

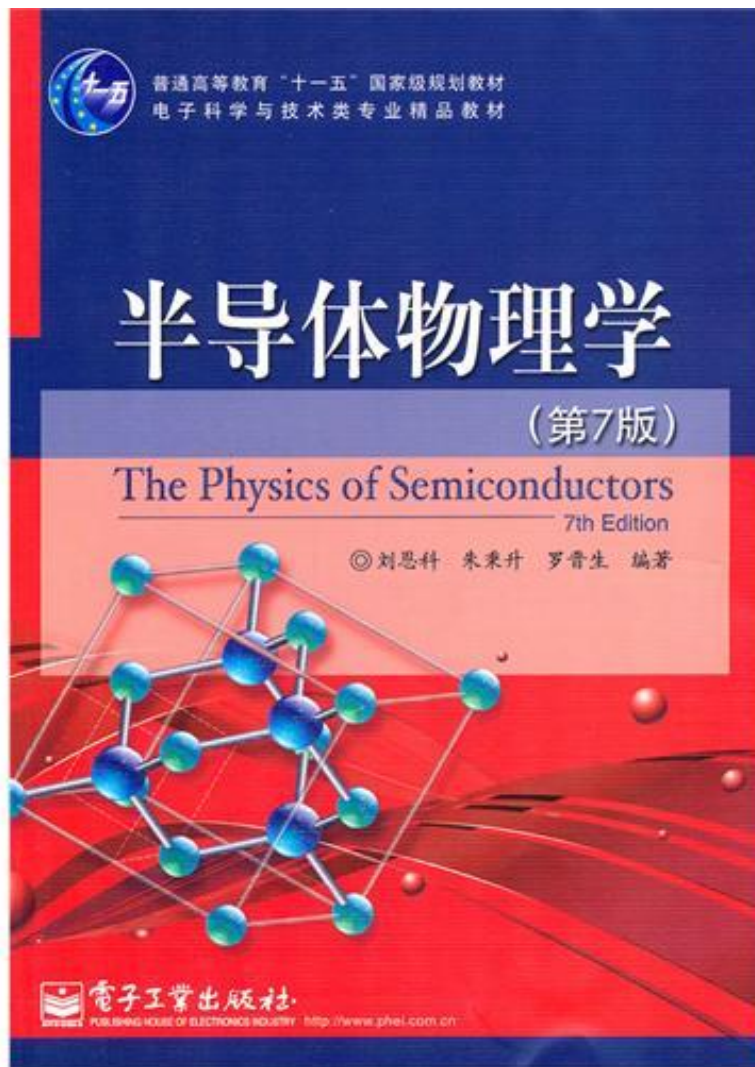
# 华中科技大学光学与电子信息学院本科教学

## 半导体物理（电子16级）

姜胜林、刘欢、张光祖

2018. 11





1

半导体中的电子状态

2

半导体中载流子的统计分布

3

载流子输运与导电

4

非平衡载流子

5

p-n结

6

金属和半导体的接触

7

半导体表面与MIS结构

8

半导体异质结

9

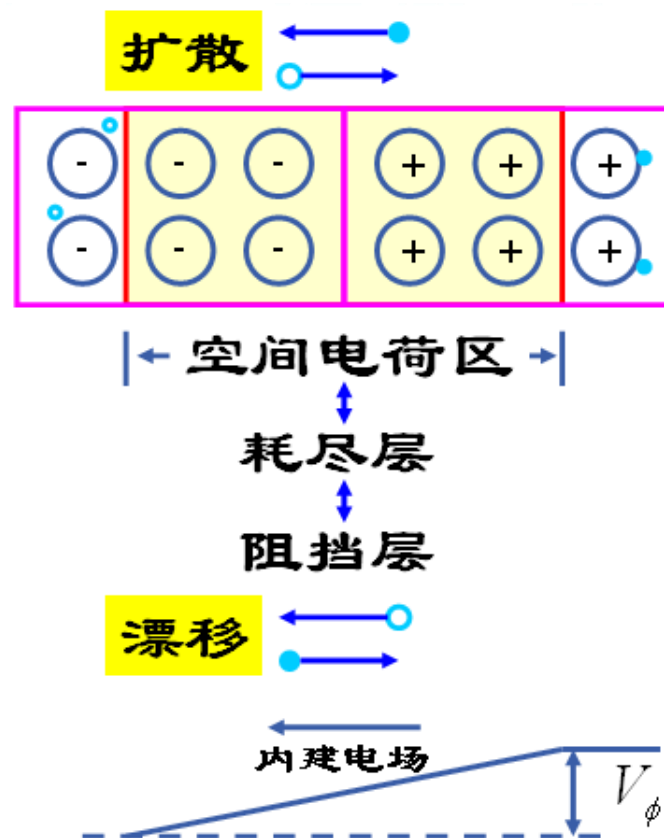
半导体的光、热、磁效应

## 5

## p-n 结

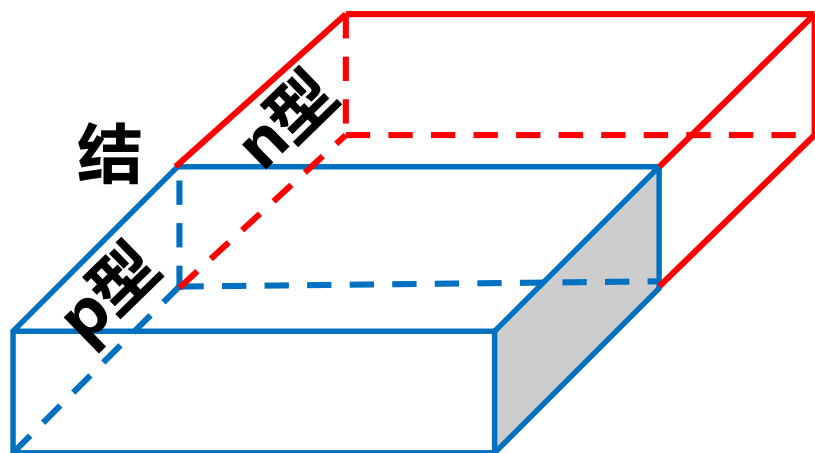
## 本章内容提要

- p-n结的形成及其能带图
- p-n结伏安特性
- p-n结电容
- p-n结击穿
- 隧道p-n结



## 5.1 p-n结的形成

p-n结：p型半导体和n型半导体结合的交界面



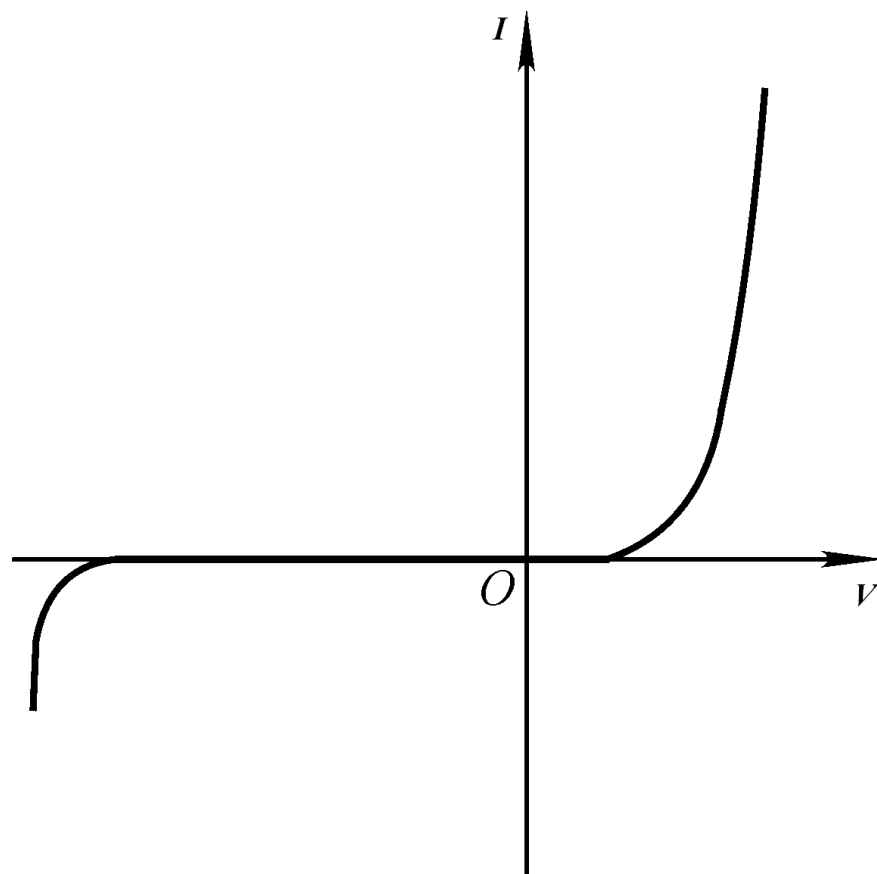
电流电压特性

电容效应

击穿特性



半导体器件的心脏





## 半导体器件的心脏——p-n结

- 二极管实际上就是一个p-n结
- 三极管是两个靠得很近、背靠背的p-n结组成
- 结型场效应管也是利用p-n结的特性工作
- 半导体集成电路中，还利用了p-n结的有关特性制成了电路中的电阻、电容以及实现电路元器件间的隔离，使得大规模集成电路（LSI/VLSI）的制作成为可能
- 可制作成LED、光伏、光探等多种半导体功能器件

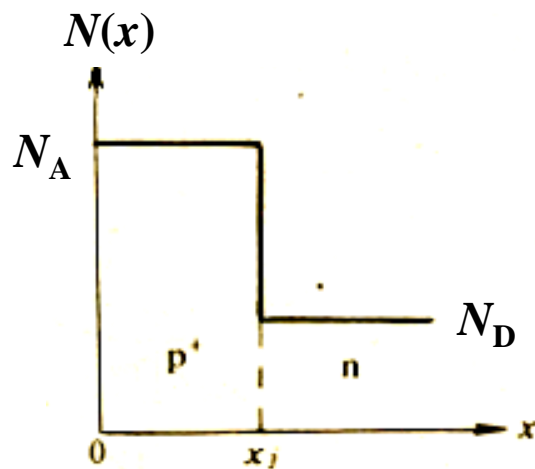
## 二极管的基本电路应用

- (1) 限幅电路——利用二极管的单向导电性及导通后两端电压基本不变的特点
- (2) 箝位电路——把输出电压箝位在一定数值上
- (3) 开关电路——利用p-n结的单向导电特性，其理想模型相当于一个理想的开关

## p-n结的杂质分布：

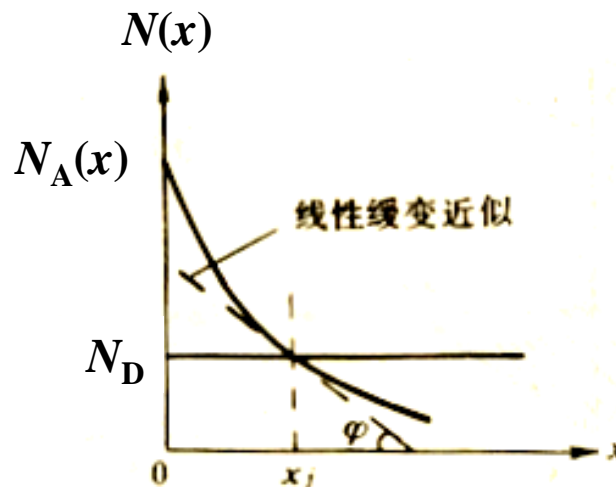
突变结：p、n区杂质均匀分布，两侧杂质类型及浓度突然变化

缓变结：从一个区域到另一个区域的杂质浓度逐渐变化



突变结杂质分布

(合金结、高表面浓度的浅扩散结)



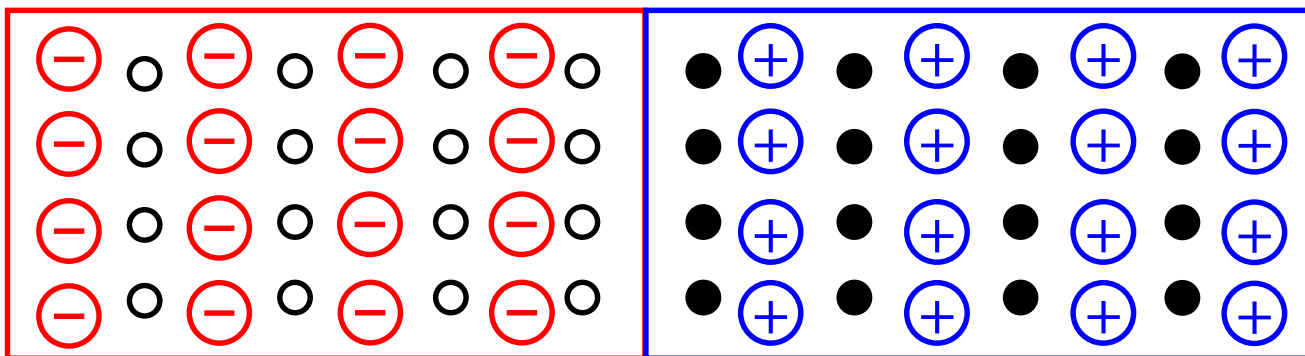
缓变结杂质分布

(低表面浓度的深扩散结)

