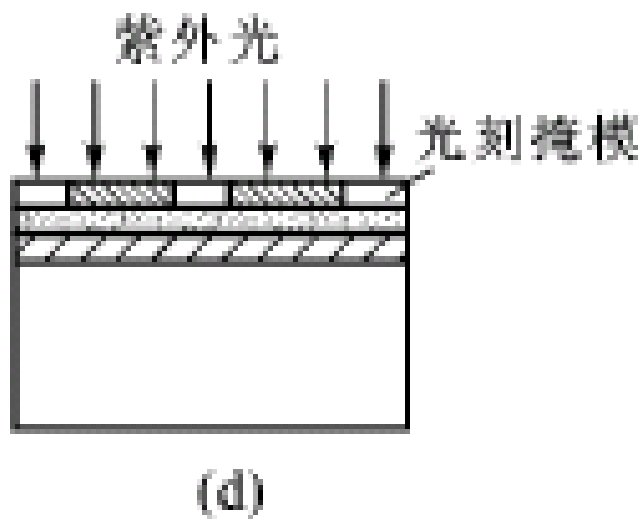
(c)

前烘

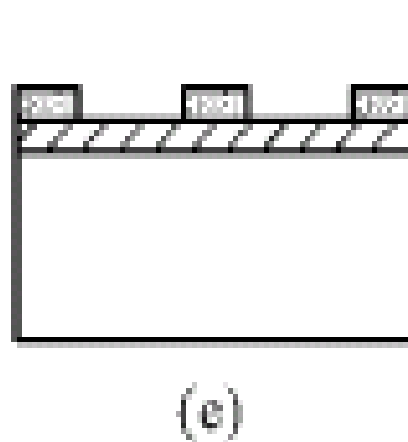


# 光刻工艺

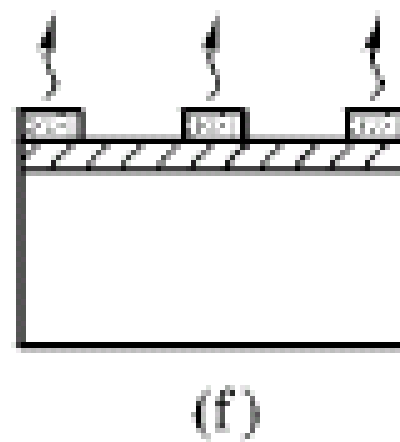
将光刻版（又称为掩膜）放在光刻胶层上，然后用一定波长的紫外光照射，使光刻胶发生化学反应。



**曝光**

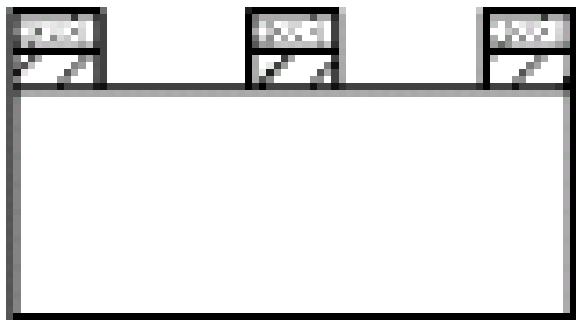


**显影**



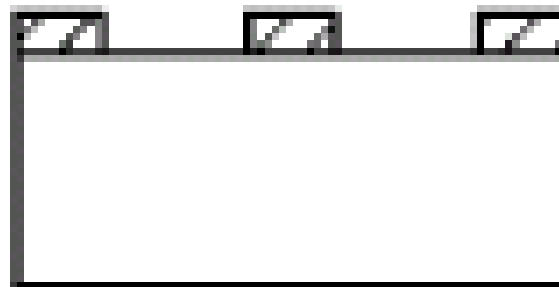
**后烘(坚膜)**

# 光刻工艺



(g)

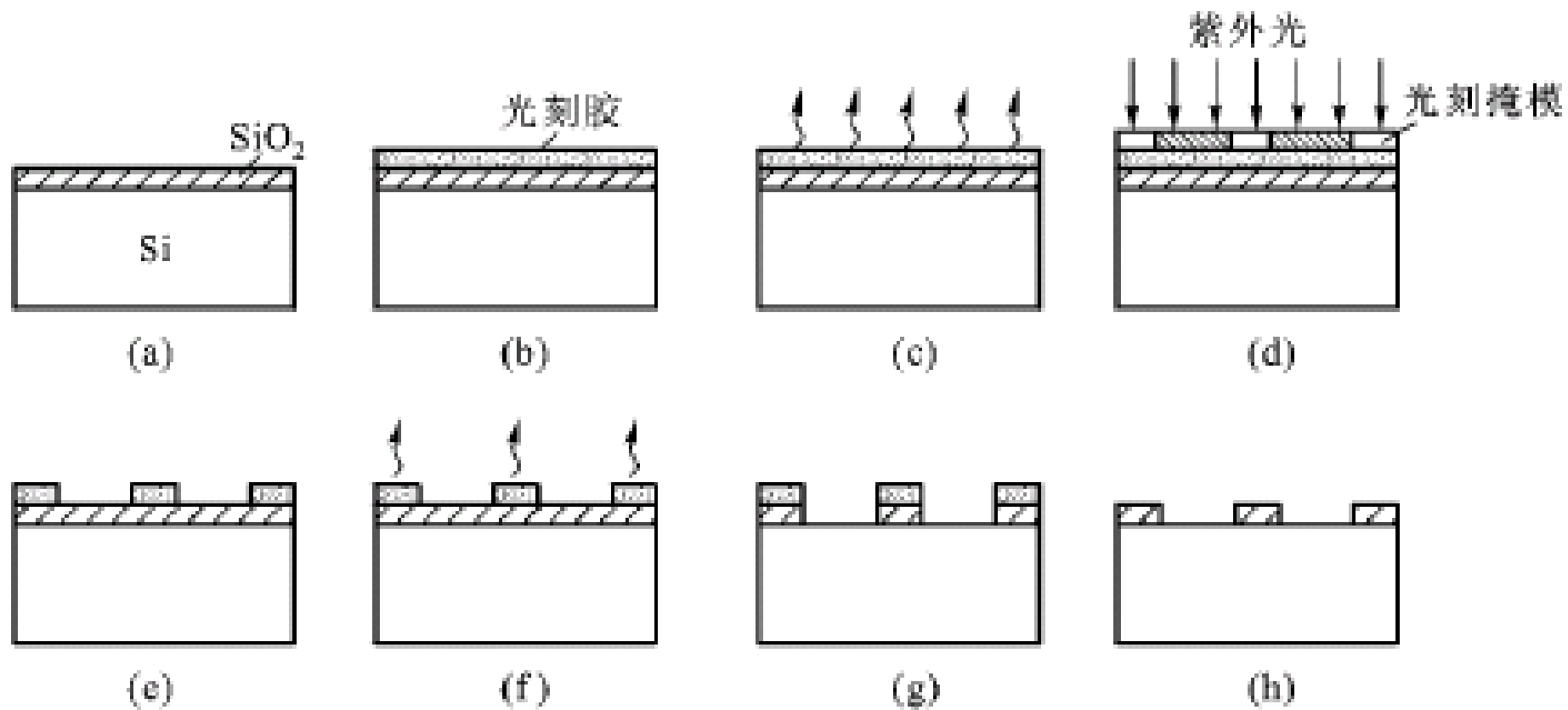
刻蚀(腐蚀)



(h)

去胶

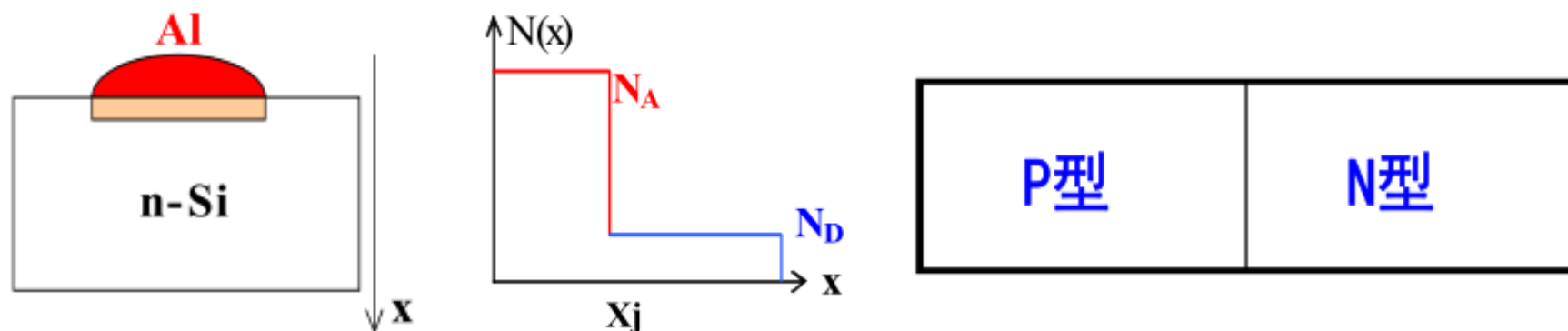
# 光刻工艺



# PN结中的杂质分布

- ◆ 由于制造工艺不同，杂质分布也不同
- ◆ 通常将PN结的杂质分布分为突变结和缓变结

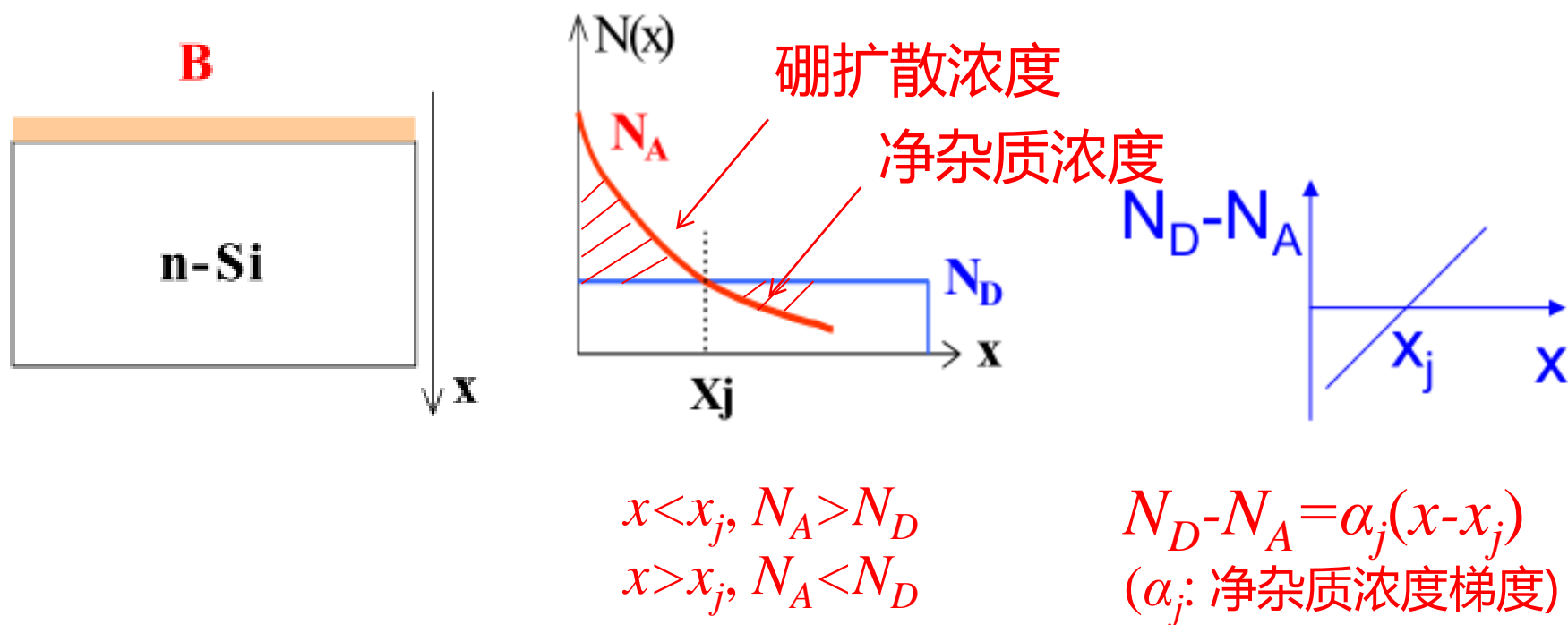
例：合金法



**突变结：** PN结两区中的杂质浓度为均匀分布，且在交界面  $x_j$  处发生杂质突变。如果突变结两边的浓度相差很多，称为单边突变结，其中  $N_A \gg N_D$  记为  $p^+\text{-n}$  结，  $N_D \gg N_A$  记为  $n^+\text{-p}$  结。  
( $N_D$ : 施主杂质浓度,  $N_A$ : 受主杂质浓度)

# PN结中的杂质分布

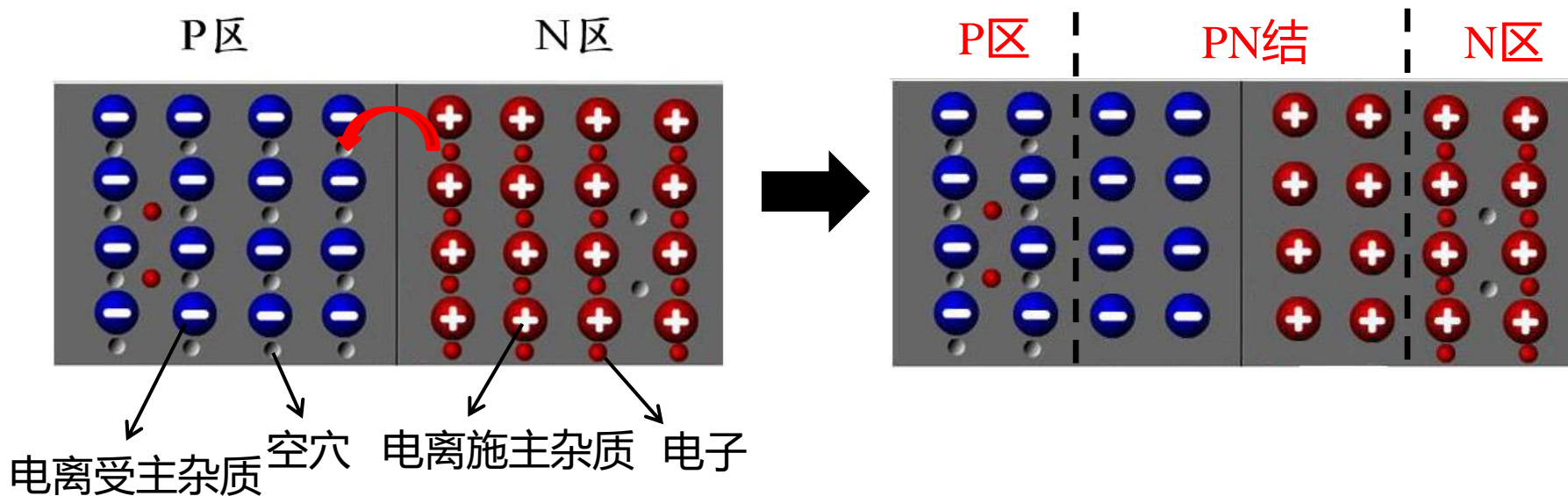
例：扩散法



**(线性)缓变结：** 在 $x_j$ 处，净杂质浓度为0，即为接触结界面，结附近，杂质分布是缓变分布的，可以用直线近似，其斜率称为杂质浓度梯度。

# 热平衡PN结的形成过程

## 主要步骤1：载流子扩散



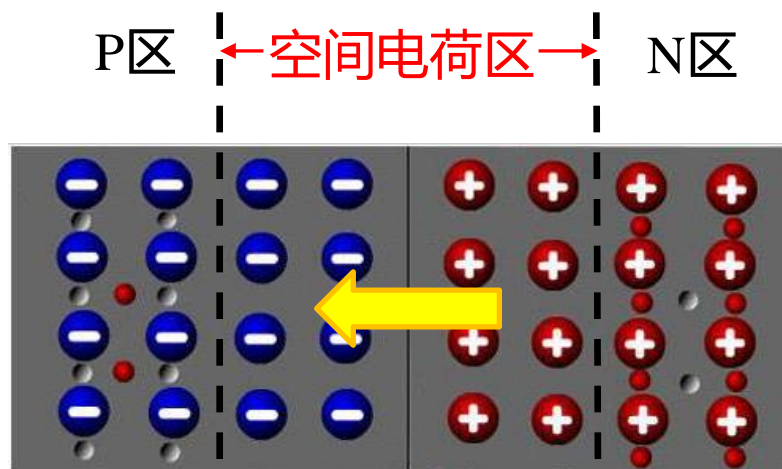
由于有载流子浓度梯度存在，载流子发生扩散

电子：N区  $\longrightarrow$  P区

空穴：P区  $\longrightarrow$  N区

# 热平衡PN结的形成过程

## 主要步骤2：产生自建电场

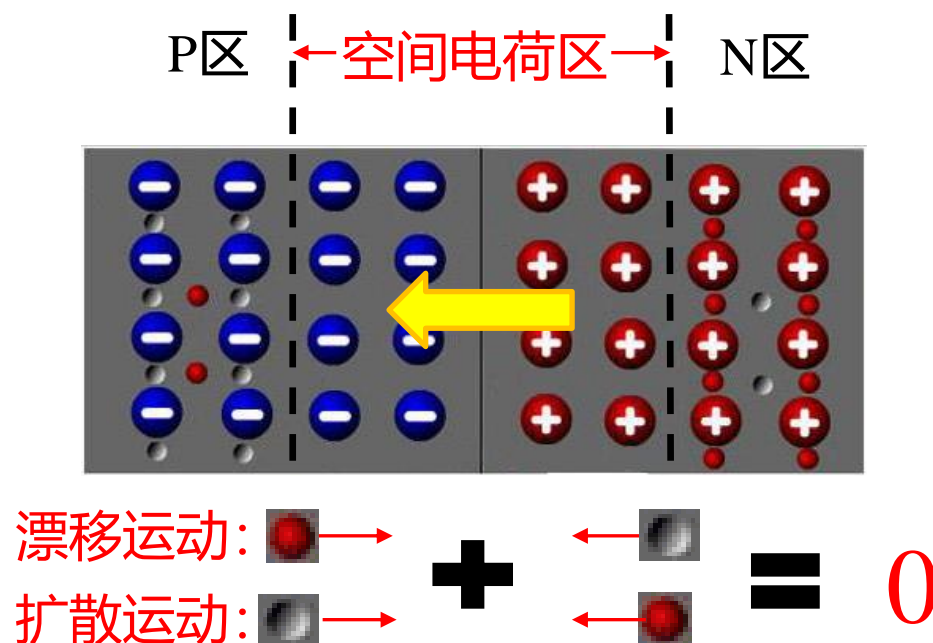


自建电场

界面附近P区N区电中性被破坏，产生自建电场(内建电场)，留下的施主离子和受主离子是固定无法移动的，称为空间电荷，空间电荷存在的区域叫做空间电荷区。

# 热平衡PN结的形成过程

## 主要步骤3：漂移、扩散达到平衡



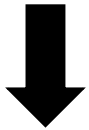
- ◆ 自建电场引起少子漂移电流，阻碍多子扩散；
- ◆ 当漂移运动和扩散运动相互抵消时，即大小相等、方向相反，PN结达到动态平衡，净电流为零。



# 总结：PN结形成机理

**PN结器件：双极型器件！**

浓度差



多子的扩散运动 → 杂质离子形成空间电荷区



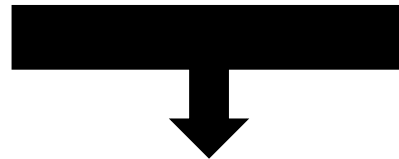
空间电荷区形成内电场



内电场促使少子漂移



内电场阻止多子扩散



形成PN结

# 费米能级

热平衡条件下，根据量子统计理论，服从泡利不相容原理的电子遵循费米分布。一个能量为 $E$ 的量子态被电子占据的几率为：

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

$f(E)$ 称为费米分布函数， $E_F$ 是费米能级， $k$ 或者 $k_B$ 是波耳兹曼常数， $T$ 是温度

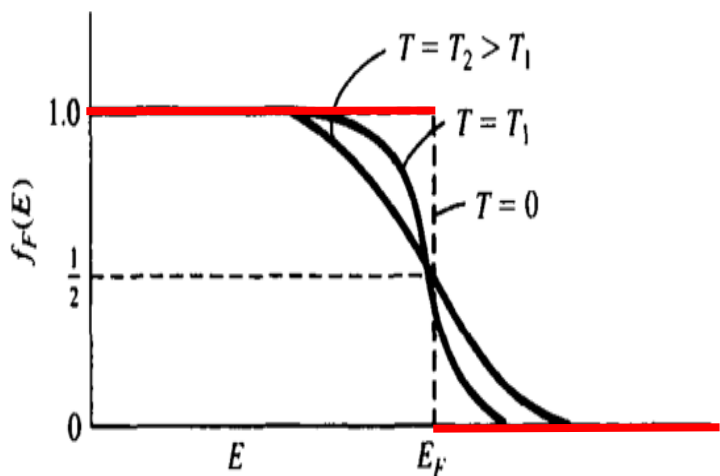


图 3.31 不同温度下的费米概率函数与能量的关系

$T = 0\text{K}$ 时：

若 $E < E_F$ ，则 $f(E) = 1$

若 $E > E_F$ ，则 $f(E) = 0$

$T > 0\text{K}$ 时：

若 $E < E_F$ ，则 $f(E) > 1/2$

若 $E = E_F$ ，则 $f(E) = 1/2$

若 $E > E_F$ ，则 $f(E) < 1/2$

例：  $T > 0\text{K}$ ，  $E - E_F = 5kT$ ， 电子占据的几率 $f(E) = 0.7\%$ ；  $E - E_F = -5kT$ ， 电子占据的几率 $f(E) = 99.3\%$ 。

# 费米能级

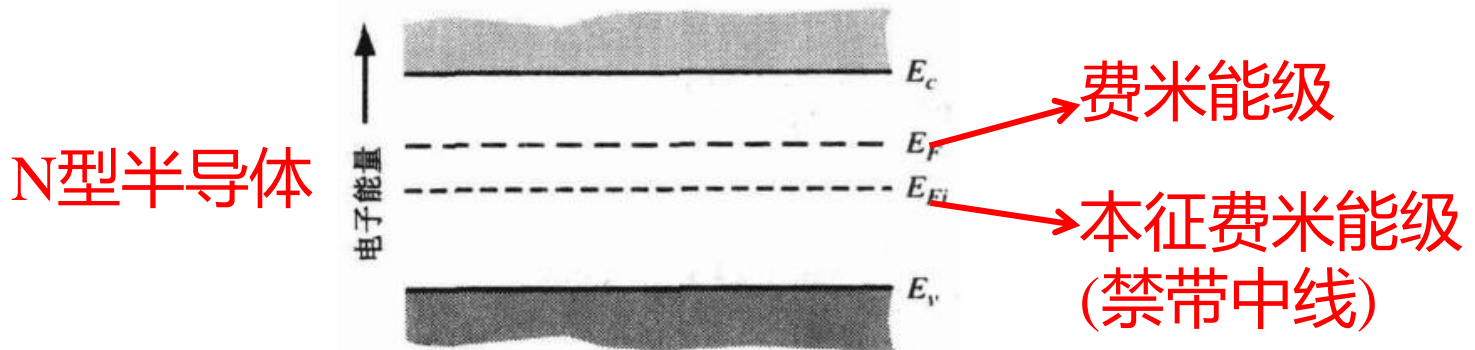
费米能级 $E_F$ 是量子态被电子占据的**分界线**，高于 $E_F$ 的量子态基本是空的，低于 $E_F$ 的量子态基本被电子占据，而电子占据费米能级的概率在各种温度下总是**1/2**。费米能级位置较高，说明有较多的能量较高的量子态上有电子。

半导体的费米能级一般都位于禁带之中，并且满足：

$$E_c - E_F \gg kT \quad \text{或} \quad E_F - E_v \gg kT$$

$$f_B(E) = \exp\left(-\frac{E - E_F}{kT}\right)$$

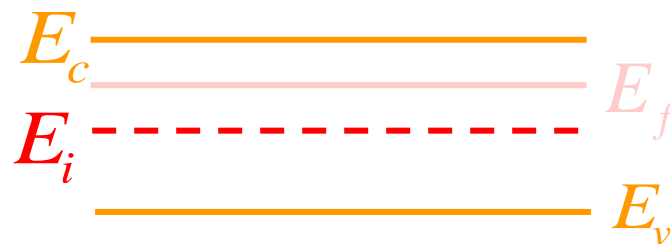
因此对于价带或导带中的所有量子态，电子和空穴都可以用玻耳兹曼分布描述。由于分布几率随能量按指数衰减，因此导带绝大部分电子分布在导带底附近，价带绝大部分空穴分布在价带顶附近，说明：起作用的载流子都在能带极值附近。



# 热平衡条件 ( $V_{appl}=0V$ )



Silicon  
(p-type)



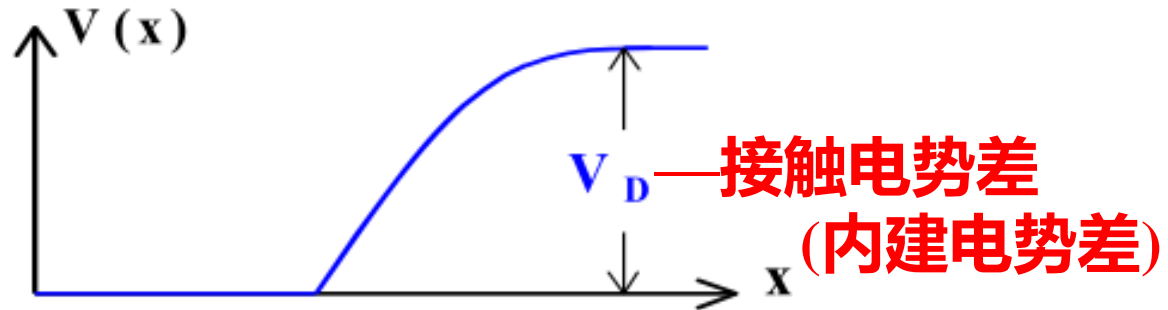
Silicon  
(n-type)

# 接触电势差的产生

设P区电势为0



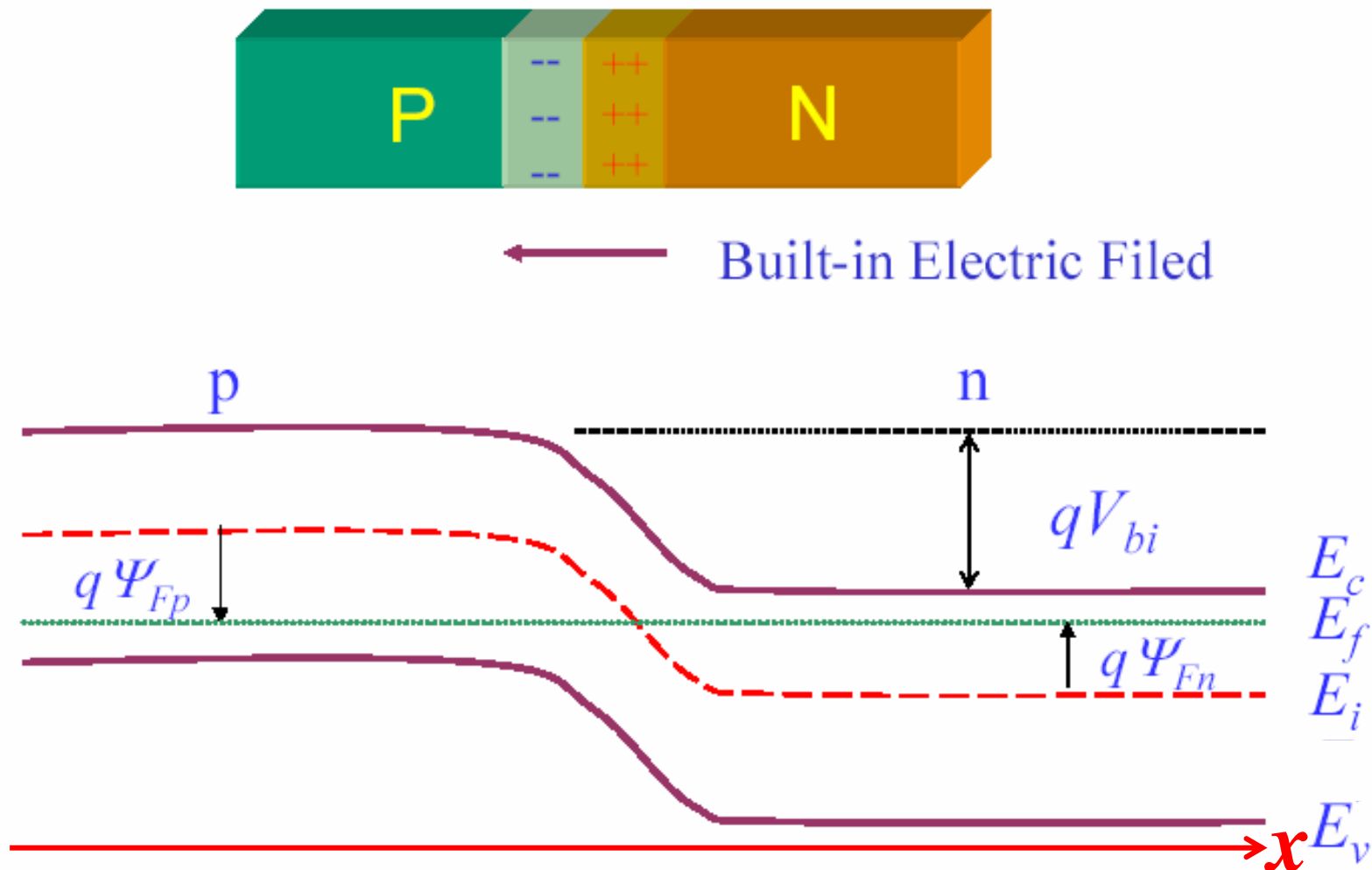
电场对正电荷  
做功，沿电场  
方向正电荷的  
电势降低



电子能量



# 热平衡条件PN结能带图



$V_{bi}$ : 接触电势差,  $\psi_{Fp}$ : P区内电势,  $\psi_{Fn}$ : N区内电势

# 1. 热平衡下P区与N区的费米能级一致

平衡时净电流为0，以电子电流为例

$$J_n = J_{n,diff} + J_{n,dr} = 0$$

$$J_n = qn_0\mu_n E + qD_n \frac{dn_0}{dx} \quad (\text{扩散漂移电流公式直接代入})$$

$$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$\frac{dn_0}{dx} = -n_0 \frac{1}{kT} \frac{dE_i}{dx} + n_0 \frac{1}{kT} \frac{dE_F}{dx}$$

