

基础电路与电子学

主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

Email: ckz@fzu.edu.cn

QQ 群： 812010686

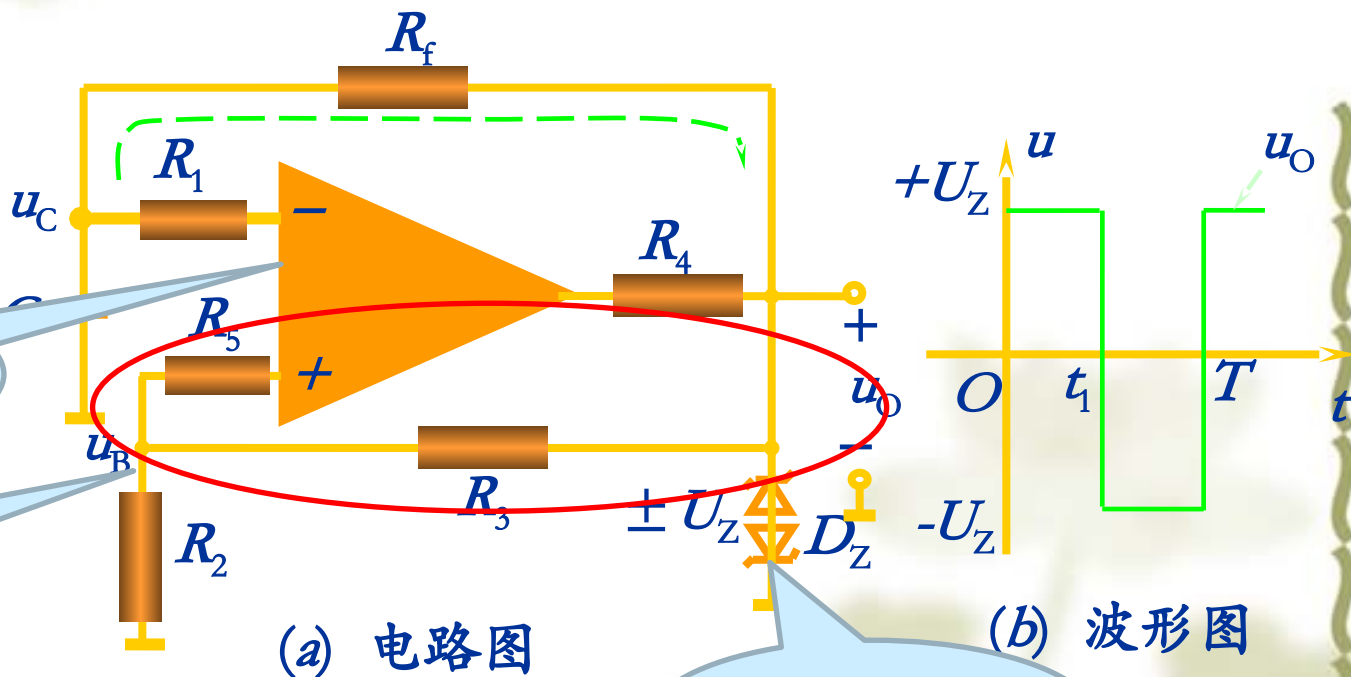
学习模电目的：

分析和设计基本模拟电路，同时也是学习数字电路的基础

方波发生器：模电和数电中都经常用到。

集成运算放大器 7

反馈电路 8