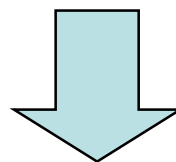
p区

n区

接触之前各自保持电中性



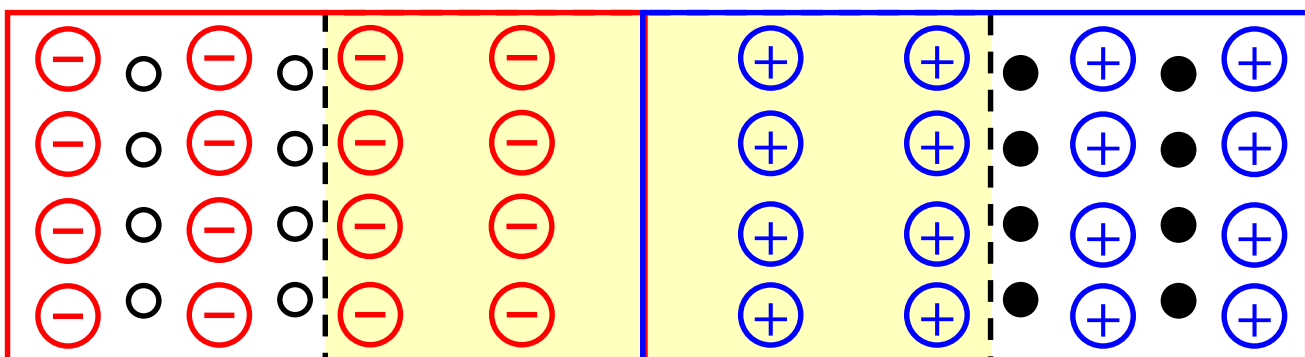
载流子浓度差  
产生扩散运动



p区

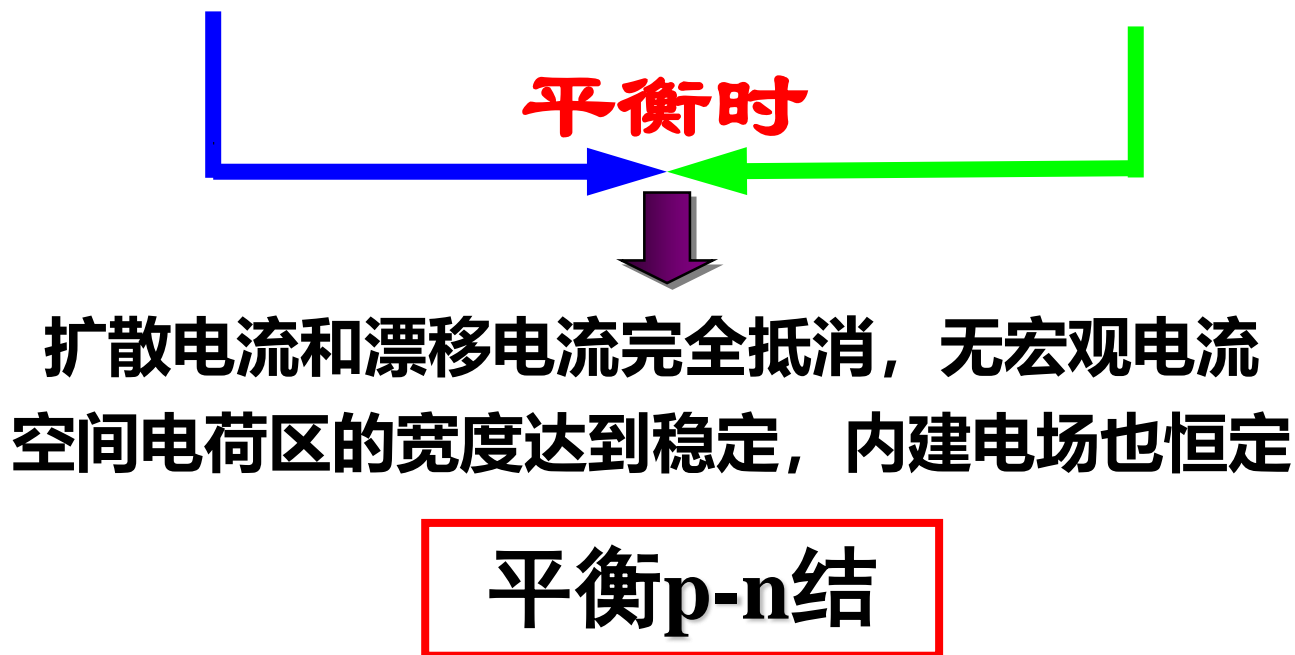
空间电荷区

n区



内建电场

形成空间电荷区  
产生内建电场  
发生漂移运动  
阻碍继续扩散  
直至动态平衡





## 5.2 p-n结空间电荷区及能带图

### 1.空间电荷区

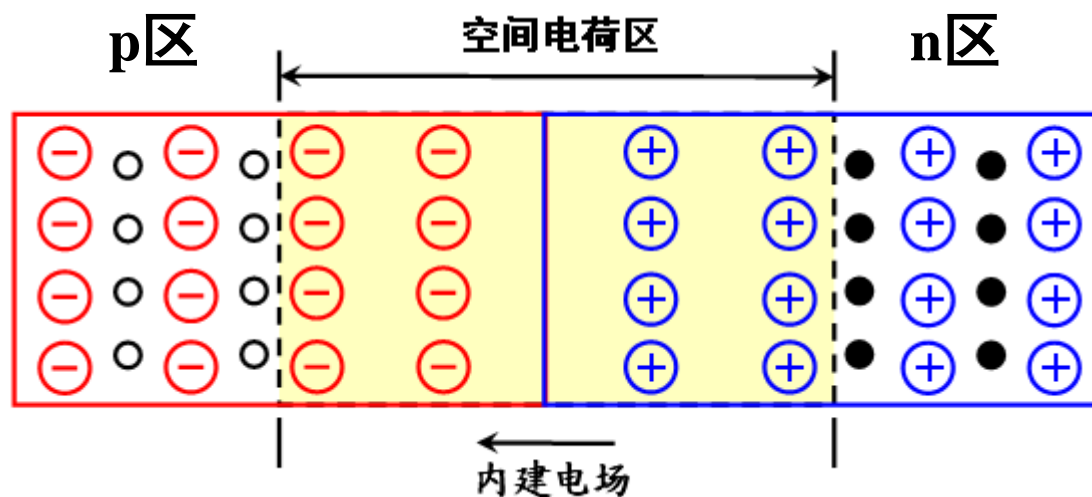
**内建电场:**

空间电荷区中的正、负电荷间产生的电场，其方向由n区指向p区

**平衡p-n结:**

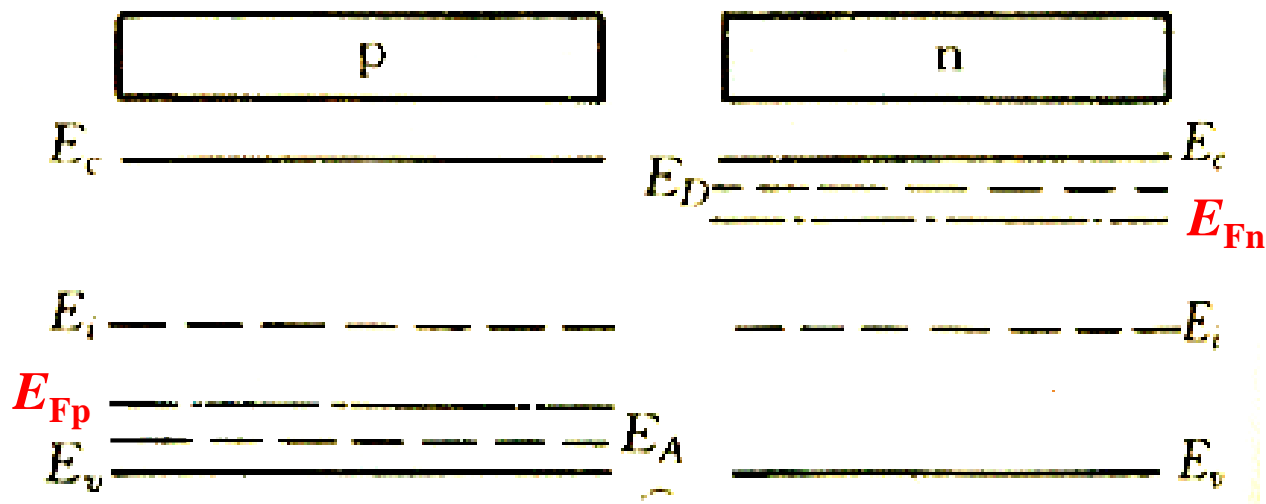
载流子在内建电场的作用下，漂移运动和扩散运动相抵时，所达到的动态平衡状态下的p-n结

(p-n结的净电流为零)

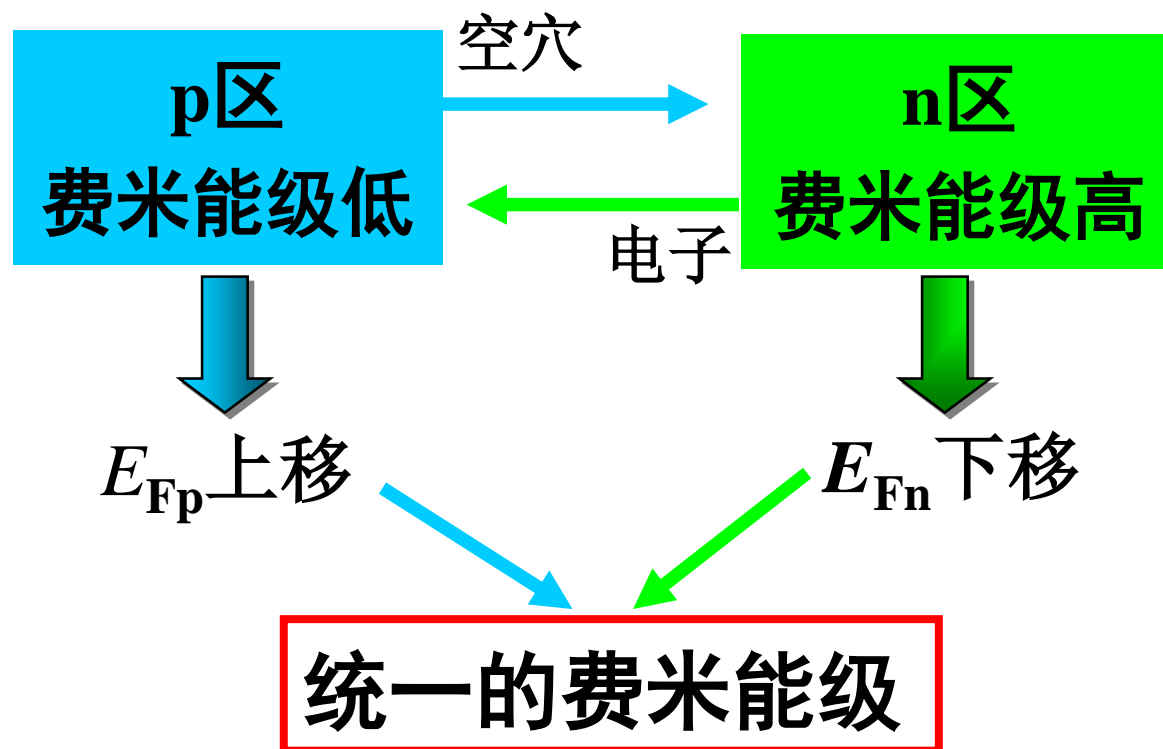
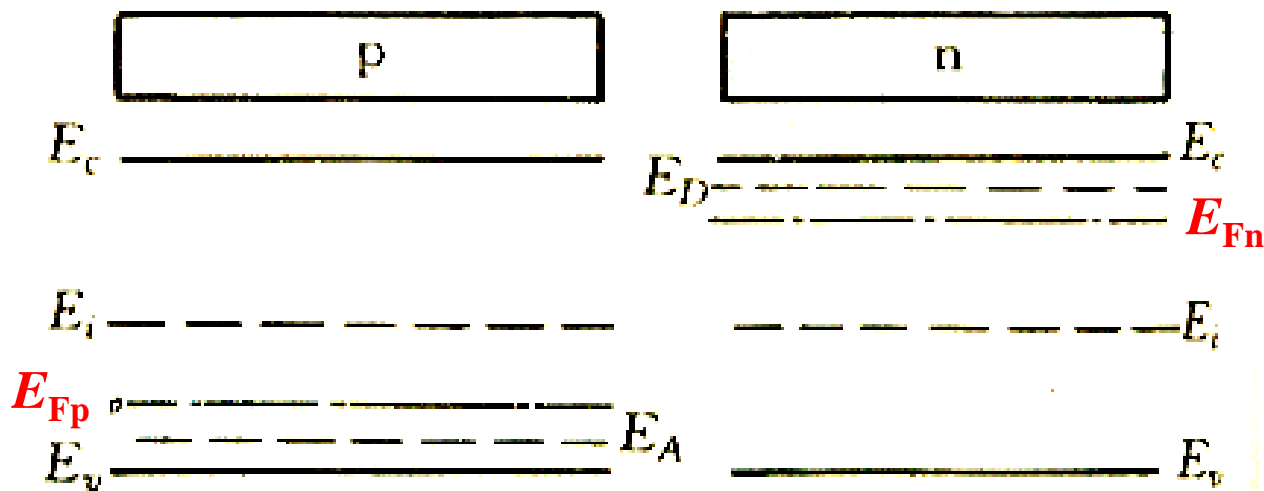