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} = E_c - \frac{E_g}{2} \quad (E_g \text{ 为常数})$$

$$E_c(x) = E_{c0} + (-q)V(x)$$

$$\frac{dE_i}{dx} = -q \frac{dV(x)}{dx} = qE$$

$$\frac{dn_0}{dx} = -n_0 \frac{qE}{kT} + n_0 \frac{1}{kT} \frac{dE_F}{dx}$$

# 1. 热平衡下P区与N区的费米能级一致

$$\frac{dn_0}{dx} = -n_0 \frac{qE}{kT} + n_0 \frac{1}{kT} \frac{dE_F}{dx}$$

$$J_n = qn_0\mu_n E + qD_n \frac{dn_0}{dx}$$

$$J_n = qn_0\mu_n E - qD_n n_0 \frac{qE}{kT} + n_0 \frac{qD_n}{kT} \frac{dE_F}{dx} = 0$$

Einstein关系:

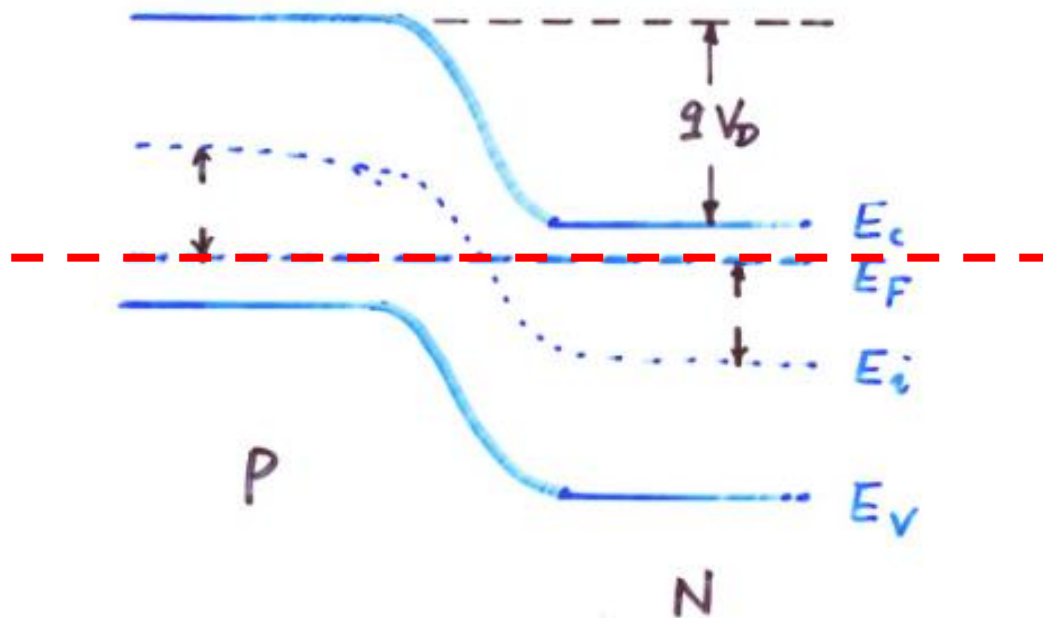
$$D/\mu = kT/q$$

$$\boxed{\frac{dE_F}{dx} = 0}$$

从费米能级意义出发，电子从费米能级高的N区流向费米能级低的P区，空穴则从P区流向N区，因而 $E_{Fn}$ 不断下移， $E_{Fp}$ 不断上移，直至 $E_{Fn}=E_{Fp}$

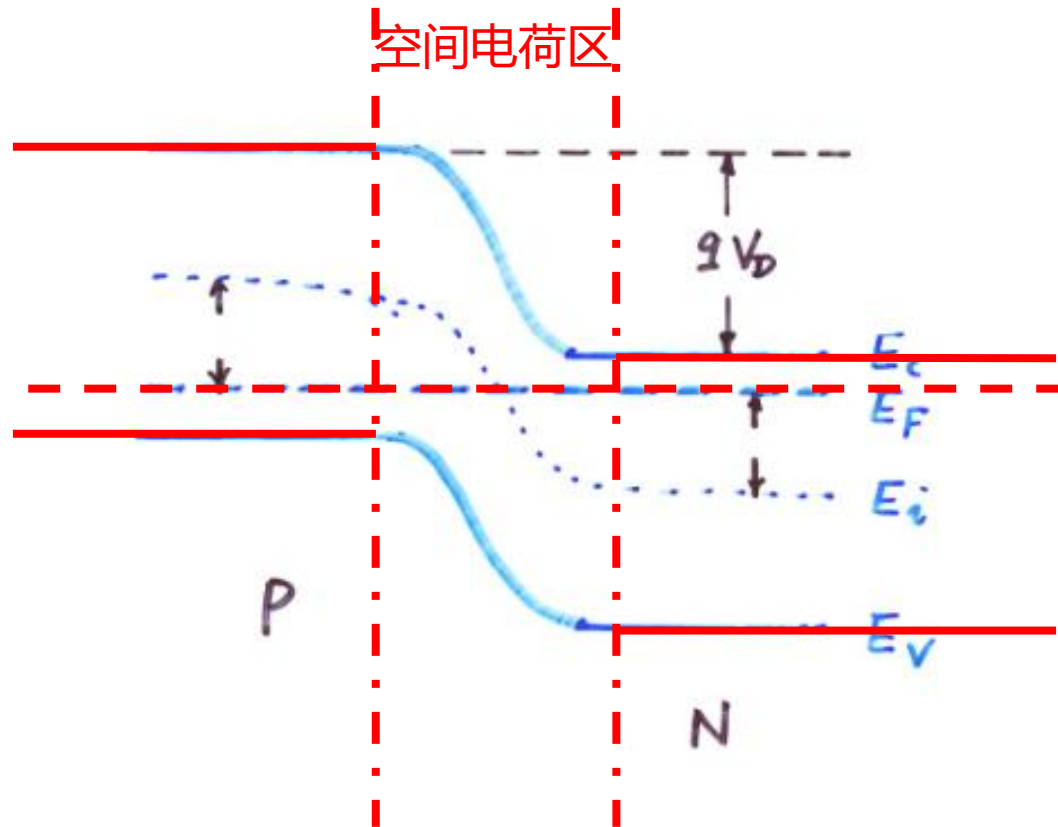


## 2. PN结能带形成过程



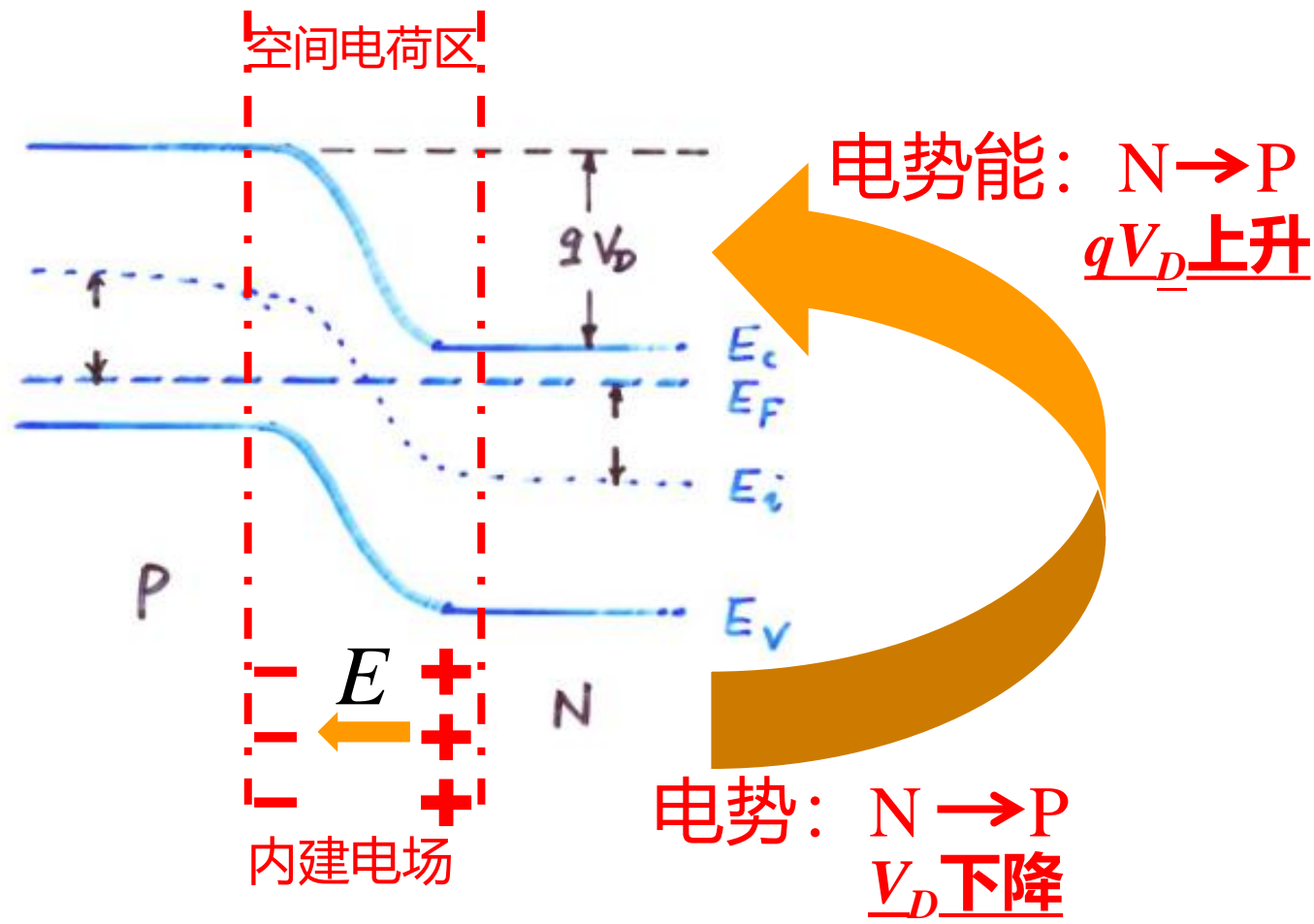
平衡态下PN结中费米能级相等

## 2. PN结能带形成过程



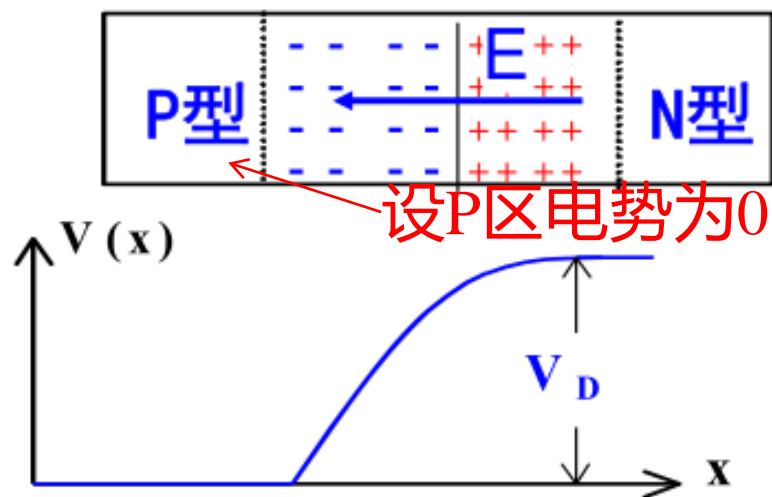
半导体远离PN结区部分呈电中性，  
与未接触前能带一致，不存在电场

## 2. PN结能带形成过程

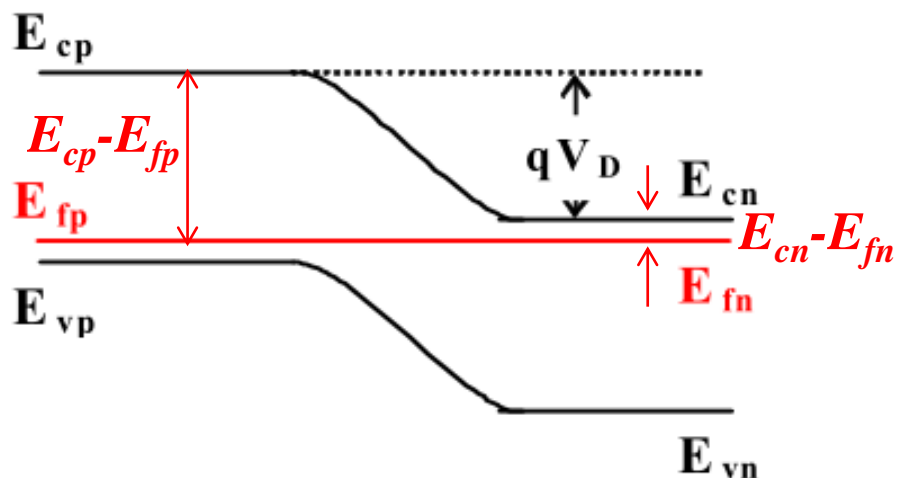


空间电荷区内能带发生弯曲，电场强度越强，曲线弯曲越厉害，电子从N区到P区需跨过势垒（空穴同理）

### 3. 内建电势 (接触电势差)



$V_D$ : 半导体接触电势差



求  $V_D$

求  $qV_D$

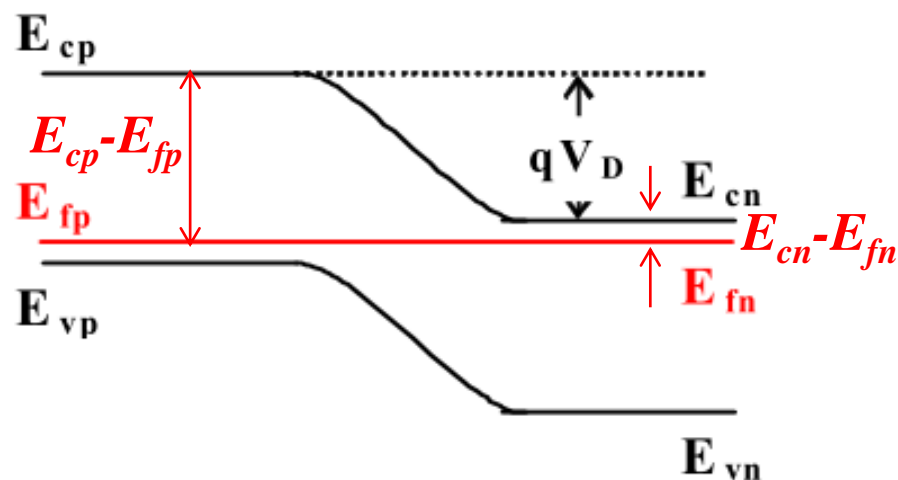
$$qV_D = (E_{cp} - E_{fp}) - (E_{cn} - E_{fn})$$

$$qV_D = E_{F(n)} - E_{F(p)}$$

(接触前费米能级的差)

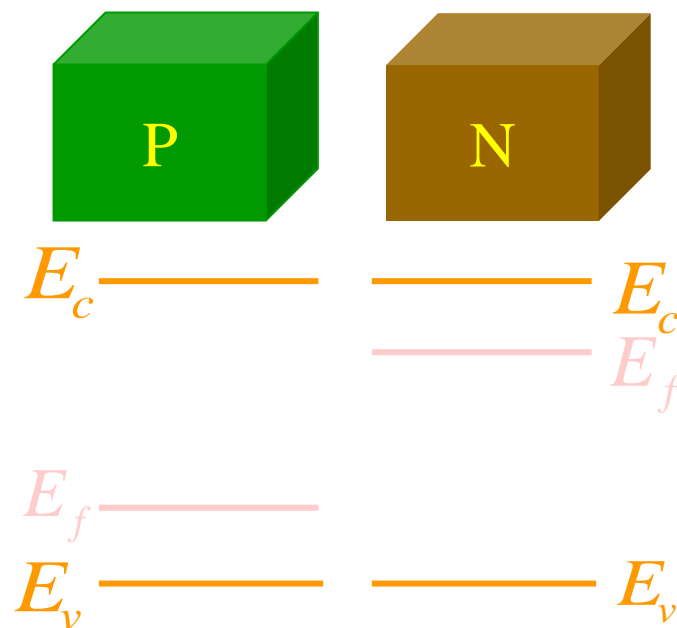
### 3. 内建电势（接触电势差）

接触后



$$qV_D = (E_{cp} - E_{fp}) - (E_{cn} - E_{fn})$$

接触前

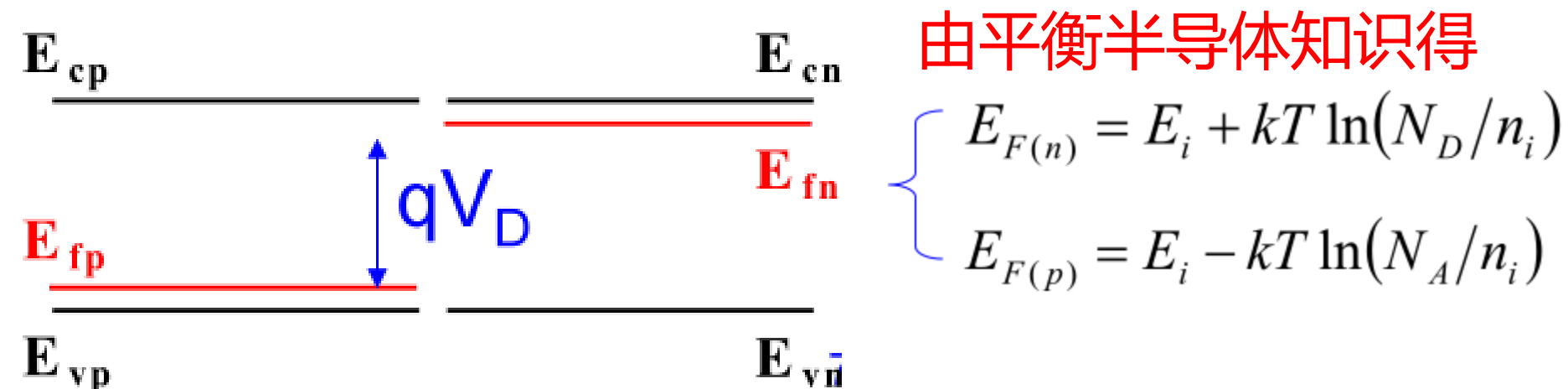


$$qV_D = E_{F(n)} - E_{F(p)}$$

(接触前费米能级的差)

### 3. 内建电势（接触电势差）

$$qV_D = E_{F(n)} - E_{F(p)}$$



例：  $N_A=10^{17}\text{cm}^{-3}$ ,  $N_D=10^{15}\text{cm}^{-3}$



$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

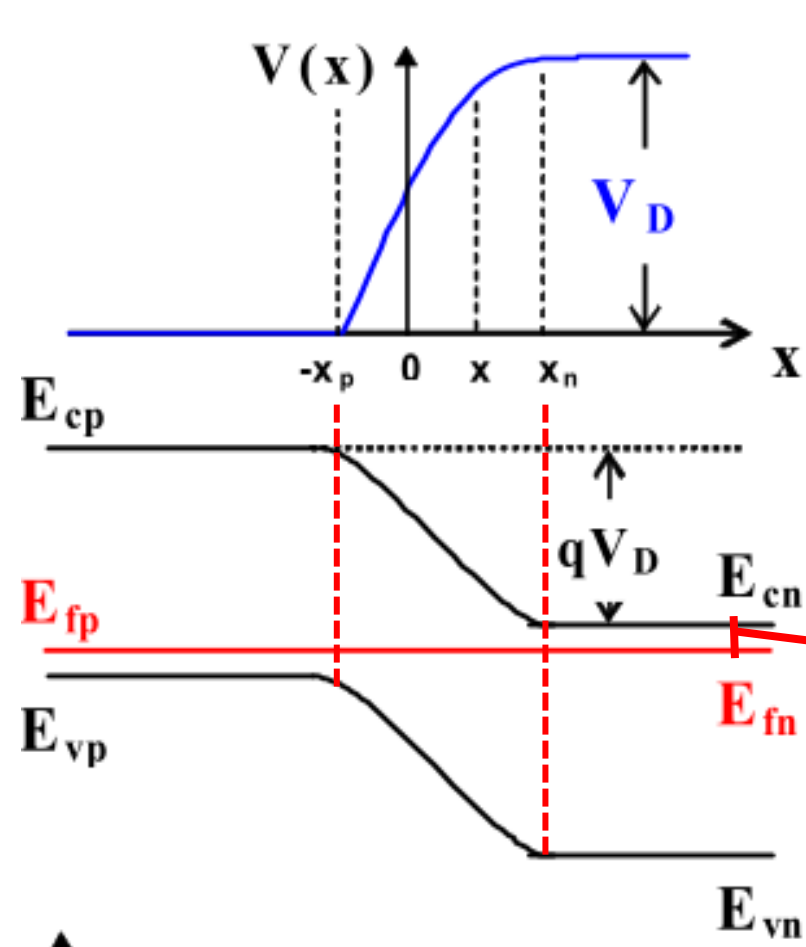
**Si:**  $V_D \approx 0.7\text{V}$

**Ge:**  $V_D \approx 0.3\text{V}$

$(n_{i(\text{Si})}=1.02 \times 10^{10}\text{cm}^{-3})$

$n_{i(\text{Ge})}=2.33 \times 10^{13}\text{cm}^{-3})$

# 4. PN结的载流子分布



$x_p$ : P型区空间电荷区边界  
 $x_n$ : N型区空间电荷区边界  
 $x=0$ : PN结交界面  
 求 $x$ 处载流子分布

由平衡半导体知识得

$$n(x) = N_c \exp\left(-\frac{E_c(x) - E_f}{kT}\right)$$

$$n(x) = N_c \exp\left(-\frac{E_c(x) - E_f + E_{cn} - E_{cn}}{kT}\right)$$

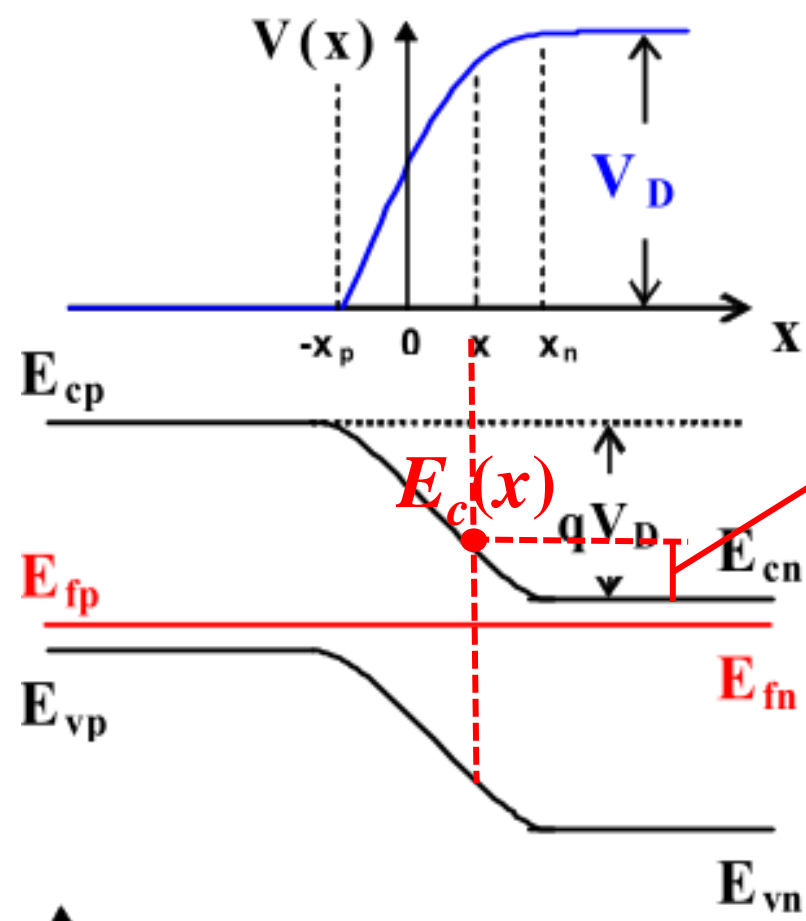
N区电子浓度

$$n_{n0} = N_c \exp\left(-\frac{E_{cn} - E_f}{kT}\right)$$

$n_{n0}$ : N区平衡多数载流子-电子浓度

代入  
上式

## 4. PN结的载流子分布



得 
$$n(x) = n_{n0} \exp\left(-\frac{E_c(x) - E_{cn}}{kT}\right)$$

$$E_c(x) - E_{cn} = qV_D - qV(x)$$

例: 
$$n(-x_p) = n_{n0} \exp\left(-\frac{E_{cp} - E_{cn}}{kT}\right)$$

$$= n_{n0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right) = n_{p0}$$

- ◆ 从  $E_f$  解释,  $E_c$  离  $E_f$  越远, 电子浓度越低
- ◆ 结区内载流子浓度可通过中性区内载流子浓度与势垒高度结合得到

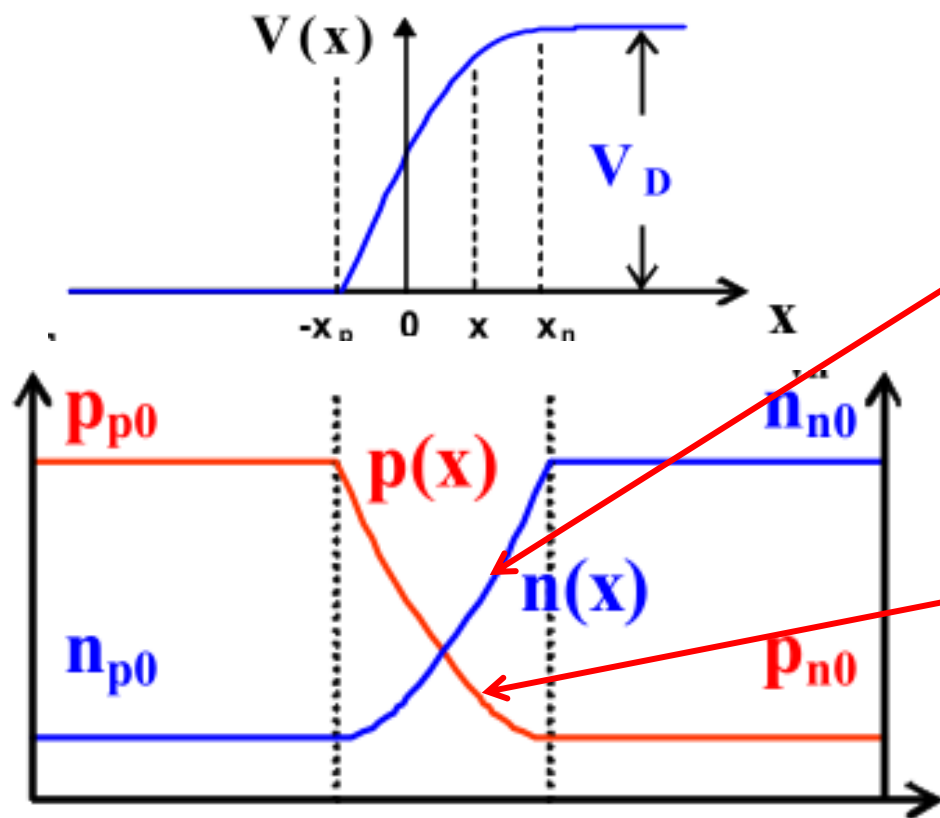
$n_{p0}$ : P区平衡少数载流子-电子浓度

同理可得

$$n(x) = n_{p0} \exp\left[\frac{qV(x)}{kT}\right]$$



## 4. PN结的载流子分布



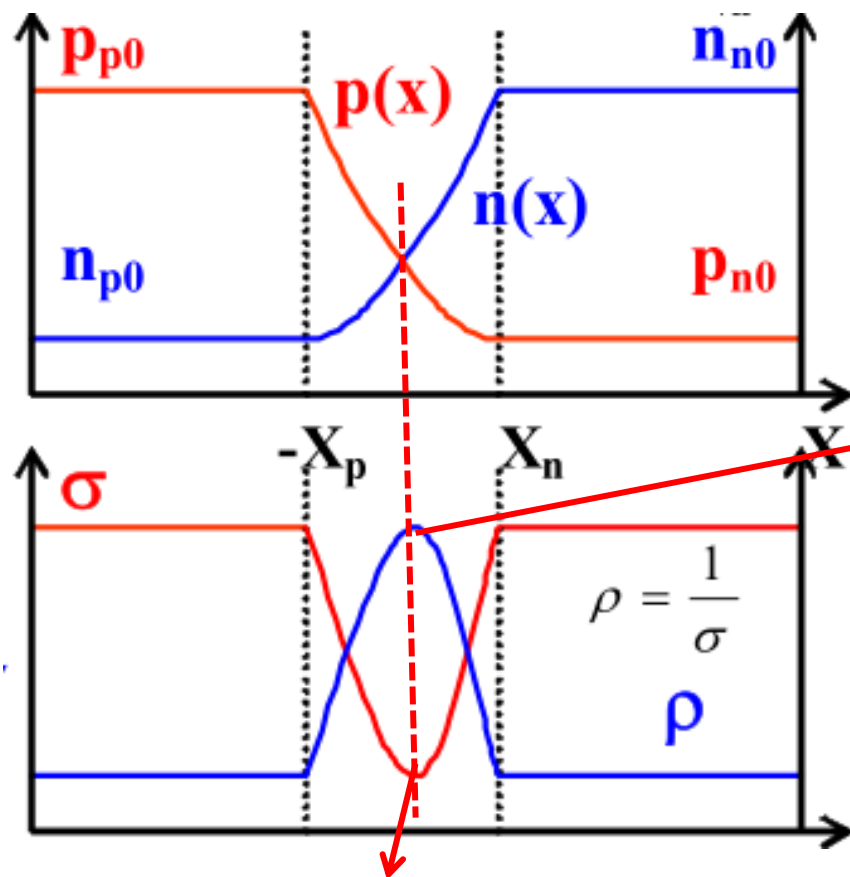
$$n(x) = n_{p0} \exp\left[\frac{qV(x)}{kT}\right]$$

