

4.2 pn结二极管pn junction diode

常见的pn结二极管：

- 变容二极管
- 开关二极管
- 雪崩二极管
- 隧道二极管

二极管结电容特性：

- 扩散电容（正偏：损耗电导）
- 势垒电容（常用反偏、零偏：变容二极管）

4.2.1 变容二极管varactor diode

理想阶跃结二极管单位面积势垒电容容量:

$$C_B = \epsilon_r \epsilon_0 / X_D \propto (V_D + V_R)^{-1/2}$$

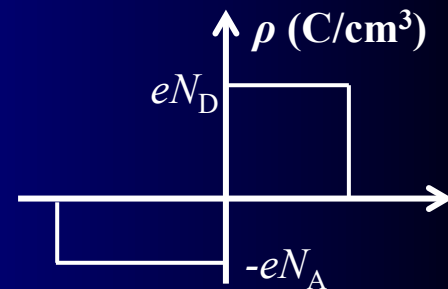
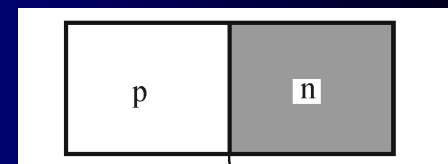
线性缓变结二极管单位面积势垒电容容量:

$$C_B \propto (V_D + V_R)^{-1/3}$$

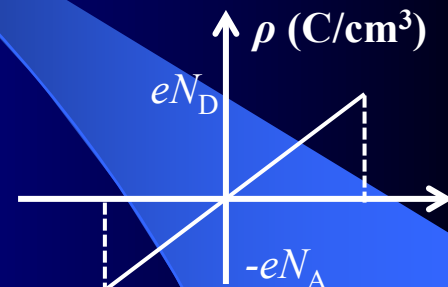
更一般的情况: $N = Bx^m$

- $m = 0$, 为均匀掺杂结;
- $m = +1$, 为线性缓变结;
- $m = +2, +3$, 重掺杂 n^+ 基片上外延低杂质浓度 n 层;
- m 是负值, 为超突变结。

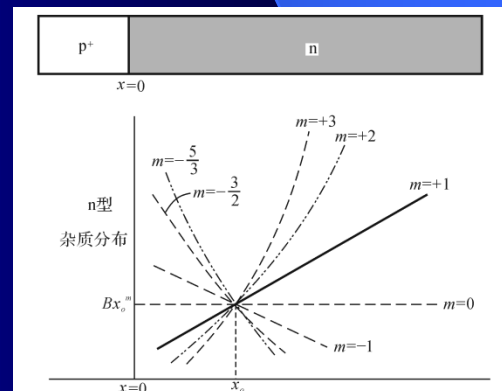
$$C_B \propto (V_D + V_R)^{-1/(m+2)}$$



理想阶跃结



线性缓变结: $\rho = eax$



一般情况: $N = Bx^m$

- 反偏电压 $V = -V_R$
- 变容二极管: $C_B \propto (V_D + V_R)^{-1/(m+2)}$
- 变容二极管的电抗以可控方式随偏压变化, 如果变容二极管并联电感, 则LC回路的谐振频率为:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_B}} \propto (V_D + V_R)^{\frac{1}{2(m+2)}}$$

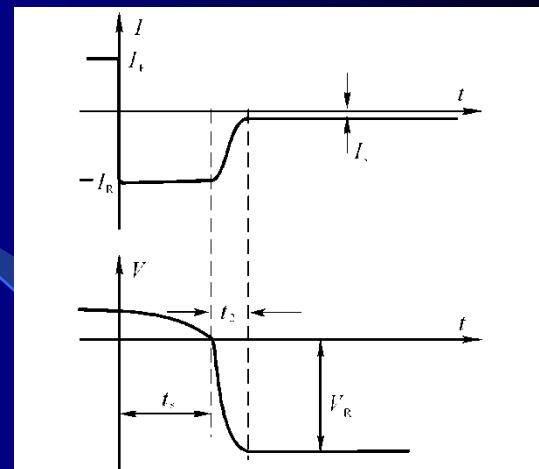
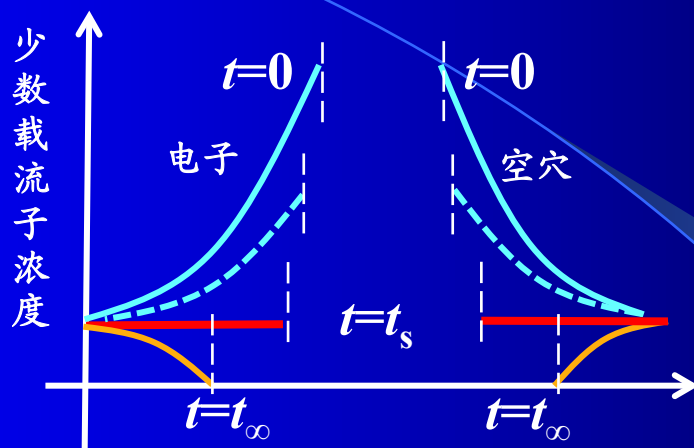
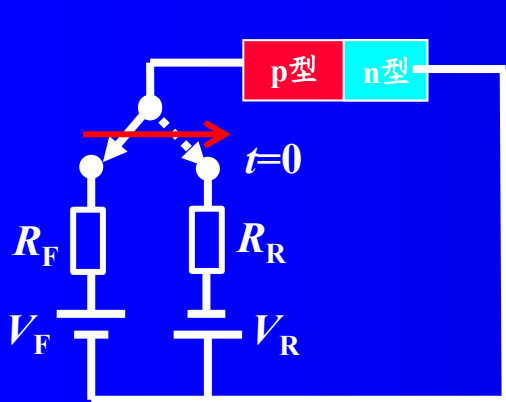
$$m = -\frac{3}{2} \Rightarrow f_r \propto (V_D + V_R)$$