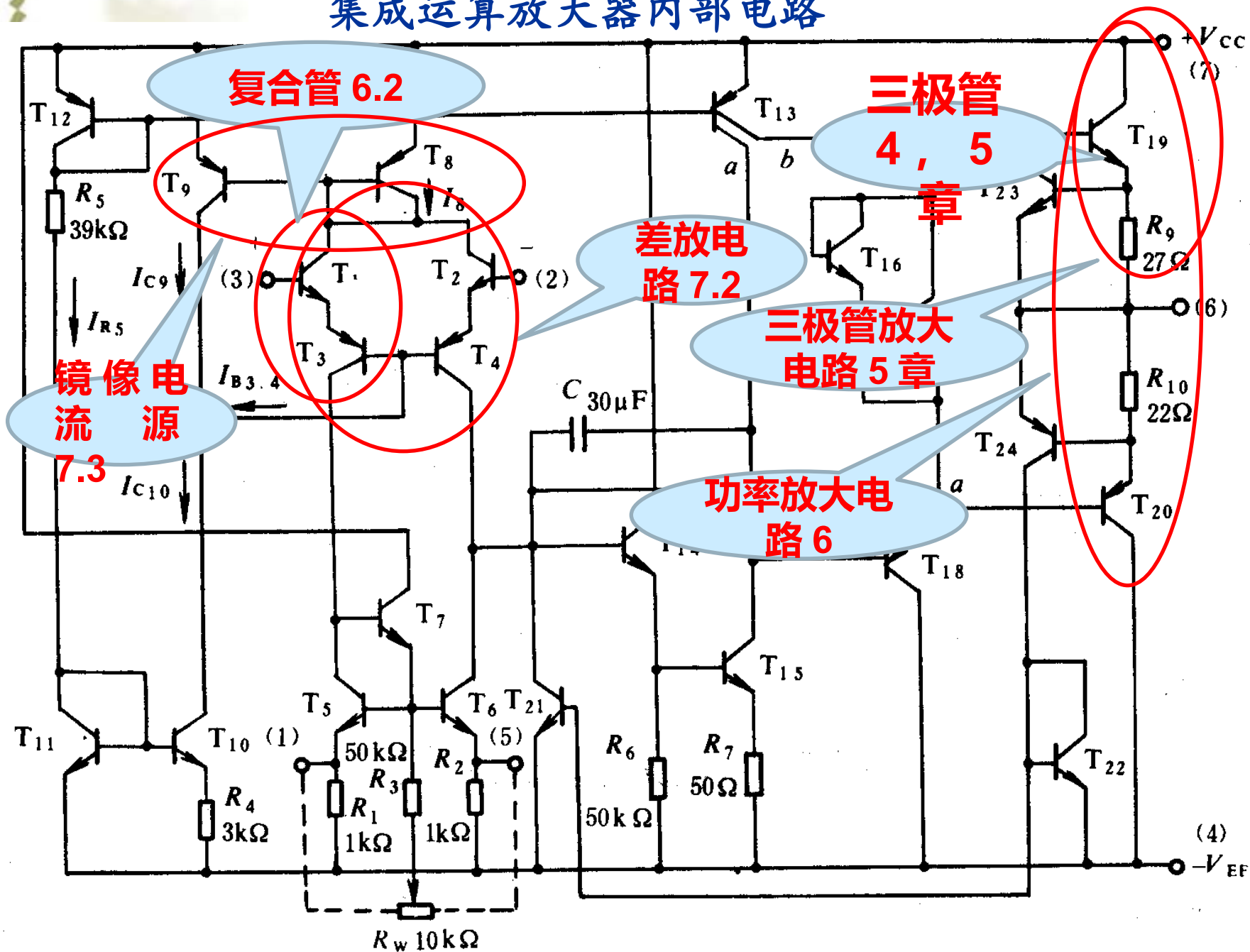


方波发生器

稳压电路

集成运算放大器：接不同的外围电路后，可实现交流直流的放大、加减乘除运算、积分微分运算、以及滤波等等各种信号处理电路（第九、十章）。

集成运算放大器内部电路



主要内容

半导体二极管和三极管 (4.1-4.3)

放大电路基础 (5.1, 5.3, 5.5, 5.7, 5.8)

功率放大电路

集成运算放大器 (7.1, 7.2)