同理可得

$$p(x) = p_{p0} \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right]$$

$p_{n0}$ : N区平衡少数载流子-空穴浓度  
 $p_{p0}$ : P区平衡多数载流子-空穴浓度

## 4. PN结的载流子分布



$$\sigma = qn\mu_n + qp\mu_p$$

电阻率最大，说明外加电压时，电压将大部分降落在结区

载流子浓度最低  
电导率最小

## 4. PN结的载流子分布

### 练习-势垒区中载流子浓度估算

$$n(x) = n_{p0} \exp\left[\frac{qV(x)}{kT}\right] = n_{n0} \exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{kT}\right]$$

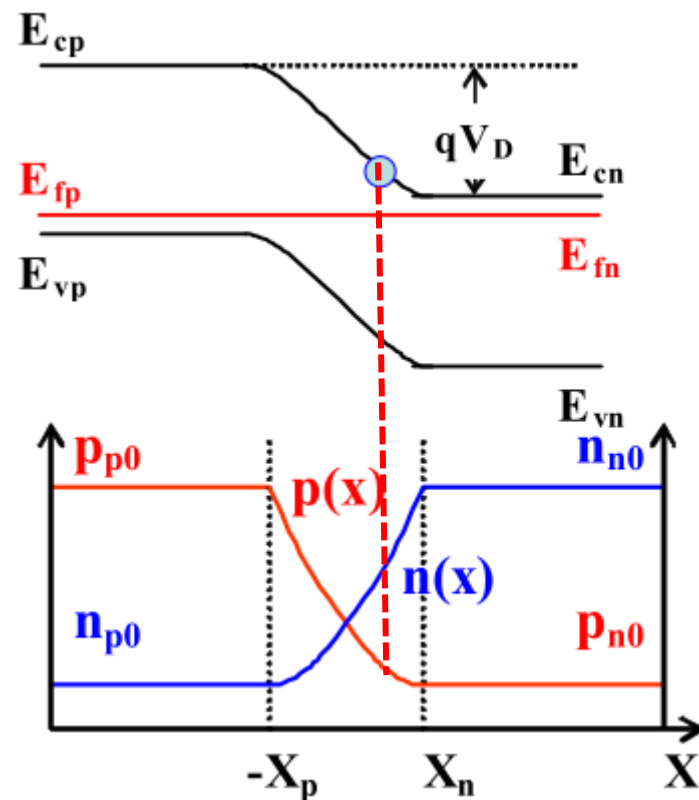
$$p(x) = p_{p0} \exp\left[-\frac{qV(x)}{kT}\right]$$

设位置 $x$ 在  $E_c(x) = E_{cn} + 0.1\text{eV}$ ,  $V_D = 0.7\text{eV}$   
( $kT/q = 0.026\text{V}$ )

$$V(x) = V_D - 0.1\text{eV}$$

$$n(x) = n_{n0} \exp(-0.1/0.026) \approx N_D/50$$

$$p(x) = p_{p0} \exp(-0.6/0.026) \approx 10^{-10} N_A$$



结区内载流子浓度远远低于中性区多子浓度  $\rightarrow$  耗尽层近似

## 5. PN结的耗尽近似理论

- 耗尽近似理论，又称耗尽近似条件

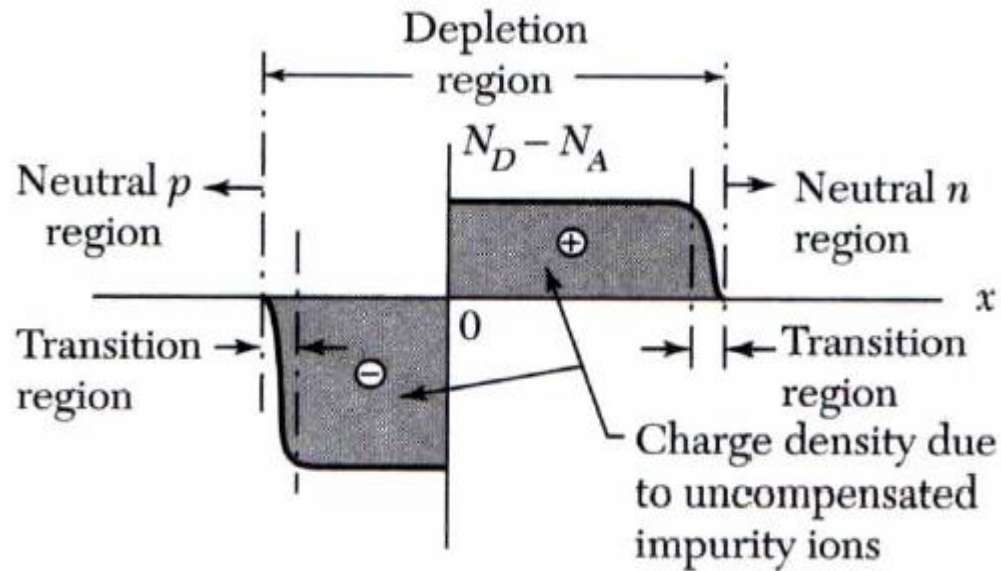
在PN结的理论分析中，为简化问题的处理，势垒区中载流子浓度可以忽略，常常假设空间电荷区中正负电荷密度完全由电离杂质浓度决定。

- 耗尽区

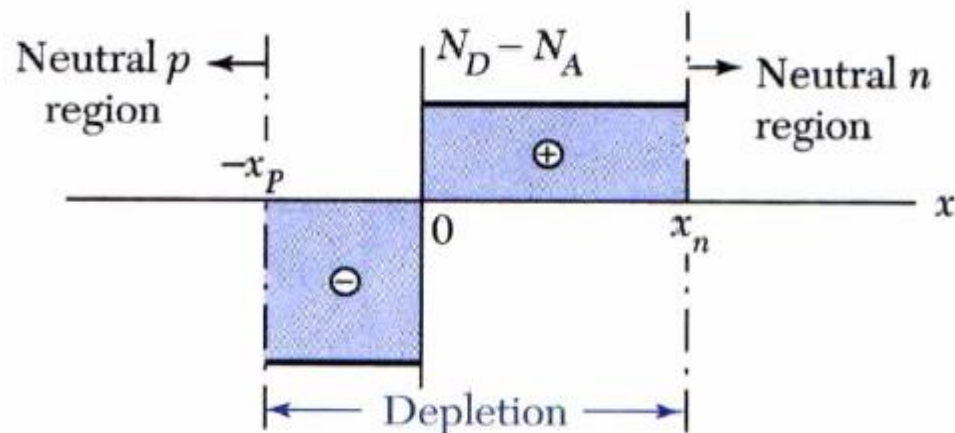
从中性区向结移动时，将遇到一个狭窄的过渡区，此处的杂质离子部分地被可动载流子补偿，经过过渡区就是完全耗尽区，其中可动的载流子浓度为零，这个区称为耗尽区，也叫空间电荷区。

- 一般地，对Si, GaAs的PN结，过渡区的宽度远小于耗尽区，可以忽略过渡区。

# 耗尽区（空间电荷区）、过渡区



(c)



## §2.2 PN结电流电压特性

### 1. 平衡态PN结中的电场和电势分布



电场只分布在结区，结外为0

- 求解电场电势需用到泊松方程，就必须知道杂质分布。
- PN结大致可以分为两种：
  - (1) **突变结**：PN结两区中的杂质浓度为均匀分布，且在交界面处发生杂质突变。如果一区的杂质浓度远高于另一区，称为单边突变结  $P^+N$  或  $N^+P$  结。由合金、浅扩散或低能离子注入形成。
  - (2) **线性缓变结**：结附近，其杂质分布是缓变分布的，可以用直线近似，其斜率称为杂质浓度梯度。由深扩散或高能离子注入制得的结。

# (1) 突变结

P<sup>+</sup>N结为例

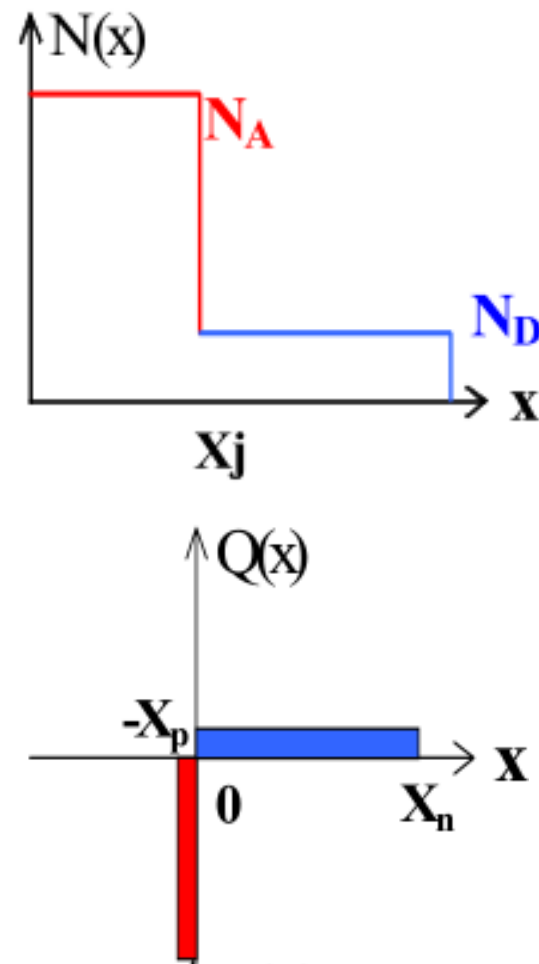
电荷分布

$$\rho(x) = q(\underbrace{N_D}_{\text{电离施主}} - \underbrace{N_A}_{\text{电离受主}} + \underbrace{p-n}_{\text{载流子}})$$

耗尽近似  
 $p=0, n=0$

$$\rho(x) = -qN_A, -x_p \leq x \leq 0$$

$$\rho(x) = qN_D, 0 \leq x \leq x_n$$



# (1) 突变结

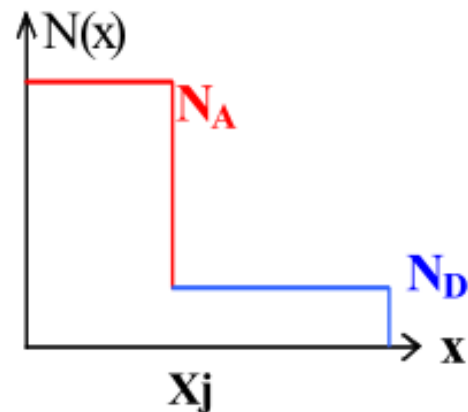
P<sup>+</sup>N结为例

**泊松方程**  
(电势与电荷密度的关系)

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

**电场表达式**

$$E(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = -\int \frac{d^2V}{dx^2} dx$$



可通过电荷分布 $\rho(x)$ 直接求解电场



# (1) 突变结

P<sup>+</sup>N结为例

电场分布

确定边界条件：  $x = -x_p$ 、 $x = x_n$  时  $E = 0$

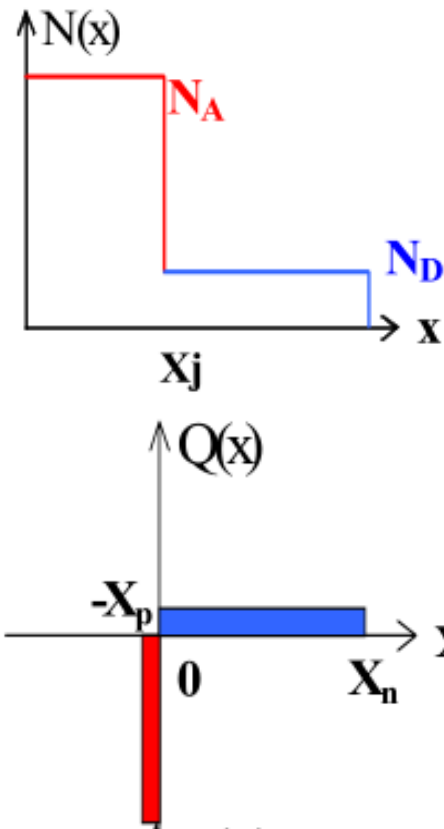
$$-x_p \leq x \leq 0$$

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

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

将  $x = -x_p$  时  $E = 0$  代入，得

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



# (1) 突变结

P+N结为例

电场分布

$$-x_p \leq x \leq 0$$

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

*Ep、En*  
绝对值  
均朝  
*x=0*处  
增大

同理  $0 \leq x \leq x_n$

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

*Ep、En*最大值是否相等?

负号是由于我们将+x方向设置为P→N, 与内建电场方向相反

∴ 介质内部任意处电位移相等

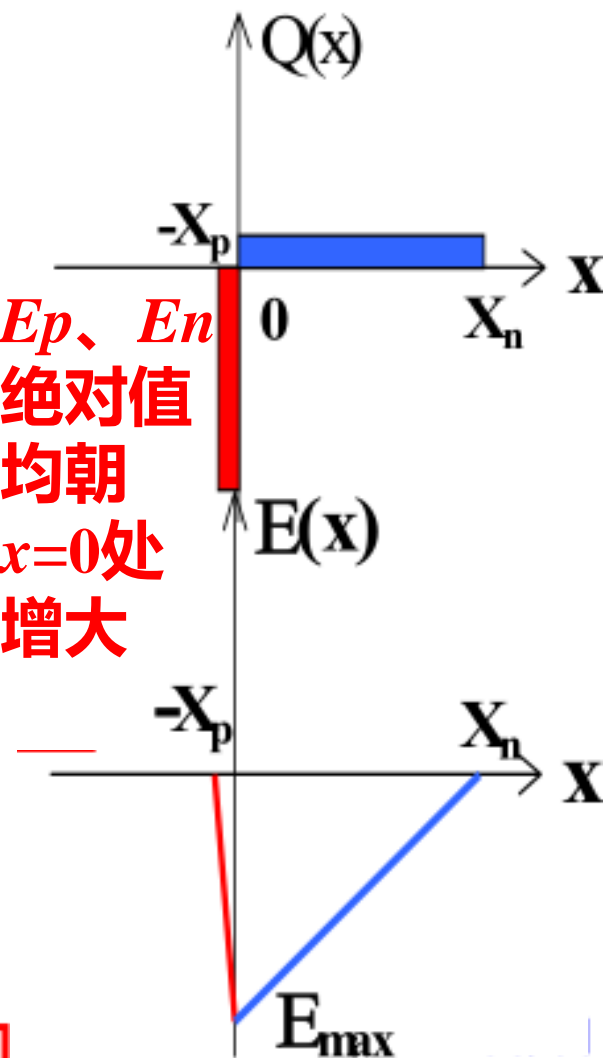
$$\vec{D}_1 = \vec{D}_2$$

$$\epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}_1 = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E}_2$$

$$\therefore x = 0$$

$$E_m = -\frac{qN_A x_p}{\epsilon_r \epsilon_0} = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

∴ 任意处电场相等



# (1) 突变结

P<sup>+</sup>N结为例

$$E_m = -\frac{qN_A x_p}{\epsilon_r \epsilon_0} = -\frac{qN_D x_n}{\epsilon_r \epsilon_0}$$

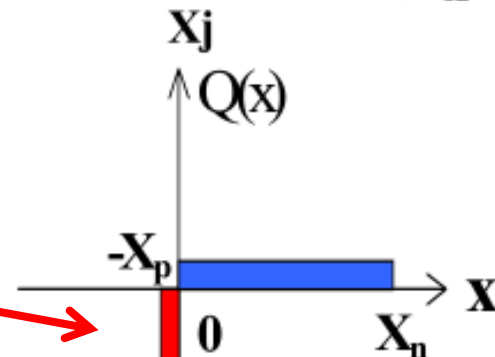
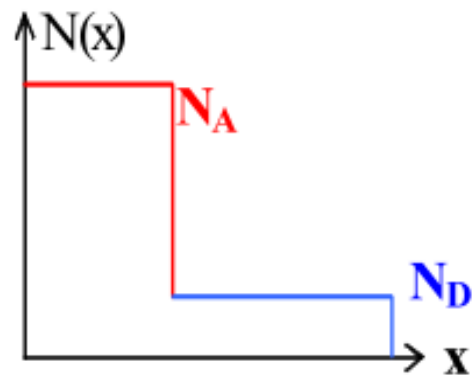
正负电荷总量相等

$$qN_A x_p = qN_D x_n$$

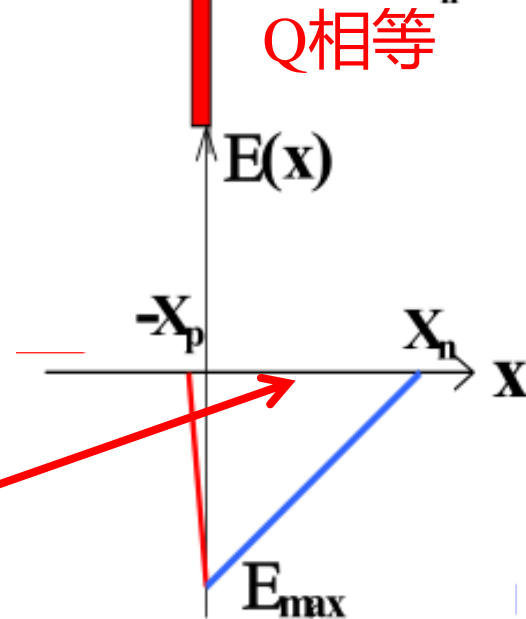
$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$$N_A \gg N_D$$

$$x_n \gg x_p$$



Q相等



空间电荷区宽度向低掺杂浓度一侧展宽

# (1) 突变结

P<sup>+</sup>N结为例

电场分布

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

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

电势分布

$$V(x) = -\int E(x)dx$$

确定边界条件：  $x=-x_p$ ,  $V=0$ ;  $x=x_n$ ,  $V=V_D$

$-x_p \leq x \leq 0$  代入边界条件

$$V(x) = \int \frac{qN_A}{\epsilon_r\epsilon_0}(x+x_p)dx = \frac{qN_A}{2\epsilon_r\epsilon_0}(x+x_p)^2 + C, \quad C=0$$

# (1) 突变结

P+N结为例

$$-x_p \leq x \leq 0$$

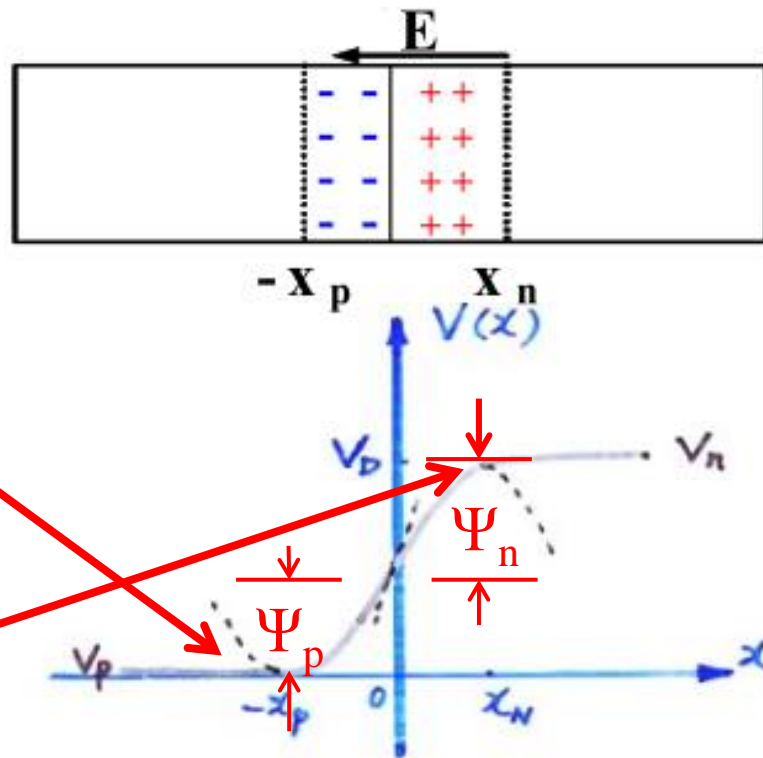
$$V_p(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_r\epsilon_0}(x+x_p)^2 \quad V_{\min}=0$$

$$0 \leq x \leq x_n$$

$$V_n(x) = V_D - \frac{qN_D}{2\epsilon_r\epsilon_0}(x_n-x)^2$$

$$V_{\max}=V_D$$

$$\Psi_p + \Psi_n = V_D$$



PN结内电势分布是由两段抛物线的半段拼凑在一起的

# (1) 突变结

P+N结为例

电势分布

$$V_p(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_r\epsilon_0}(x+x_p)^2$$

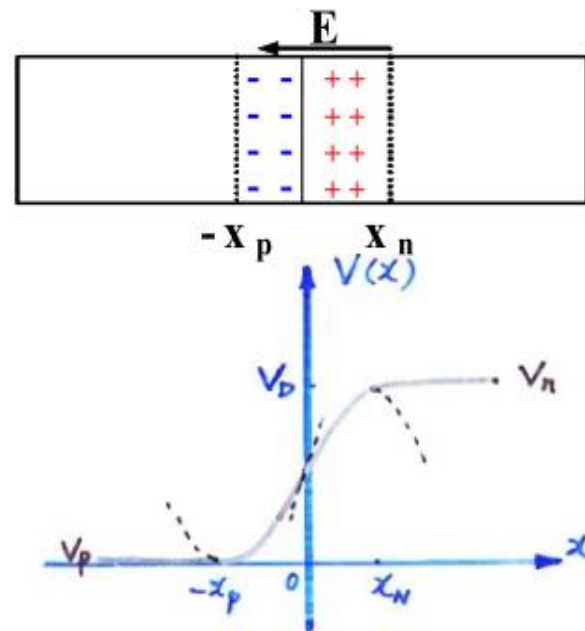
$$V_n(x) = V_D - \frac{qN_D}{2\epsilon_r\epsilon_0}(x_n-x)^2$$

$x=0$  时  $V_p(x) = V_n(x)$

得

$$V_D = \frac{qN_A}{2\epsilon_r\epsilon_0}x_p^2 + \frac{qN_D}{2\epsilon_r\epsilon_0}x_n^2$$

未知数



# (1) 突变结

P+N结为例

电势分布

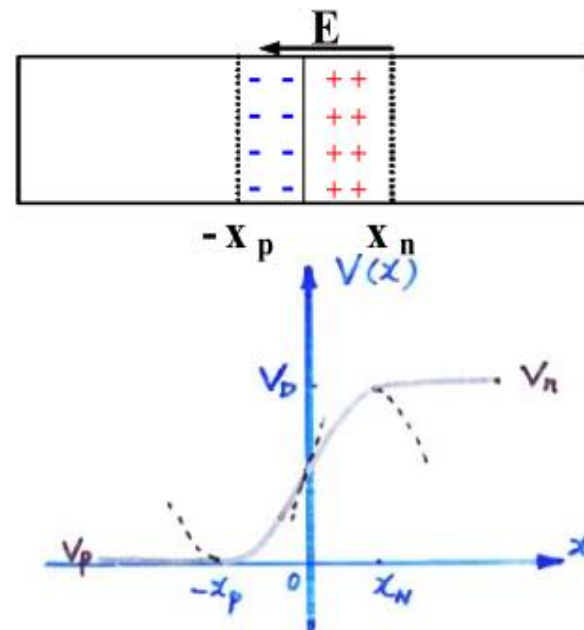
设势垒宽度  $X_D = x_p + x_n$

$$V_D = \frac{qN_A}{2\epsilon_r\epsilon_0} x_p^2 + \frac{qN_D}{2\epsilon_r\epsilon_0} x_n^2$$

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

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

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



$$V_D = \frac{q}{2\epsilon_r\epsilon_0} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} X_D^2$$



$$X_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0 (N_A + N_D) V_D}{q N_A N_D}}$$

(无近似情况)

# (1) 突变结

P+N结为例

电势分布 (近似情况)

$$X_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0(N_A + N_D)V_D}{qN_A N_D}}$$