超突变结的谐振频率
与反偏电压成正比

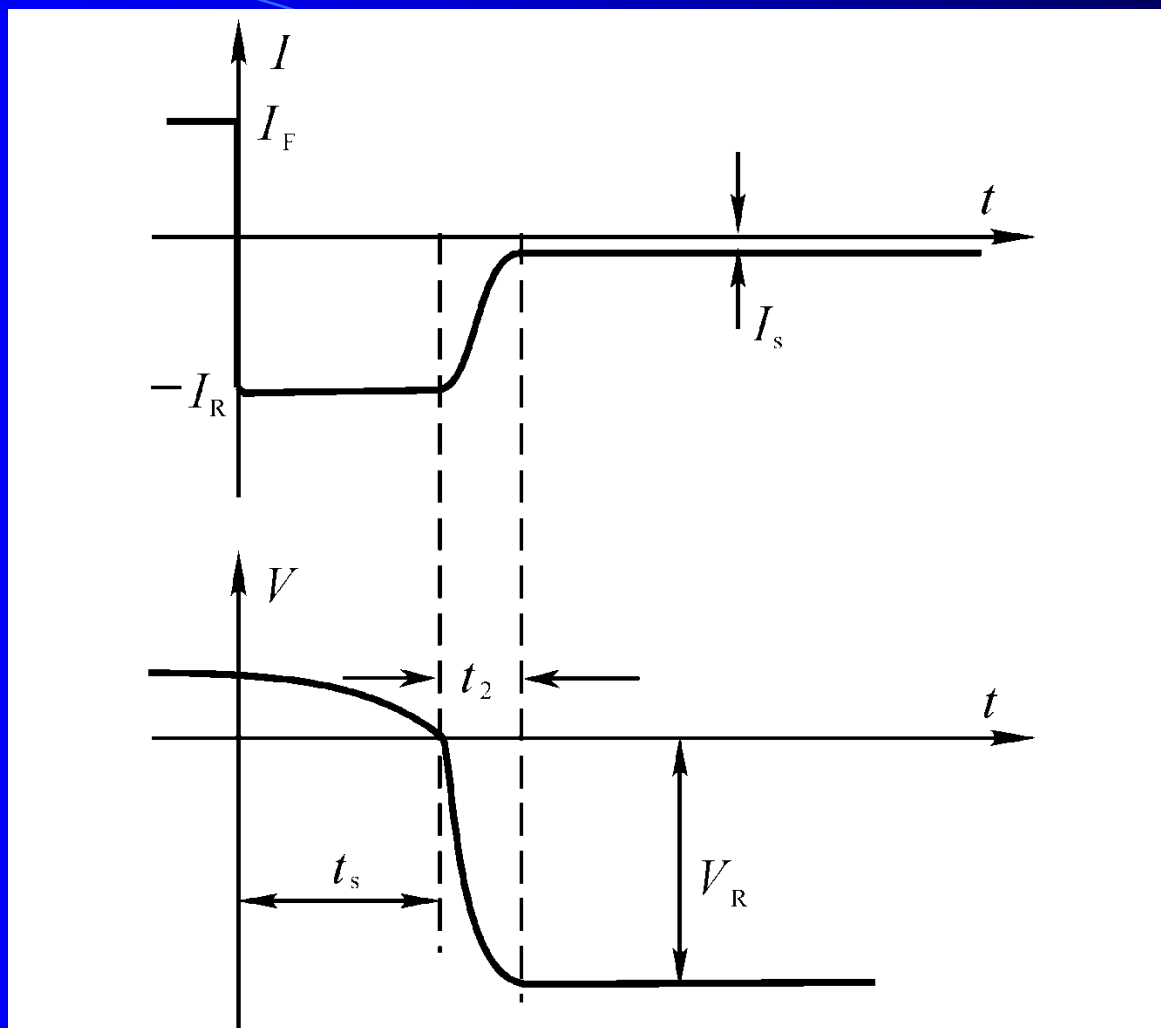
- 常用Si晶体作为变容二极管材料
- 外延生长或离子注入制作超突变结

4.2.2 开关二极管

pn结电子开关：pn结导通（on）、不导通（off）

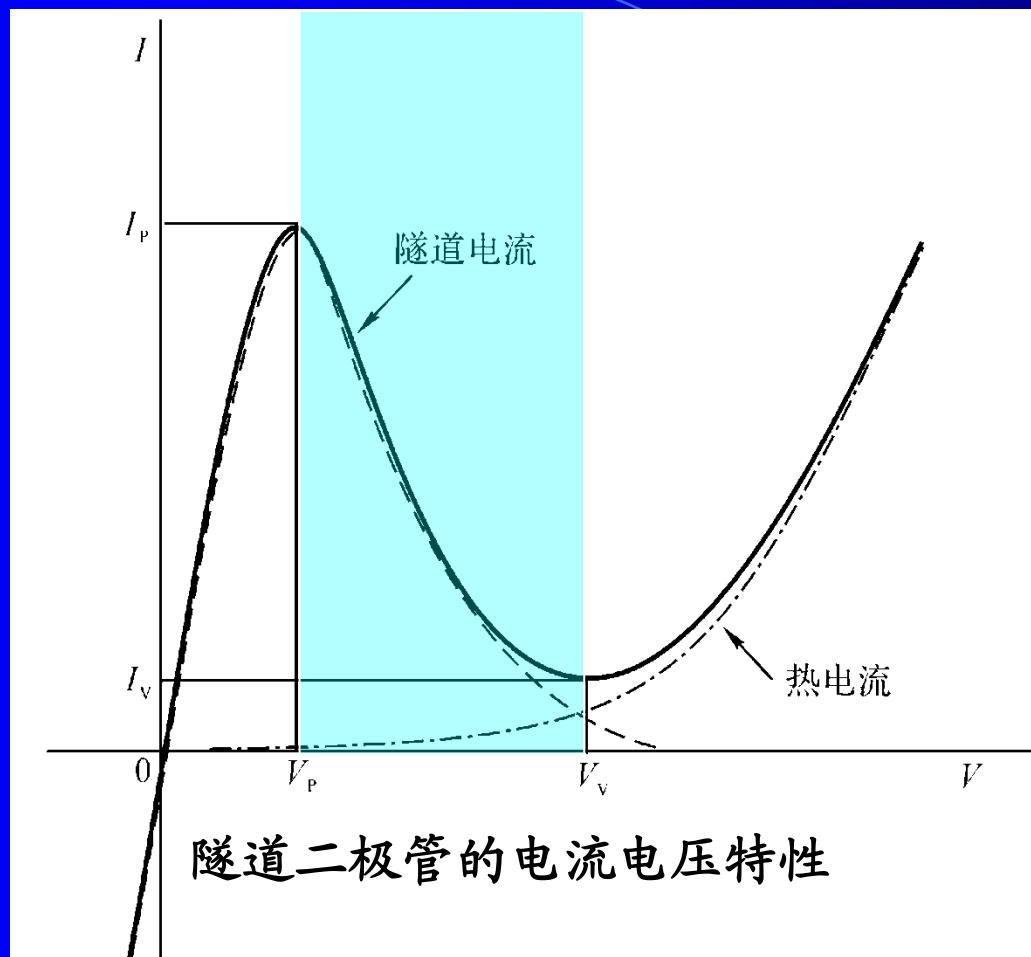


- $t < 0$, 落在结上正偏压为 V_D , 结两侧扩散区内少子积累, 正偏电流为:
$$I_F = (V_F - V_D) / R_F$$
- $t = 0$, 结上压降保持 V_D 不变, 反向电流为: $I_R = (V_R + V_D) / R_R \approx V_R / R_R$
- $0 < t < t_s$, 反向电流近似恒定: $I_R \approx V_R / R_R$, 扩散区内存储的少子流出被消耗, 结上正偏压逐渐下降到0, t_s 称为存储时间。
- $t > t_s$, pn结开始反偏, p区和n区内部的少子被反向抽取, 空间电荷区增大。
- $t > t_s + t_2$, pn结稳定, V_R 电压全落在pn结上, 电流为反向饱和电流。



开关二极管的反向总恢复时间: $t_r = t_s + t_2$

4.2.3 隧道二极管 tunnel diode

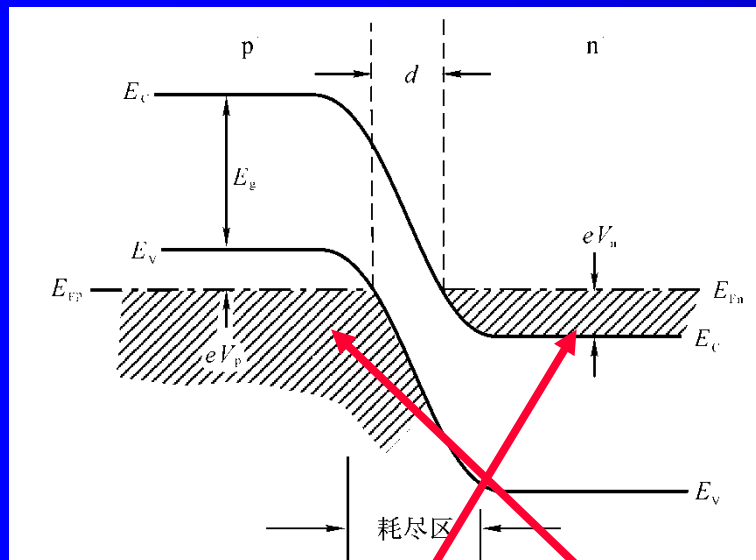


- 1958年由江崎在研究重掺杂锗PN结时首次发现，1973年获得诺贝尔奖。
- 隧道是量子效应，不受电子渡越时间限制，因此隧道二极管可在极高的频率下工作（100GHz），广泛应用于微波放大，高速开关等。

4.2.3 隧道二极管 tunnel diode

p^+n^+ (重掺杂) 二极管

$$X_D = \sqrt{(V_D - V) \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)}$$



- 重掺杂：使得n区和p区的费米能级分别进入导带和价带，从而n区导带和p区价带出现具有相同能量的量子态。
- 重掺杂：使耗尽区宽度变得很窄，隧道距离很小（约5~10 nm），提高了隧穿几率。 $T \propto \exp(-2d)$

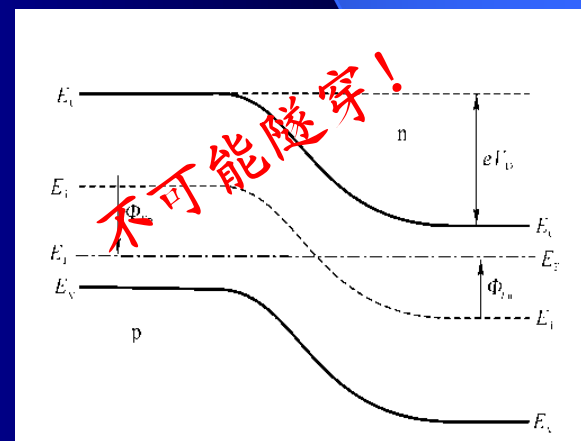
热平衡

$$n = N_D > N_C$$

$$E_F(T) = E_{C0} + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{N_C} \right)$$

