



中国科学技术大学

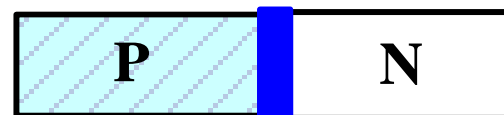
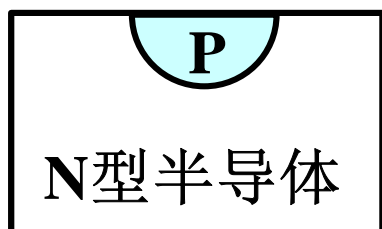
University of Science and Technology of China

§ 2.2 PN结

lugh@ustc.edu.cn

2016年9月13日

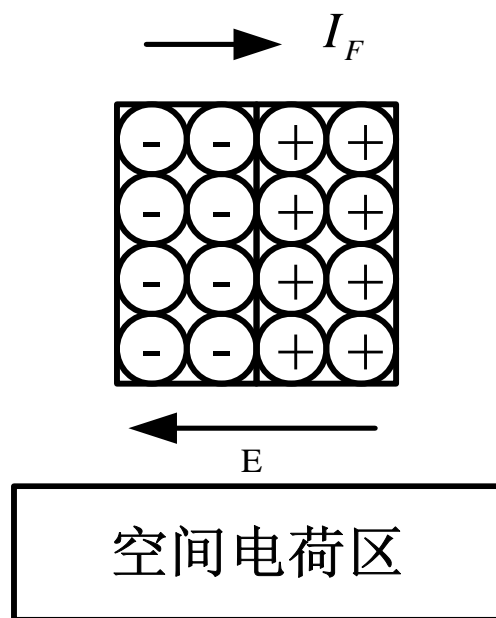
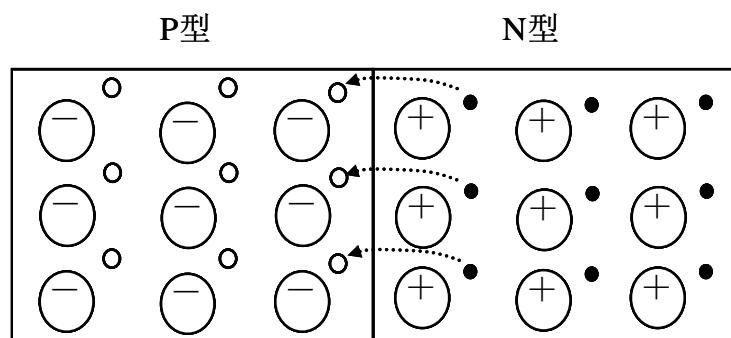
1. PN结的形成



1. PN结的形成

■ 多数载流子向对方扩散

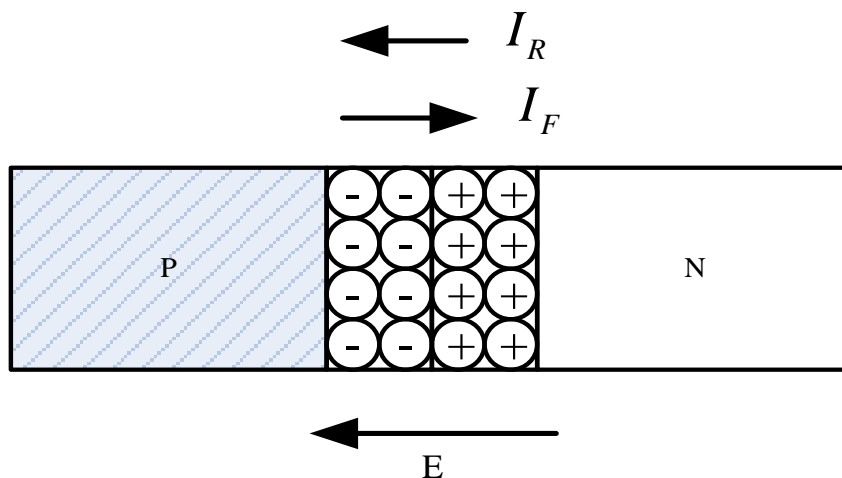
- 浓度梯度引起多数载流子做扩散运动，在交界面附近形成空间电荷区，并逐步扩大
- 内电场逐步增大，阻挡了多子的扩散运动，减缓空间电荷区的进一步扩大