P+N结,  $N_A \gg N_D$   
分子分母同除 $N_A$

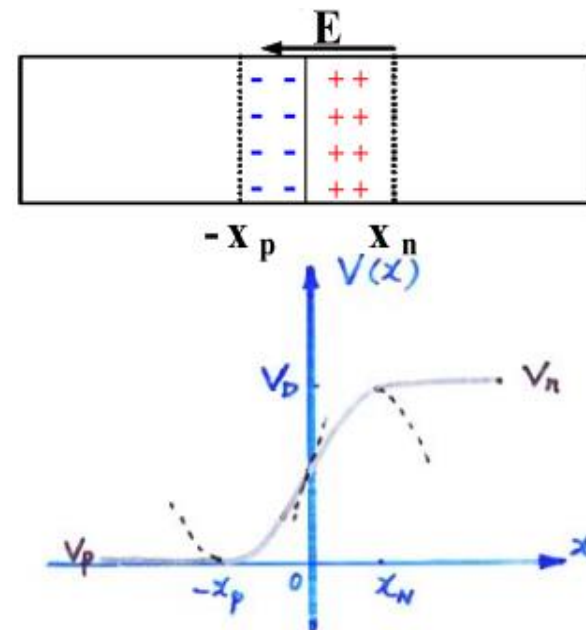
$$X_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0 V_D}{qN_D}}$$

$$X_D \approx x_n$$

N+P结,  $N_D \gg N_A$   
分子分母同除 $N_D$

$$X_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_r\epsilon_0 V_D}{qN_A}}$$

$$X_D \approx x_p$$



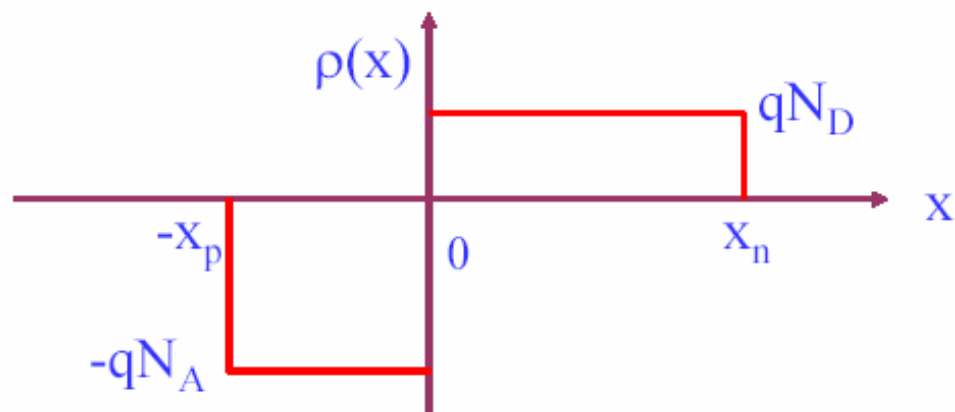
◆ 浓度不变, 势垒区宽度展宽, 内建势也增大

◆ 内建势不变, P区浓度不变, 增大 $N_D$ 需要减少势垒区宽度维持电荷相等

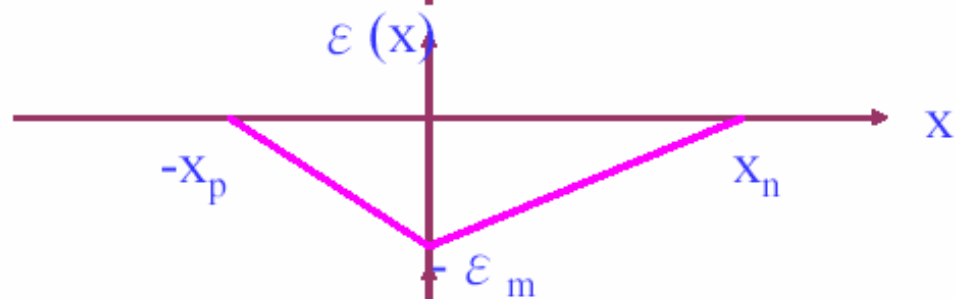


# 总结：突变结耗尽区特性

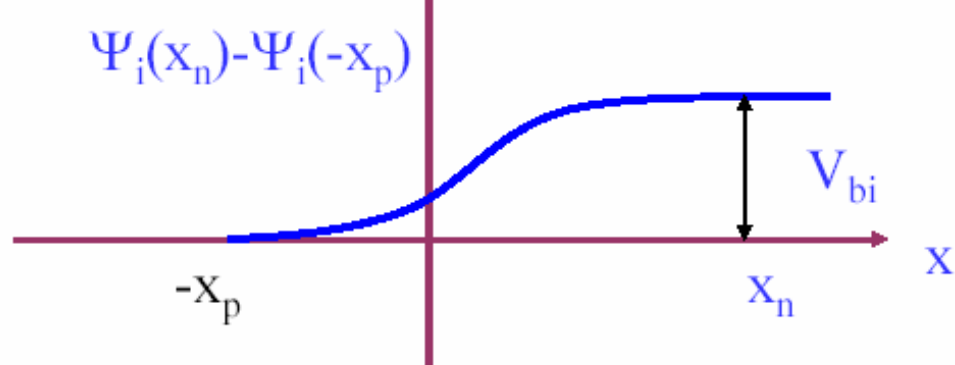
电荷分布



电场分布



电势分布



# 总结：突变结耗尽区宽度

$$X_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(N_A + N_D)V_D}{qN_A N_D}}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q} \cdot \frac{N_A}{(N_A + N_D) \cdot N_D} \cdot V_D}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q} \cdot \frac{N_D}{(N_A + N_D)N_A} \cdot V_D}$$

# 单边突变结

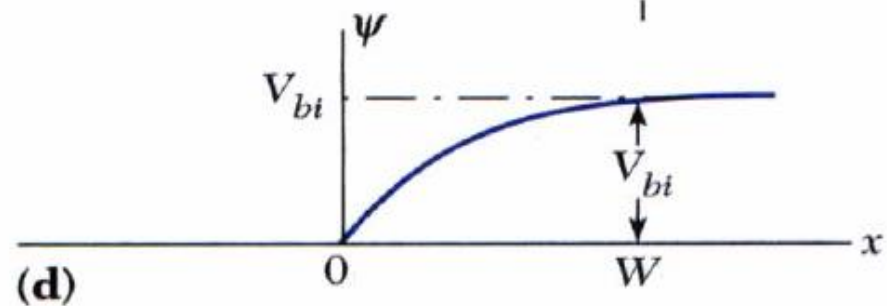
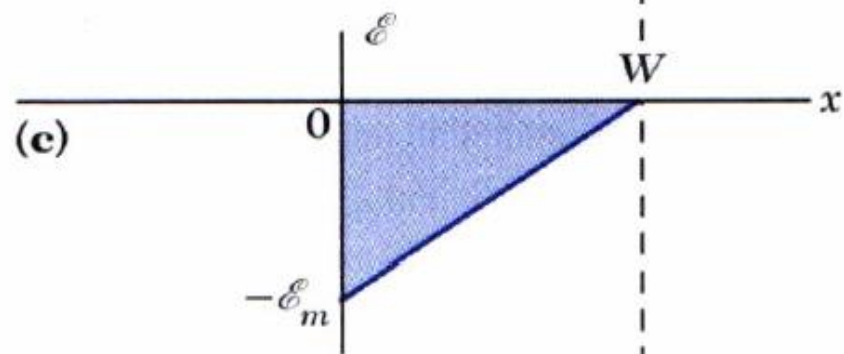
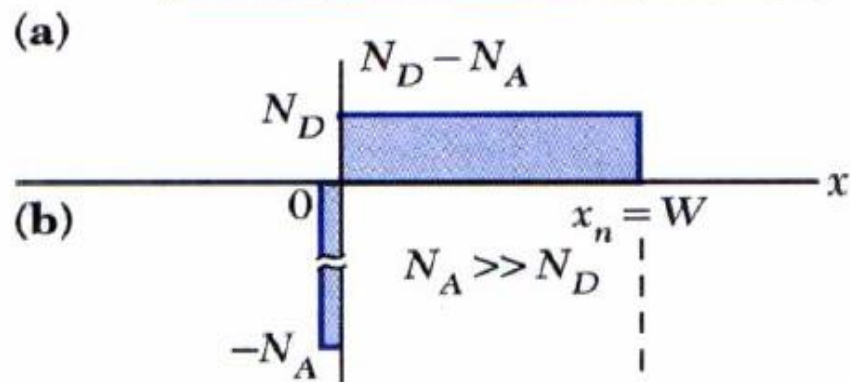
实际问题中经常遇到p区和n区掺杂浓度相差悬殊的情况,当突变结一边杂质浓度远大于另一边时,称为单边突变结。

对于单边突变结, 空间电荷区宽度简化为

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r V_D}{qN_B}}$$

式中 $N_B$ 为PN结轻掺杂区的浓度。

# 单边突变结



例：计算PN结中的空间电荷区宽度和PN结零偏时的最大电场。硅PN结所处的环境温度为 $T=300\text{K}$ ，掺杂浓度为 $N_A = 10^{16}\text{cm}^{-3}$ ， $N_D = 10^{15}\text{cm}^{-3}$ 。

- 内建电势差为

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$V_D = (0.0259) \ln[10^{16} \times 10^{15} / (1.02 \times 10^{10})^2] = \mathbf{0.655\text{V}}$$

- 空间电荷区宽度

$$X_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 (N_A + N_D) V_D}{q N_A N_D}}$$

$$X_D = \{2 * 11.9 * 8.854 \times 10^{-12} * 0.655 / 1.602 \times 10^{-19} * (10^{22} + 10^{21}) / (10^{22} \times 10^{21})\}^{1/2}$$

$$= \mathbf{0.974\mu\text{m}}$$

$$x_n = 0.8854\mu\text{m}, \quad x_p = 0.0885\mu\text{m}$$

- 最大电场

$$E_m = -\frac{q N_A x_p}{\varepsilon_r \varepsilon_0} = -\frac{q N_D x_n}{\varepsilon_r \varepsilon_0}$$

$$E_{\text{max}} = -(1.602 \times 10^{-19} * 10^{21} * 0.8854 \times 10^{-6}) / (11.9 * 8.854 \times 10^{-12})$$

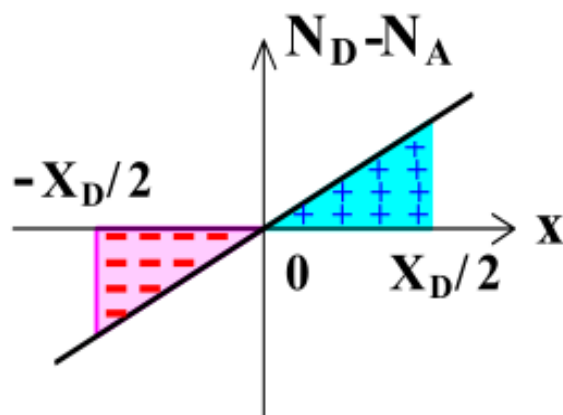
$$= \mathbf{-1.35 \times 10^4 \text{V/cm}}$$

# 突变结：载流子浓度修正

- 除了考虑杂质浓度外，还考虑到自由载流子的影响时，则在P型侧有 $\rho(x) = -q[N_A - p(x)]$ ，在N型侧有 $\rho(x) = q[N_D - n(x)]$ 的关系，由此进行简单修正后可以得到更精确的耗尽层宽度，这种简单模型对大多数突变结作出了相当好的预言。
- 对极不对称的结，或超浅结，为了得到精确结果，需进行数值分析。

## (2) 线性缓变结

- 对于线性缓变结，其杂质分布可表示为



$$N_D - N_A = a_j x$$

杂质浓度梯度

- 由结对称，两边耗尽区宽度为 $X_D/2$ ，利用耗尽近似条件，空间电荷分布为

$$\rho(x) = q(N_D - N_A) = qa_j x$$

$$-X_D/2 \leq x \leq X_D/2$$

## (2) 线性缓变结—电场分布

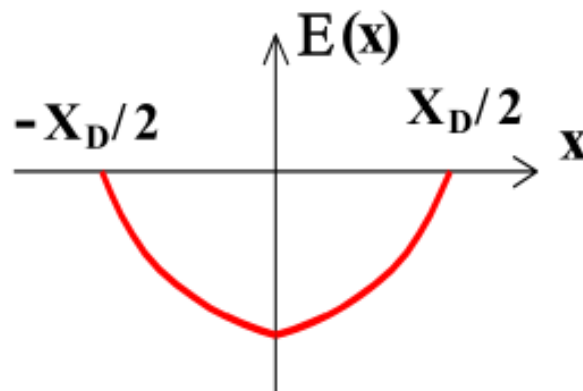
- 泊松方程

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{qa_jx}{\epsilon_s} \quad -X_D/2 \leq x \leq X_D/2$$

由电场边界条件： $x = \pm \frac{X_D}{2}, E(x) = 0$

可得电场分布：

$$E(x) = -\int \frac{d^2V}{dx^2} dx = \frac{qa_j}{2\epsilon_r\epsilon_0} \left[ x^2 - \left( \frac{X_D}{2} \right)^2 \right]$$





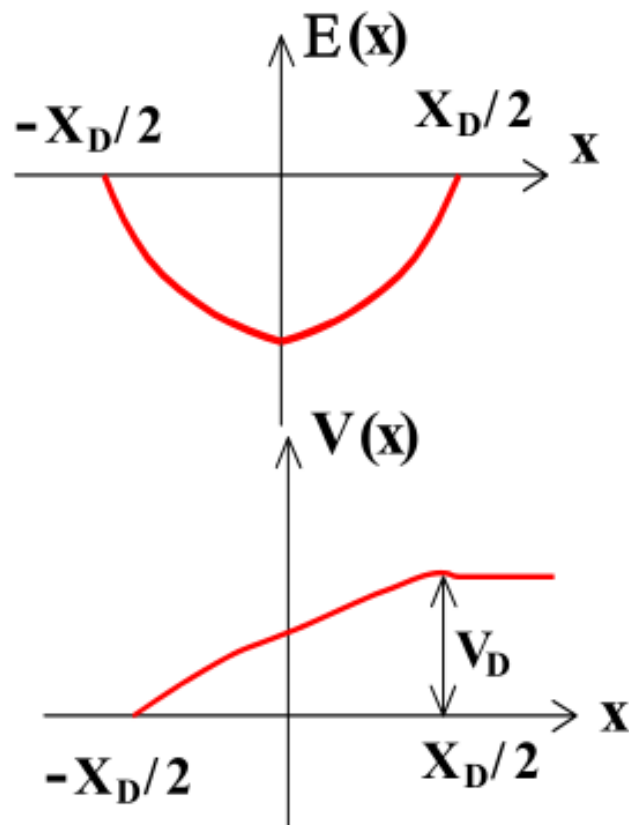
## (2) 线性缓变结—电势分布

- $x=0$ 处，电场有最大值。

$$|E_{\max}| = \frac{qa_j}{2\varepsilon_s} \cdot \left(\frac{X_D}{2}\right)^2 = \frac{qa_j}{8\varepsilon_s} X_D^2$$

- 电势分布

$$V(x) = -\int E(x)dx = \frac{qa_j}{2\varepsilon_r\varepsilon_0} \left[ \left(\frac{X_D}{2}\right)^2 x - \frac{1}{3}x^3 \right]$$



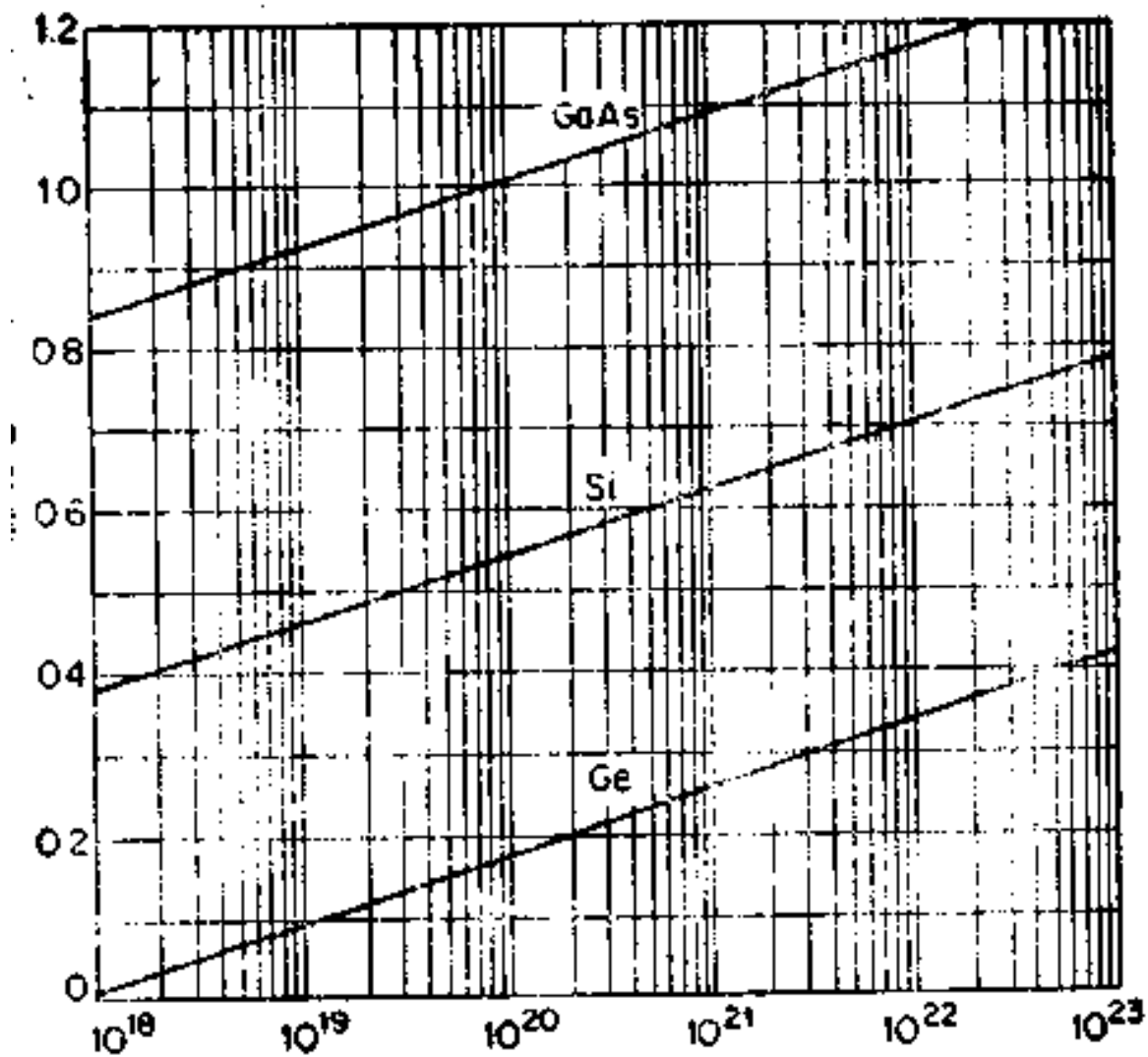
## (2) 线性缓变结—电势分布

- 可以求得内建电势：
$$V_D = V\left(\frac{X_D}{2}\right) - V\left(-\frac{X_D}{2}\right) = \frac{qa_j}{12\epsilon_r\epsilon_0} X_D^3$$
- 耗尽区宽度：
$$X_D = \left(\frac{12\epsilon_r\epsilon_0 V_D}{qa_j}\right)^{\frac{1}{3}}$$

如果把线性缓变结看成由无数薄层组成，每一薄层掺杂浓度均匀，则类似于突变结，由此内建电势可由耗尽区边缘处的杂质浓度表示：

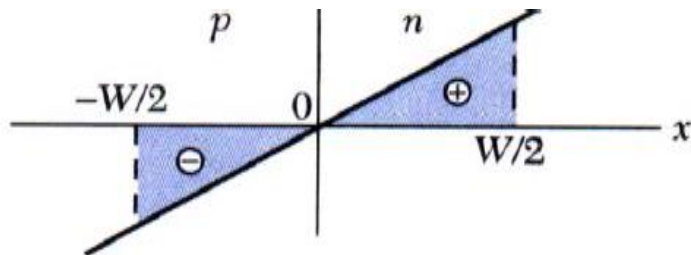
$$V_D = kT/q \ln \left[ \left( a_j X_D / 2 \right)^2 / n_i^2 \right] = 2kT/q \ln \left( a_j X_D / 2n_i \right)$$

将两式联立，消去 $X_D$ ，可得到 $V_D$ 与杂质浓度梯度 $a_j$ 的函数关系。

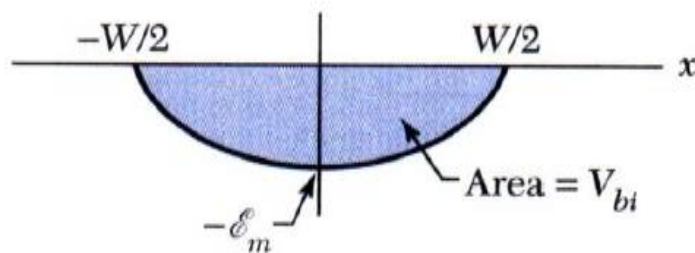


Ge、Si、GaAs线性缓变结的内建电势和杂质梯度的关系 ( $\text{cm}^{-4}$ )

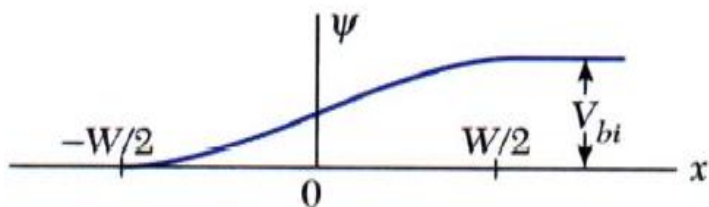
## (2) 总结: 线性缓变结



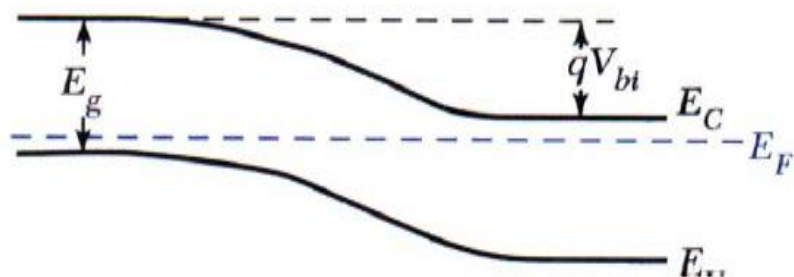
(a)



(b)



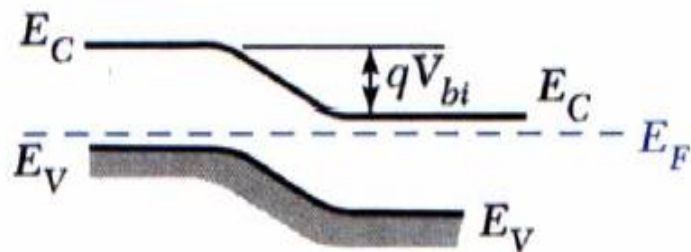
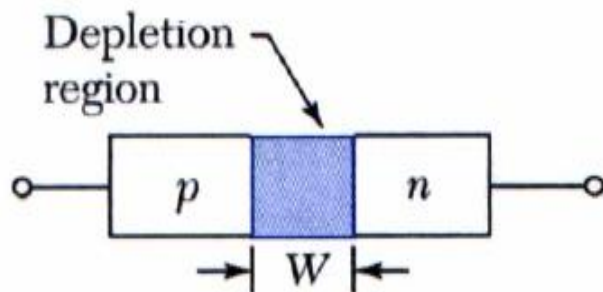
(c)



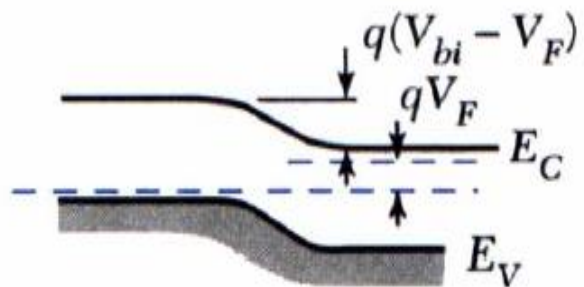
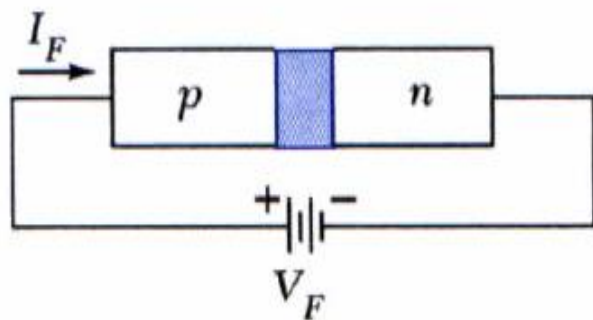
## 2、非平衡PN结的电学特性

- 一个PN结，当加上外电压时，势垒区中载流子的扩散和漂移两种运动的相对平衡状态将被破坏。直接结果是一种运动大于另一种运动，导致PN结上净电流的流动。
- 一般情况下，空间电荷区的电阻远远高于电中性区，与前者相比后者的电位降可忽略不计，相当于外加电压直接加在空间电荷区两端。
- 传导电流的大小强烈依赖于外加电压的极性。当外加电压的方向使P区相对于N区为正时，称为正向偏置；反之，则称为反向偏置。

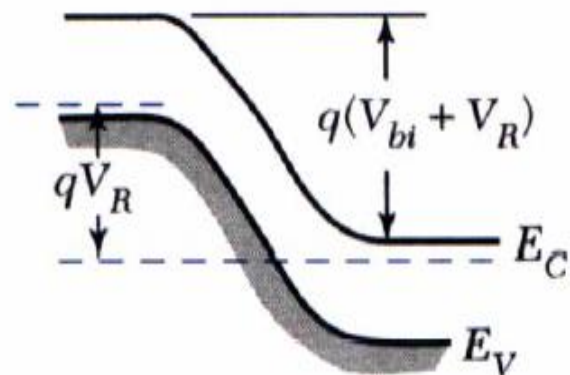
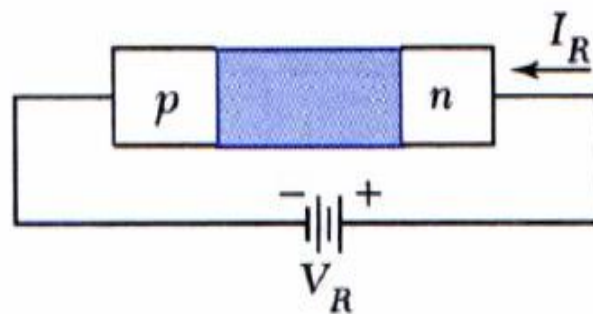
无偏置



正偏

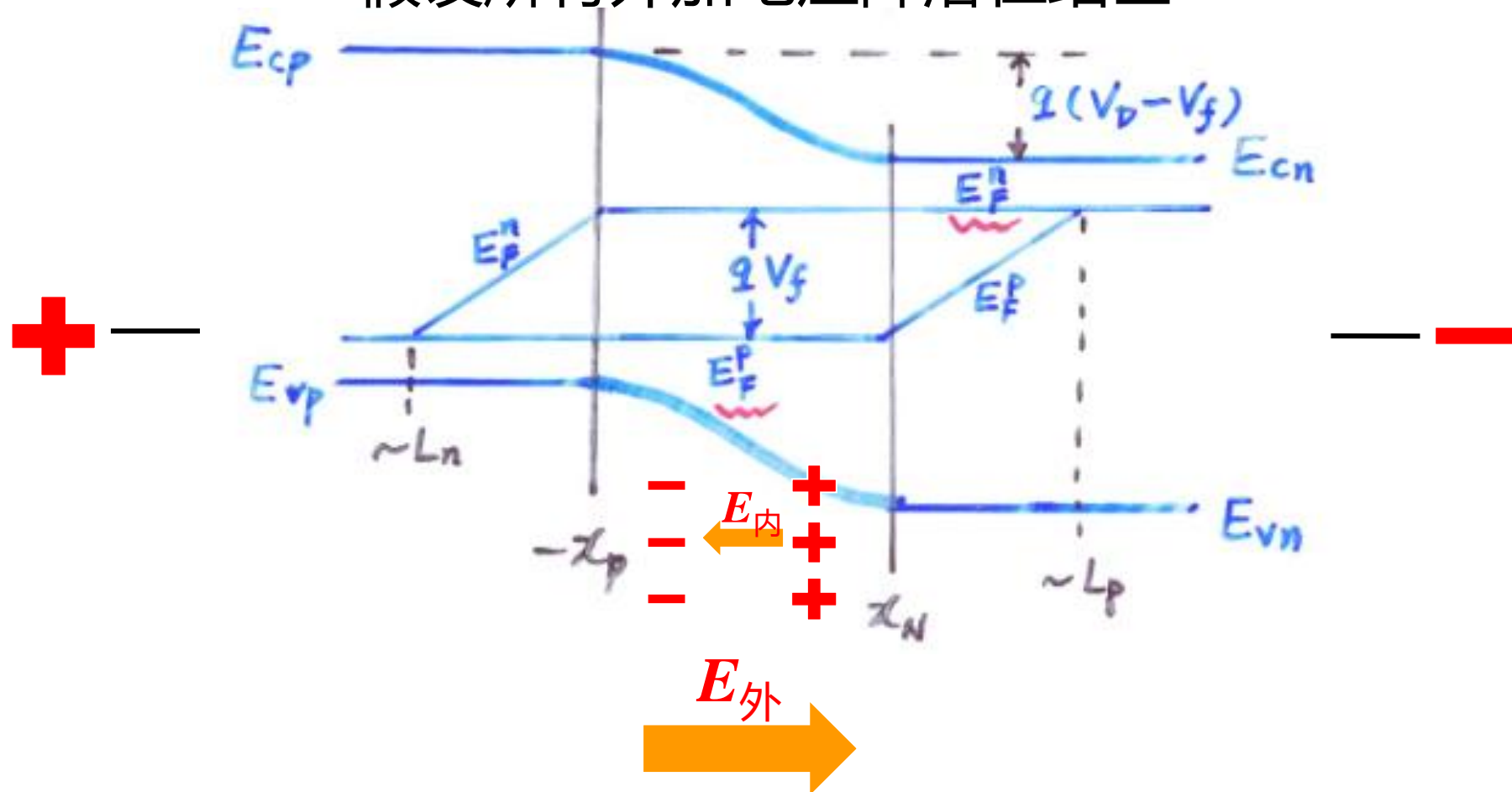


反偏



# 正向偏压下的能带图

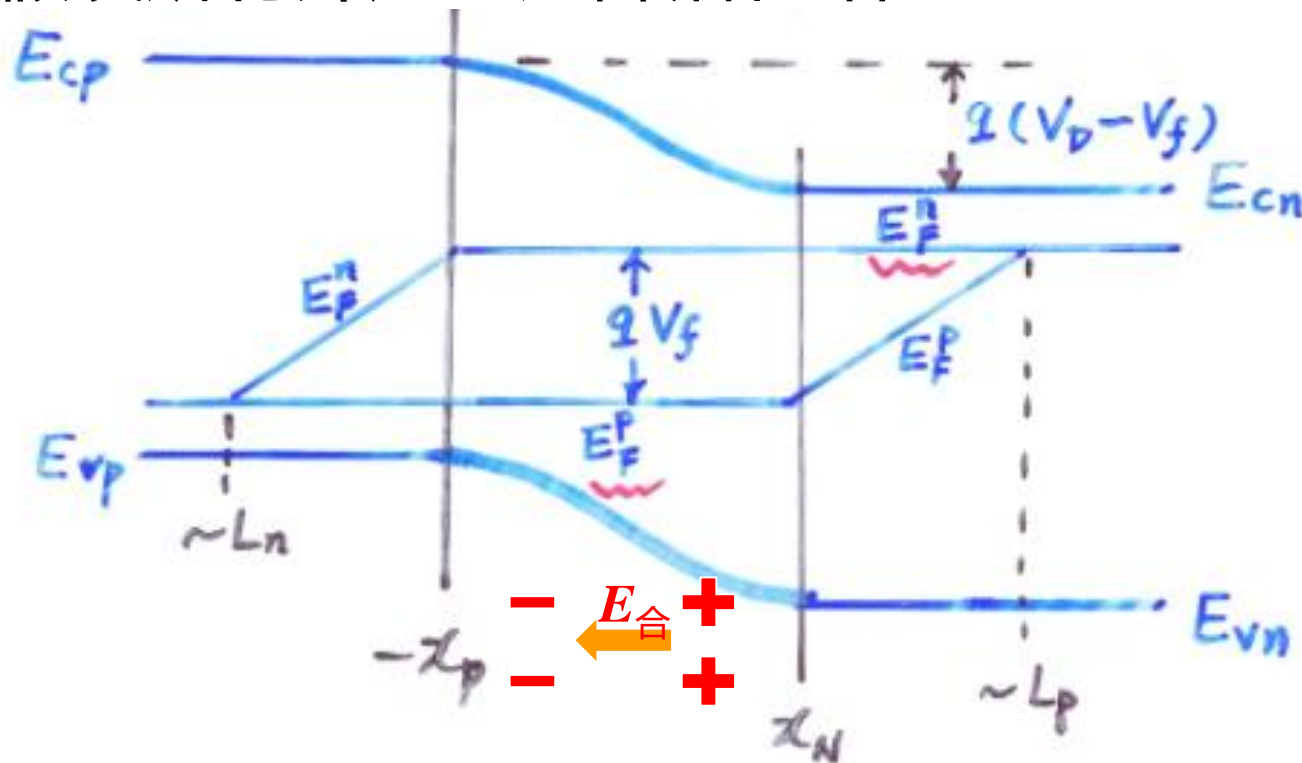
假设所有外加电压降落在结区



合成场 = 自建场 - 外加场 (降低了自建场强度)