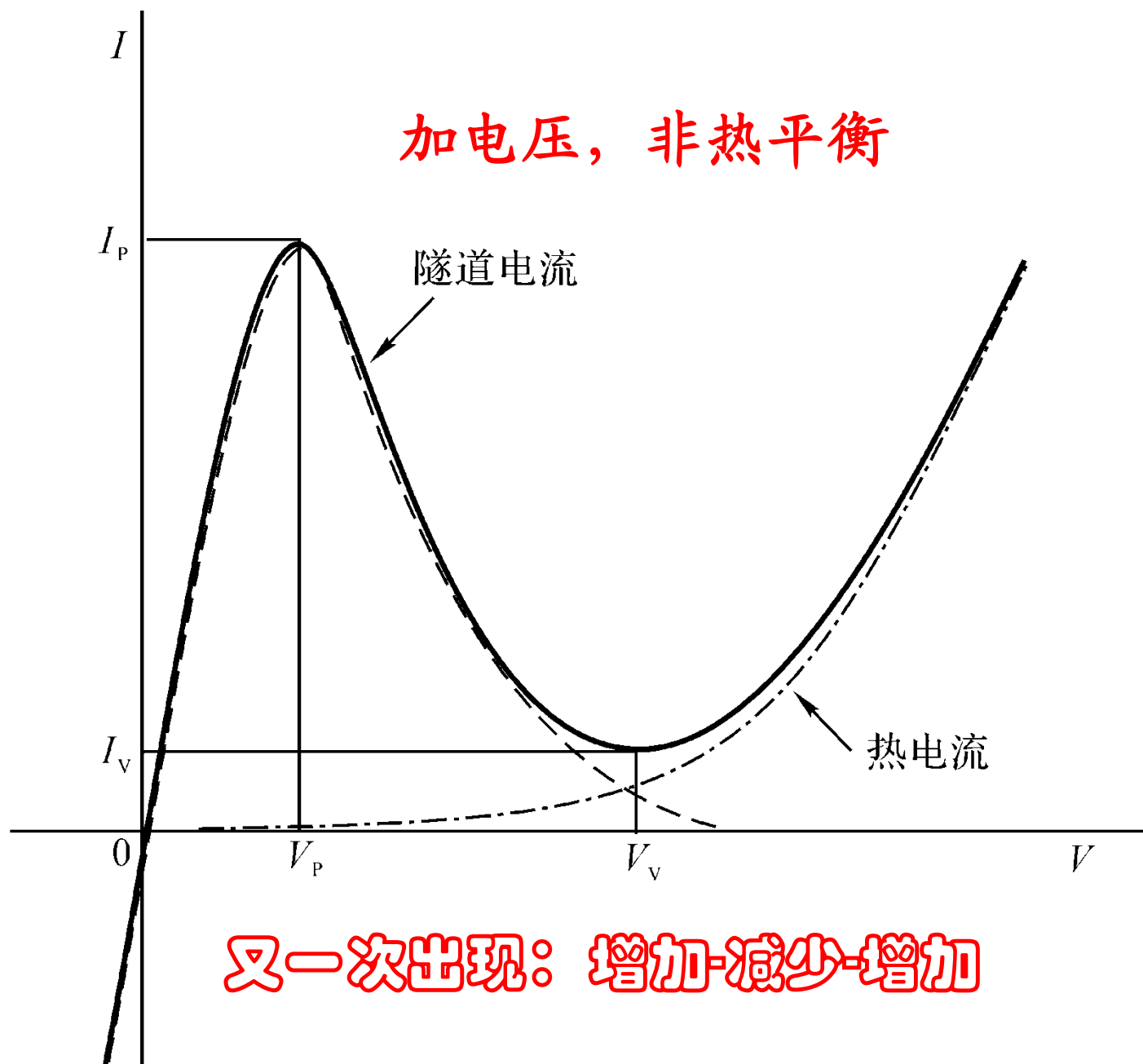
$$p = N_A > N_V$$

$$E_F(T) = E_{V0} - k_B T \ln \left(\frac{N_A}{N_V} \right)$$

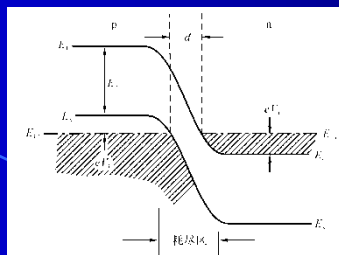


常规二极管

加电压，非热平衡

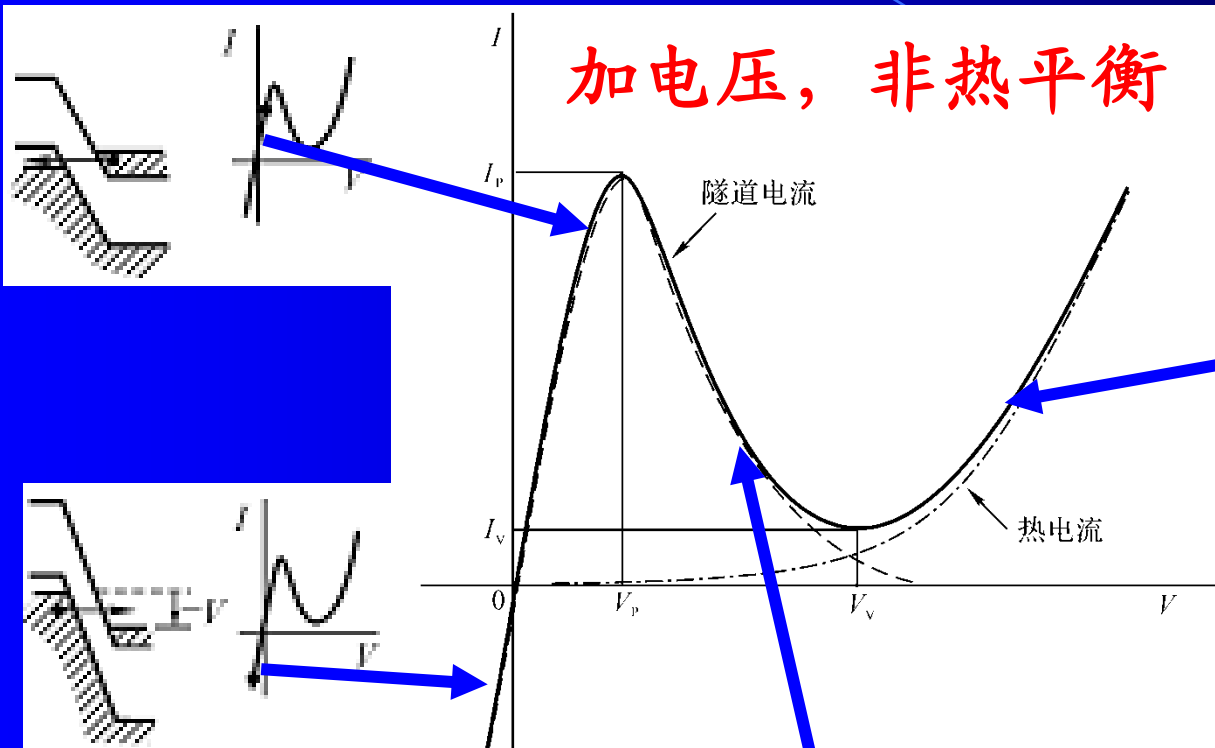


隧道效应：n区导带
电子进入p区价带，
产生正向隧道电流



只有热电流，
没有隧道效
应产生的隧
道电流

2



1

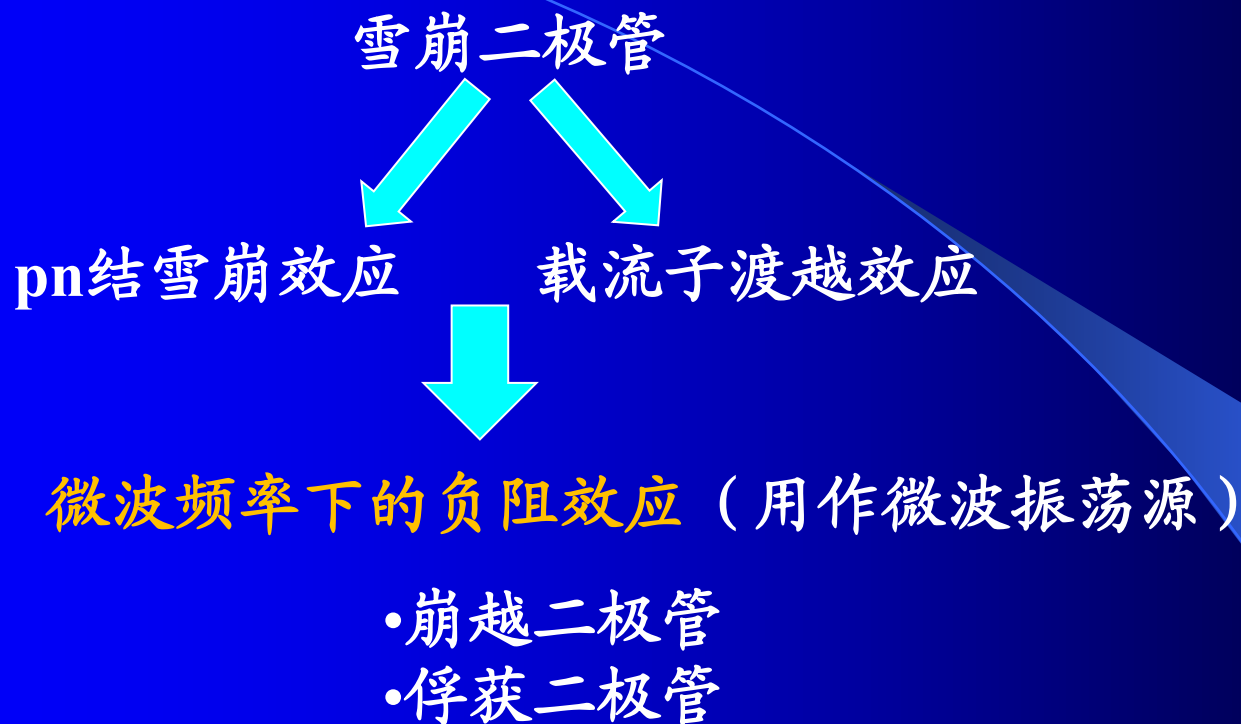
隧道效应：p区价带电
子进入n区导带，产生
反向隧道电流

4

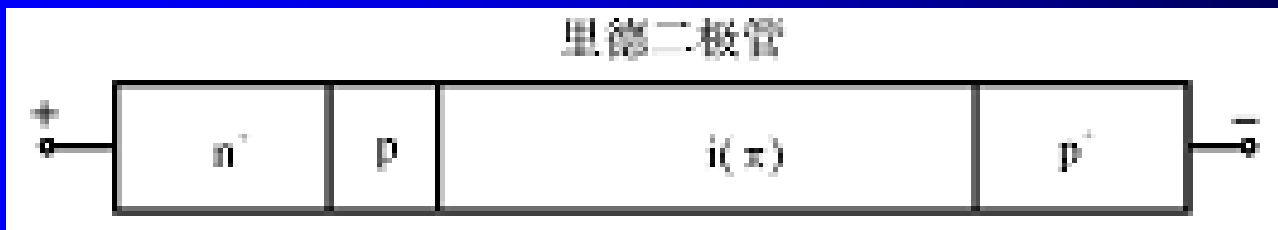