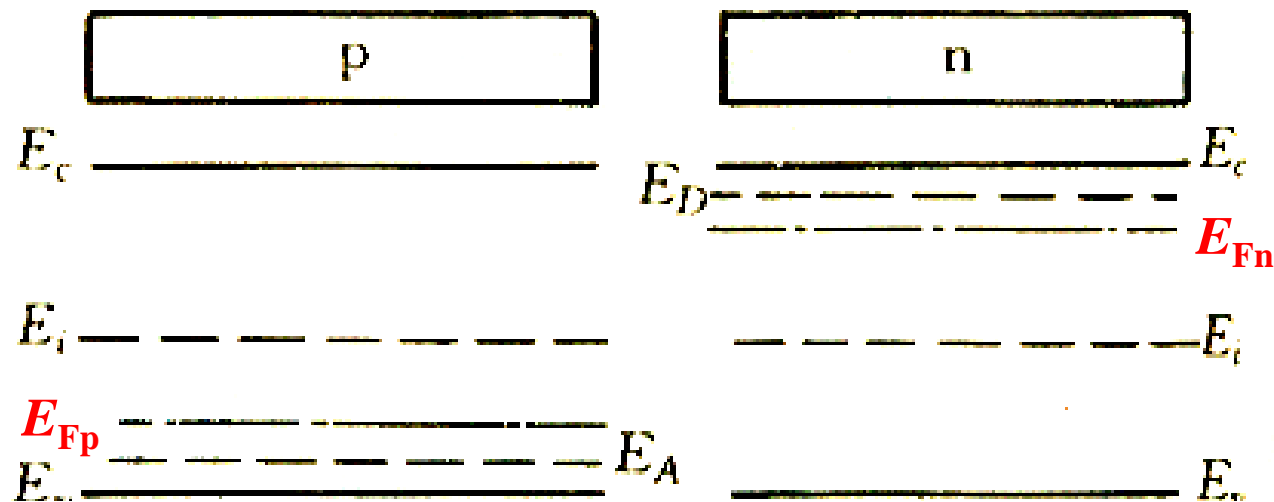
空间电荷区也称作耗尽区

## 2. p-n结能带图



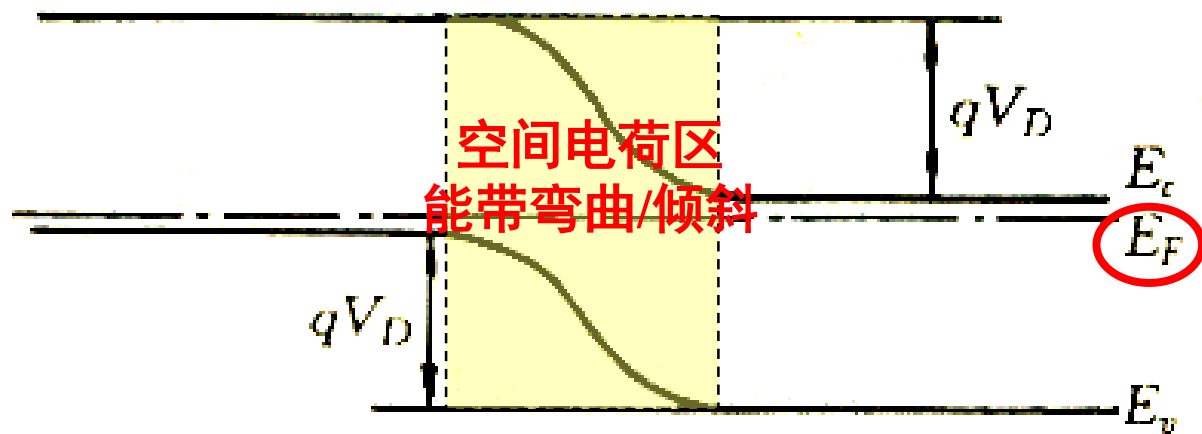
平衡p-n结的能带图 ?





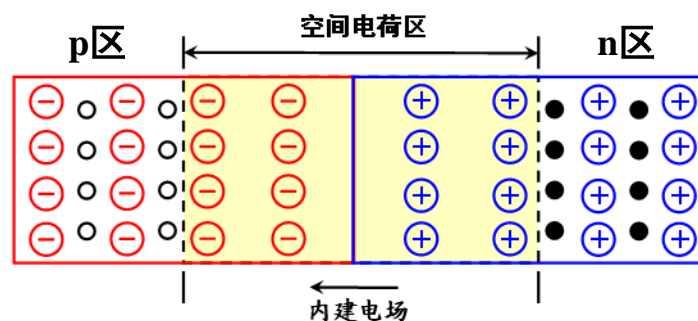
整个能带的移动

p区上移      n区下移  
 直至费米能级统一

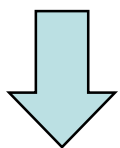


平衡p-n结的能带图

### 3.p-n结接触电势差

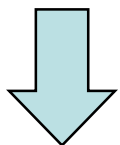


空间电荷区存在内建电场



沿电场方向电势降低

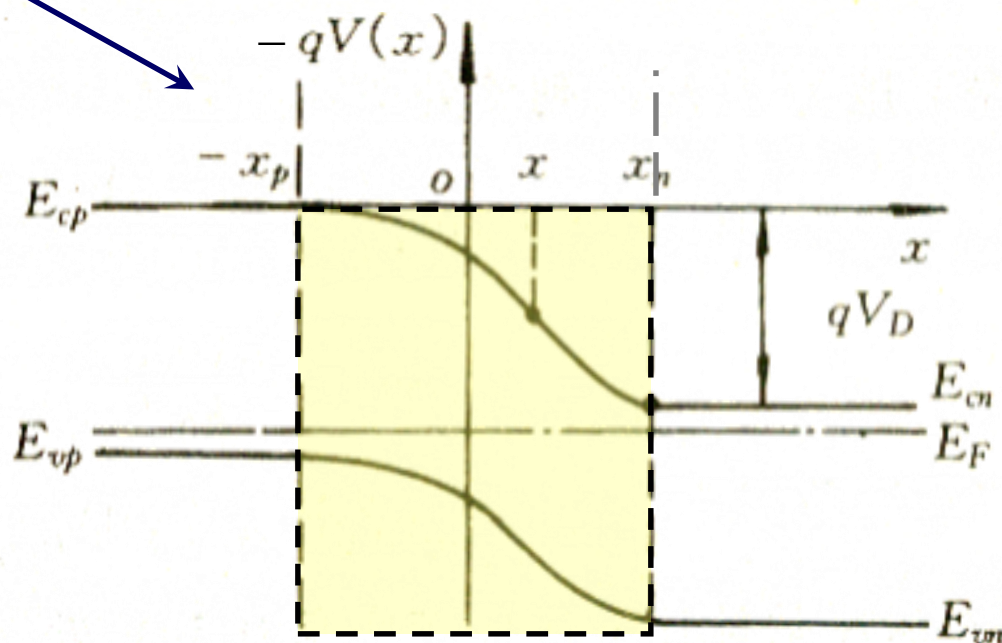
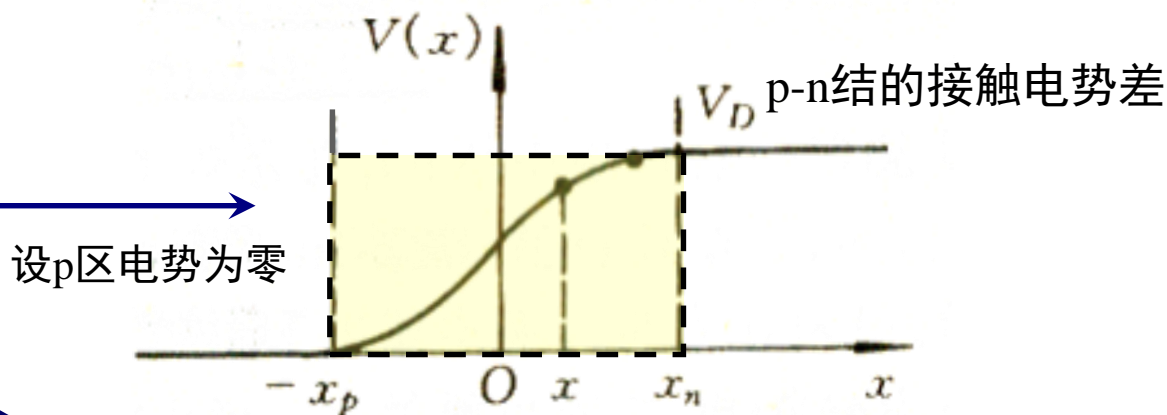
电子电势能逐渐升高



空间电荷区能带弯曲/倾斜

p-n结势垒高度  $qV_D = (E_F)_n - (E_F)_p$

空间电荷区也称作势垒区



作业：  $V_D$  的表达式？

提示：  $qV_D = (E_F)_n - (E_F)_p$

n区电子平衡浓度：  $n_{n0} = n_i \exp\left[\frac{(E_F)_n - E_i}{k_0T}\right]$

p区电子平衡浓度：  $n_{p0} = n_i \exp\left[-\frac{E_i - (E_F)_p}{k_0T}\right]$

两式相除并取对数：  $\longrightarrow \ln\left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}}\right) = \frac{1}{k_0T} [(E_F)_n - (E_F)_p]$

$\longrightarrow V_D = \frac{1}{q} [(E_F)_n - (E_F)_p] = \frac{k_0T}{q} \ln\left(\frac{n_{n0}}{n_{p0}}\right)$