# 正向偏压下的能带图

假设所有外加电压降落在结区



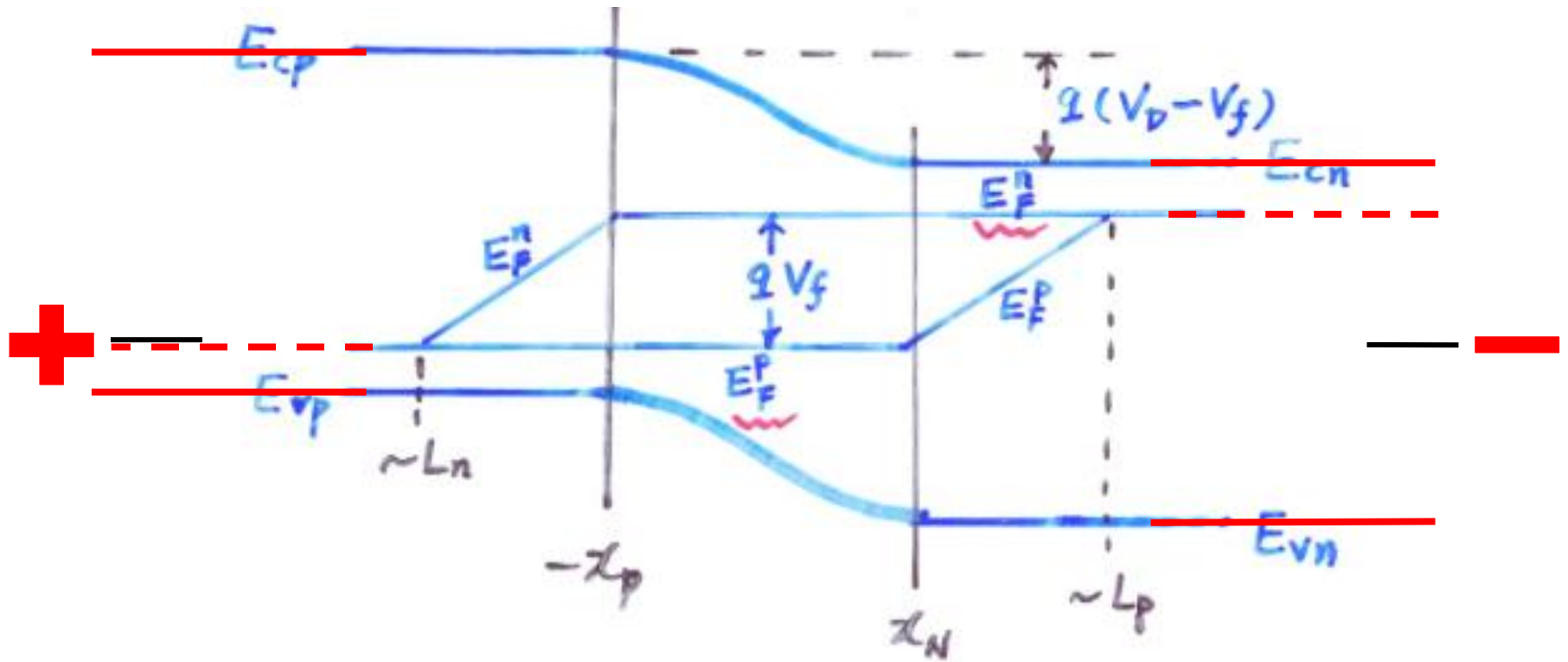
内建势=内建电场

内建电场 $E$  ↓

内建电势 $V$  ↓



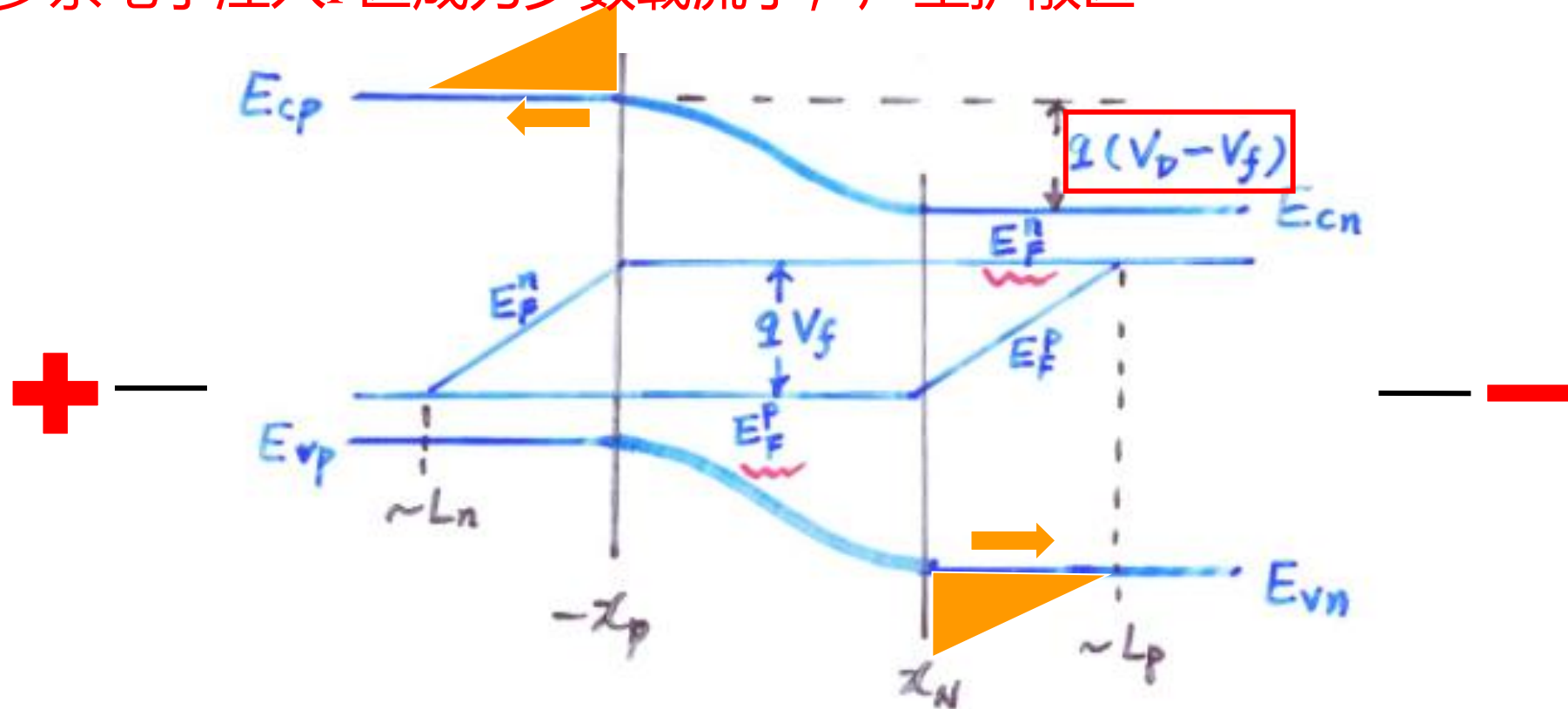
# 正偏下能带图的形成



半导体远离结区部分保持电中性

# 正偏下能带图的形成

多余电子注入P区成为少数载流子，产生扩散区



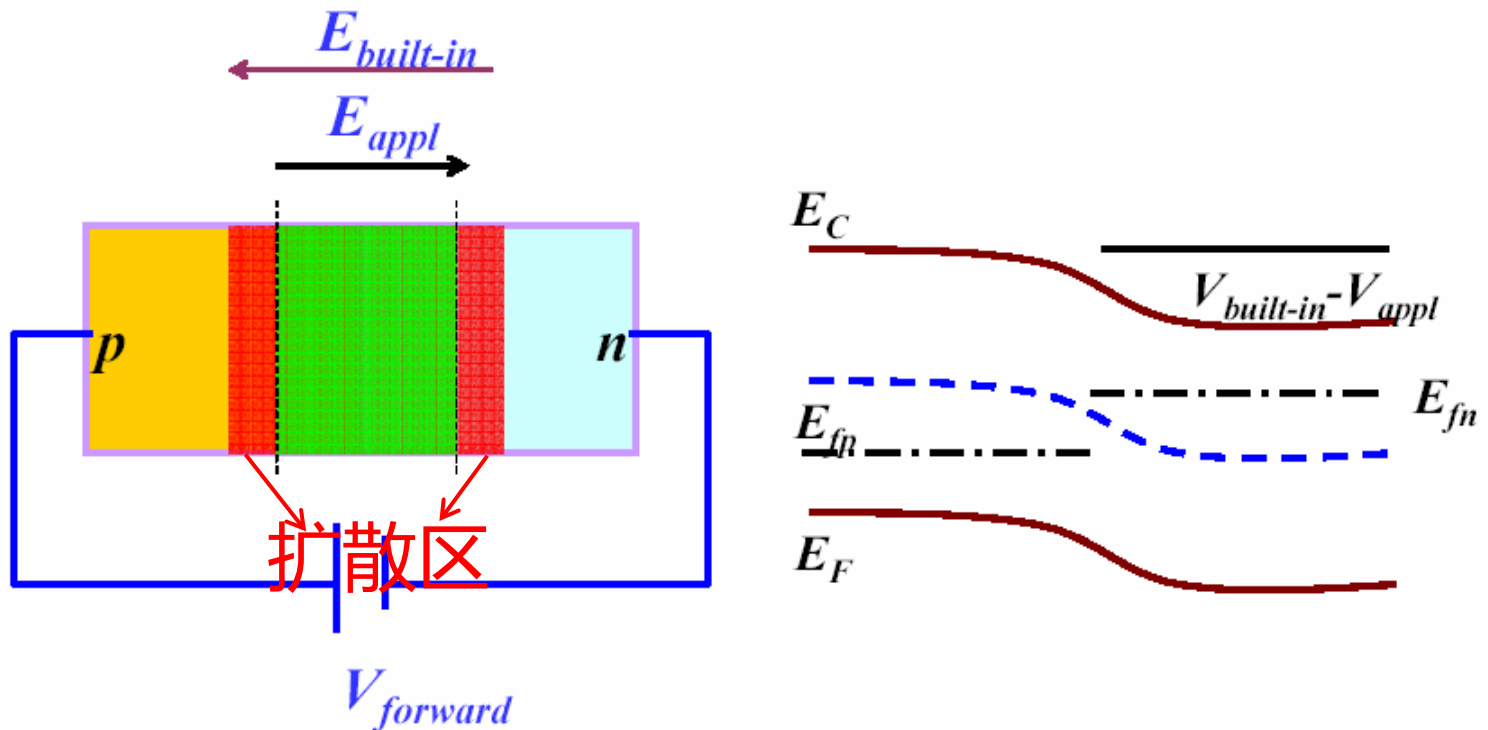
多余空穴注入N区成为少数载流子，产生扩散区

自建势降低 → N区能带整体上移(假设P区能带位置不变)

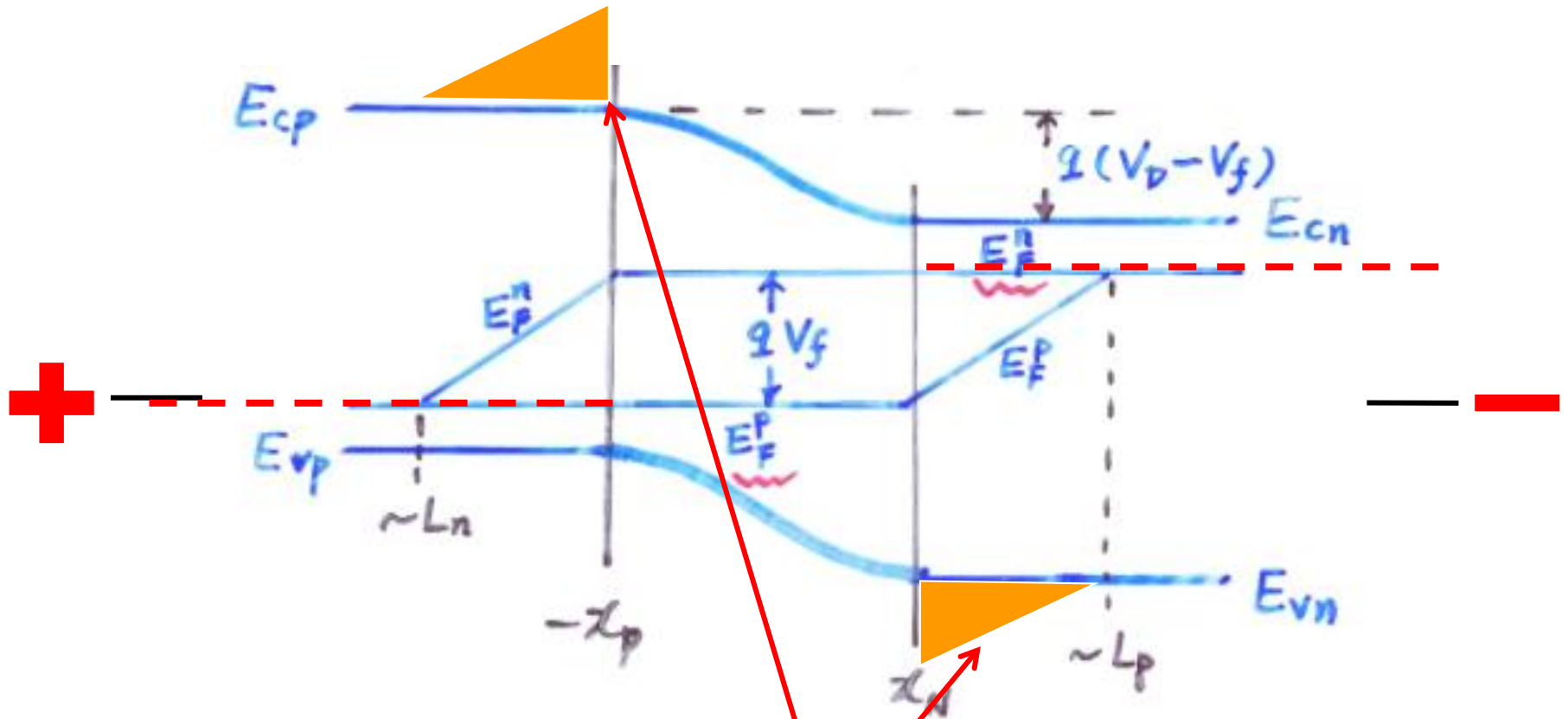
→ 扩散 > 漂移 → 有多余电子和空穴

# 正偏下PN结扩散区定义

空间电荷区两侧少子扩散长度范围内的区域称为扩散区。在P区一侧为电子扩散区，N区一侧为空穴扩散区。

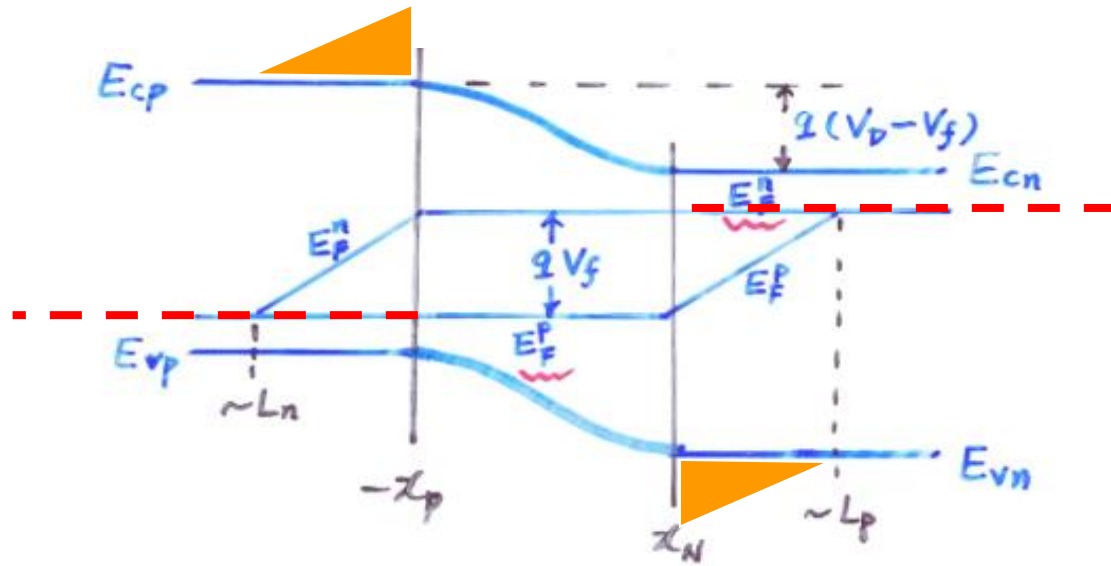


# 正偏下能带图的形成



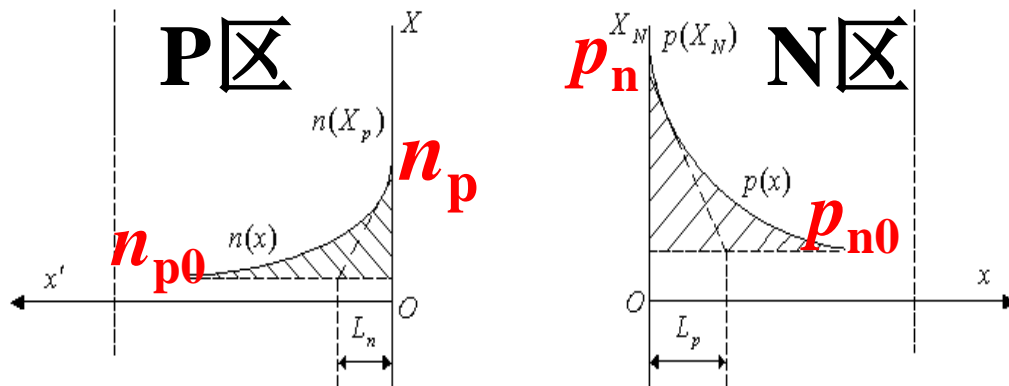
正向注入效应：N区电子向左进入P区成为少子，P区空穴进入N区成为少子——小注入，对P区或N区的整体费米能级影响很小，可忽略。

# 正向注入效应

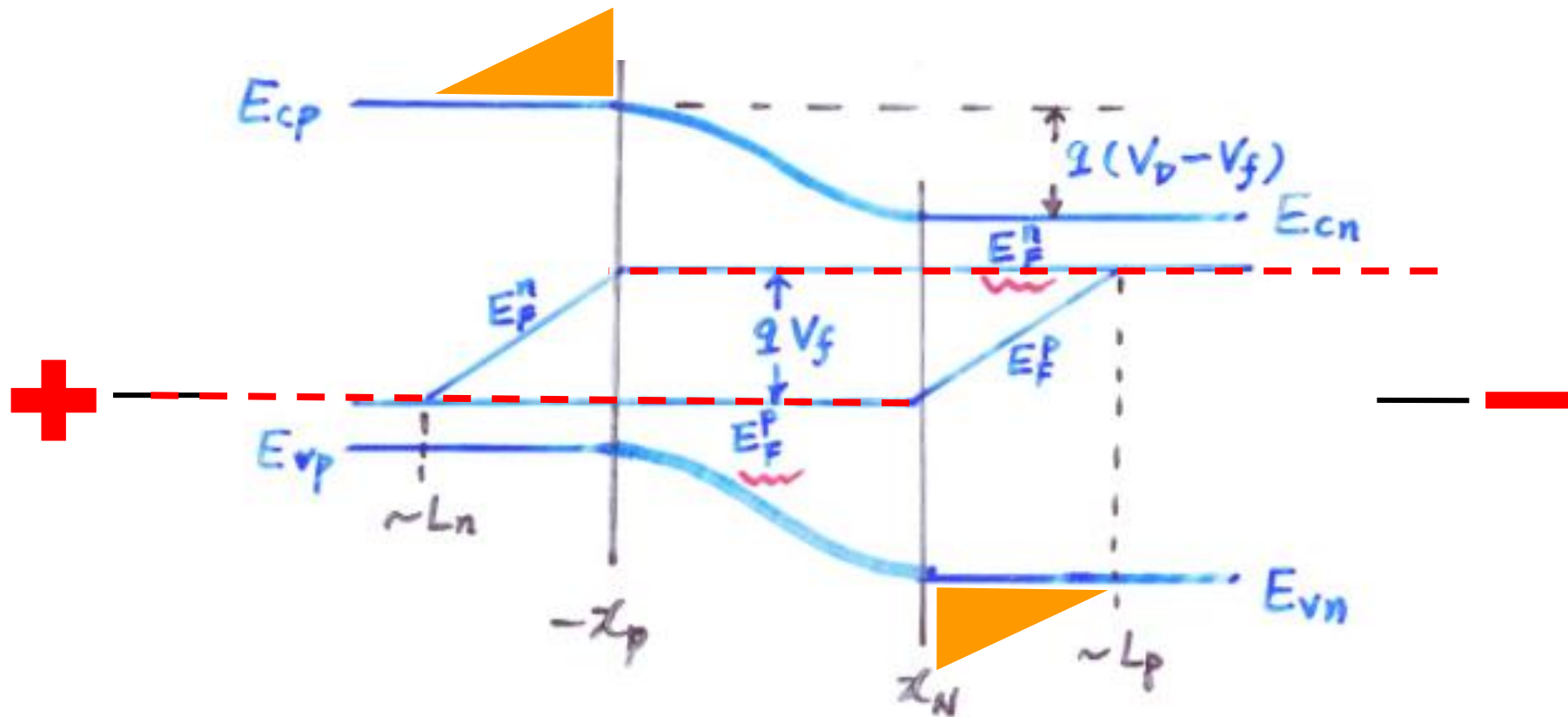


正偏时，电子从N区扩散或注入到P区，空穴从P区扩散到N区，导致P侧结边缘电子浓度大于平衡值：

$n_p > n_{p0}$ ，N侧结边缘的空穴浓度大于平衡值： $p_n > p_{n0}$ ，这种现象称为正向注入效应。

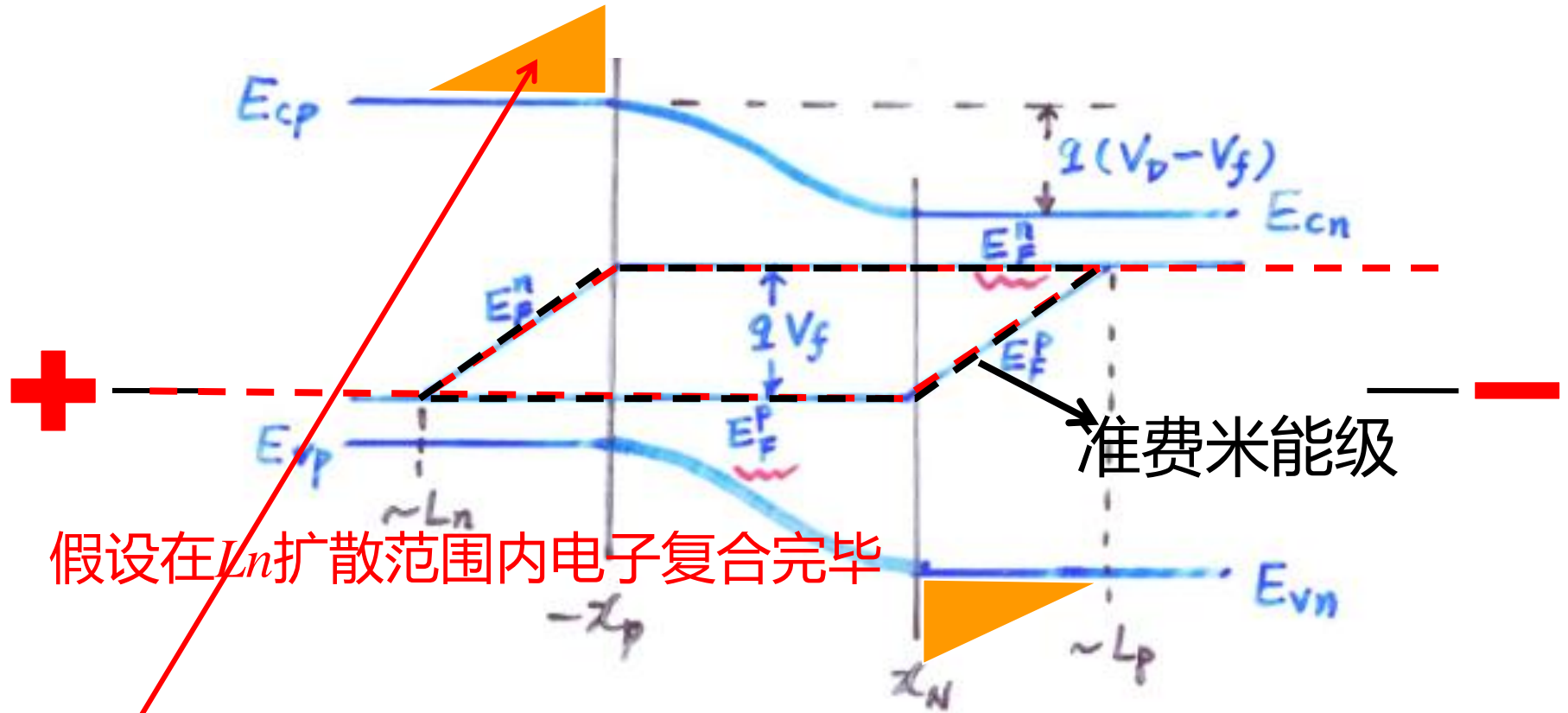


# 正偏下能带图的形成



势垒区(耗尽区)宽度非常小( $\ll$ 扩散区), 且使用耗尽层近似, 费米能级 $E_{fn}$ 、 $E_{fp}$ 在势垒区变化可以忽略。

# 正偏下能带图的形成



假设在 $L_n$ 扩散范围内电子复合完毕

多余电子注入P区成为非平衡少数载流子，发生稳态扩散和复合（中性区无电场），浓度逐渐降低，费米能级 $E_{fn}$ 距离导带底距离逐渐增大，最后与P区费米能级一致，多余空穴注入N区同理。