1. PN结的形成

■ 少数载流子的漂移

- 少数载流子在内电场作用下做漂移运动，补充了多子，使空间电荷区变薄，并减小了内电场



1. PN结的形成

■ 动态平衡形成PN结

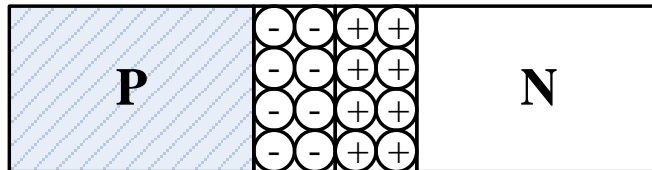
动态平衡条件: $I_F = I_R$

■ 说明

- 动态平衡的**PN**结是电中性的，没有电流流过
- 几个名称：
 - 空间电荷区：浓度梯度、扩散、内电场。
 - 阻挡层：内电场减弱了扩散过程、阻挡作用、阻挡层。
 - 耗尽层：由于**PN**结中只有不能移动的正负离子，故而具有很高的电阻率，又称为耗尽层。

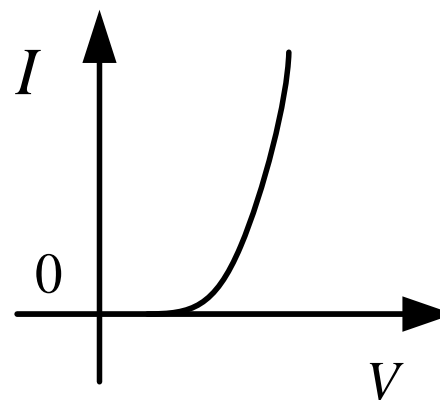
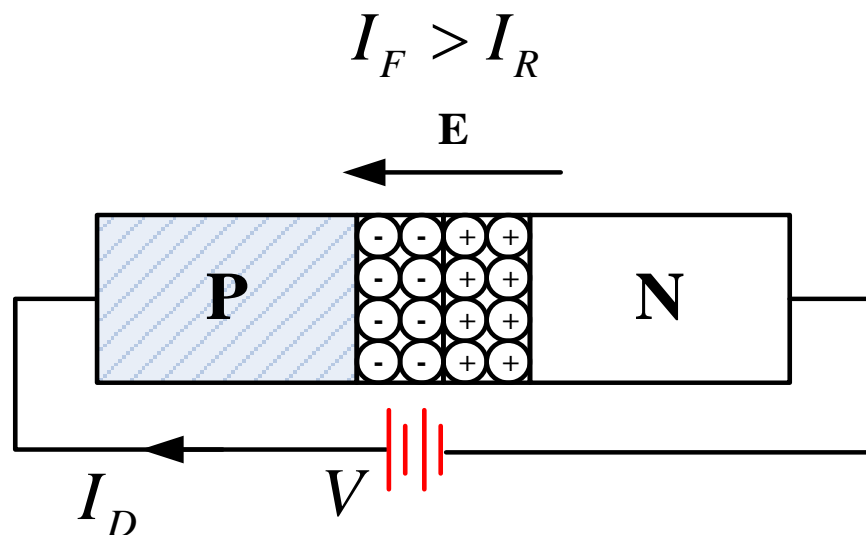
2.单向导电性