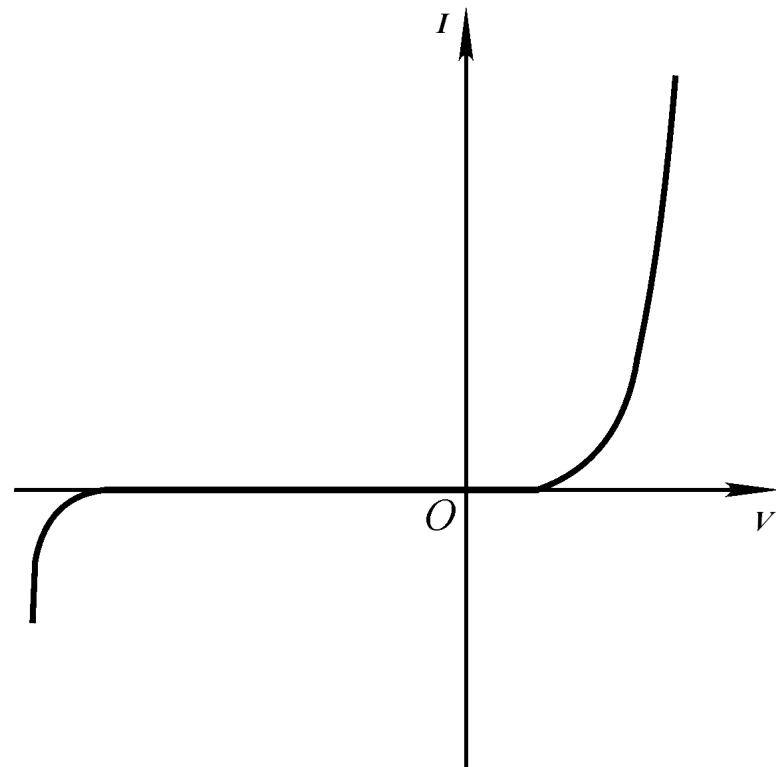
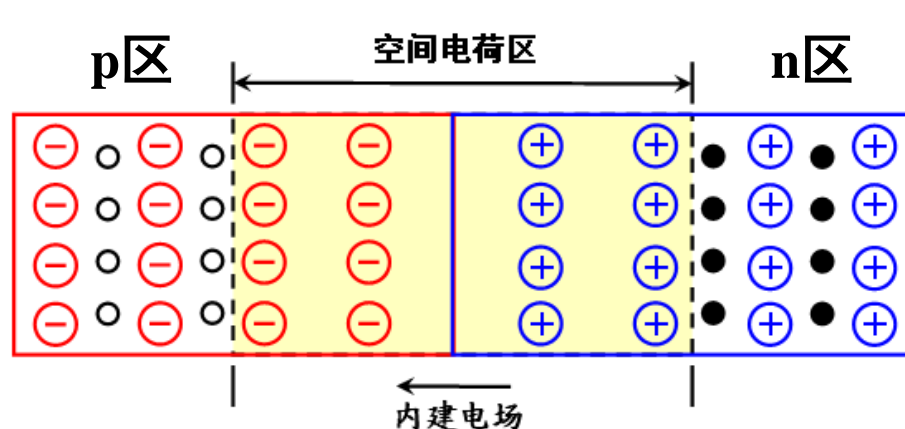
在非简并情况下近似有  $n_{n0} \approx N_D$  ,  $n_{p0} \approx n_i^2 / N_A$  (因为  $p_{p0} \approx N_A$ )

$\longrightarrow V_D = \frac{k_0T}{q} \left[ \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right) \right]$

$V_D$  与  $N_D$ 、 $N_A$ 、 $T$ 、材料禁带宽度有关

$$n_i = n_0 = p_0 = (N_C N_V)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0T}\right)$$

## 5.3 p-n结伏安特性



外加电压时，p-n结处于非平衡状态

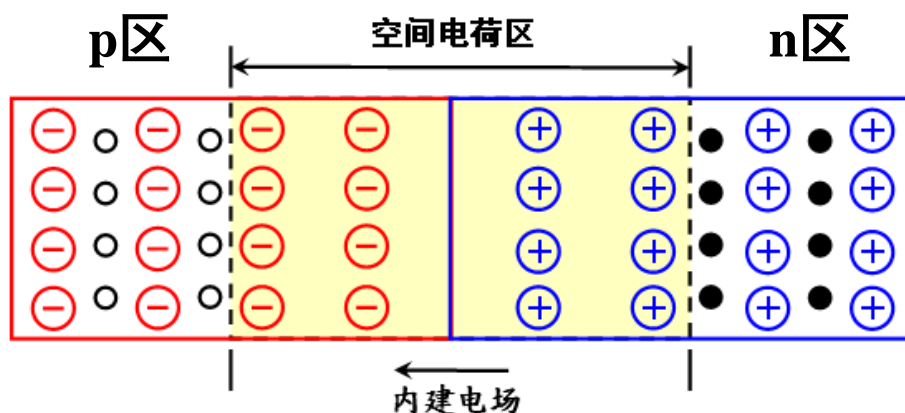
### p-n结的单向导电性

- 正向电流随正向电压增大而迅速增大，正向电阻很小（导通）
- 反向电流微弱且不随反向电压变化，反向电阻很大（关断）

关键在于空间电荷区(势垒区/耗尽区)的存在，且其宽度(高度)随外加电压变化

# 1.非平衡状态下的p-n结(正偏)

正向偏压时



外加电场与内建电场相反

结区电场减弱

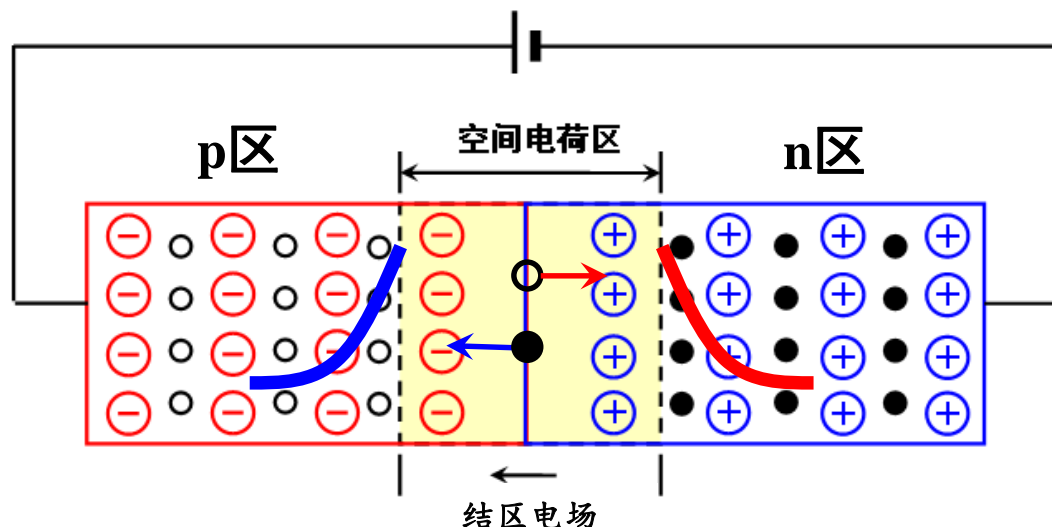
耗尽层宽度 ↓  
势垒高度 ↓

扩散大于漂移

产生载流子净扩散流

非子注入到p、n区

- 均是非平衡少子的注入，积累
- 边扩散边复合，形成稳定分布
- 由对方多子提供，扩散电流显著
- 电流随正偏压增大而提高

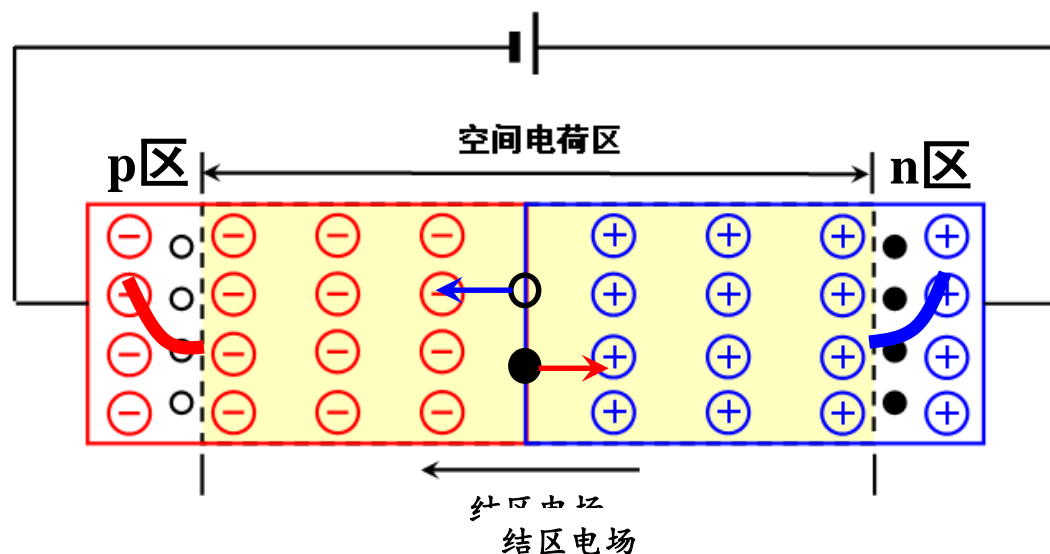
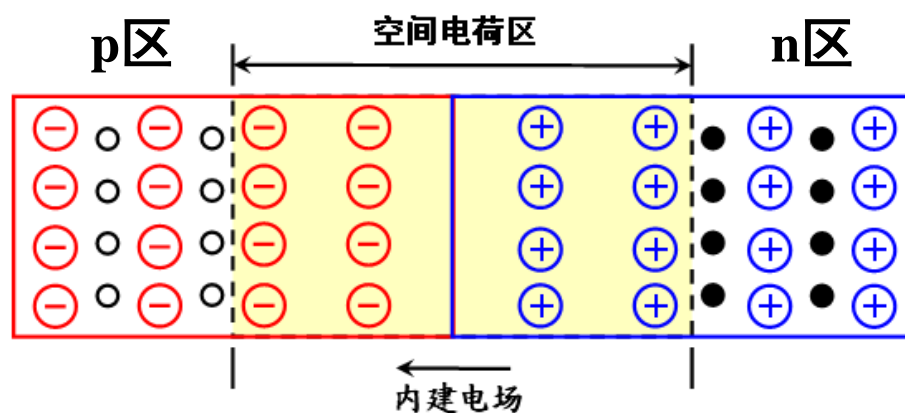


p-n结正向(扩散)电流  $I_F$  = p区电子扩散电流 + n区空穴扩散电流



## 2.非平衡状态下的p-n结(反偏)

反向偏压时



外加电场与内建电场相同

结区电场增强

耗尽层宽度 ↑

势垒高度 ↑

漂移大于扩散

产生载流子净漂移流

内部少子向结区扩散

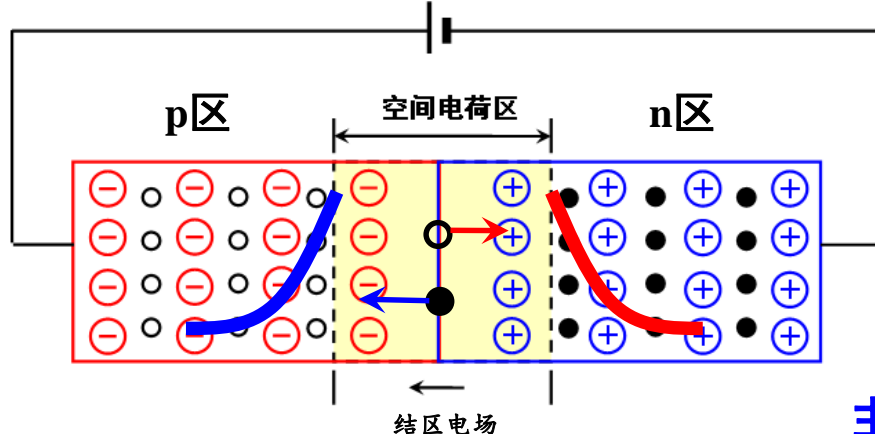
从p、n区中抽取非子

- 均是非平衡少子的抽取，吸出
- 边扩散边漂走，形成稳定分布
- 由自身少子提供（本征激发产生），电流微弱且在反偏压增大时几乎不变

p-n结反向(扩散)电流  $I_R$  = p区电子扩散电流 + n区空穴扩散电流

正向偏压时

势垒高度降低  
势垒区变窄

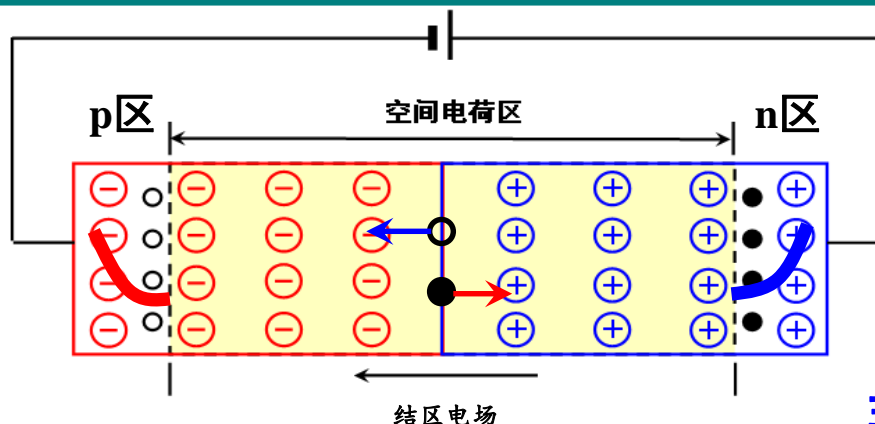


结区扩散大于漂移  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{p区空穴经势垒区扩散流入n区} \\ \text{n区电子经势垒区扩散流入p区} \end{array} \right\}$  非平衡少数载流子的电注入 形成正向扩散电流

$I_F = \text{p区电子扩散电流} + \text{n区空穴扩散电流}$   $\blacksquare$  由对方多子提供, 正向电流显著且随正偏压增大而提高