隧道效应：n区导带电子
进入p区价带，产生正向
隧道电流，但p区价带顶
介于n区导带底和 E_F 之间

3

4.2.4 雪崩二极管



崩越二极管： $n^+p_i p^+$ 型里德(Read)二极管



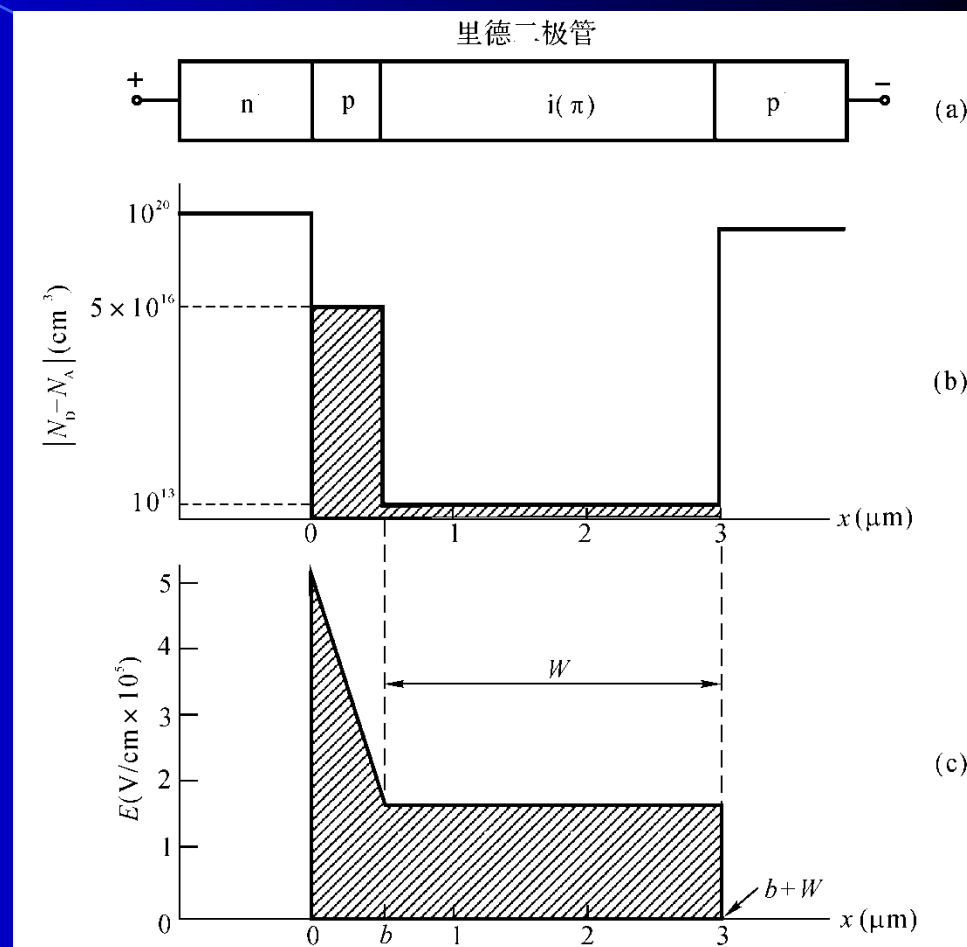
i 代表高阻层， p 型材料高阻层为 π 层， n 型材料高阻层为 ν 层

高反偏电压

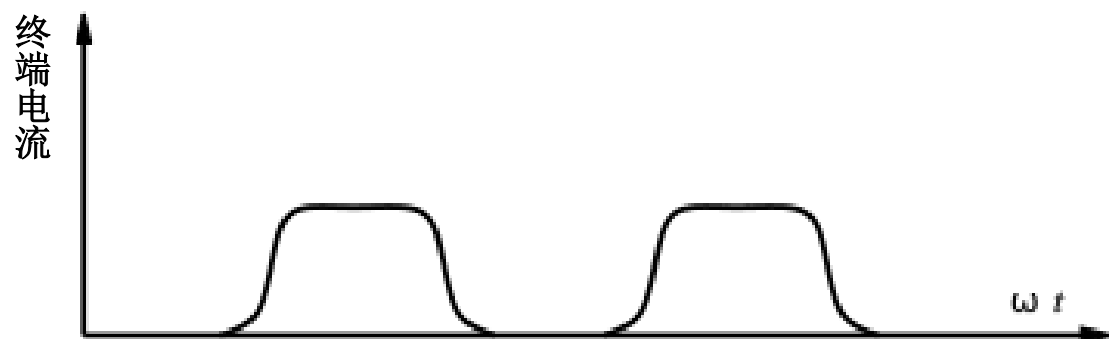
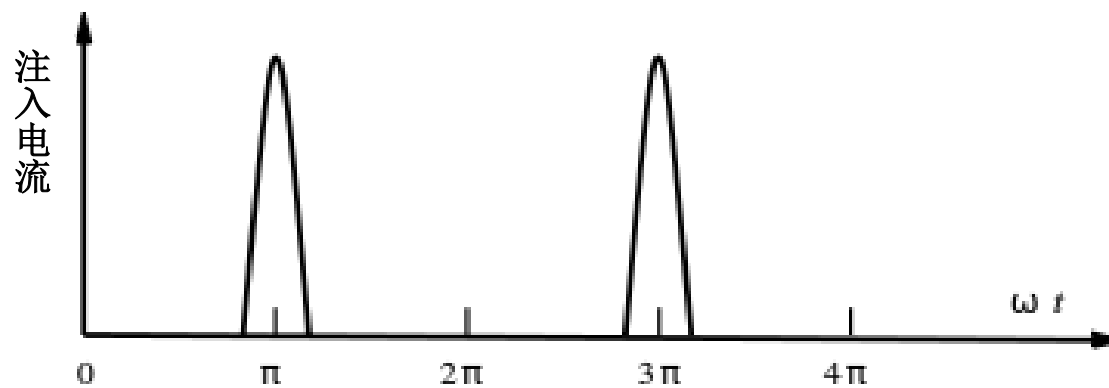
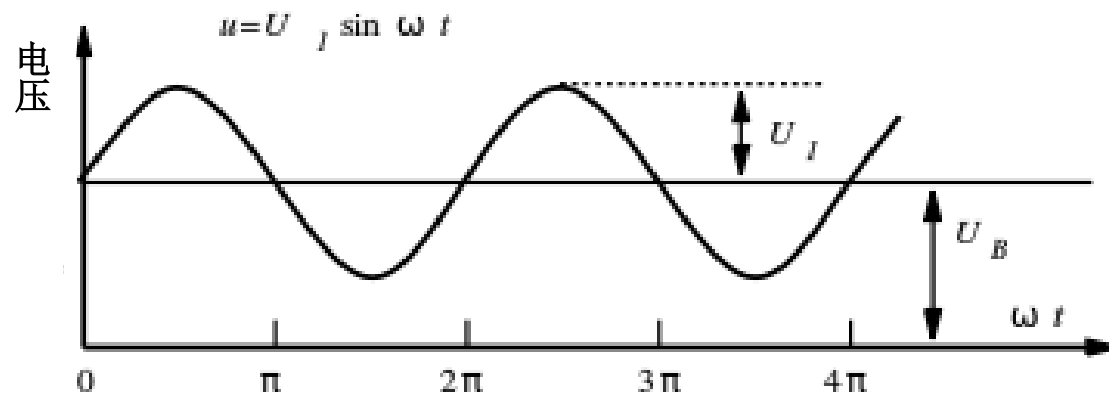
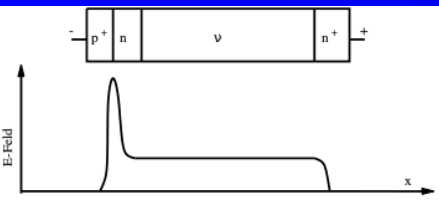
↓
n⁺p结雪崩击穿（雪崩区）