■ 电路符号



(1) 正向特性

■ 正向偏置及其伏安特性



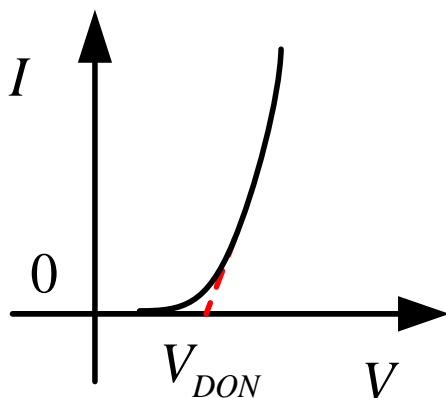
■ 说明

- 正向偏置时，PN结电流 I_D 主要由多数载流子形成，一般为mA量级

(1) 正向特性

■ 导通电压

- 定义电流明显上升时对应的PN结两端电压 V_D 为PN结的导通电压，记为 V_{DON}

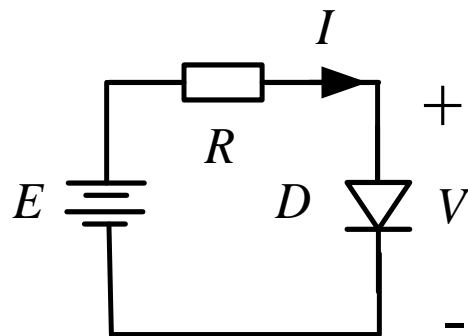
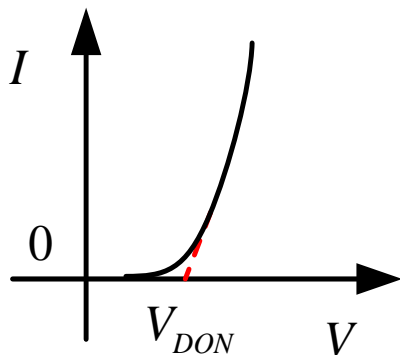


$$\begin{cases} Si : V_{DON} = 0.7V \\ Ge : V_{DON} = 0.3V \end{cases}$$

(1) 正向特性

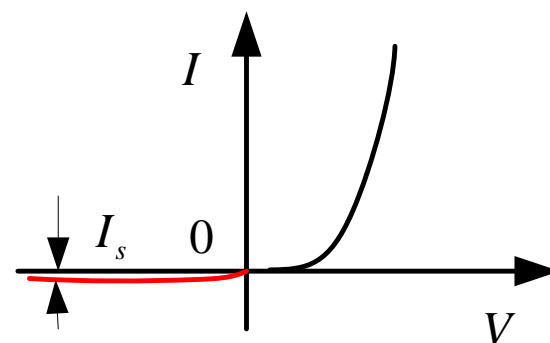
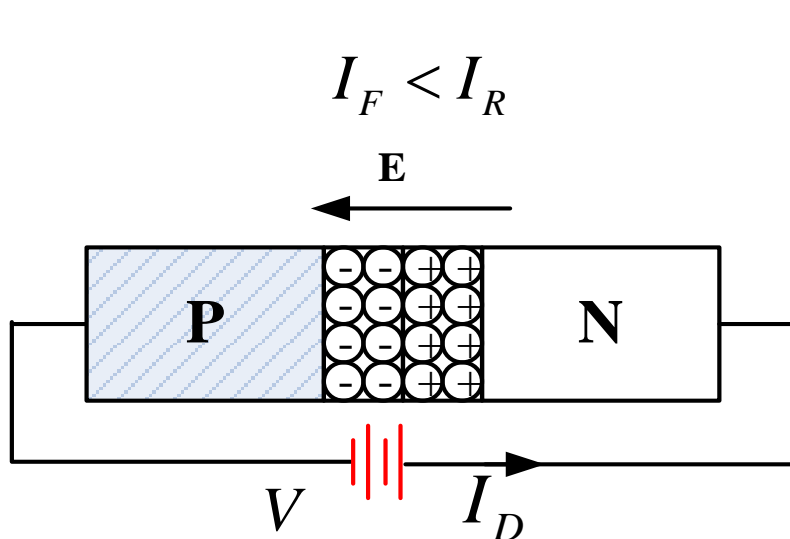
■ 说明