反向偏压时

势垒高度上升  
势垒区变宽



结区漂移大于扩散  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{p区电子被势垒区强场驱向n区} \\ \text{n区空穴被势垒区强场驱向p区} \end{array} \right\}$  非平衡少数载流子的抽取或吸出 形成反向扩散电流

$I_R = \text{p区电子扩散电流} + \text{n区空穴扩散电流}$   $\blacksquare$  由自身少子提供, 电流微弱且在反偏压增大时几乎不变

### 3. 电流电压方程（利用连续性方程）

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n |E| \frac{\partial n}{\partial x} + \mu_n n \frac{\partial |E|}{\partial x} - \frac{\Delta n}{\tau_n} + g_n$$

p区少子（电子）

$$D_n \frac{d^2 \Delta n}{dx^2} - \frac{\Delta n}{\tau_n} = 0$$

利用边界条件求解  $\Delta n$ ，代入到

p区电子  
扩散电流  $(J_n)_{\text{扩}} = qD_n \frac{d\Delta n(x)}{dx}$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p |E| \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial |E|}{\partial x} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + g_p$$

 n区少子（空穴）

$$D_p \frac{d^2 \Delta p}{dx^2} - \frac{\Delta p}{\tau_p} = 0$$

利用边界条件求解  $\Delta p$ ，代入到

n区空穴  
扩散电流  $(J_p)_{\text{扩}} = -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$

 求和

肖克莱方程式

$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right]$$

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

饱和电流密度

## 肖克莱方程式

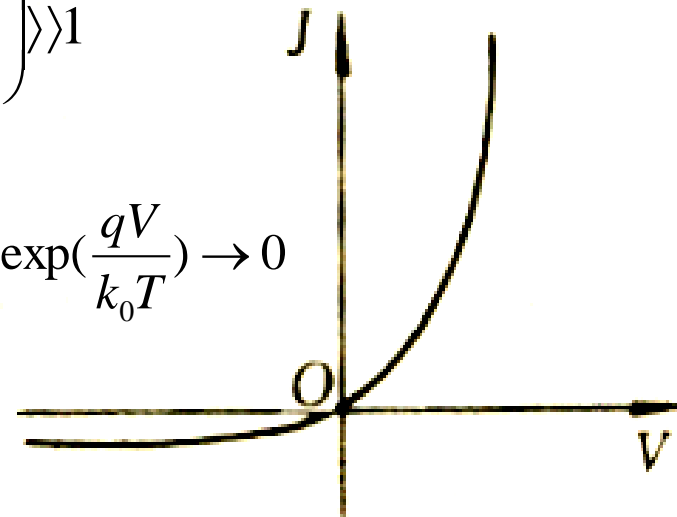
$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] \quad J_s = q \left( \frac{n_{p0} D_n}{L_n} + \frac{p_{n0} D_p}{L_p} \right)$$

### ■ p-n结具有单向导电性（整流特性）

正向：  $J = J_s \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)$  （室温下  $k_0T/q \approx 0.026\text{V}$ ，外加正向偏压约  $0.7 \sim 1.5\text{V}$ ）  
 $\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) \gg 1$   
与正向偏压呈指数变化关系

反向：  $J = -J_s$   $V < 0$ ，当  $q|V| \gg k_0T$  时， $\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) \rightarrow 0$

为反向饱和电流密度，  
与外加电压无关



理想p-n 结的  $J$ - $V$  曲线

### ■ 饱和电流密度随温度上升而增加

$$D_n, L_n, n_{p0}$$

$$D_p, L_p, p_{n0}$$

想一想？

## 5.4 p-n结电容

研究表明：频率对p-n结的伏安特性具有重要影响

原因在于p-n结具有电容效应，而且是可变电容

$$C = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_V$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

电容是表征容纳**电荷**的本领的物理量，当非导电体的两个相对表面保持某一**电位差**时，由于电荷移动的结果，能量便贮存在该非导电体之中

**p-n结电容(极间电容)由势垒电容和扩散电容组成**

- 势垒电容**：描述势垒区电荷数量随外电压变化而产生的电容效应
- 扩散电容**：描述扩散区电荷数量随外加电压变化而产生的电容效应

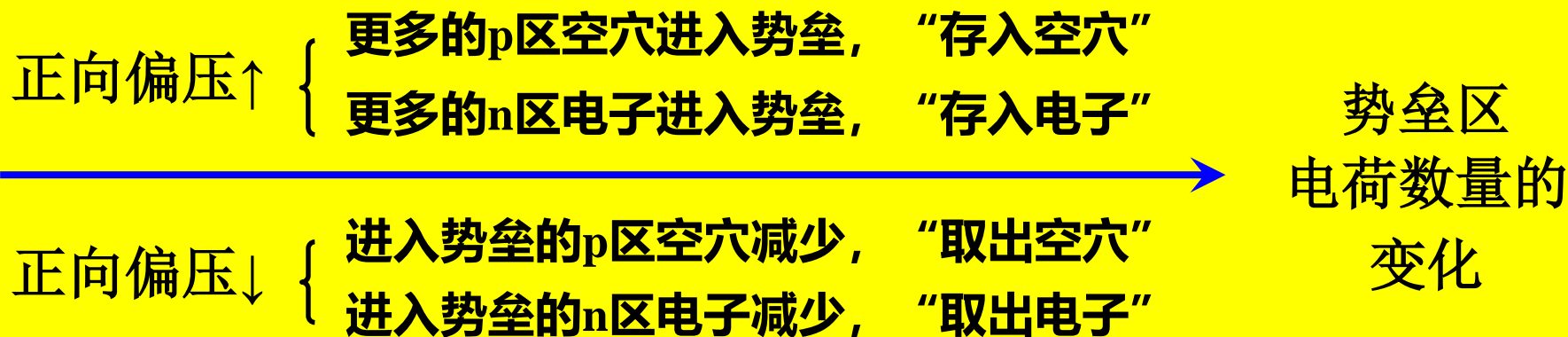
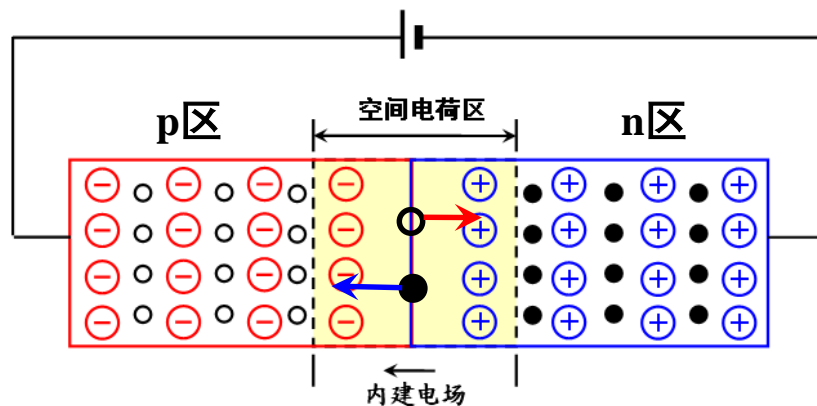
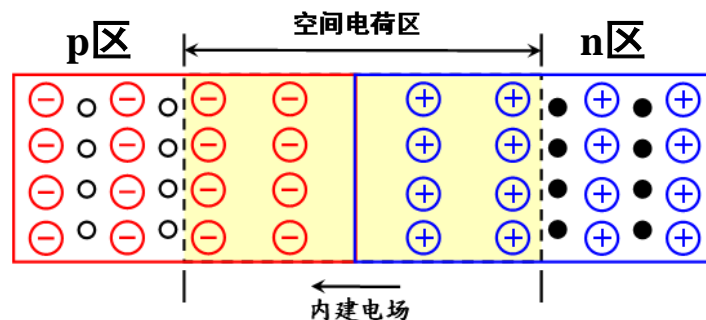
# 1. 势垒电容

势垒电容  $C_T$

正向偏压时

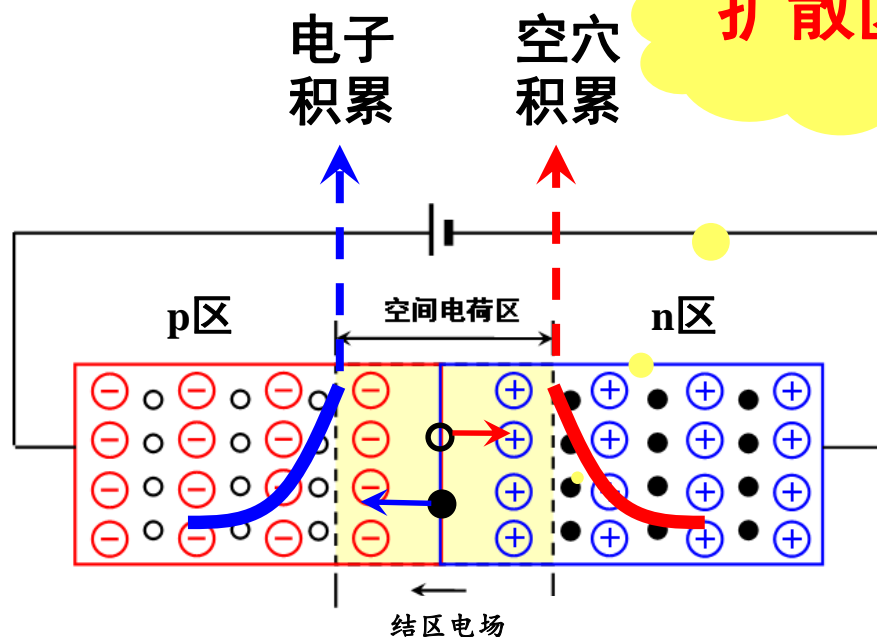
产生的电场与内建电场相反

势垒区电场减弱，扩散占优



## 2. 扩散电容

正向偏压时



结区扩散大于漂移  $\Rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{p区空穴经势垒区扩散流入n区} \\ \text{n区电子经势垒区扩散流入p区} \end{array} \right\}$  非平衡少数载流子的电注入  
形成正向扩散电流

正向偏压  $\uparrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{更多电子积累在扩散区 (p区), "存入电子"} \\ \text{更多空穴积累在扩散区 (n区), "存入空穴"} \end{array} \right.$  扩散区  
电荷数量变化

正向偏压  $\downarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{积累在扩散区 (p区) 的电子减少, "取出电子"} \\ \text{积累在扩散区 (n区) 的空穴减少, "取出空穴"} \end{array} \right.$