↓
雪崩载流子，形成雪崩区电流

↓
次强电场（漂移区）
p区很薄，漂移区主要是i区
空穴以的饱和速度漂移运动，
由p⁺区收集，形成外电流



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



电流与电压之间有 π 的相位差，**负阻效应**

4.3 双极型晶体管

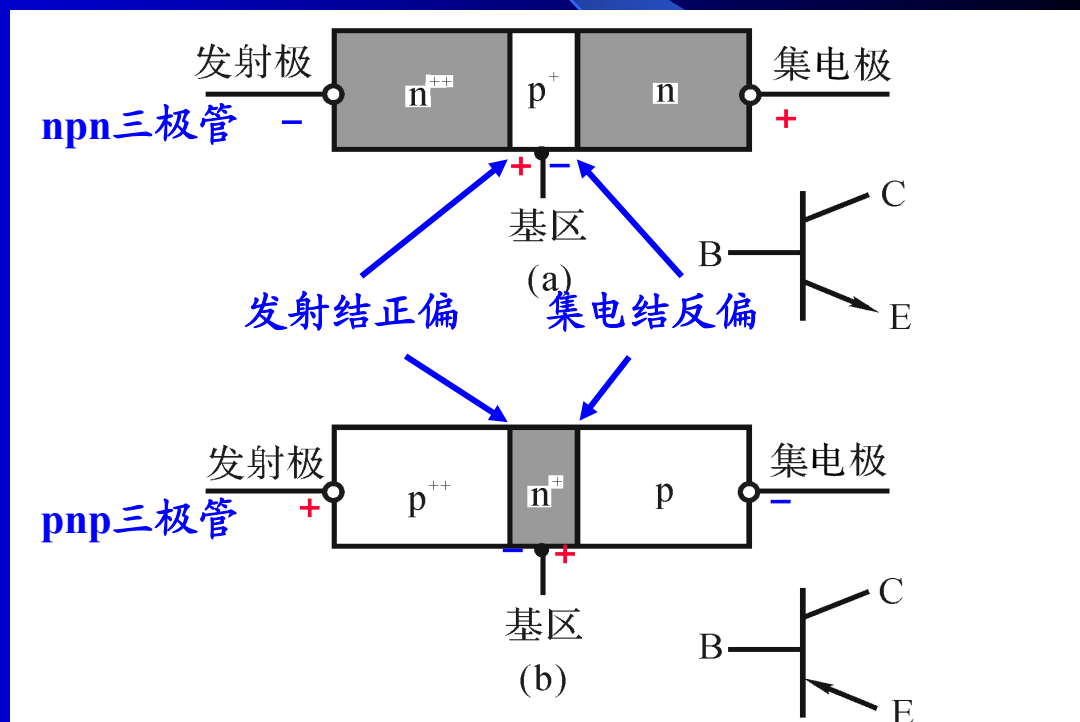
4.3.1 晶体管的基本结构和工作原理

三个独立的掺杂区和
两个pn结（互相影响、背靠背）

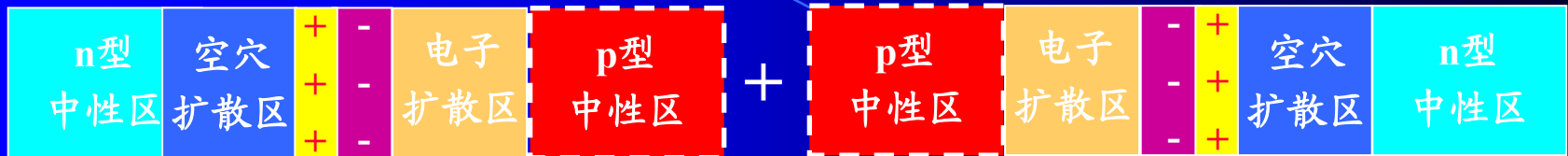
晶体管：

- 有源三端器件
- 电子、空穴两种载流子电流
- 双极型器件

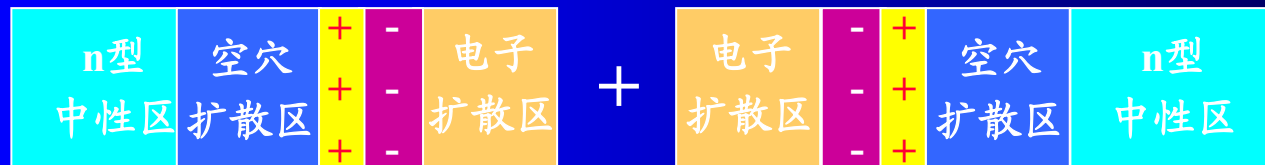
基本工作原理在“电路