- PN结导通状态下，两端的电压 V_D 动态范围其实比较小，但电流 I_D 变化范围较大，较小的电压变化可引起较大的电流变化
- 实际应用时，**PN**结两端的正向电压 V_D 不宜过大，应串入限流电阻 R ，以防工作电流值超过**PN**结的额定正向工作电流，烧毁**PN**结



(2) 反向特性

■ 反向偏置及其伏安特性



反向饱和电流 I_s

■ 反向饱和电流

- 反向饱和电流是指PN结在规定的正常工作条件下，流过PN结的最大反向电流，记为 I_s

(2) 反向特性

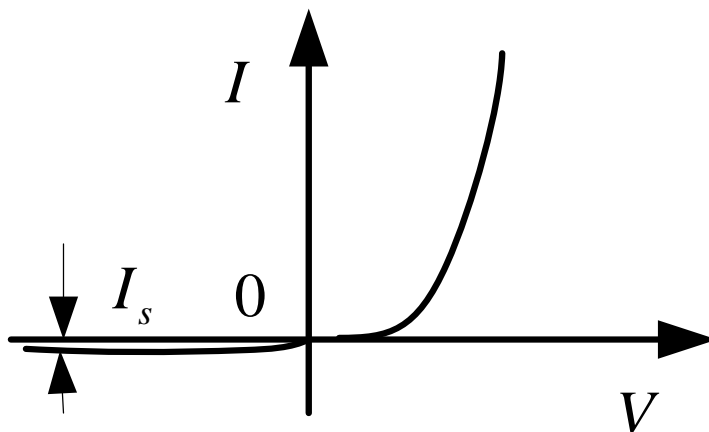
■ 说明

- PN结的反向饱和电流 I_s 主要是少数载流子形成，一般为pA~nA量级
- 由于少数载流子受温度影响比较大，因此 I_s 受温度变化的影响较大

(3) 理想PN结的伏安特性

■ PN结的非线性伏安特性

- 正向偏置时，电流随电压呈非线性增长，导通
- 反向偏置时，反向电流很快达到饱和，截止



(3) 理想PN结的伏安特性

■ PN结的单向导电性

数学模型：
$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1 \right)$$

令 $V_T = KT / q \Rightarrow I = I_s \left(e^{V/V_T} - 1 \right)$

室温下（ $T=300K$ ）： $V_T = 26mV$

(3) 理想PN结的伏安特性

$$I = I_s (e^{V/V_T} - 1)$$

■ 1 $V \gg V_T$ $e^{V/V_T} \gg 1$ $I \approx I_s e^{V/V_T}$

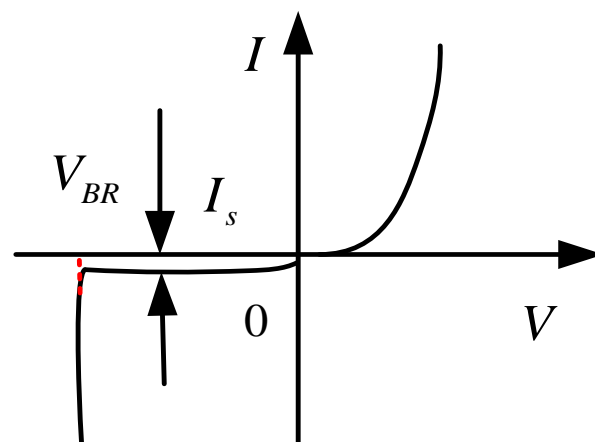
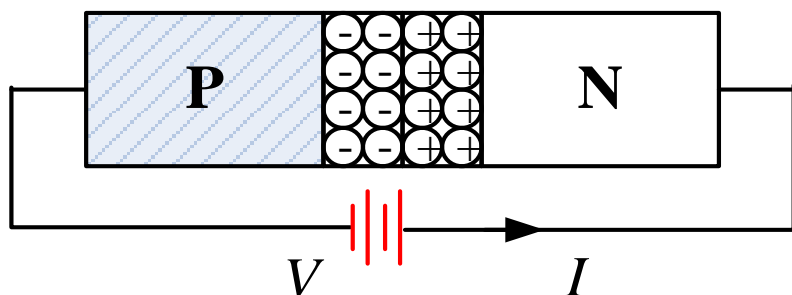
■ 2 V 加反压且 $|V| \gg V_T$ $e^{V/V_T} \ll 1$