研究表明：频率对p-n结的伏安特性具有重要影响

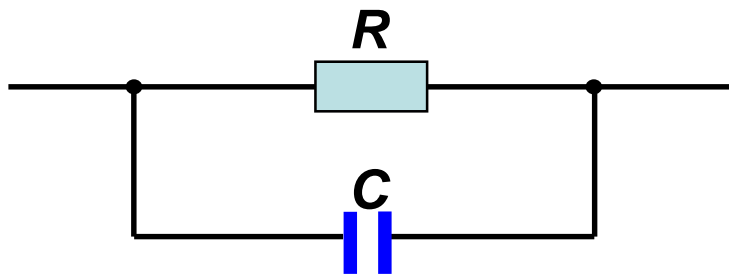
原因在于p-n结具有电容特性，**可变电容**

$$C = \left. \frac{dQ}{dV} \right|_V$$

**p-n结电容(极间电容)是势垒电容 $C_T$ 和扩散电容 $C_D$ 作用的总效果**

- 结电容只在外加电压改变时才起作用，外加电压的频率越高，其电容效应越显著

**高频时，整流特性变坏**



**p-n结的高频等效电路**

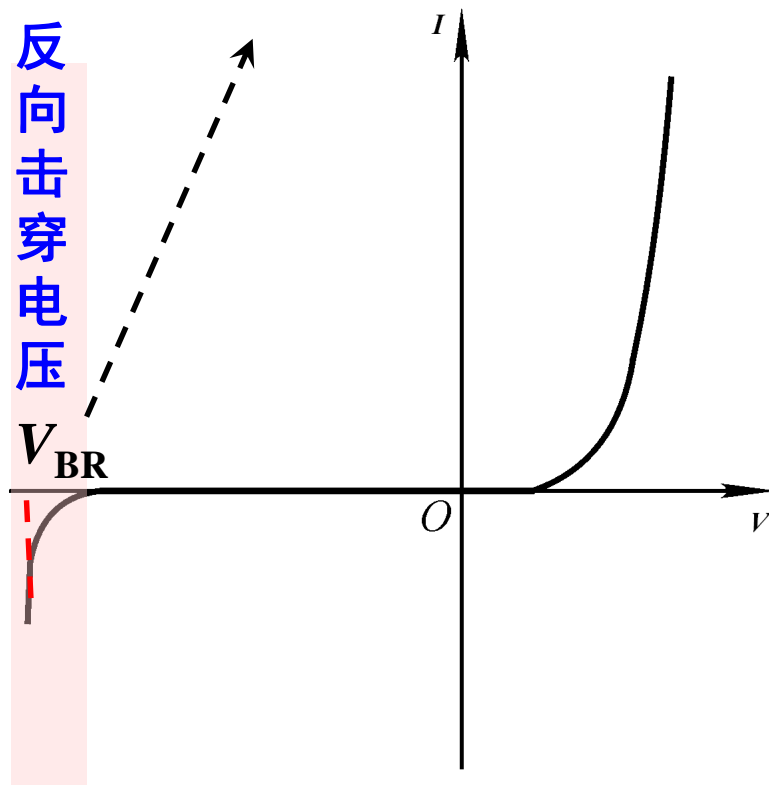


## 5.5 p-n结击穿

定义：反向偏压增大到某一数值 $V_{BR}$ 时，反向电流密度突然开始迅速增大的现象

- 1. 雪崩击穿
- 2. 隧道击穿（齐纳击穿）
- 3. 热电击穿

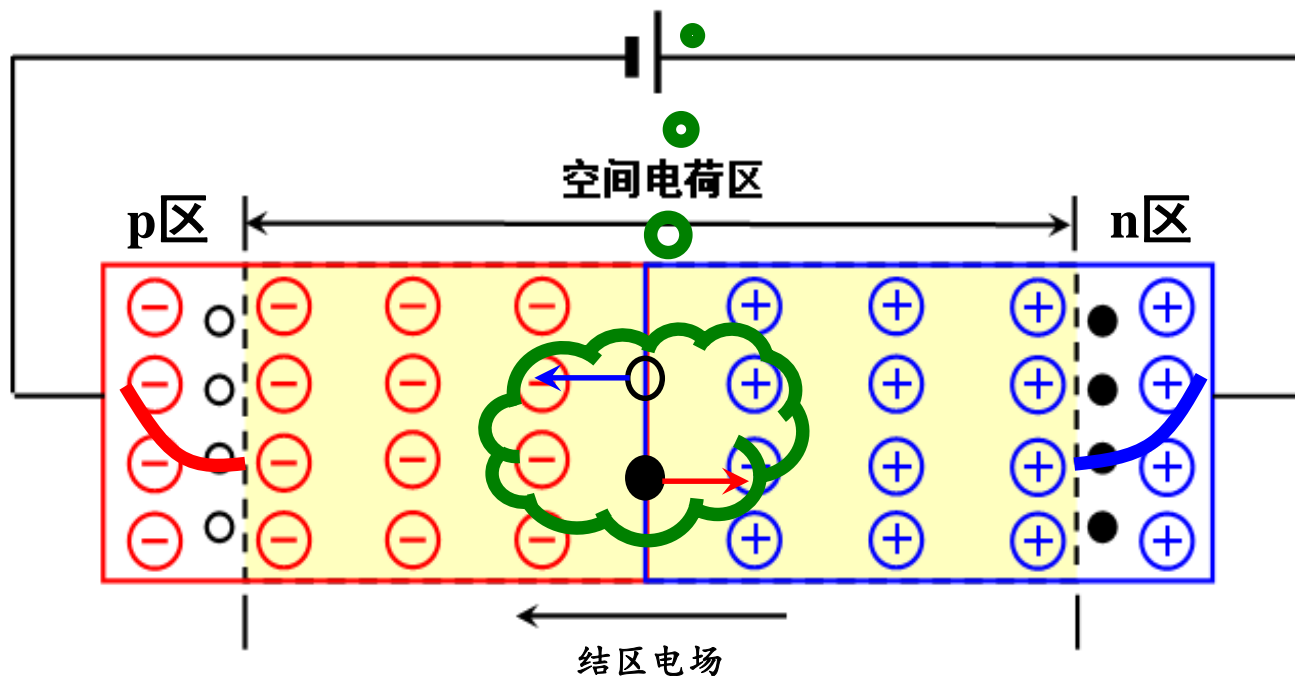
衡量p-n结质量的重要参数之一



## 反向偏压时，势垒区漂移大于扩散

p区、n区的非平衡少数载流子被抽取，形成向势垒区的扩散流

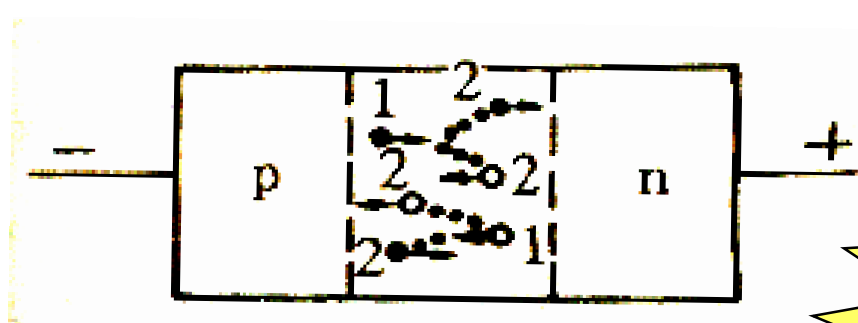
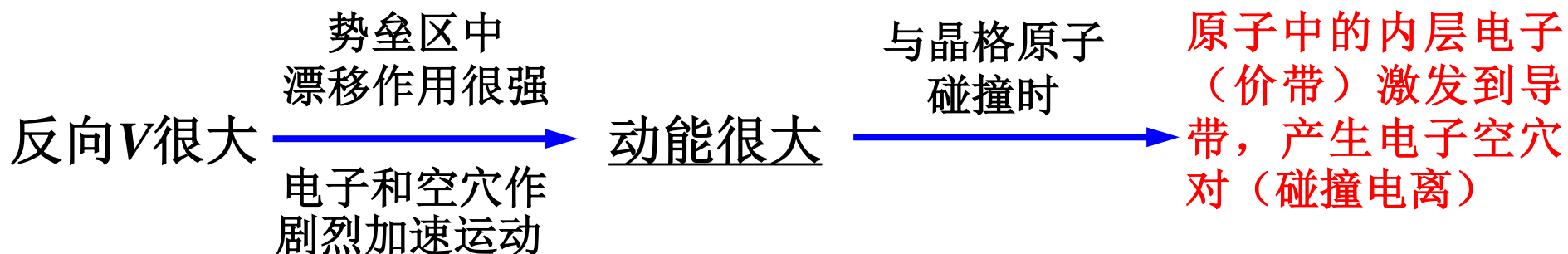
反向偏压很大时，会怎样？



p区电子到势垒区  
被其强场驱向n区

n区空穴到势垒区  
被其强场驱向p区

# 1.雪崩击穿



雪崩倍增机构

**雪崩击穿**

“繁衍后代”  
“生生不息”

载流子倍增效应

反向电流迅速增大

**需要足够的电场强度和势垒区宽度!!**

(载流子必须积累一定的能量, 才能实现碰撞电离)