# 准费米能级

- 电子的准费米能级

描述导带电子分布的费米能级

$$n = N_C \exp\left[\frac{(E'_{Fn} - E_C)}{kT}\right]$$

- 空穴的准费米能级

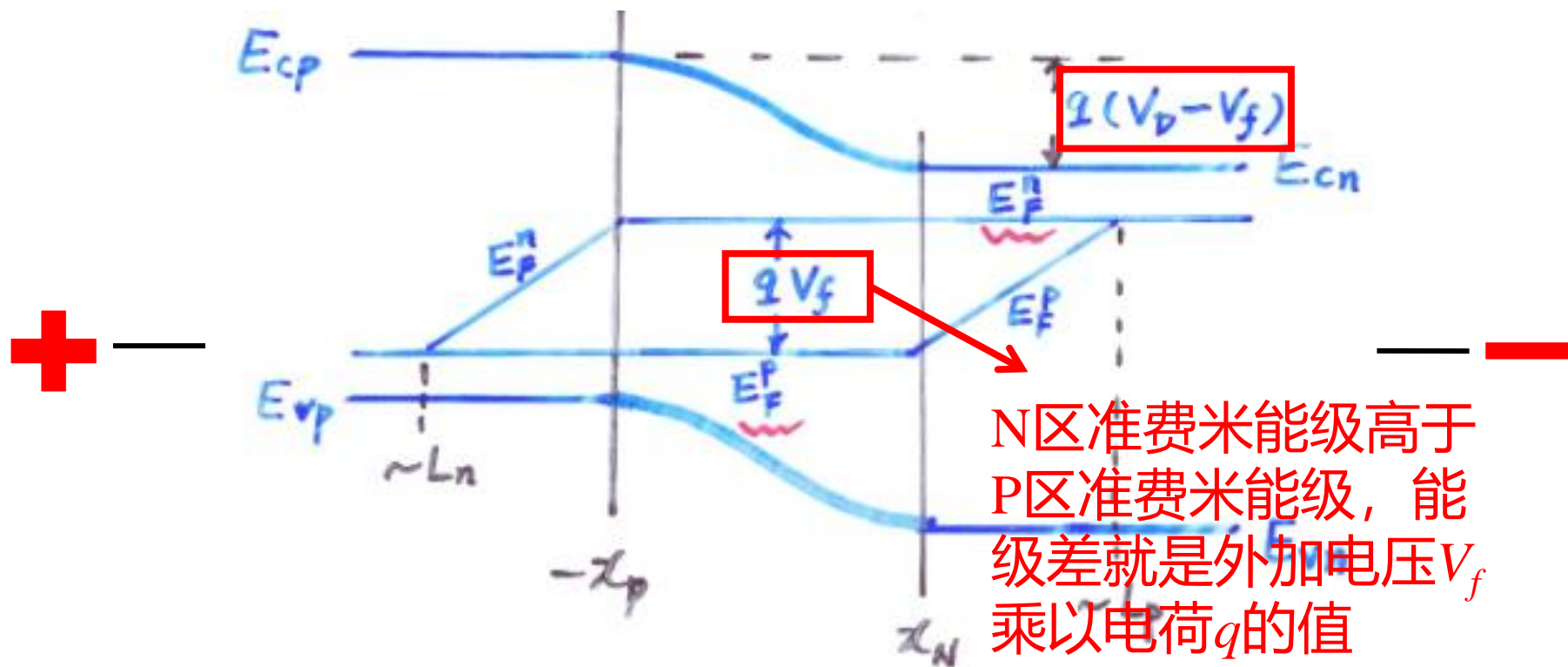
描述价带空穴分布的费米能级

$$p = N_V \exp\left[\frac{(E_V - E'_{Fp})}{kT}\right]$$

- 非平衡载流子越多，准费米能级偏离 $E_F$ 越远。



# 正偏下能带图的形成

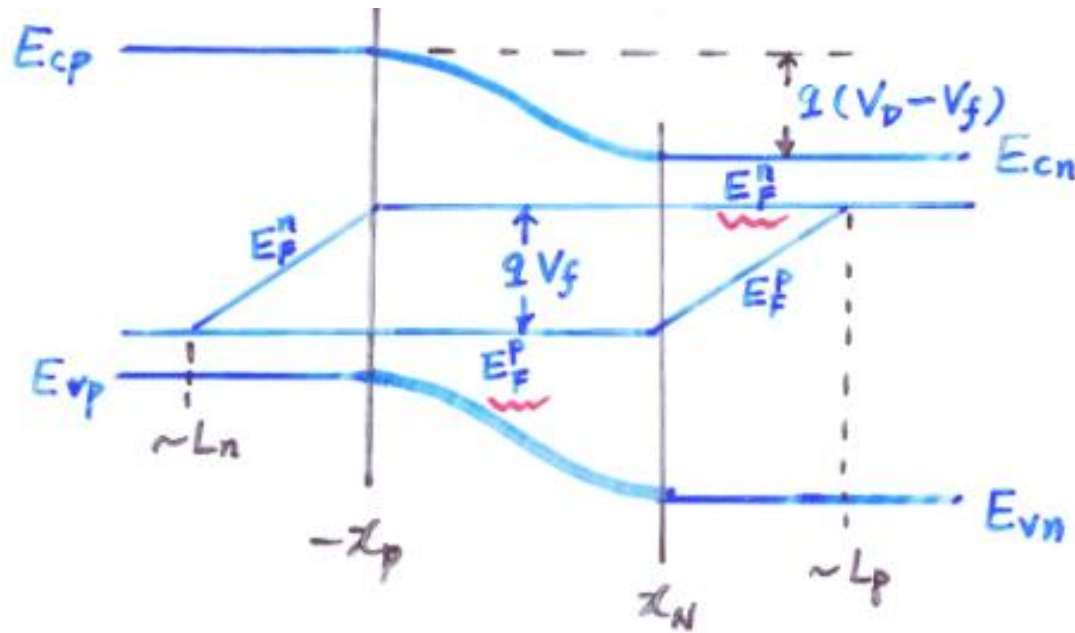


势垒降低导致N区能带上移  $\rightarrow$  N区( $E_{cn} - E_{fn}$ )不变  
 $\rightarrow$  N区费米能级上移

# 玻尔兹曼关系

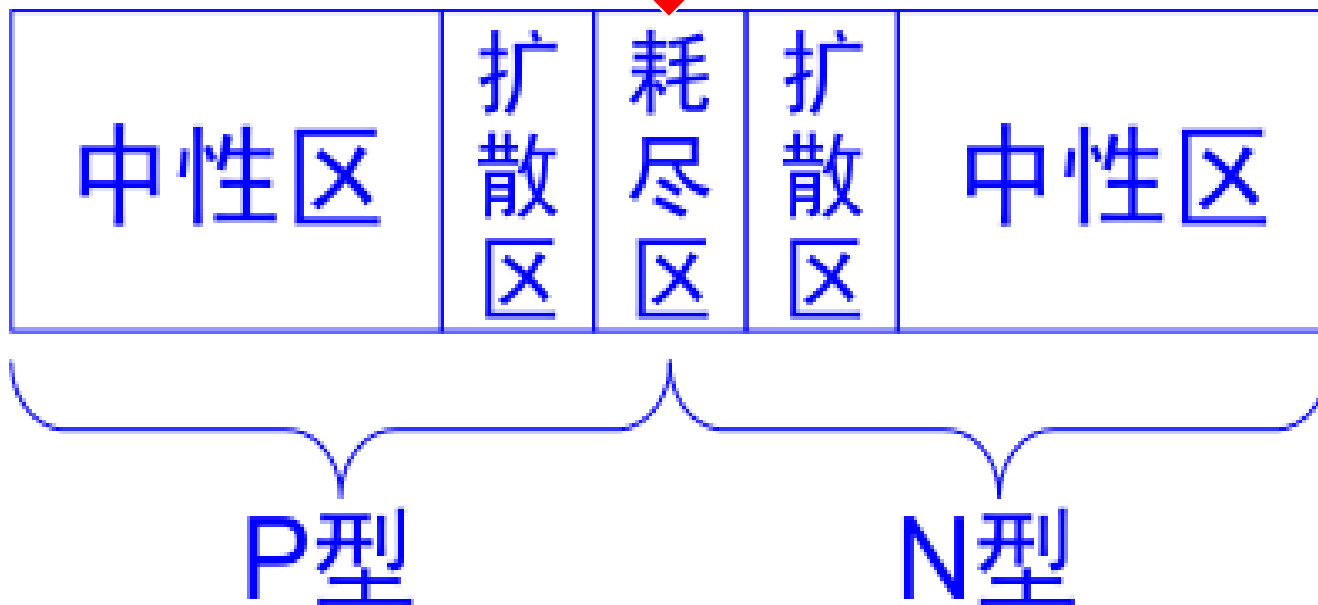
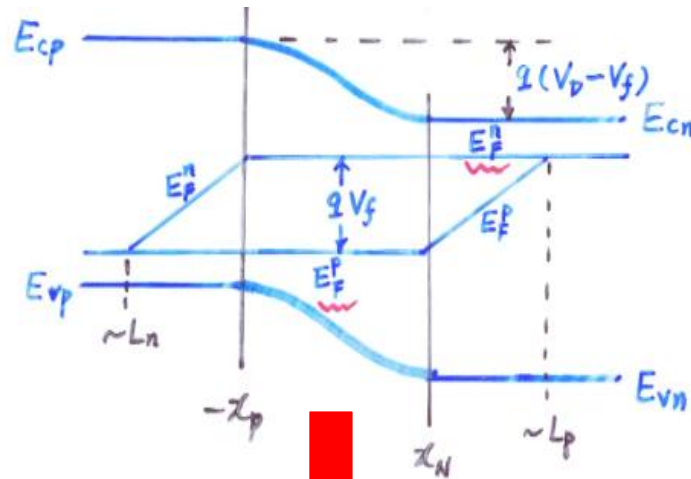
- 由电子和空穴的准费米能级可得N区边界处注入的空穴浓度：

$$p(x_n) = N_V \exp\left\{\frac{[E_V(x_n) - E'_{Fp}(x_n)]}{kT}\right\}$$



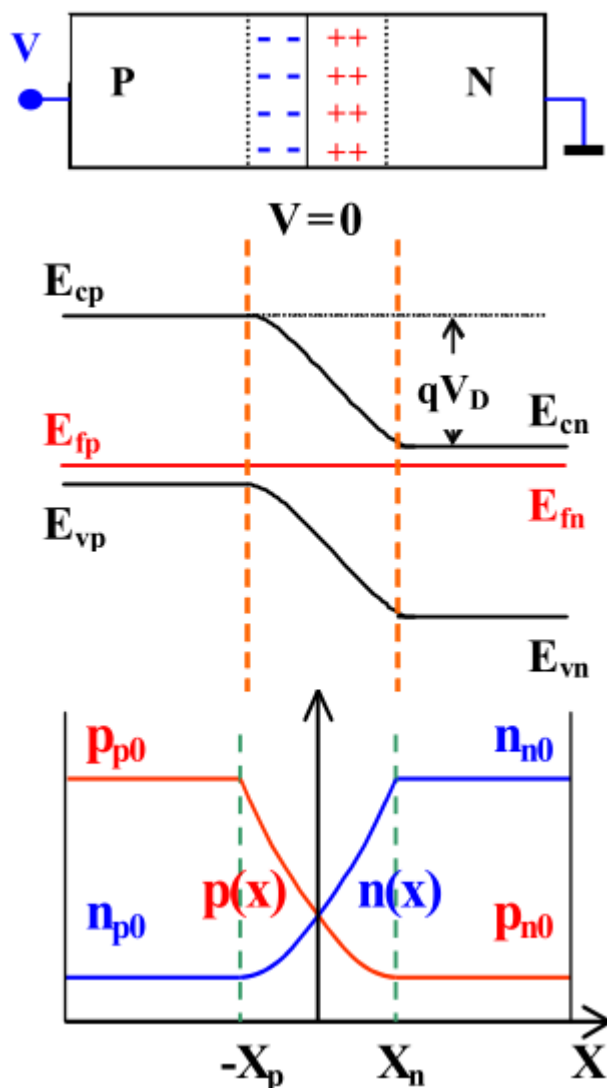
- 结定律： $p(x_n) = p_{n0} \exp(qV_f/kT)$      $n(-x_p) = n_{p0} \exp(qV_f/kT)$
- 边界处注入的少数浓度由平衡态少数浓度和外加电压所决定，其值为平衡少数浓度的 $\exp(qV_f/kT)$ 倍。