$$I \approx -I_s$$

3.反向击穿特性

■ PN结反向击穿

- 当PN结反向偏压增至一定值的时候，反向电流会急剧增大，此时的PN结呈现很小的电阻，称这种现象为PN结反向击穿



反向击穿电压 V_{BR}

3.反向击穿特性

■ 反向击穿电压

- 加在**PN**结两端的反向电压高到一定值时，会将管子击穿，失去单向导电能力，对应的电压称为反向击穿电压，记为 V_{BR}
- 反向击穿后，**PN**结两端电压可以维持为 V_{BR} 不再变化

■ 雪崩击穿

- 外部反压很大时，少数载流子携带一定的能量与对方原子产生碰撞，致使对方原子产生电离，电离后的电子和空穴在反压作用下，产生持续的碰撞，使更多原子产生电离，类似于雪崩现象，故称作雪崩击穿

3.反向击穿特性

■ 雪崩击穿特点-1

- 雪崩击穿一般发生在掺杂浓度比较低的**PN**结中，空间电荷区较宽，碰撞几率大

■ 雪崩击穿特点-2

- 需要足够高的反向电压才能在空间电荷区产生雪崩击穿

3.反向击穿特性

■ 齐纳击穿

- 当加上一定的反向电压时，空间电荷区可以建立很强的电场，该电场足以将原子间的共价键的价电子拉出来形成电子空穴对，参与导电，产生场致激发效应，称为齐纳击穿

3.反向击穿特性

■ 齐纳击穿特点-1

- 一般发生在高掺杂的**PN**结中，空间电荷区较薄，易产生场致激发效应

■ 齐纳击穿特点-2

- 所需反向击穿电压较低，一般低于**6V**

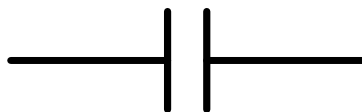
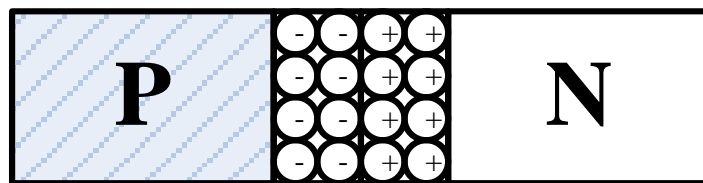
3.反向击穿特性

- 电击穿，可逆
- 热击穿，不可逆
- 利用此特性制作稳压二极管

4.结电容

■ PN结电容

- 当PN结端电压发生**变化**时，PN结空间电荷区的正负离子的数量也要随着变化，或向对方区扩散注入的多数载流子数目也将随之变化，PN结将呈现电容效应，称为PN结电容



4.结电容

■ 势垒电容

- 外加电压变化时，空间电荷区的厚度会随之变化，称由此产生的电容效应为势垒电容

■ 扩散电容

- 多数载流子浓度梯度随外加电压变化而发生变化，从而使PN结呈现出一种电容效应，由于它主要是载流子扩散而引起的，称为扩散电容

4.结电容

■ 结电容特点-1

- 在正向偏置下，电压变化产生的电容效应主要是扩散电容

■ 结电容特点-2

- 而反向偏置下，电压的变化主要影响空间电荷区，因而势垒电容起主要作用

■ 结电容特点-3

- 两种电容容值均比较小，一般为pF量级，仅在外加高频交流信号时予以考虑