## 2. 隧道击穿 (Zener 齐纳击穿)

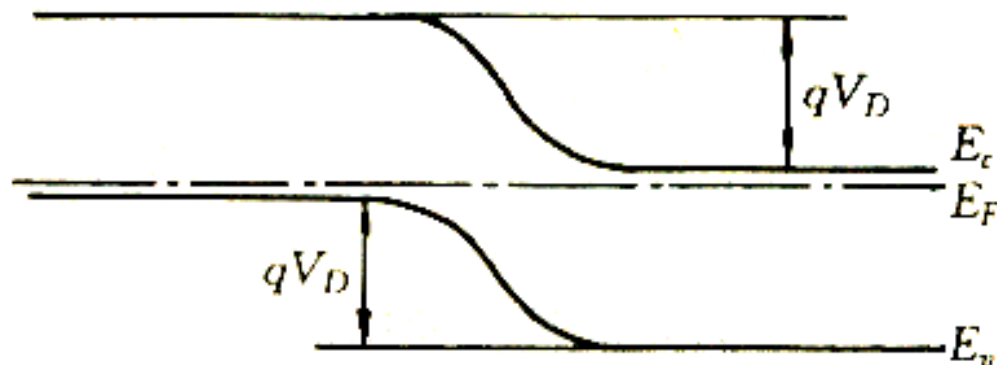
强电场作用下，隧道效应使得大量价带电子 **穿过** 禁带而进入导带

**思考：如何成行？**

平衡态时，

p区能带上移、n区下移

n区、p区费米能级统一



反向偏压下，

结区电场增强

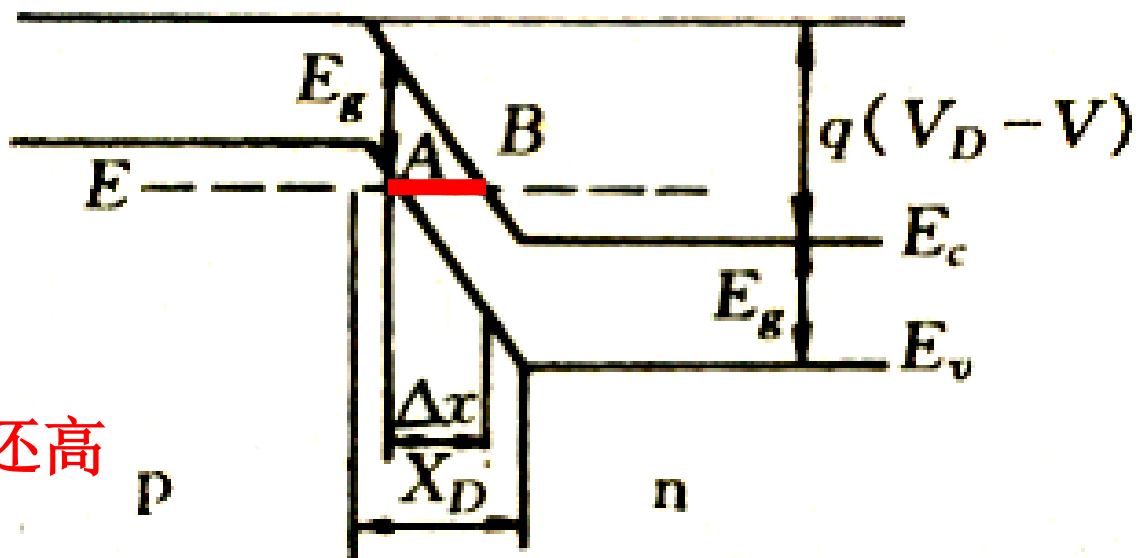
**势垒区能带倾斜更为明显**

反向偏压↑

内建电场↑  
势垒高度↑

p区的价带顶比n区导带底还高

存在能量相同的量子态 (A与B)  
隔着水平距离为  $\Delta x$  的禁带。  
隧道长度  $\Delta x$



大反向偏压下p-n结能带图

隧道长度越短，隧穿几率越高

当反向电压增强使  $\Delta x$  短到一定程度时，发生隧穿（量子力学隧道效应）

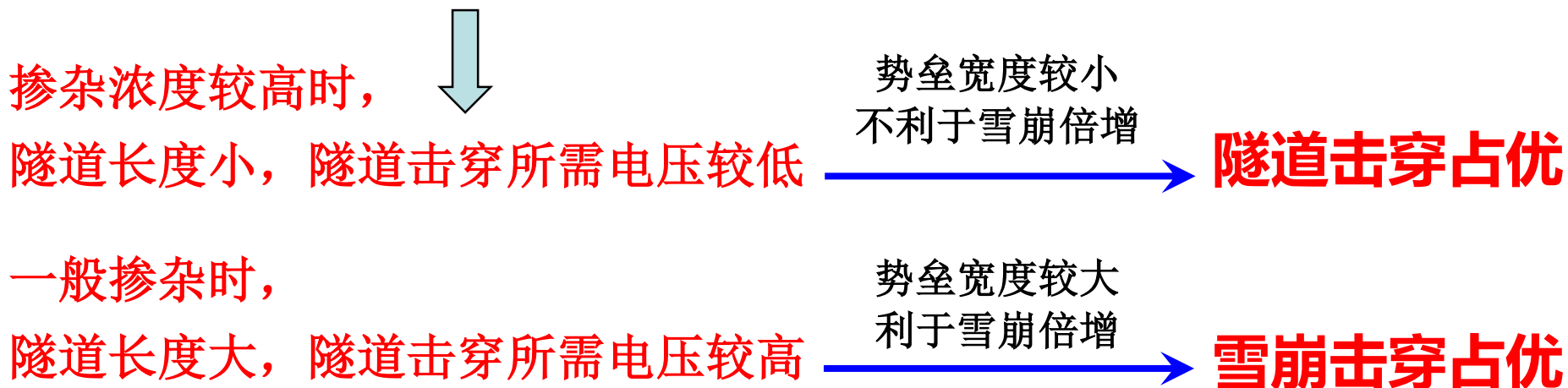
此时，尽管势垒高度很高，但p区价带电子仍能到达n区导带参与导电

反向电流  
急剧增大

隧道击穿

反向 $V$ 越大,  $p$ 区、 $n$ 区相同能量的量子态就越多, 隧道长度也越短, 因此隧穿几率就越高, 易发生隧道击穿

数学证明: 隧道长度与杂质浓度成反比关系

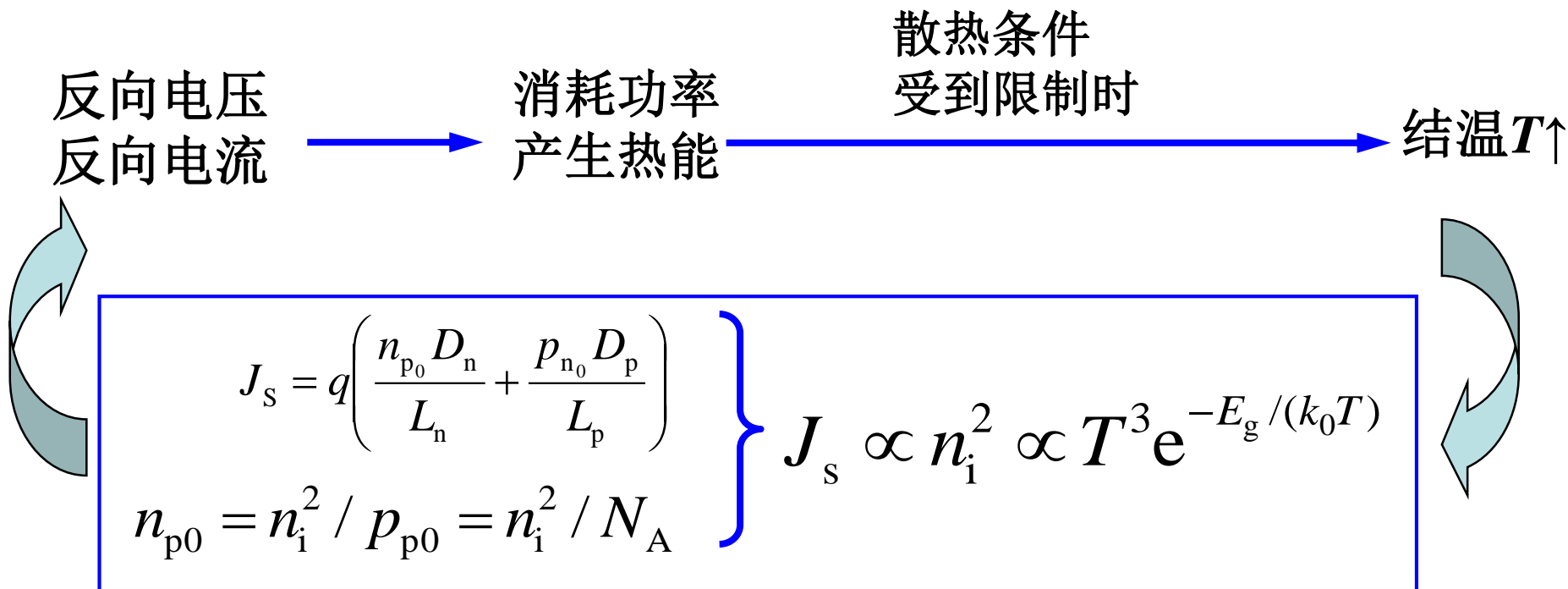


这两种电击穿过程均是可逆的: 可利用

而热电击穿则不可逆, 彻底烧毁: 应避免



### 3. 热电击穿



**反向饱和电流大小与温升陷入恶性循环，直至过热烧毁**

对于禁带宽度比较小的半导体如锗p-n结，由于反向饱和电流密度较大，在室温时热电击穿问题就很突出。

## 5.6 隧道p-n结

隧道结：重掺杂的p区和重掺杂n区形成的p-n结 ( $p^+-n^+$ )

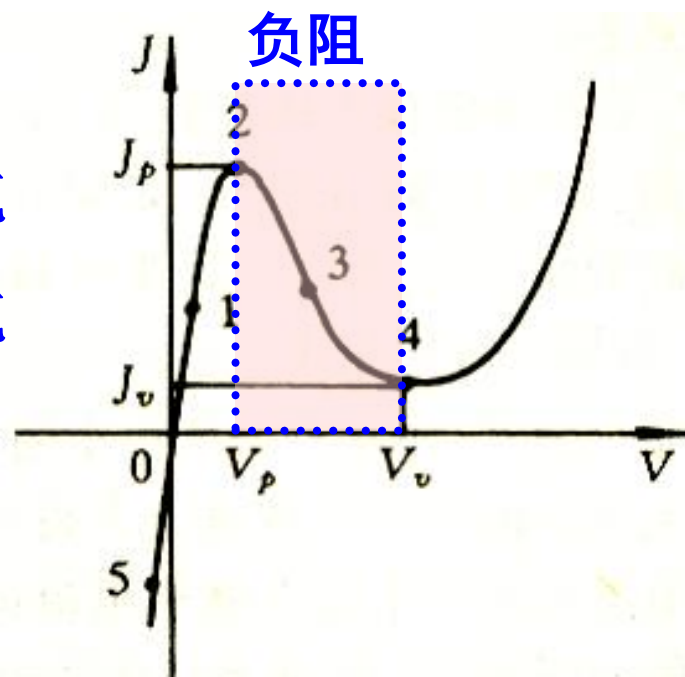
### 隧道结的电流电压特性

正向，负阻特性

峰值电压/峰值电流  
谷值电压/谷值电流

隧道二极管

微波放大  
高速开关  
激光振荡源...



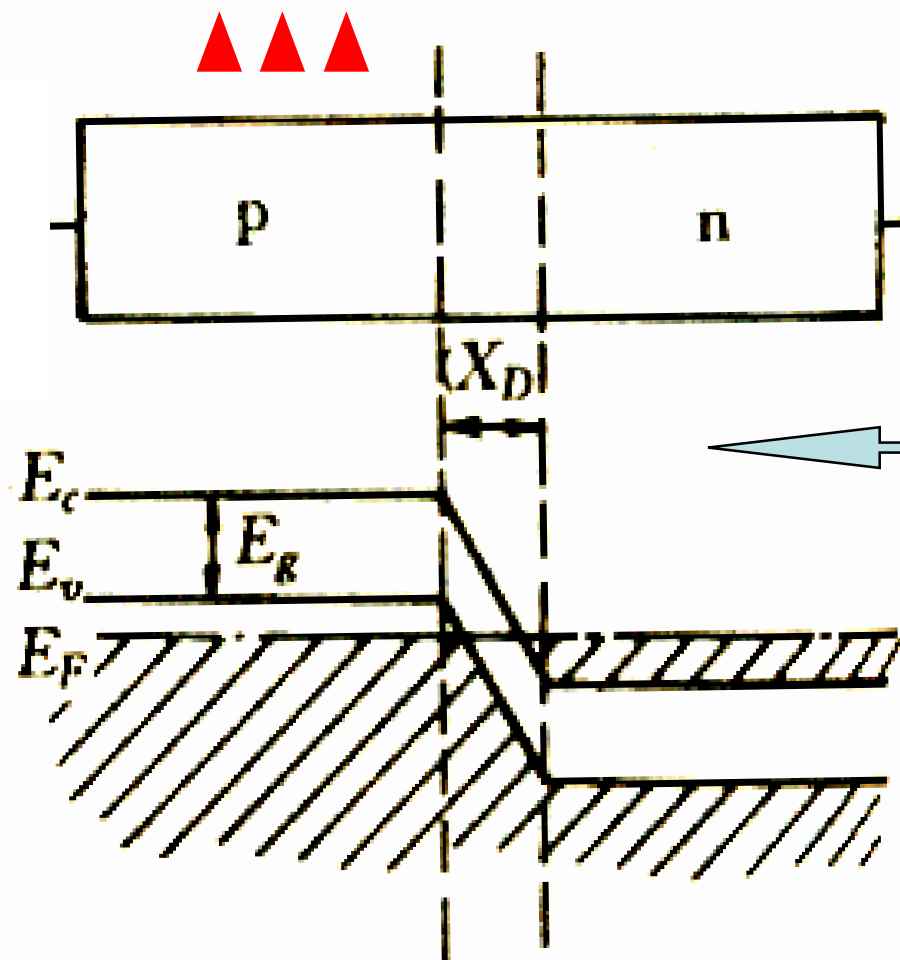
反向（隧穿）电流，随反向偏压增大而迅速增加

思路：以重掺杂简并半导体的特性为基础，结合能带图来讨论正、反向偏压对电流的影响。

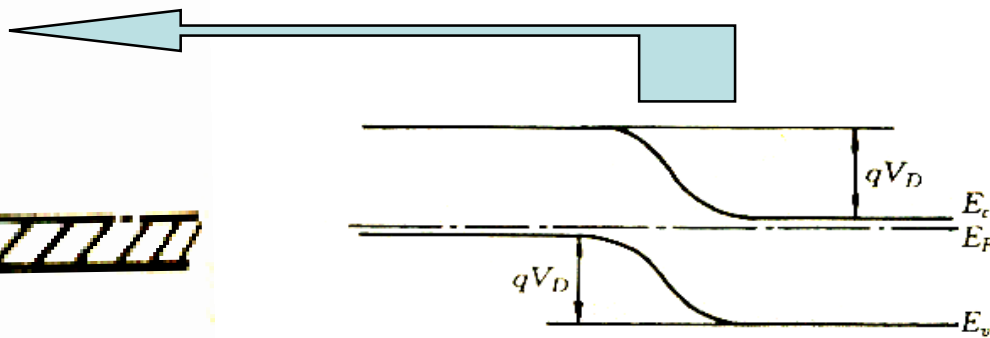


## 隧道结热平衡时的能带图

重掺杂半导体---简并化, 特征?



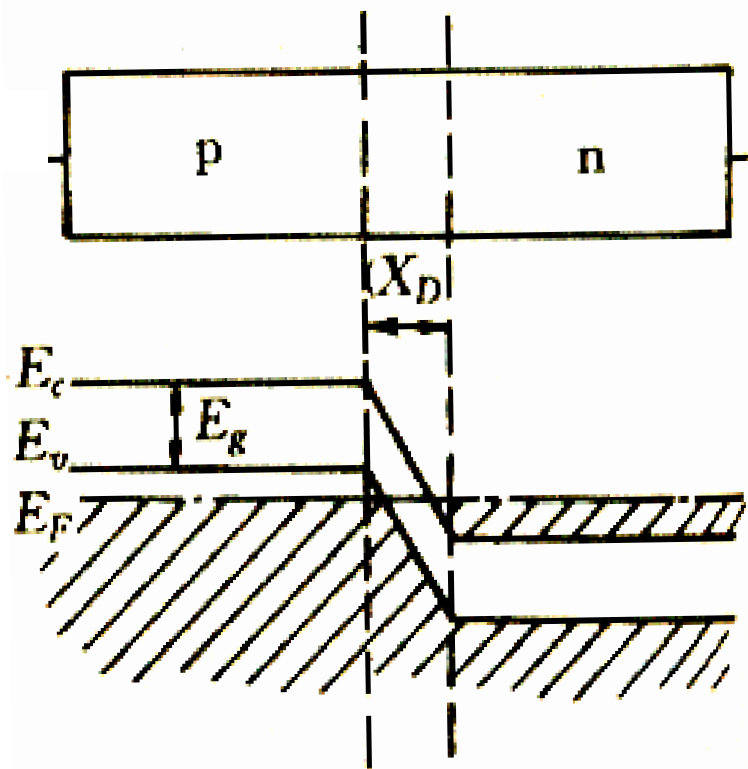
n型, 费米能级进入导带  
p型, 费米能级进入价带  
平衡时二者费米能级统一



平衡态时p区、n区费米能级统一  
(以一般p-n结为例)

{ p区价带顶比n区导带底高, 存在相同能量的量子态  
杂质浓度大, 隧道长度短, 穿过隧道的概率大

隧道结平衡时p区价带和n区导带即存在相同量子态，而且隧道长度小，故在小偏压时即可发生隧道击穿，而且正向、反向均有可能 !!!