分析原理”和“电子电
路基础”中有介绍



npn三极管 \neq np二极管 + pn二极管

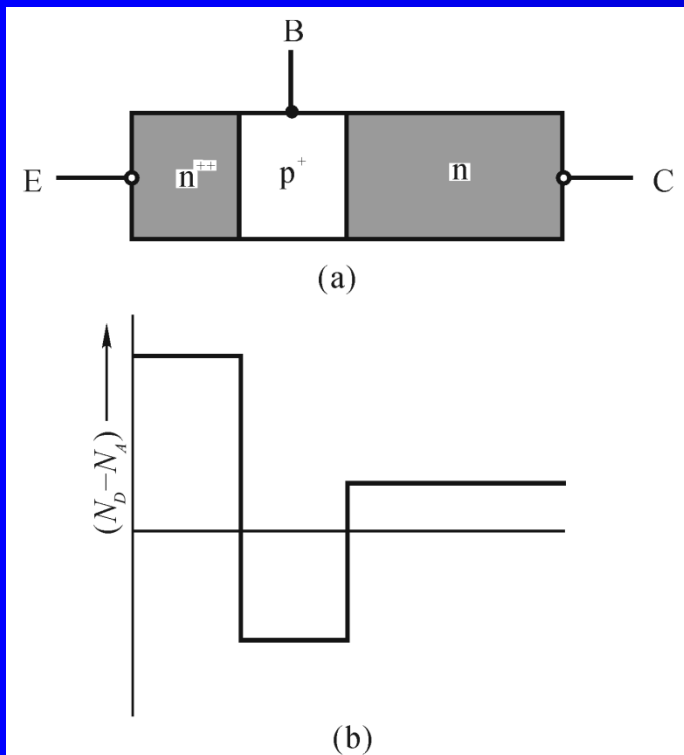


npn三极管 = np二极管 + pn二极管 + 互相影响



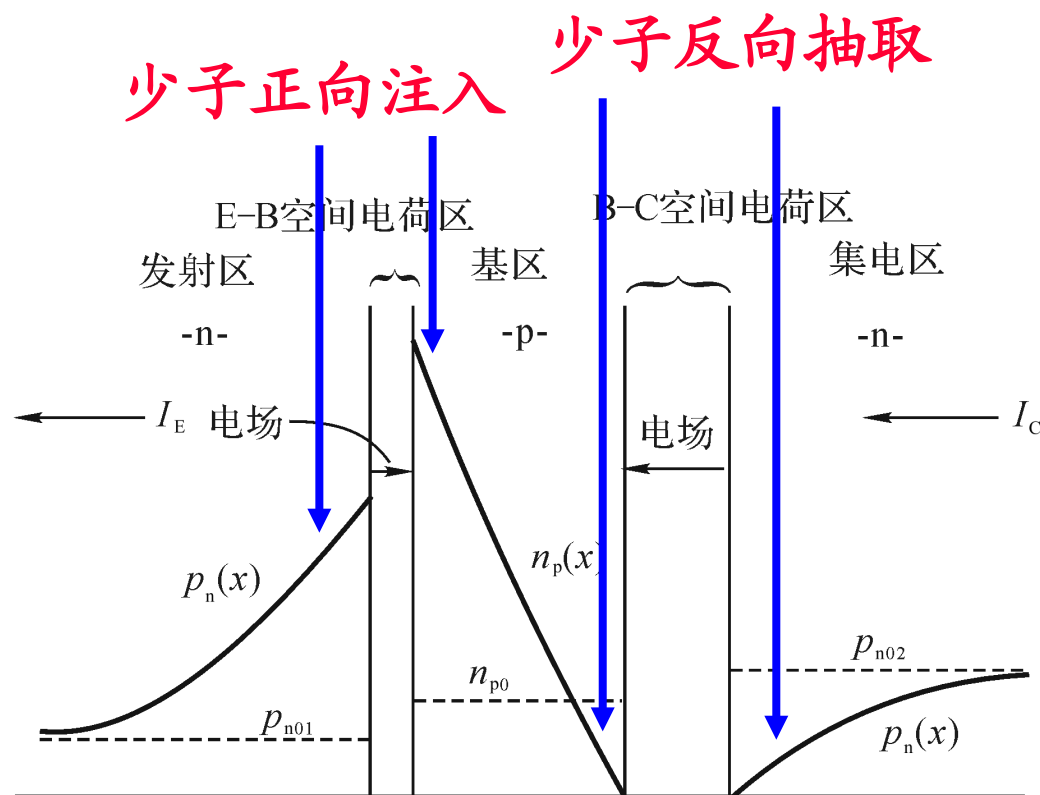
两个背靠背pn结互相影响：基区宽度比少子扩散区短

两个互相影响pn结



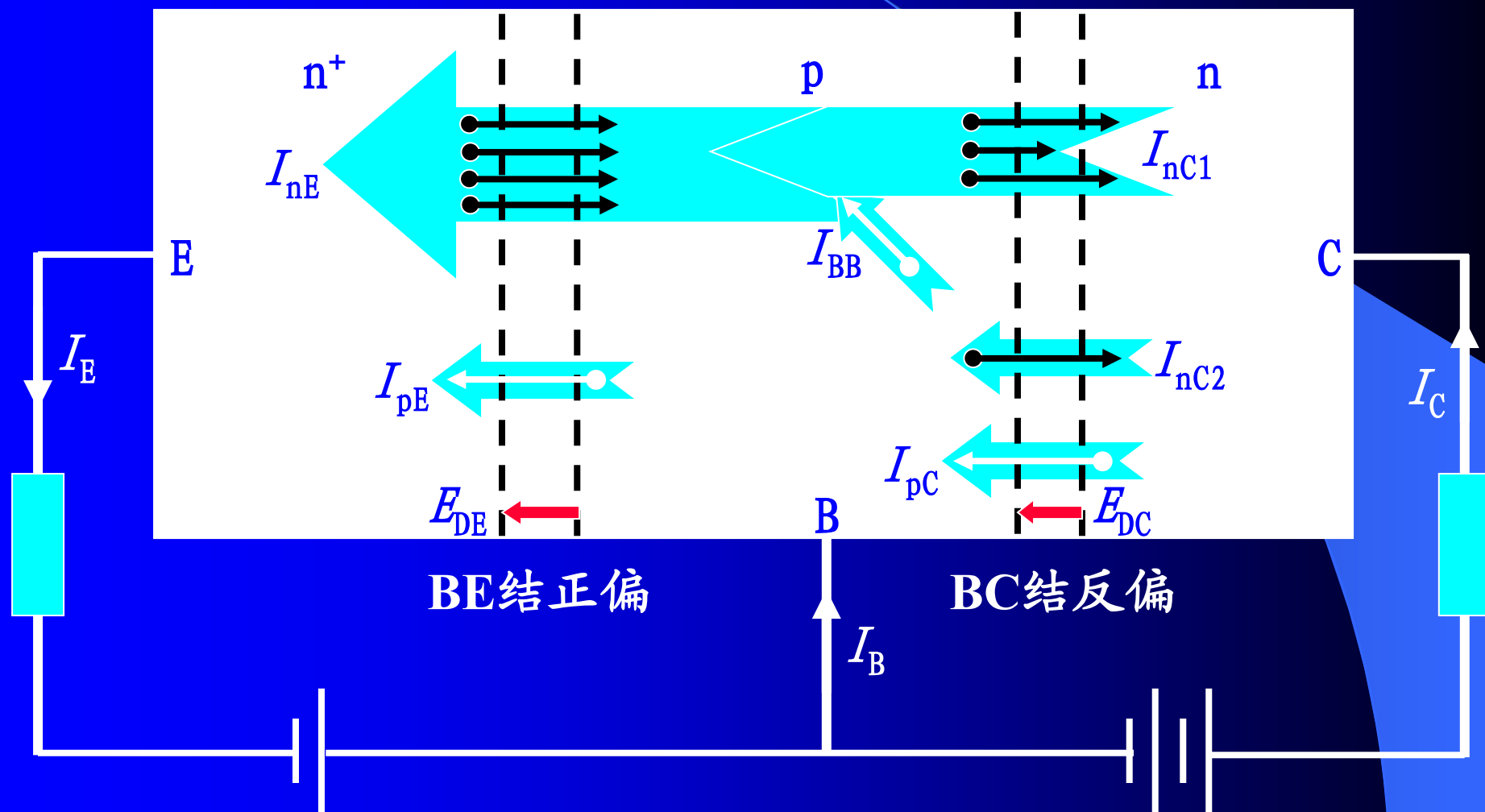
基区宽度比少子扩散长度短

晶体管每个区域内少子浓度分布：



4.3.2 晶体管的放大作用

共基极npn晶体管：



发射区 (BE结正偏)

内建电场下降、势垒下降

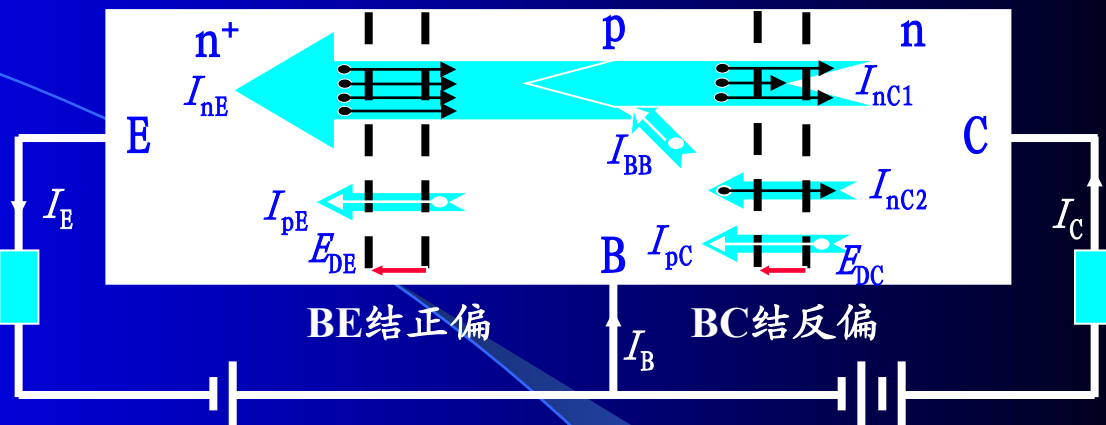
发射区的电子 (多子)