# 正向偏压下的PN结

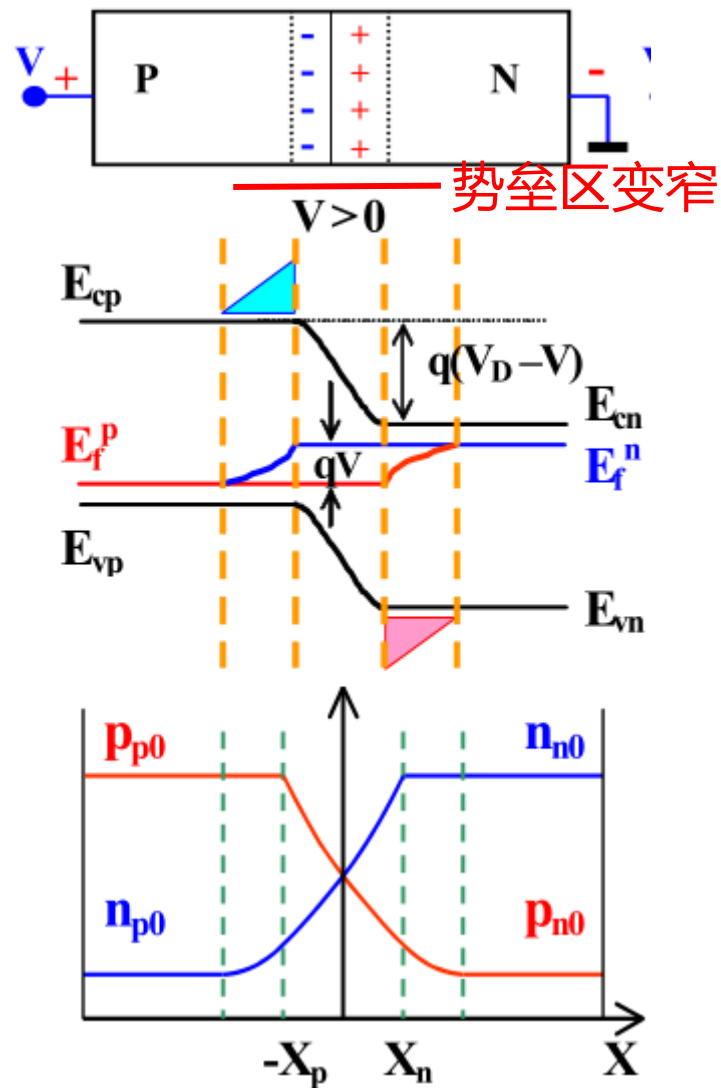


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

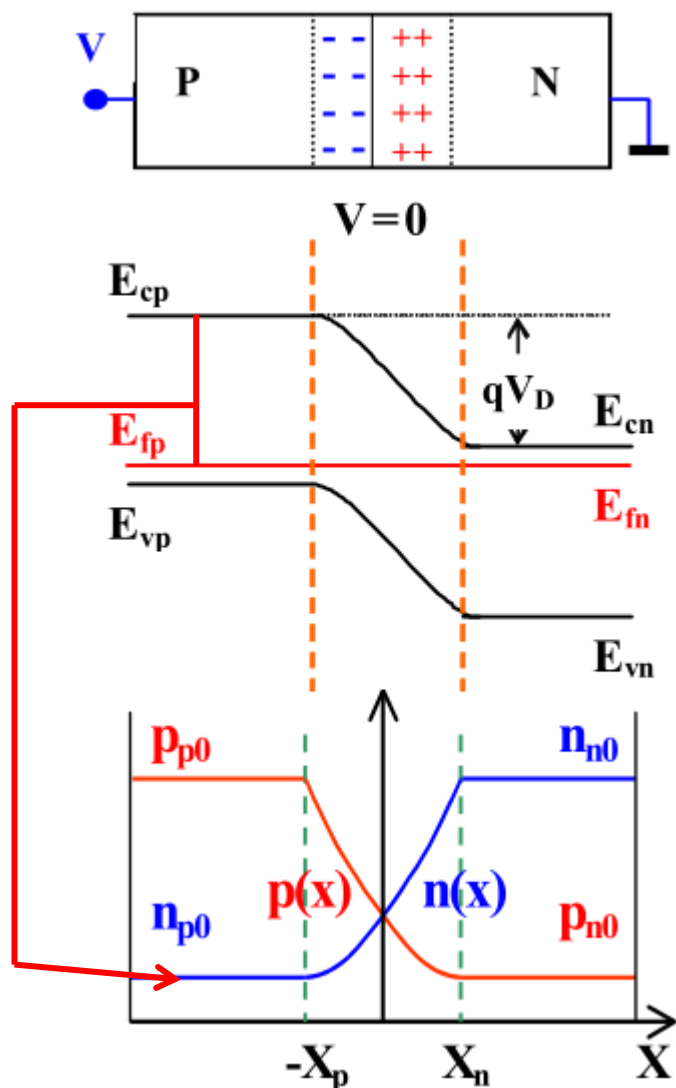


正偏

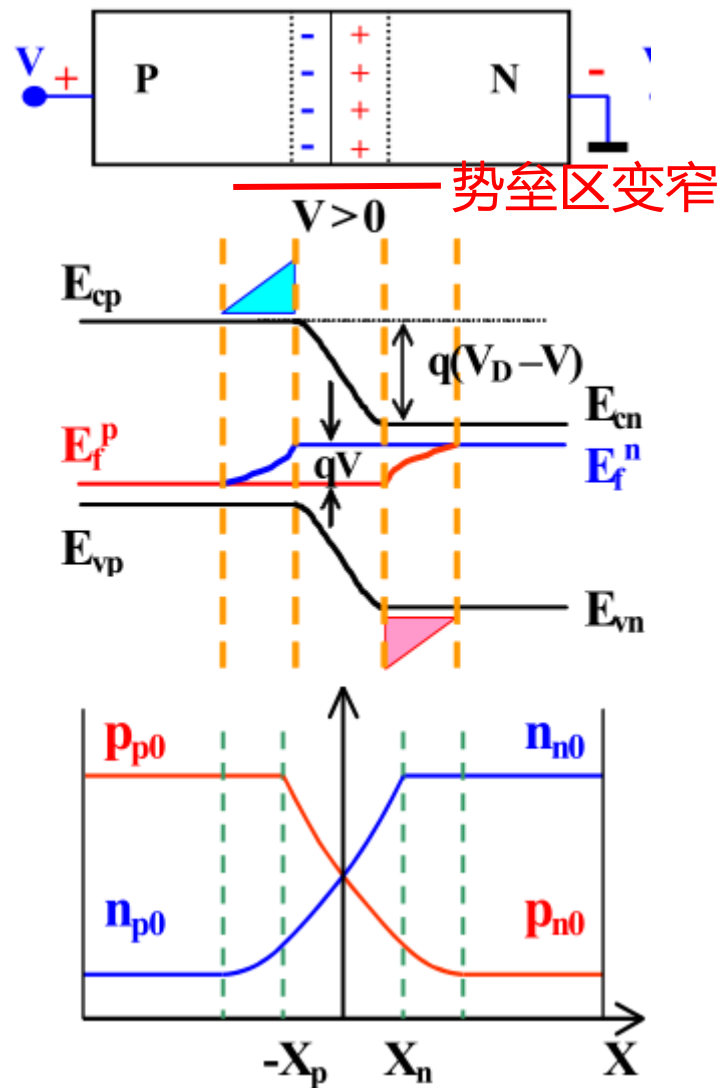


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

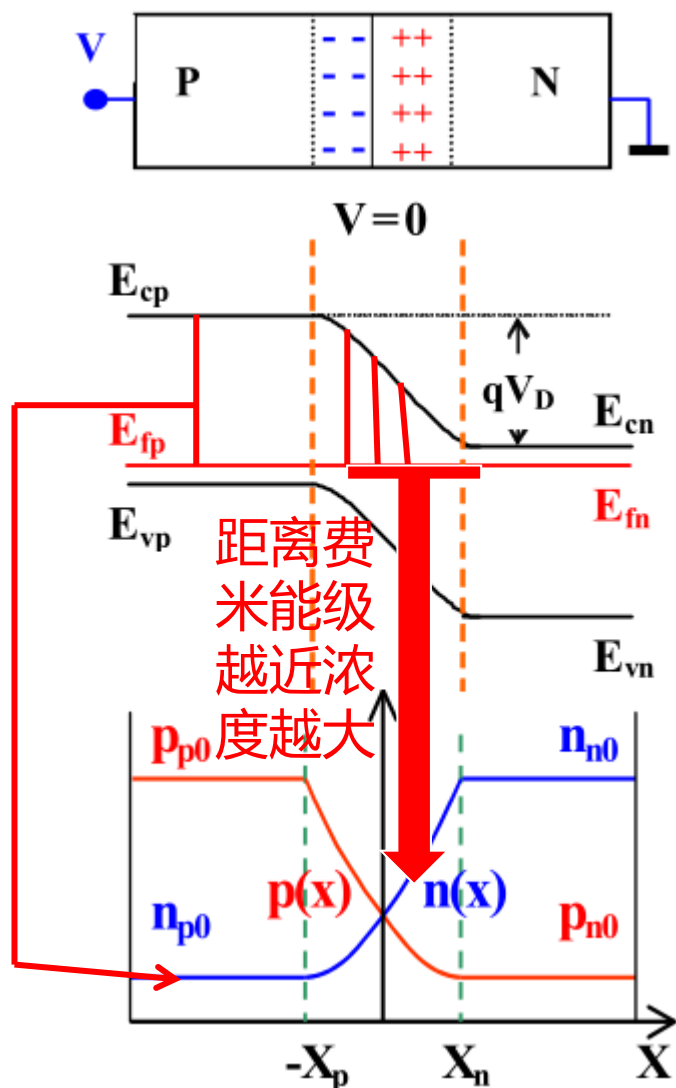


正偏

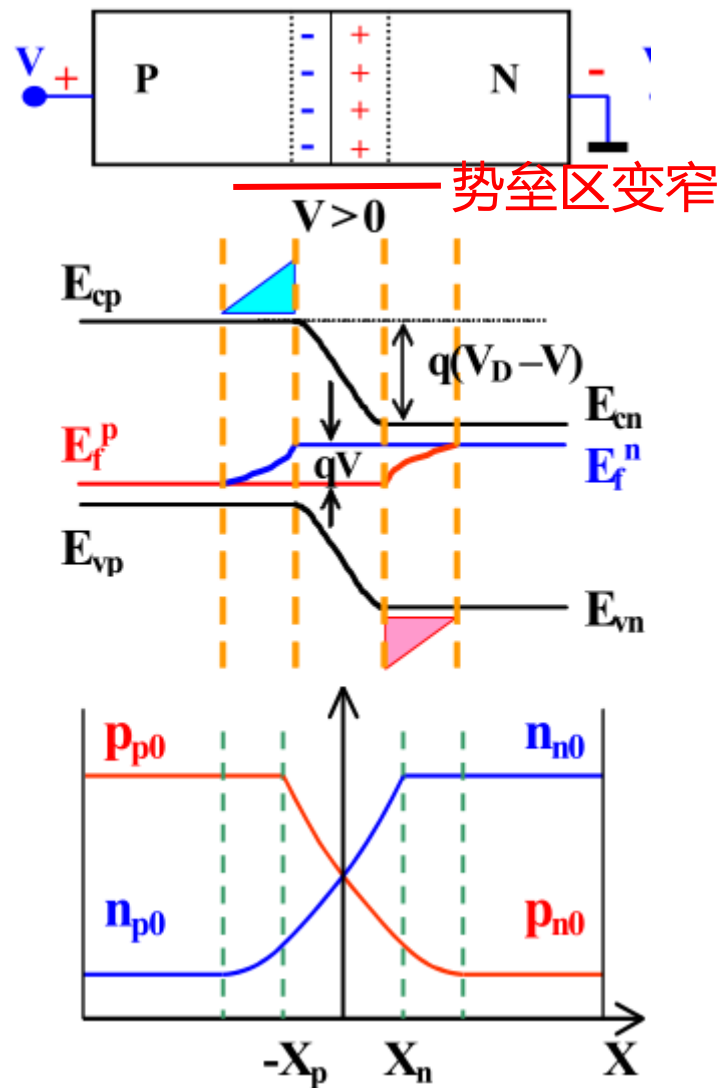


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

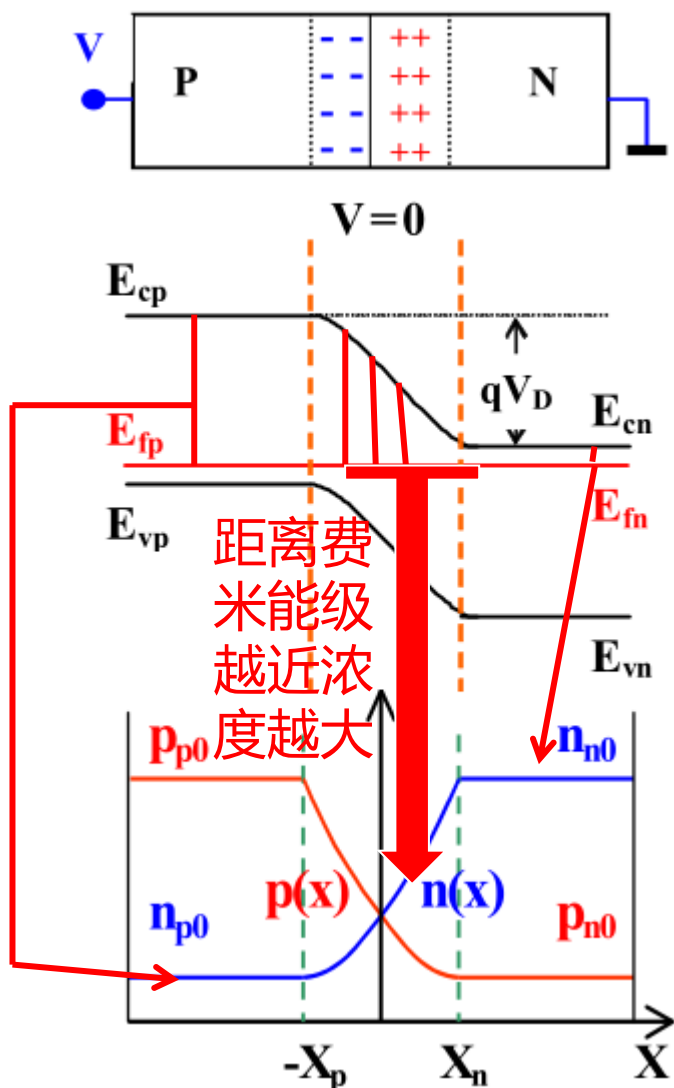


正偏

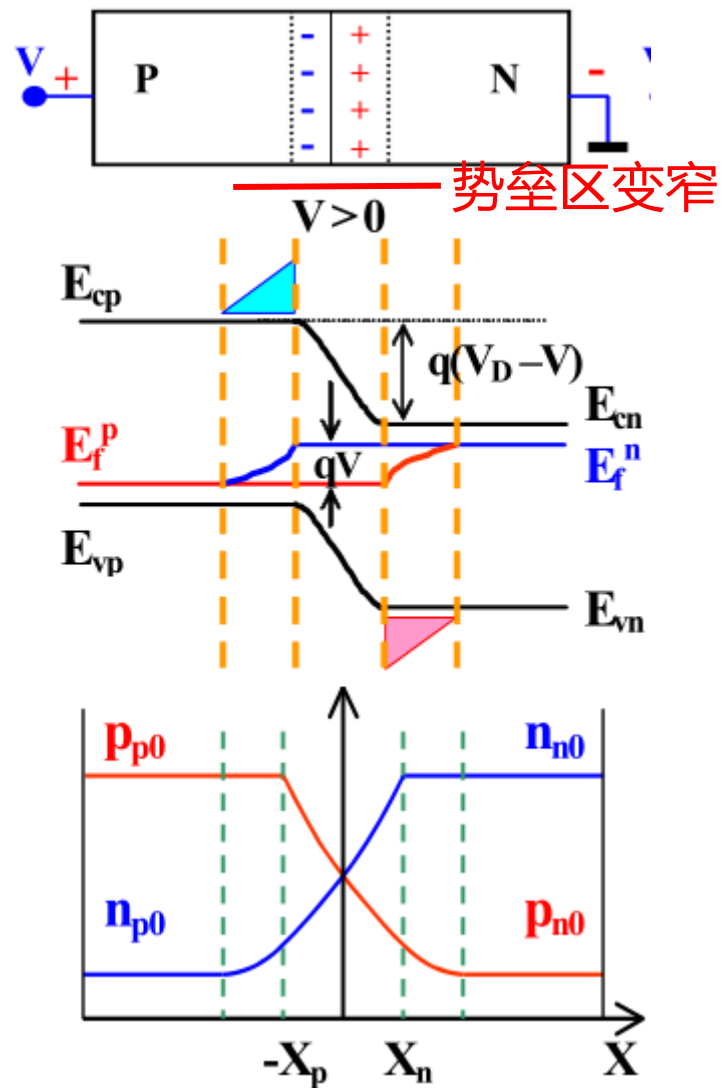


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

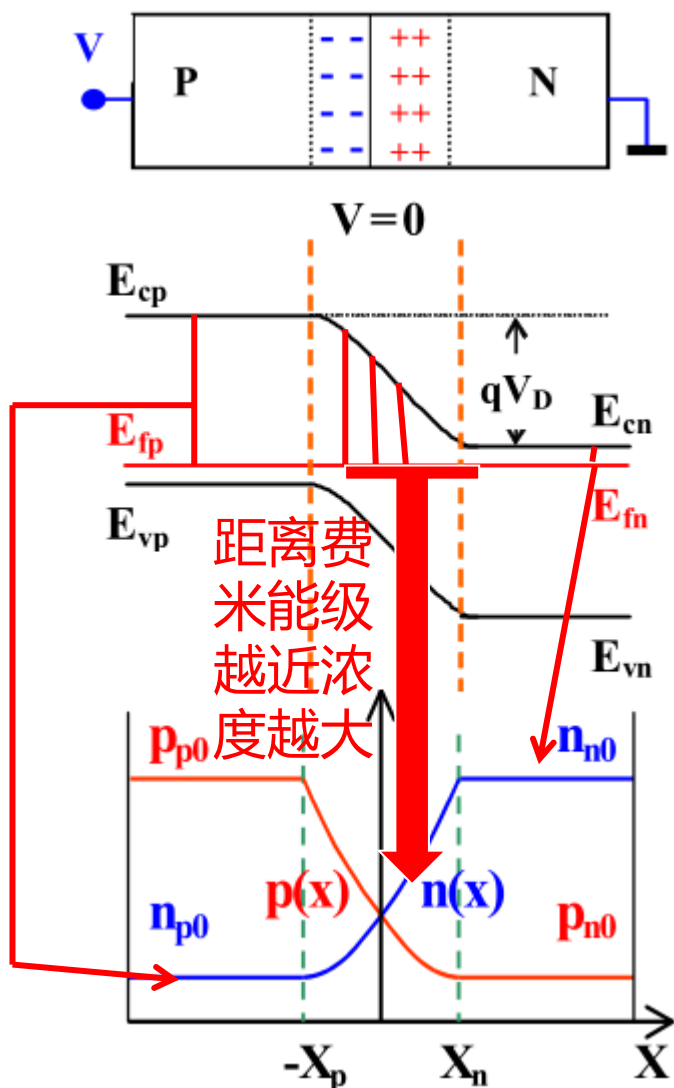


正偏

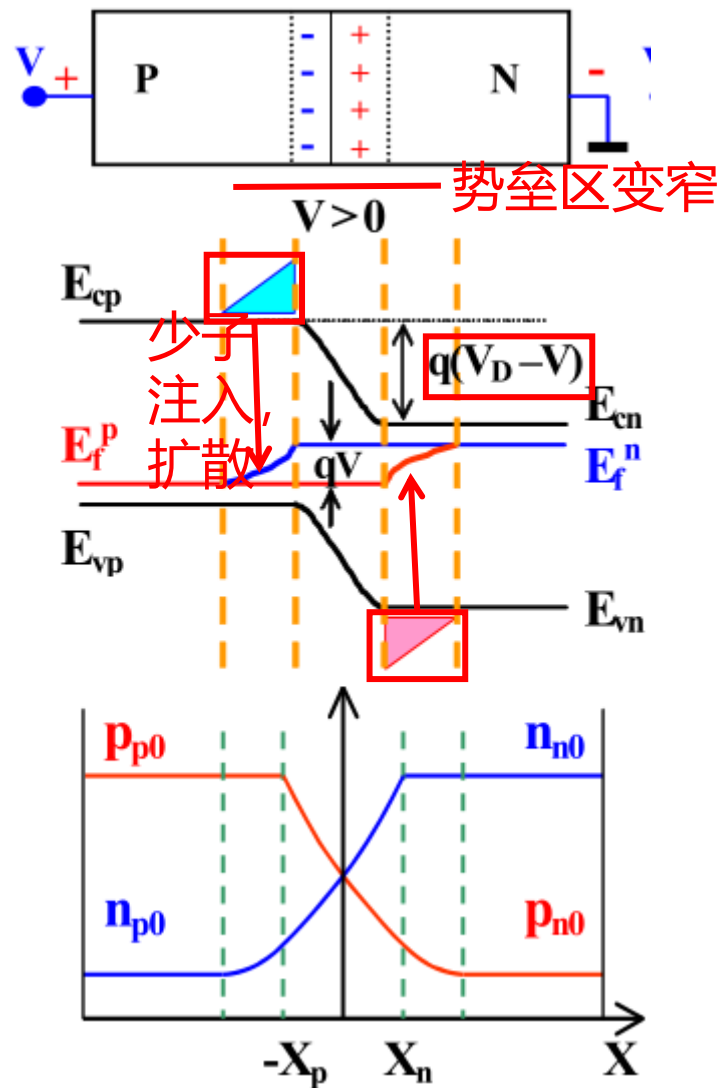


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏



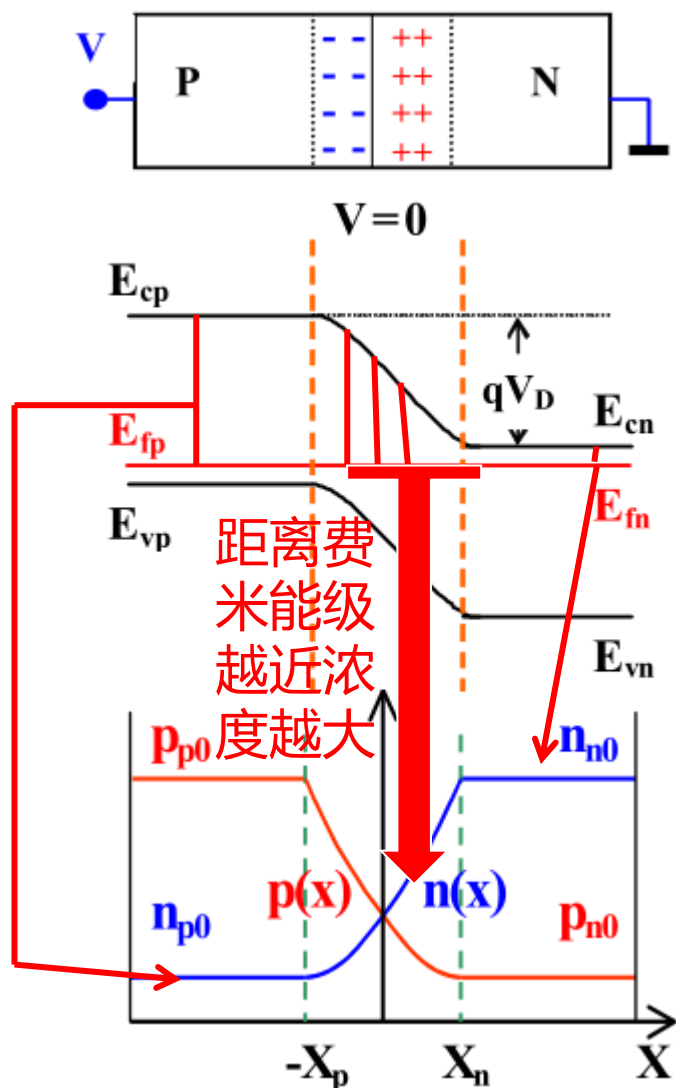
正偏



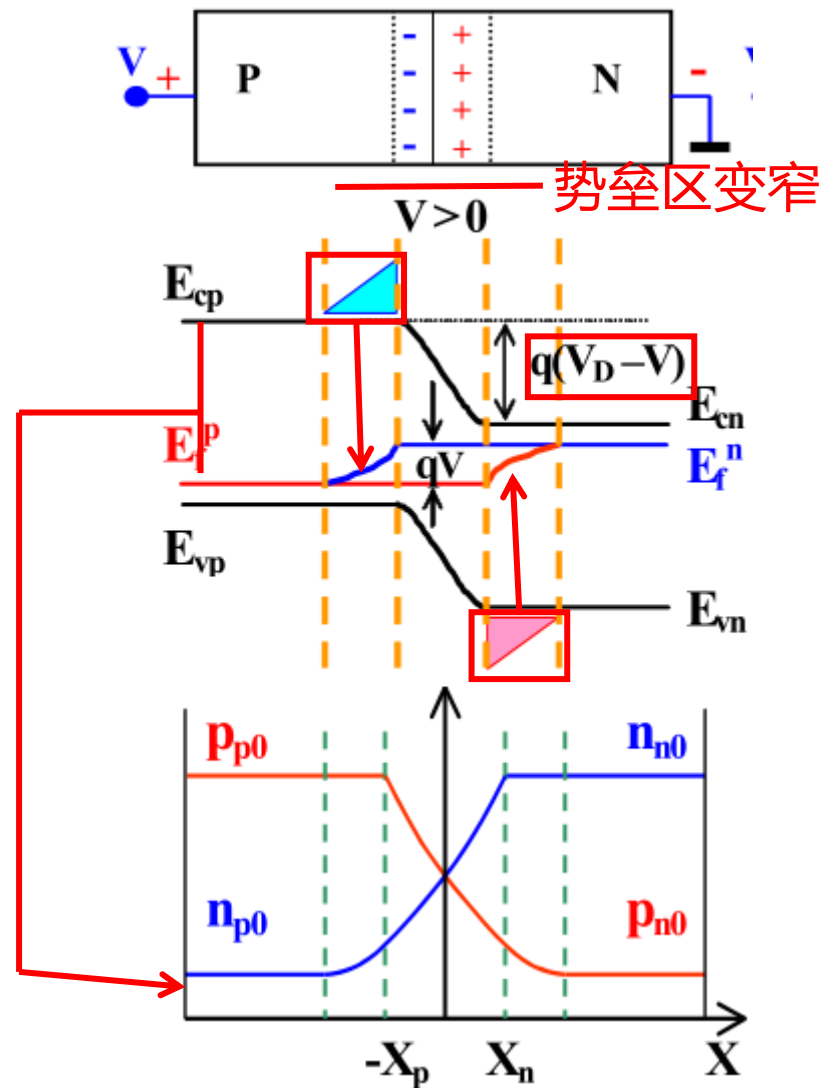


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

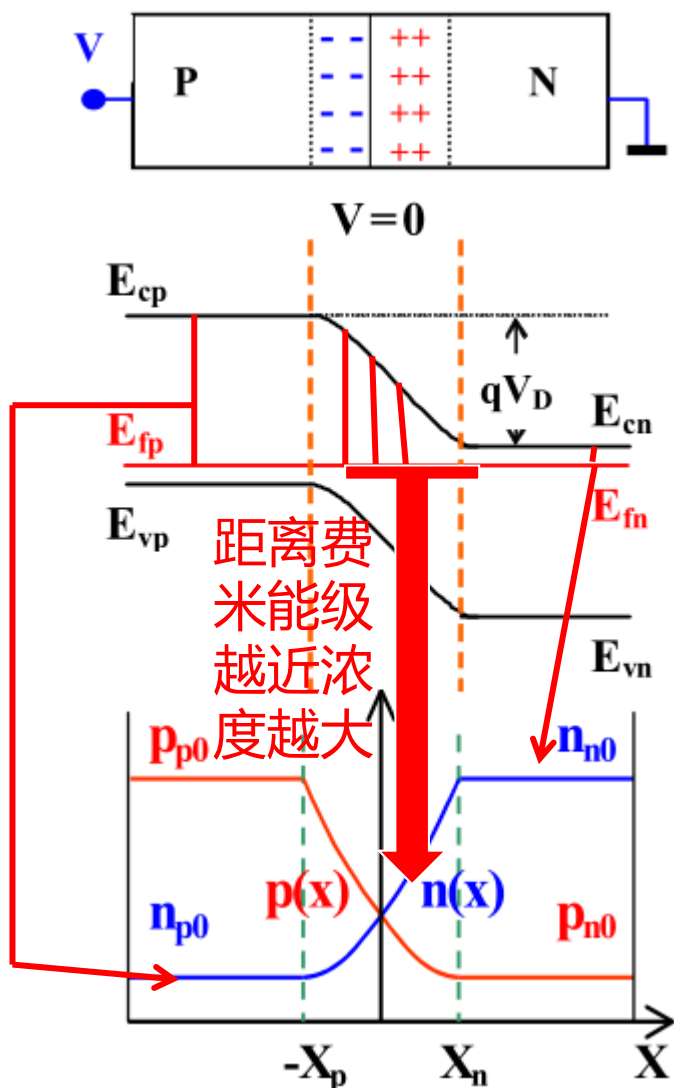


正偏

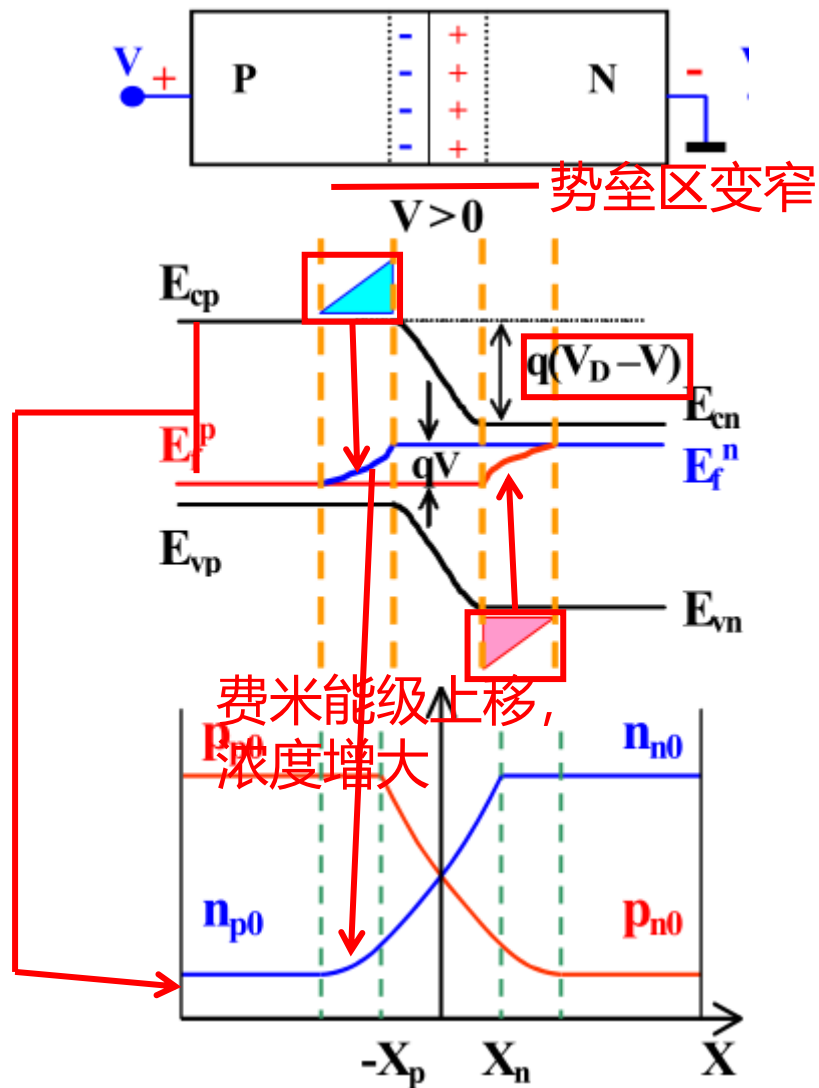


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

零偏

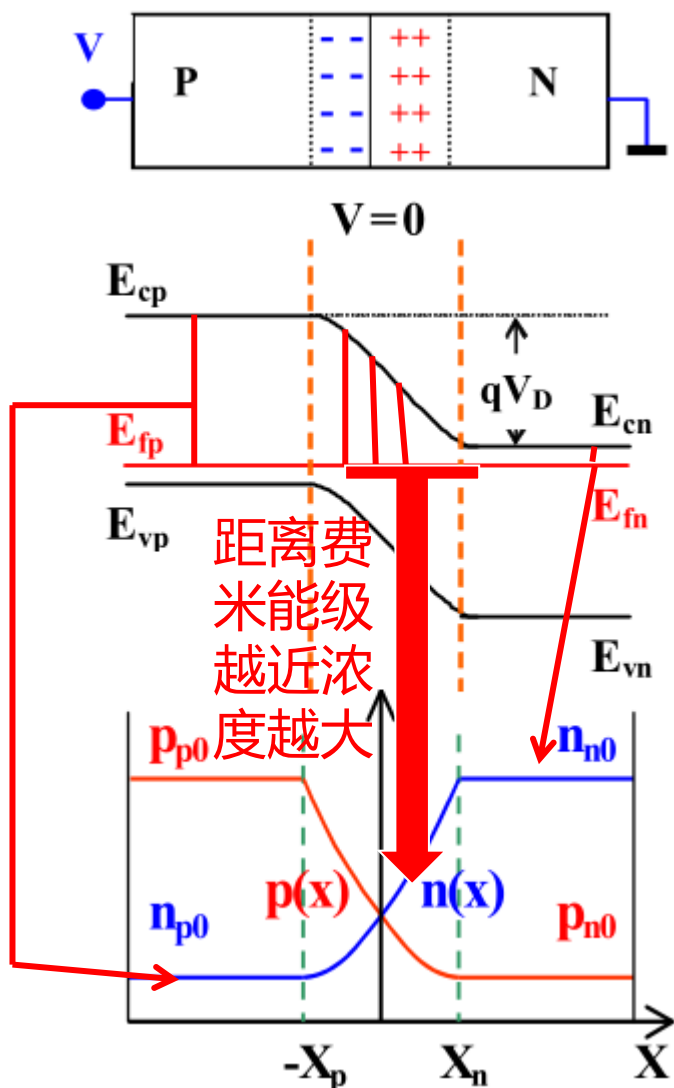


正偏

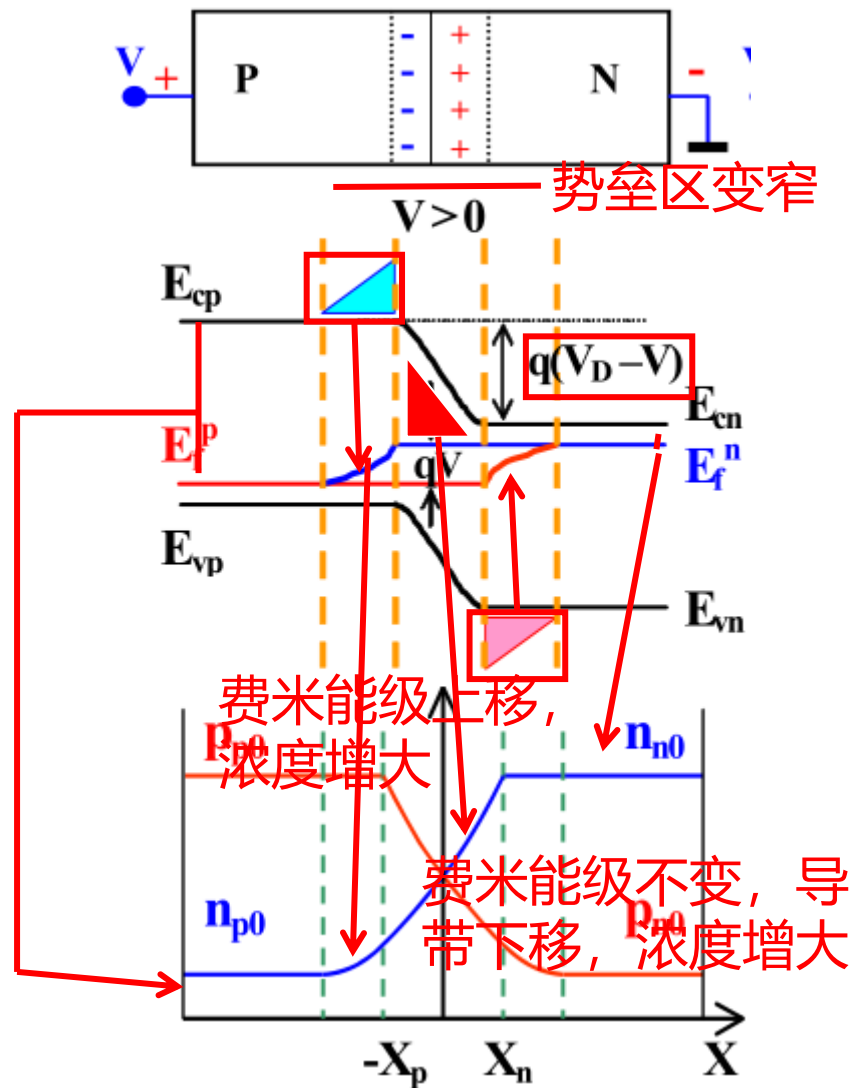


# 零偏/正偏PN结的能带图/载流子分布

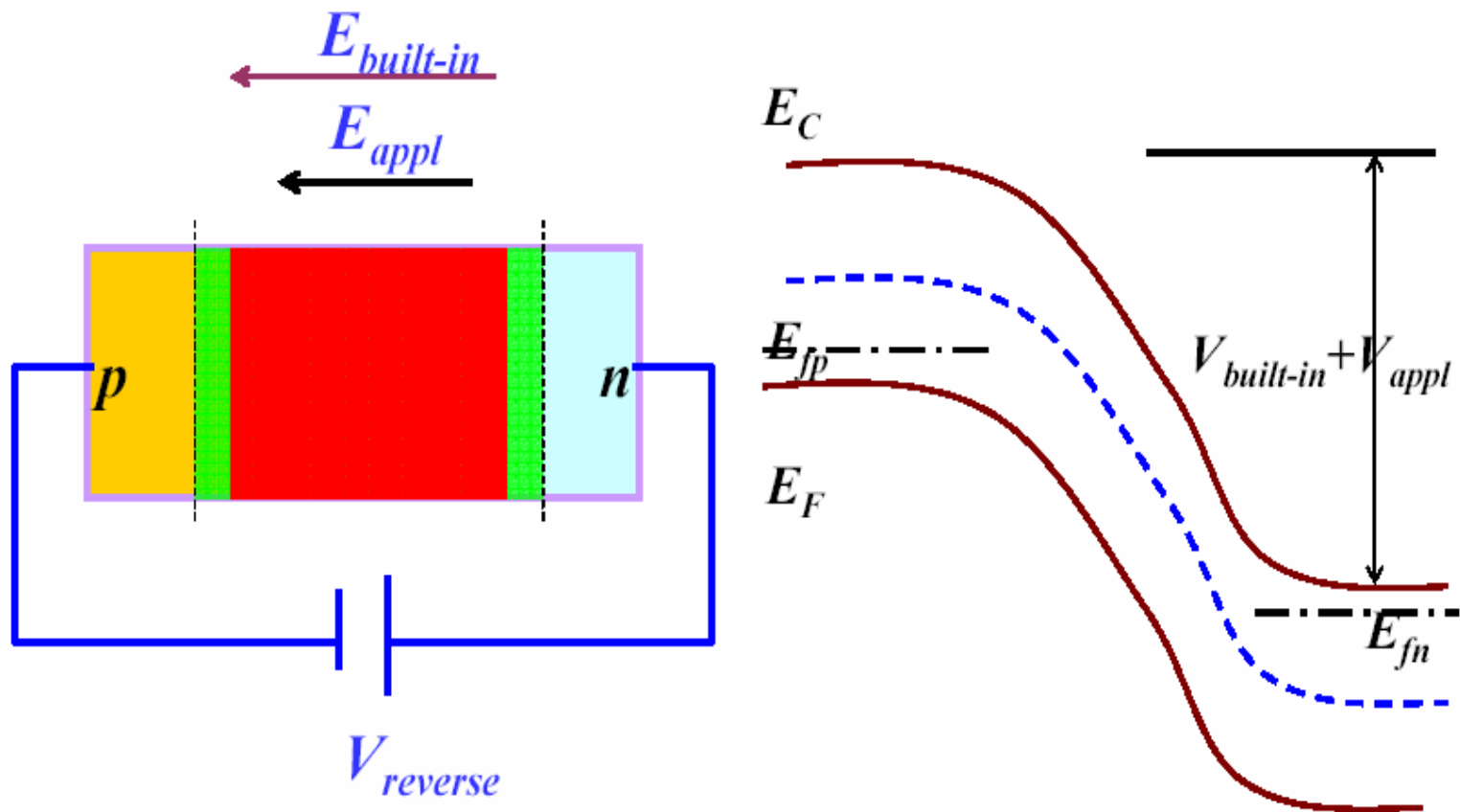
零偏



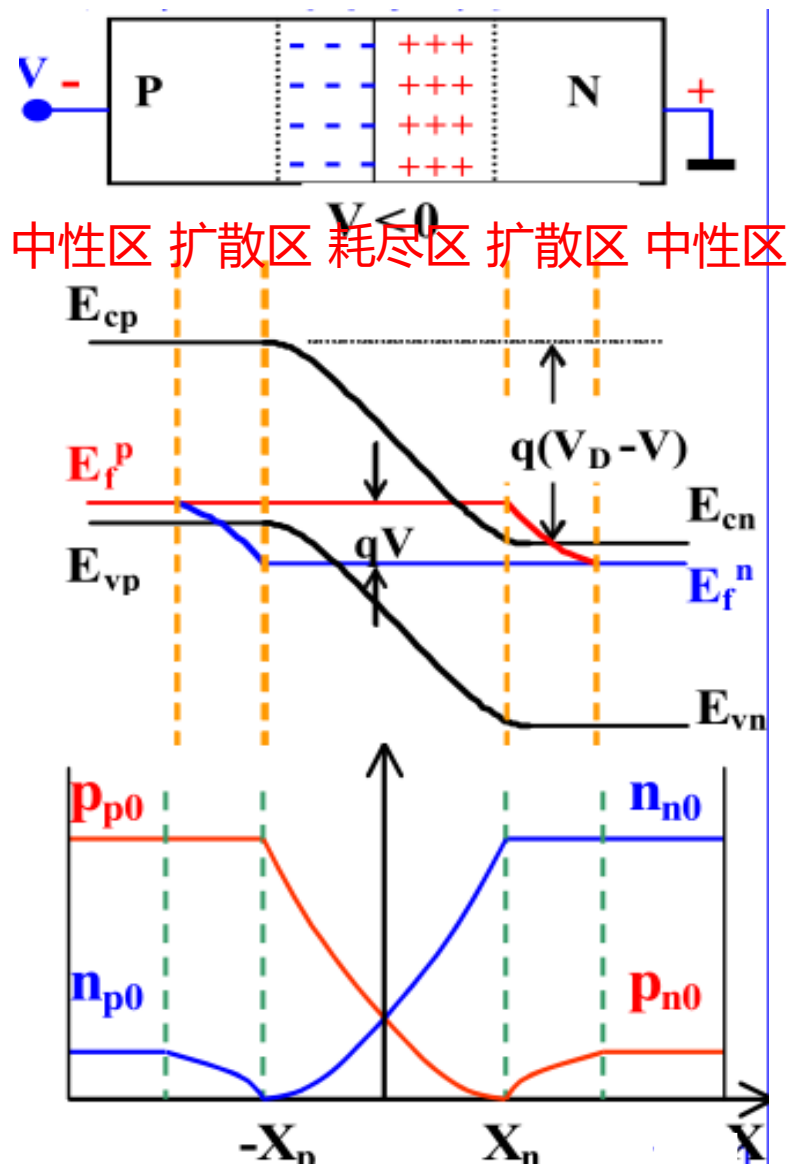
正偏



# 反向偏压下的PN结



# 反向偏压下的PN结

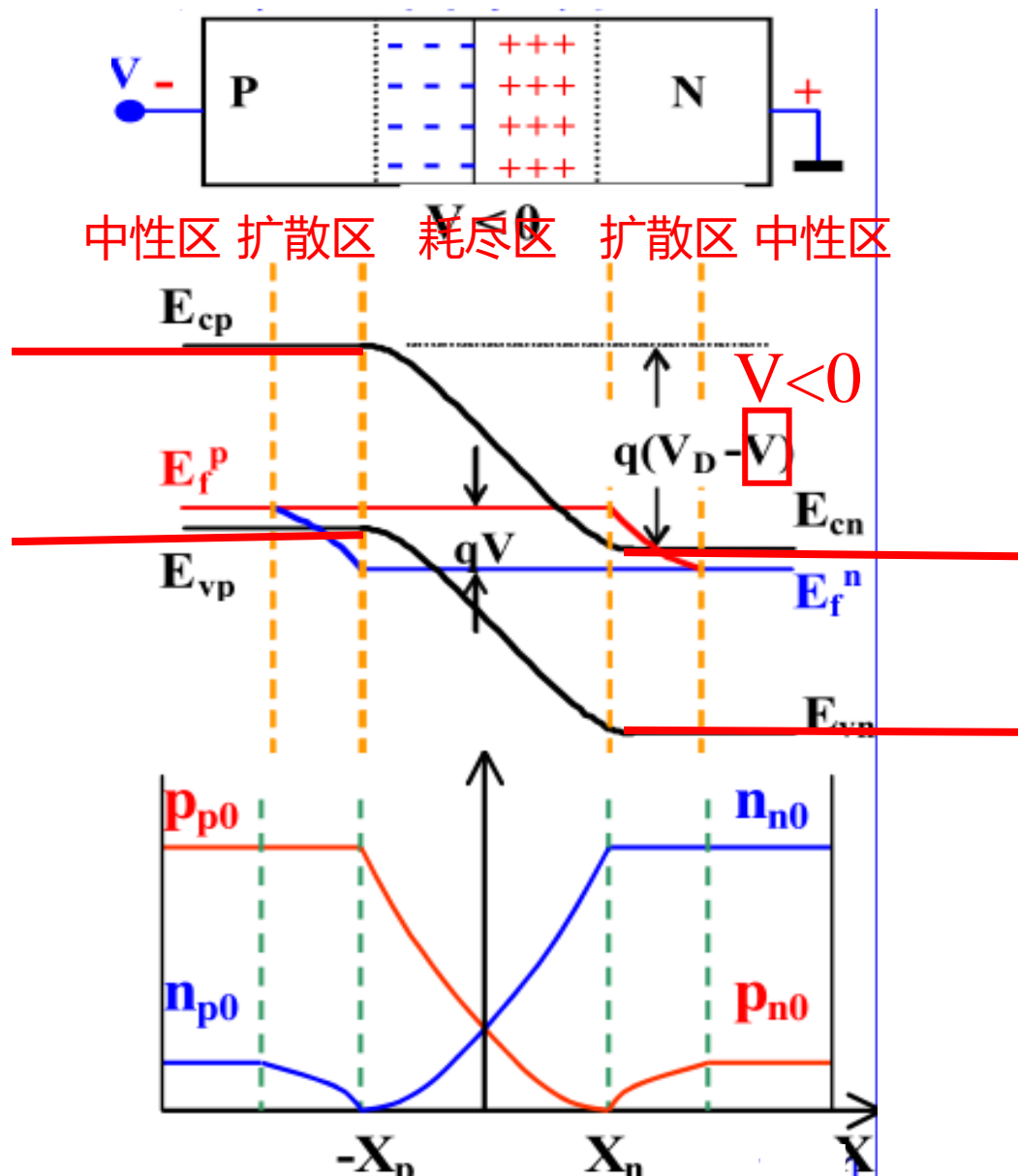


总电场=自建电场 + 外加电场  
(势垒区电场增大)