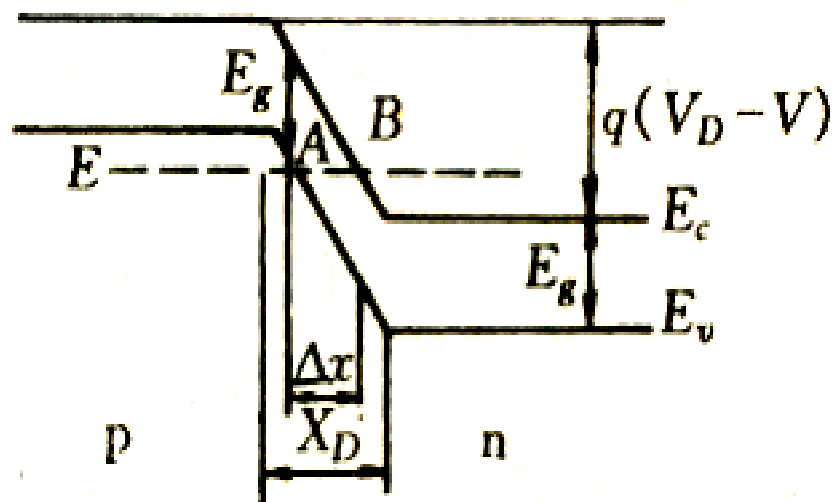


隧道pn结热平衡时的能带图

## 思考：二者的区别与联系？

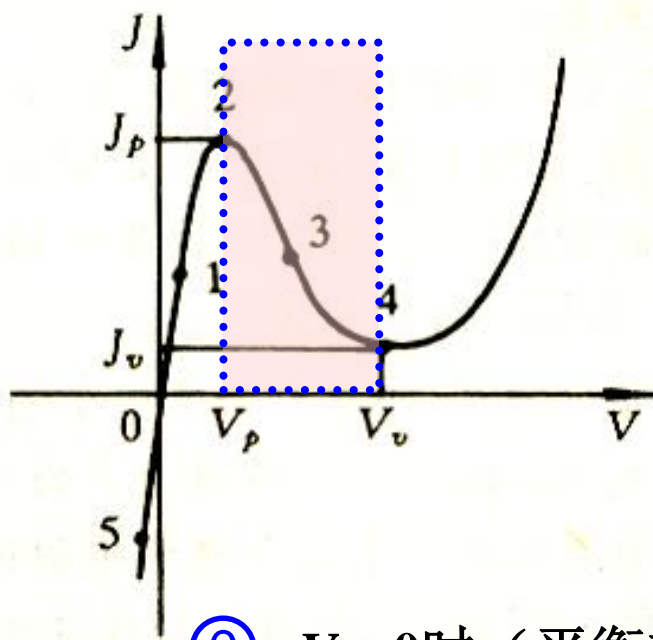
(想一想发生隧道击穿需具备的条件)

一般pn结仅在反向偏压很大时，p区价带和n区导带才存在相同量子态，才可能发生（反向）隧道击穿



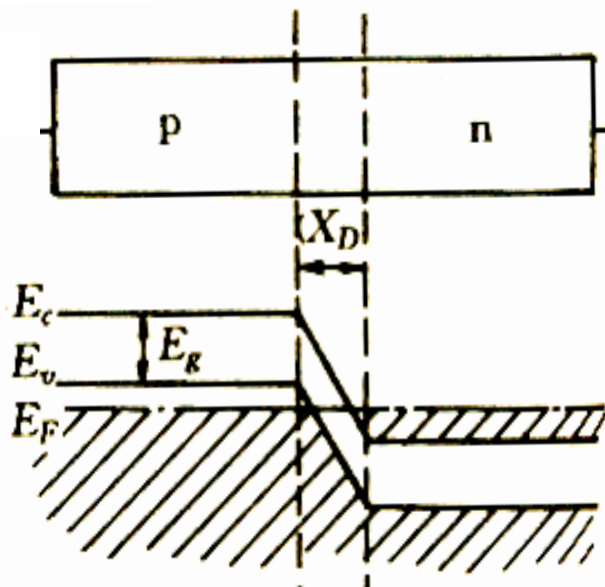
一般pn结大反向偏压下的能带图

隧道结正向电流 = 正向扩散电流 + 正向隧道电流  
(指数增长) (导致负阻特性)



电压较低时，以隧道电流为主  
它随外加电压的变化情况如何？

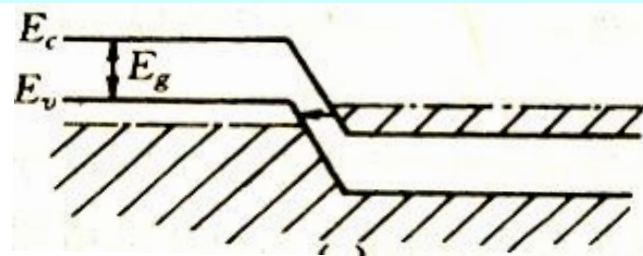
<隧穿载流子数目  
及其隧穿几率>

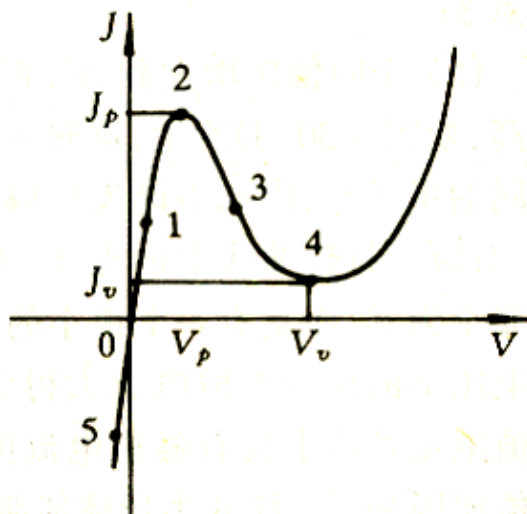


- ①  $V=0$  时（平衡态）  
存在相同能量的量子态  
但费米能级统一，无隧道电流

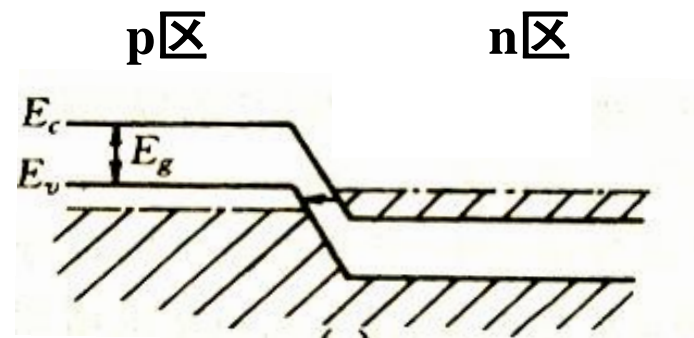
正向偏压时，势垒区能带倾斜减弱

- ① 正偏，当  $V$  很小， $n$  区导带电子（**多子**）可能穿过隧道到达  $p$  区价带中的空量子态，产生正向隧道电流



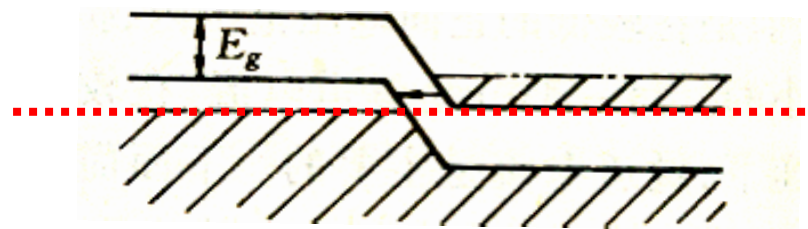


①

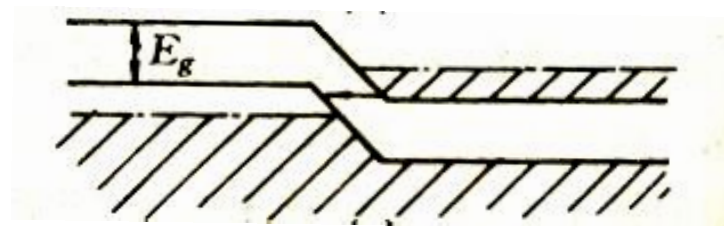


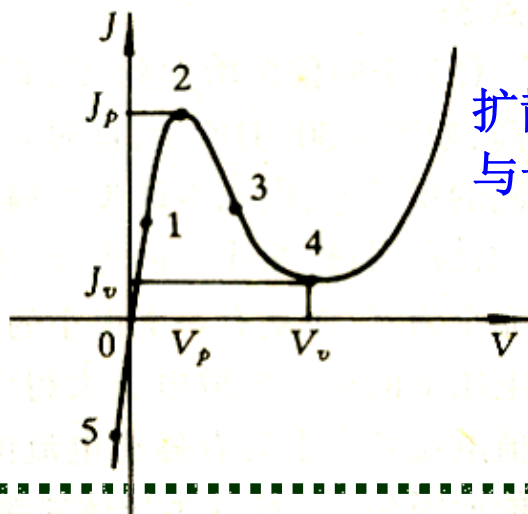
当 $V$ 继续增加，势垒高度不断下降，更多 $n$ 区导带电子可能穿过隧道到达 $p$ 区价带中的空量子态，隧道电流不断增大。

- ② 正偏，当 $V$ 增至 $V_p$ 时， **$n$ 区导带底与 $p$ 区费米能级一样**， $n$ 区导带中的电子可能全部穿过隧道到达 $p$ 区价带中的空量子态——峰值电流



- ③ 正偏，此后 $V$ 增加，随着两边相同能量的量子态减少，隧穿几率减小，隧道电流随之减小，负阻

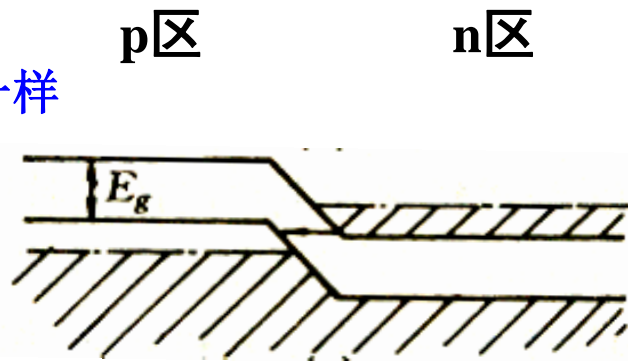




扩散电流为主

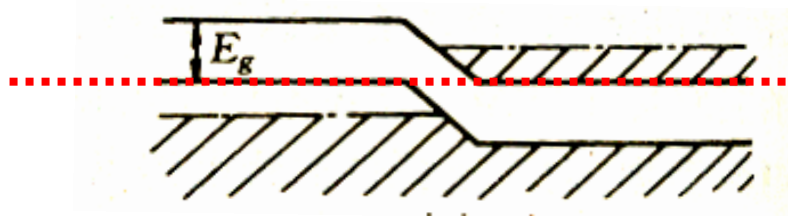
与一般p-n结的正向特性基本一样

③



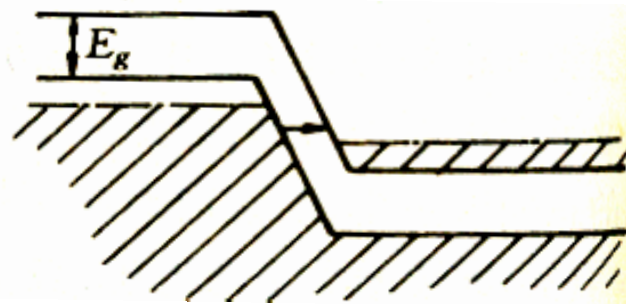
④ 当 $V$ =谷值电压 $V_v$ , **n区导带底和p区价带顶一样高**, 无能量相同的量子态, 隧道电流**应该**降为零, 而实际中的谷值电流大于谷值电压对应的正向扩散电流

(过量电流, 与简并半导体禁带变窄效应以及深能级杂质或缺陷有关)



反向偏压时, 势垒区能带倾斜增强

⑤ 反向偏压时, p区相对n区升高, p区中的价带电子可穿过隧道到n区导带, 形成**反向隧道电流**。 $V$ 增加, 两边能量相同的量子态增多, 结两边电子填充水平差距更大, 因此穿过隧道的电子大大增多, 反向电流迅速增加





说明：

- ① 隧道结由重掺杂的简并半导体制成，**利用的是多子隧道效应**，多子数目起伏小，因此隧道二极管的噪声低、工作温度范围大！
- ② 隧道效应本质上是量子跃迁的过程，电子穿过势垒的速度极其迅速，不受电子渡越时间的限制，因此隧道二极管可以在极高频率下工作！