加速穿过BE结注入基区,

基区的 (少子) 电子浓度增加,

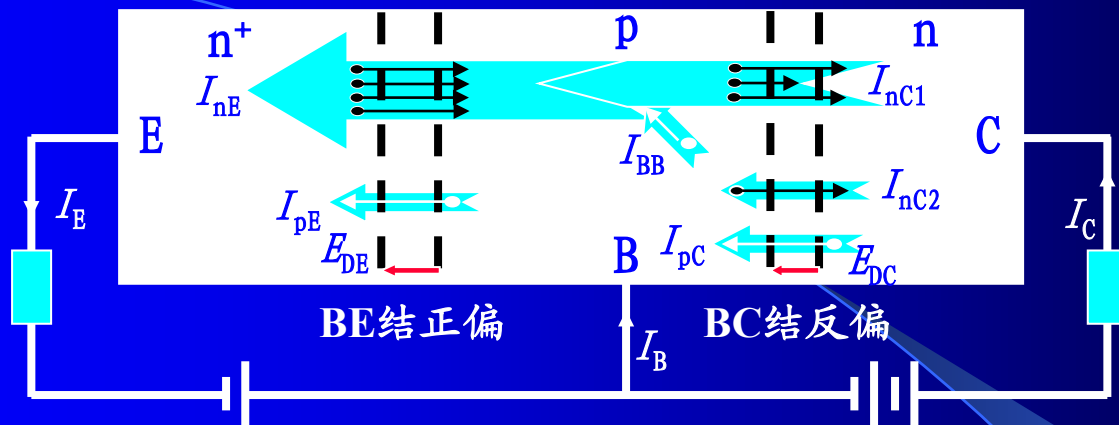
形成电子扩散电流 I_{nE}

发射极电流 $I_E = I_{nE} + I_{pE}$



基区的空穴 (多子)
加速穿过BE结注入发射区

发射区的 (少子) 空穴
扩散电流 I_{pE}



基区：

电子扩散电流 I_{nE}

基区较薄

大部分扩散到BC结

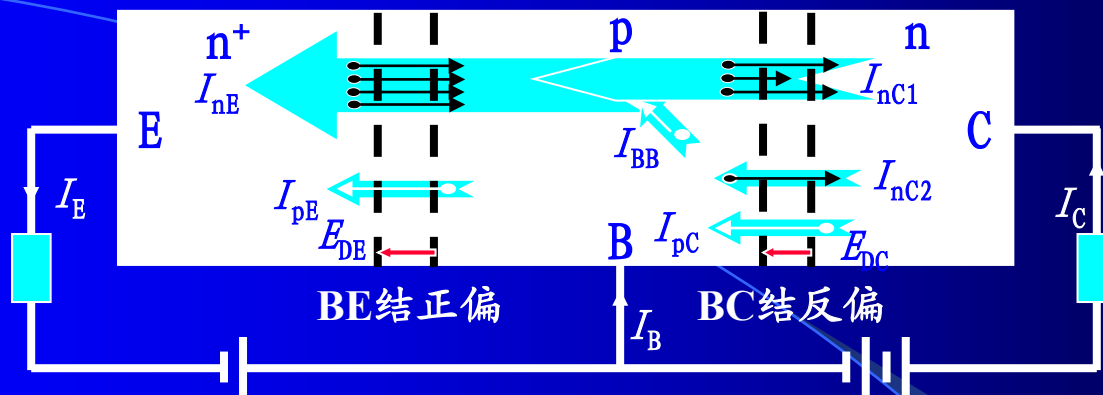
BC结反偏很高

电子迅速漂移扫入集电区，

形成电子扩散电流 I_{nC1}

少部分与基区的
空穴（多子）复合

复合电流 I_{BB}



基区的电子（少子）

热运动 ↓

BC结p区边缘

↓ BC结反偏、内建电场增加 ↓

电子迅速漂移

进入集电区，

形成电子电流 I_{nC2}

BC结反向饱和电流

集电区的空穴（少子）

热运动 ↓

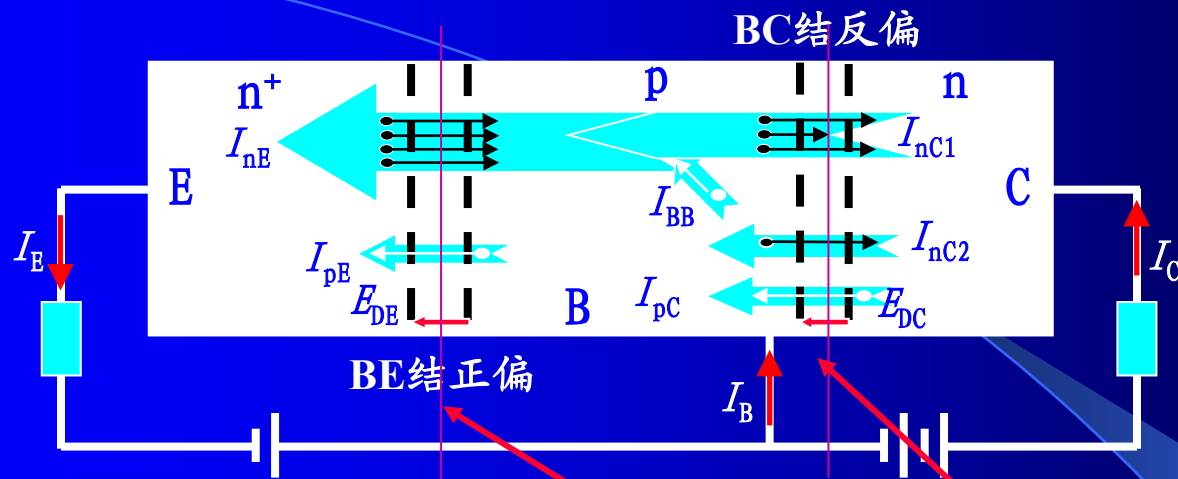
BC结n区边缘

空穴迅速漂移

进入基区，

形成空穴电流 I_{pC}

$$I_{CB0} = I_{nC2} + I_{pC}$$



发射极电流

$$I_E = I_{nE} + I_{pE}$$

集电极电流

$$I_C = I_{nC1} + I_{nC2} + I_{pC} = I_{nC1} + I_{CB0}$$

BC结反向饱和电流

$$I_{CB0} = I_{nC2} + I_{pC}$$

电子电流

$$I_{nE}、I_{nC1}、I_{nC2}$$

空穴电流

$$I_{pE}、I_{BB}、I_{pC}$$

双极型

集电极电流受正偏BE电压控制，与反偏BC电压无关。器件中某部分电流收到另一部分电压的控制。由“低电阻输入”到“高电阻输出（trans+resistor=transistor）”

4.3.3 电流—电压特性

4.3.4 击穿电压与穿通电压

4.3.5 频率特性

4.3.6 开关特性

这四小节的内容在

“电路分析原理”和“电子电路基础”中有介绍

4.3.7 晶体管噪声

晶体管放大器的主要噪声：

- 外界：输入、感应、耦合等方式引进的噪声
- 晶体管本身：
 - 热噪声：载流子无规则热运动引起电流起伏（温度愈高，热噪声也愈大）
 - 散粒噪声：载流子数目将在平均值附近起伏
 - 低频 $1/f$ 噪声（ $1/f$ ）：表面能级、晶格缺陷、位错和晶体不均匀性