↓  
漂移 > 扩散

↓  
多余电场将P区边缘电子拖回N区，N区边缘空穴拖回P区

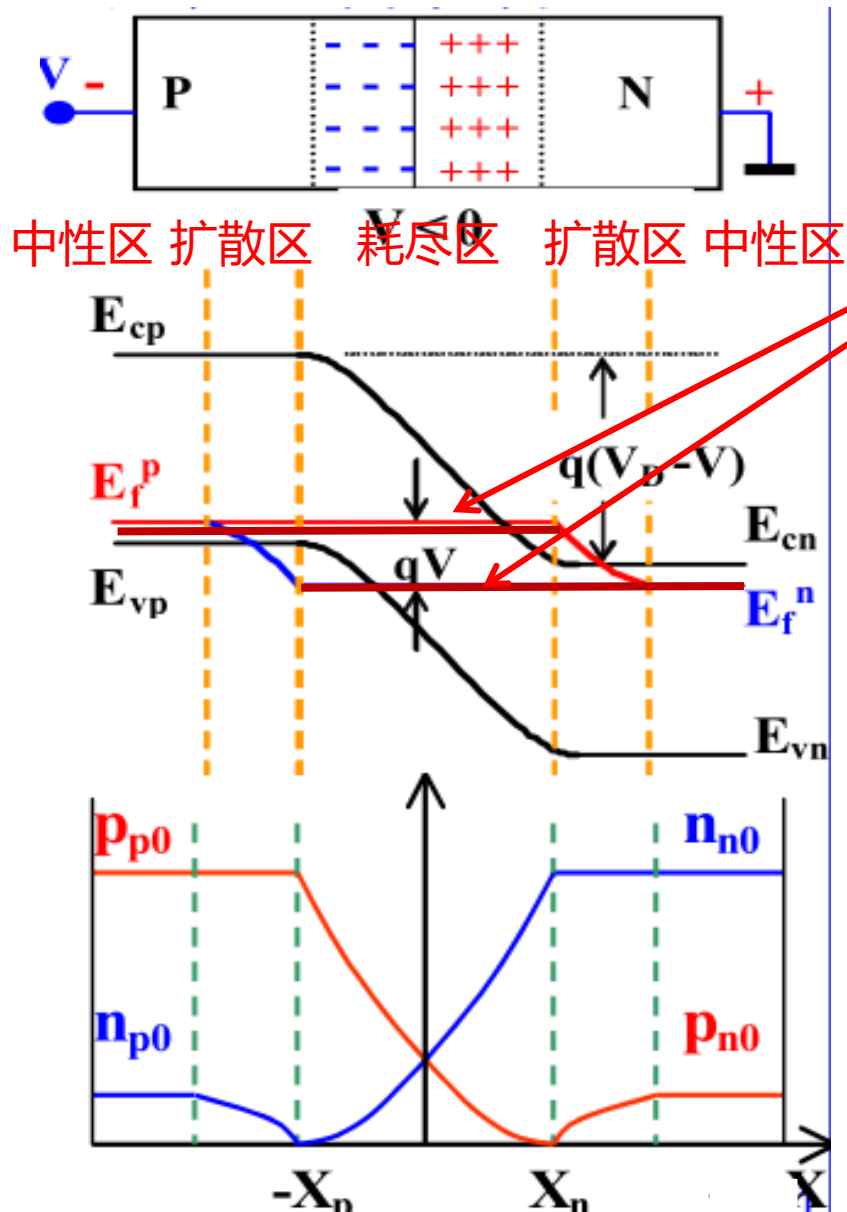
# 反向偏压下的PN结



进入势垒区前能带都不发生变化

自建势增高, N区能带整体下移(假设P区能带位置不变)

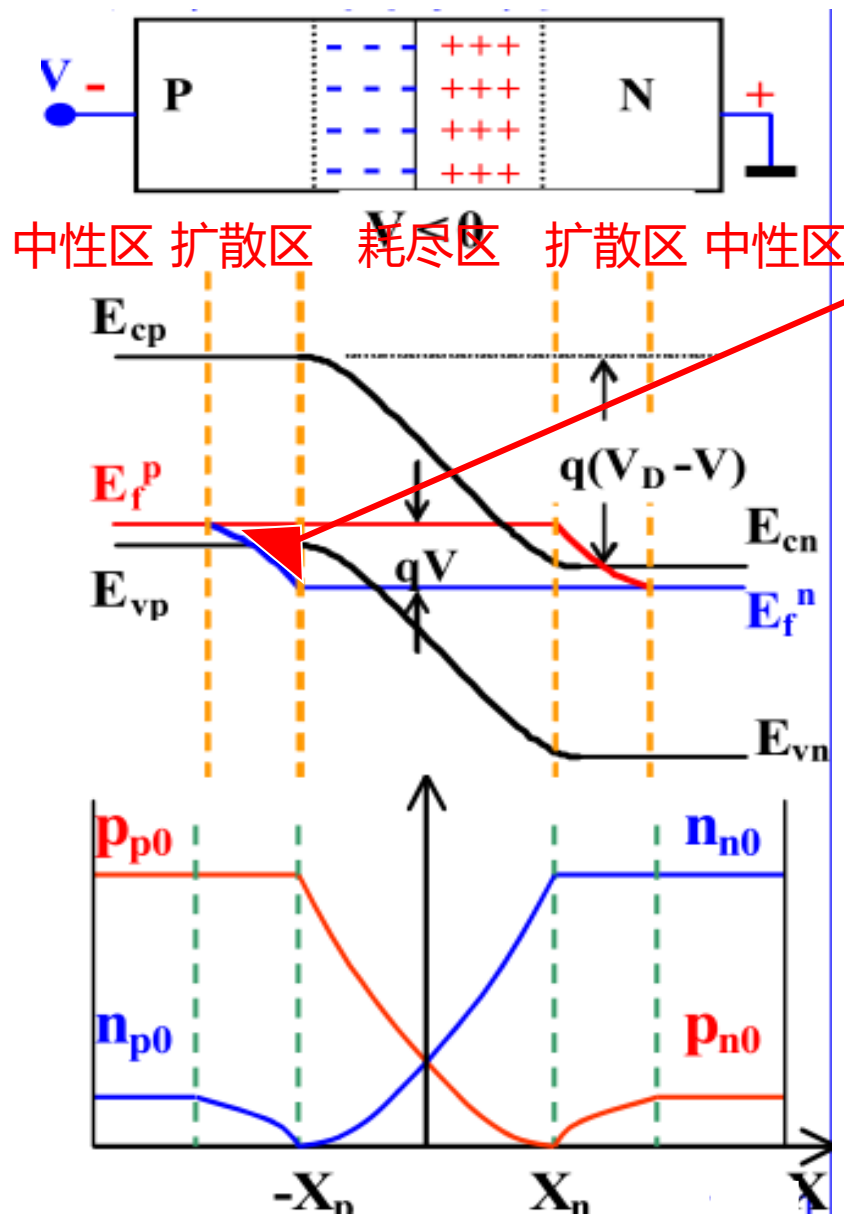
# 反向偏压下的PN结



同正偏情况，设准费米能级在势垒区不变

N区能带整体下移，  
电子准费米能级低于  
空穴准费米能级

# 反向偏压下的PN结



多余电场将P区边缘电子拖回N区，因此势垒区P区边缘电子浓度几乎为0 ( $E_{fn}$  在  $E_{vp}$  之下)。

P区体内电子向势垒区边界处扩散过来，上述过程称为反向抽取。因此电子浓度自势垒区边界至P中性区逐渐增加，费米能级逐渐提升，距导带底距离逐渐减小。



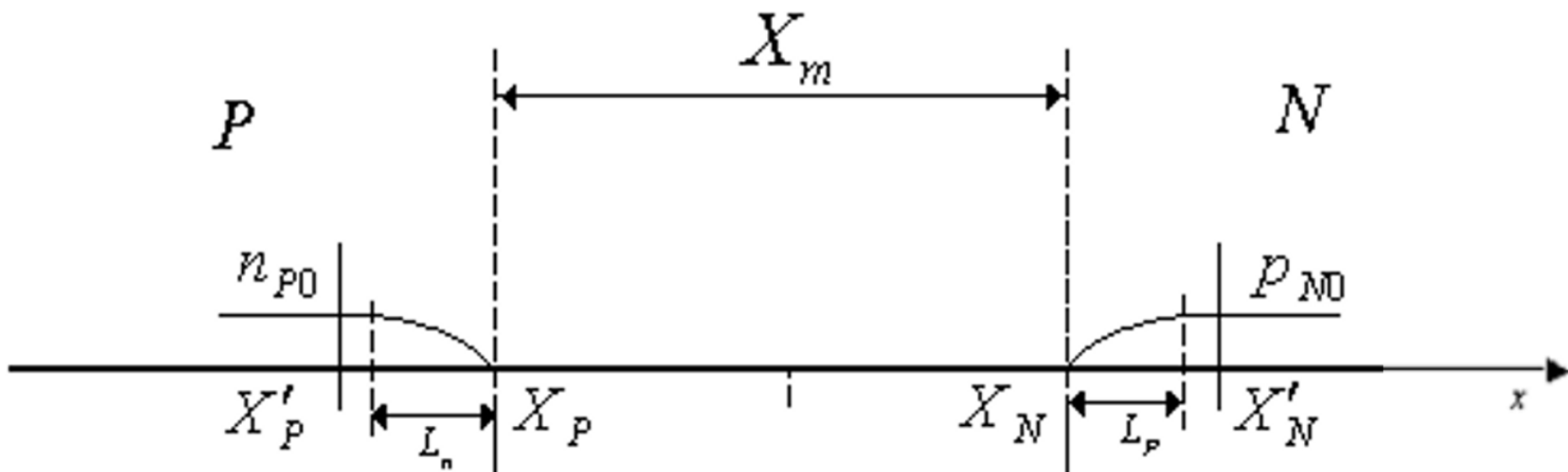
# 反向抽取作用

反偏时，势垒区电场增大，漂移强于扩散：

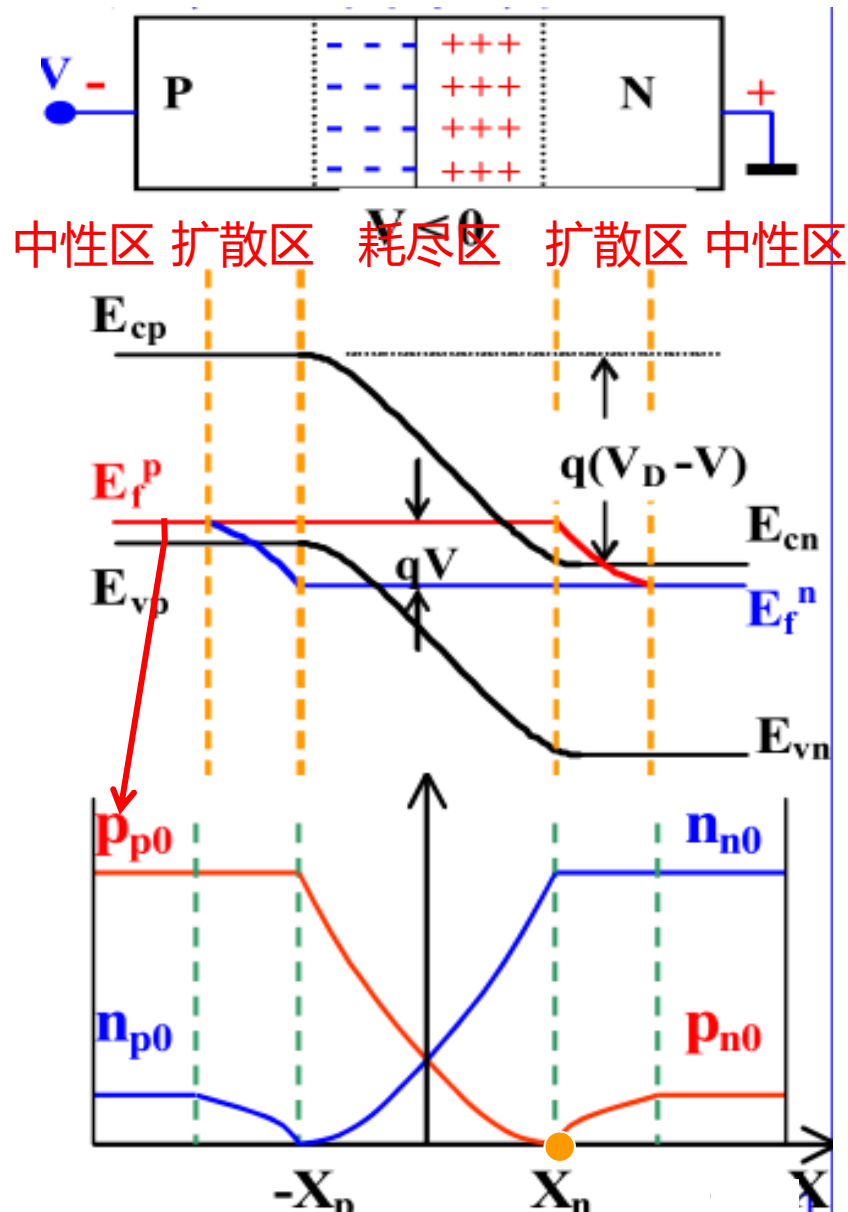
1、P区边界处电子（少子）被强电场驱入N区，电子浓度低于中性区平衡值： $n_p < n_{p0}$ ，并由P型中性区的电子来补充。

2、N区边界处空穴（少子）被强电场驱入P区，空穴浓度低于中性区平衡值： $p_n < p_{n0}$ ，并由N型中性区的空穴来补充。

这种现象称为**反向少子抽取作用**。

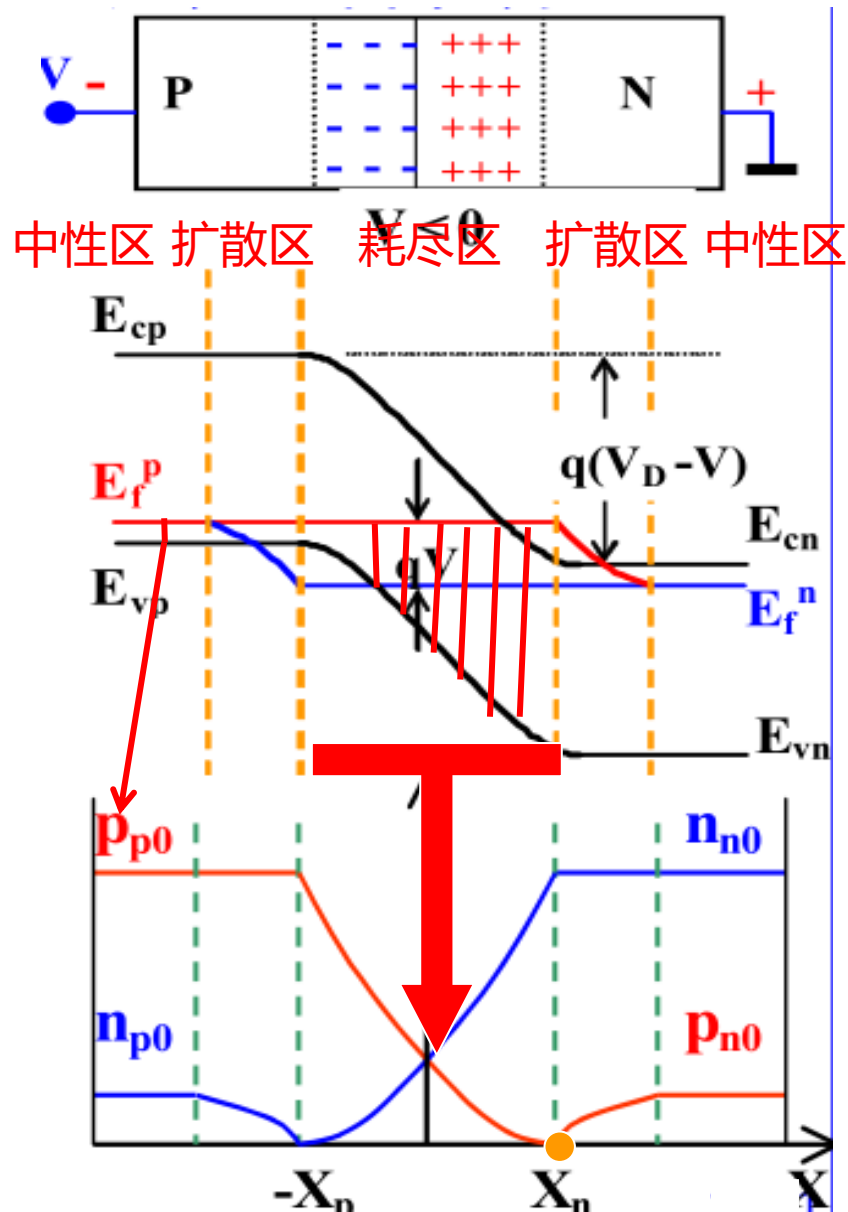


# 反向偏压下的PN结



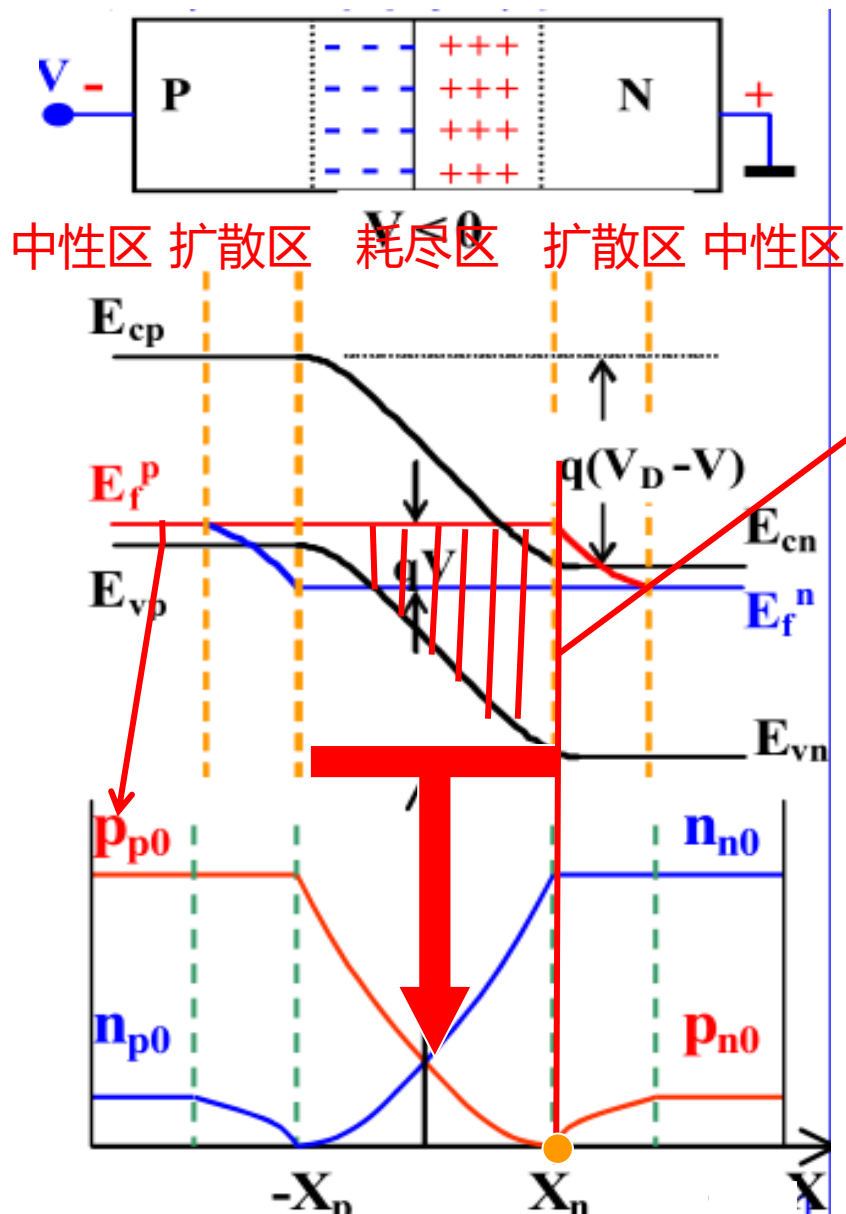
以空穴为例

# 反向偏压下的PN结



以空穴为例

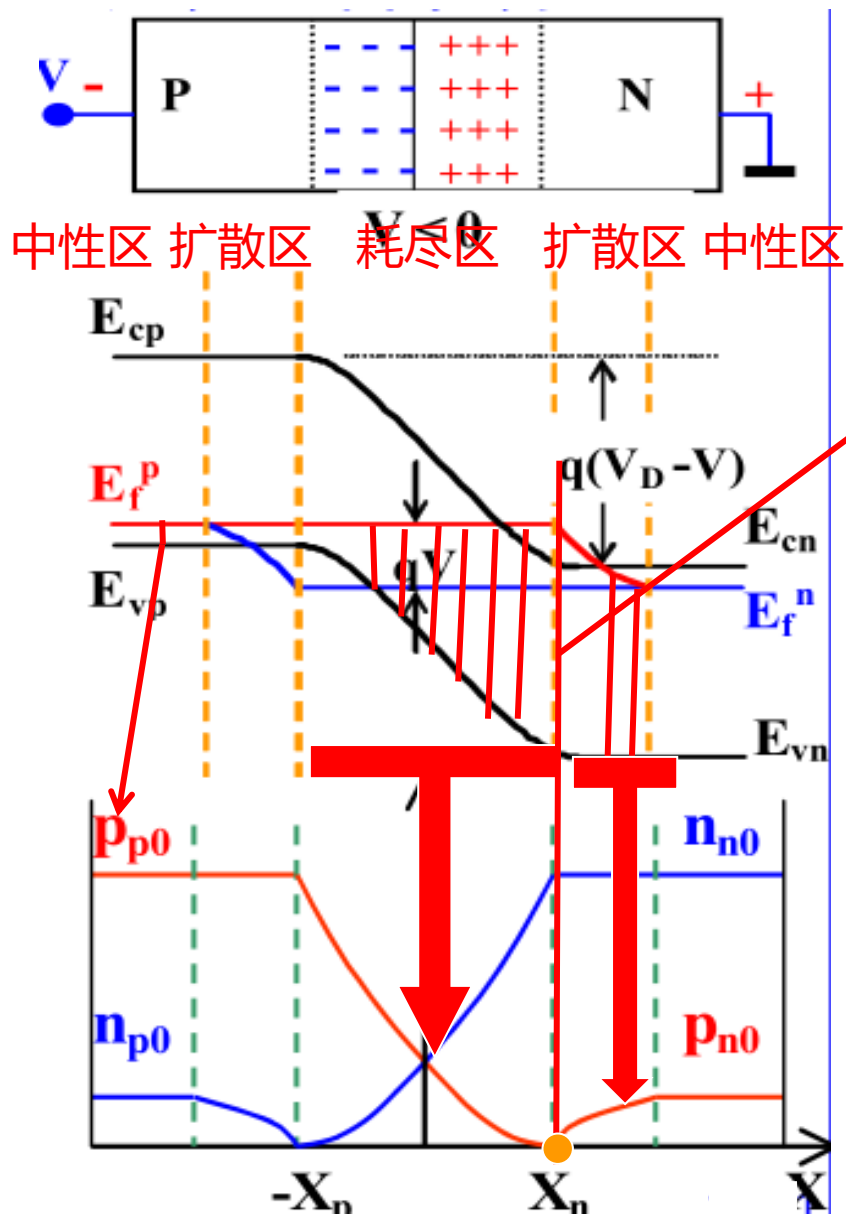
# 反向偏压下的PN结



$E_{fp}$  高于  $E_{cn}$ ，大于禁带宽度，空穴浓度约等于0

以空穴为例

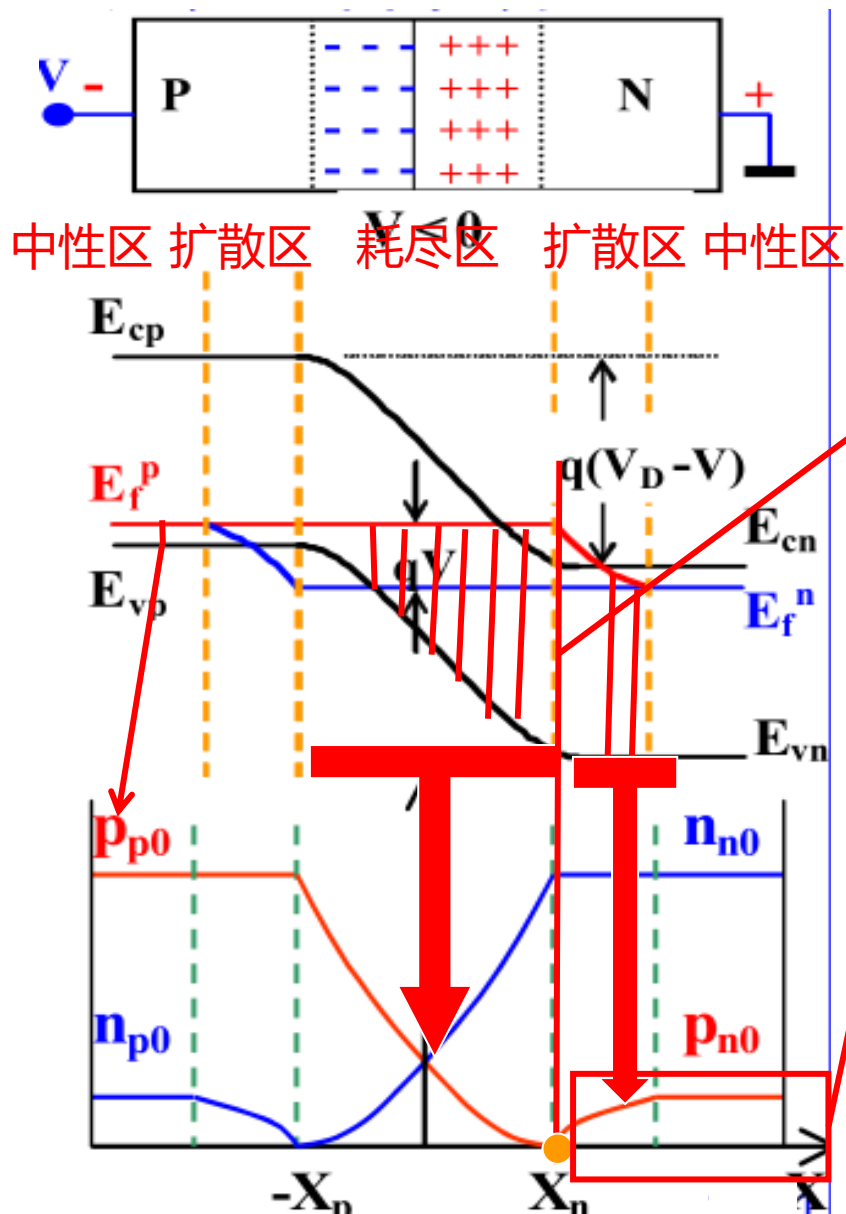
# 反向偏压下的PN结



$E_{fp}$  高于  $E_{cn}$ ，大  
于禁带宽度，空  
穴浓度约等于0

以空穴为例

# 反向偏压下的PN结



$E_{fp}$  高于  $E_{cn}$ ，大于禁带宽度，空穴浓度约等于0

反向扩散不受外加电压影响，仅依赖于浓度，少子扩散距离，扩散长度。侧面说明反偏下PN结电流较小且对电压不敏感

以空穴为例