噪声系数： $F = \text{输入信噪比} / \text{输出信噪比}$

4.4 金属—半导体接触和肖特基势垒

金属—半导体（简称金—半或M-S）接触：整流器、检测器、二极管、场效应晶体管、太阳能电池、半导体集成器件电极

4.4.1 理想肖特基势垒Schottky barrier

• **真空能级 E_0** ：表面外真空中电子势能，固体中刚能够脱离固体，发射到真空中的电子能量（真空能级连续）

• **金属功函数 ϕ_m** ：电子从金属中逸出到表面外的真空中去至少需要的能量。金属费米能级以上为空态、以下充满电子。

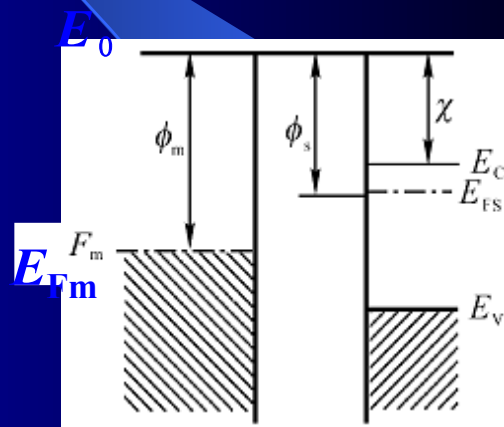
$$\phi_m = E_0 - E_{Fm}$$

• **半导体功函数 ϕ_s** ：半导体费米能级与真空能级之差。

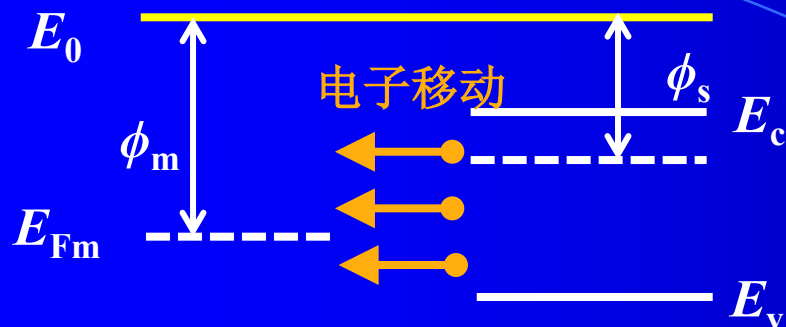
$$\phi_s = E_0 - E_{Fs}$$

• **电子亲和势 χ** ：真空能级与半导体导带底之差（不变）

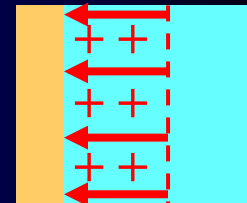
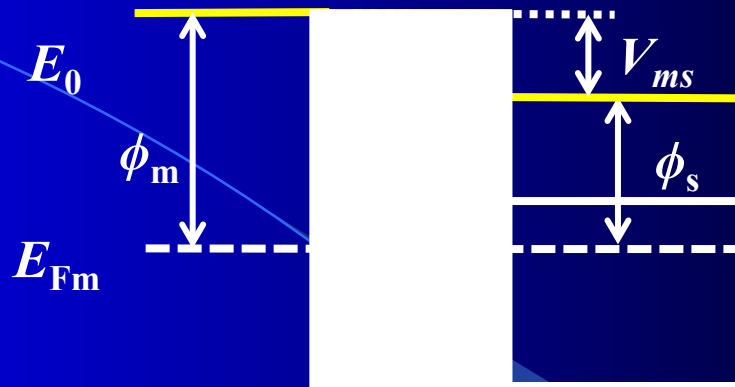
$$\chi = E_0 - E_C$$



接触前



接触后



$$\phi_m > \phi_s \quad E_{Fs} > E_{Fm}$$

电子从半导体流向金属

金属表面负电荷、半导体表面带等量正电

产生接触电势差（降低/提高了半导体/金属的电子势能）

接触电势差阻止半导体中电子继续流向金属

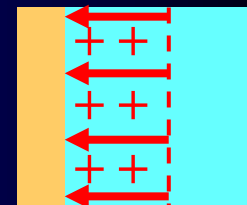
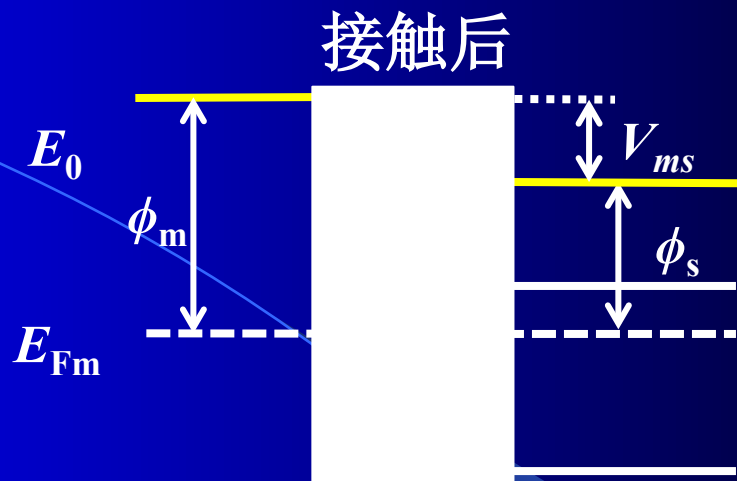
平衡状态时 **统一的费米能级** 没有电子的净流动

接触电势差大小为：

$$V_{ms} = (\phi_m - \phi_s)/e$$

接触电势差大小为:

$$V_{ms} = (\phi_m - \phi_s)/e$$



金属表面负电荷、半导体表面带等量正电

负电荷集中在表面金属

半导体一侧留下固定的电离施主

金属内部电场为零 (压降为零)

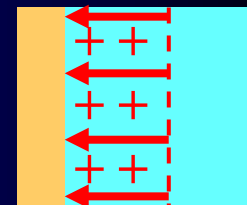
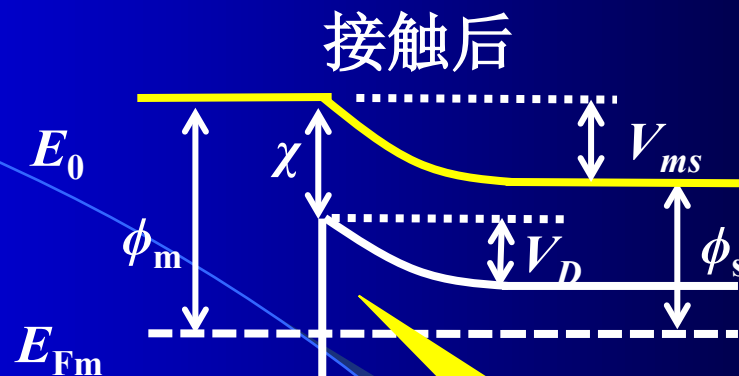
半导体表面形成一定厚度的空间电荷区

接触电势差落在半导体一侧的空间电荷区

空间电荷区半导体能带向上弯曲

接触电势差大小为:

$$V_{ms} = \phi_m - \phi_s$$



n型阻挡层

- 半导体一侧的势垒高度(电子从半导体进入金属遇到的势垒)

$$V_D = V_{ms} = (\phi_m - \phi_s)/e$$

- 金属一侧的势垒 (电子从金属进入半导体遇到的势垒)

$$V_{Dm} = (\phi_m - \chi)/e$$

肖特基势垒

- 空间电荷区内, 电子浓度比内部小得多, 形成高阻的区域, 称为阻挡层。

$$\varphi_m < \varphi_s$$



$$E_{Fs} < E_{Fm}$$



电子从金属流向半导体



半导体能带向下弯曲



电子积累层



高电导层

n型反阻挡层

有利于n型中的
电子流向
金属

p型半导体与金属接触



$$\varphi_m > \varphi_s$$



能带向上弯曲



p型反阻挡层



$$\varphi_m < \varphi_s$$

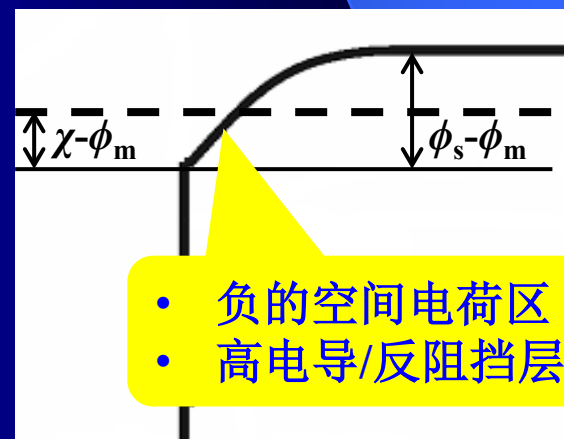
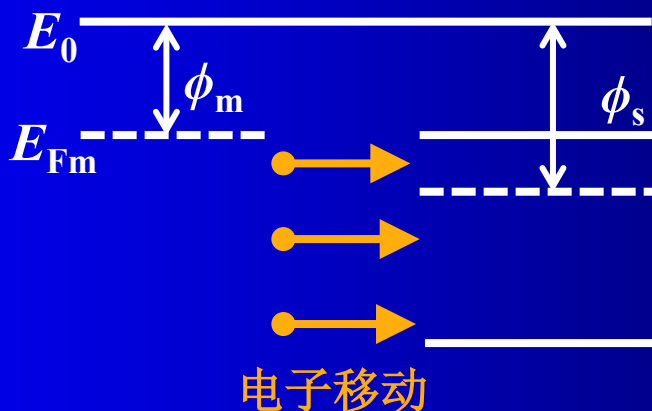


能带向下弯曲



p型阻挡层

接触前



- 负的空间电荷区
- 高电导/反阻挡层