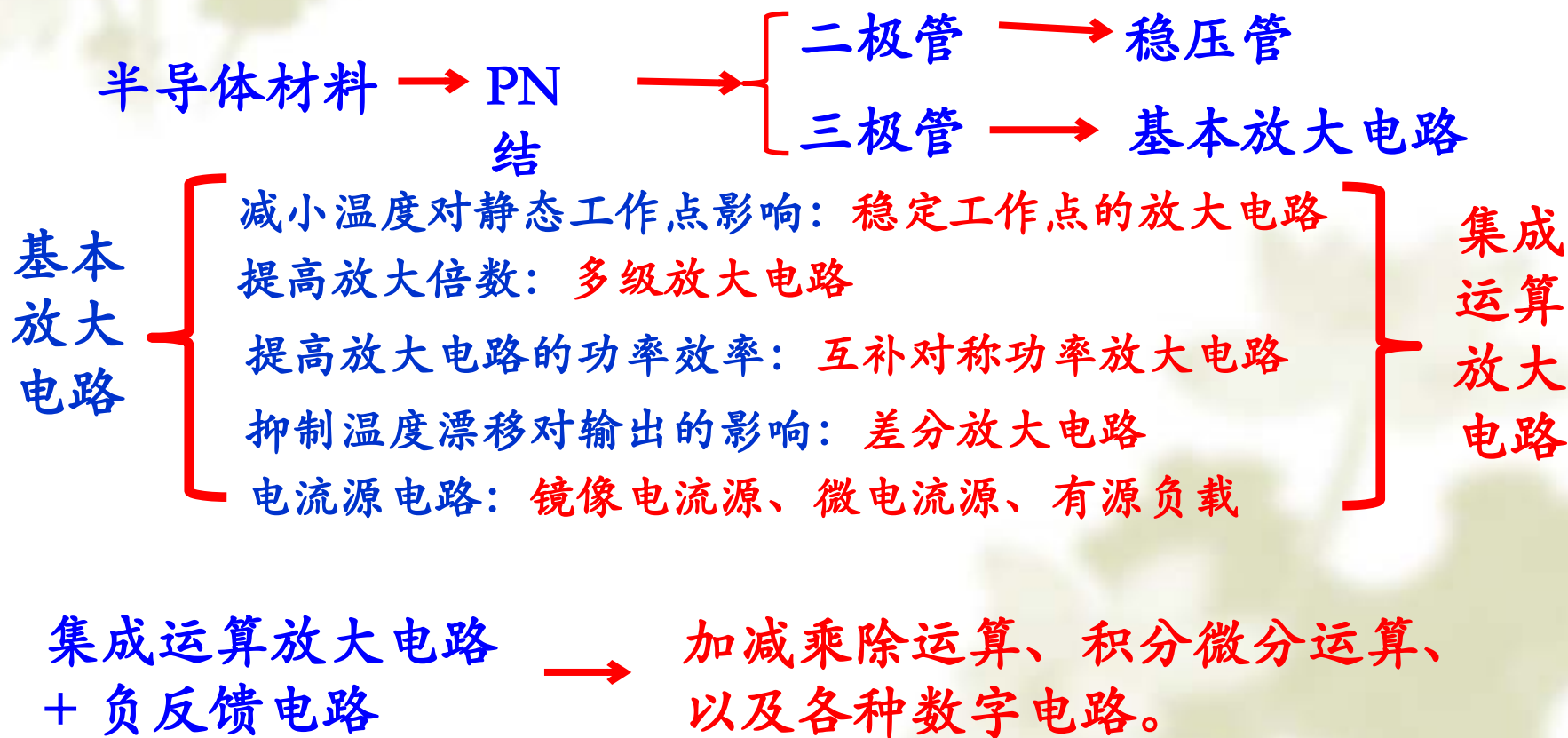
负反馈放大电路

信号的运算、处理及波形发生电路 (9.1)

直流电源 (10.1)

模电知识体系及学习特点

知识体系：



模电知识体系及学习特点

学习特点:

- 1, 理解各电路的功能: 减小误差 (温度、器件老化影响)、提高功率效率、方便耦合等。 (设计目的或电路功能)
- 2, 不再偏重于数学计算, 而以电路原理分析、理解电路整体功能为主。计算只是帮助理解原理的一个工具。很多时候会采用近似计算, 忽略次要分量影响。 (为什么这样设计)

主要内容

半导体二极管和三极管

放大电路基础

功率放大电路

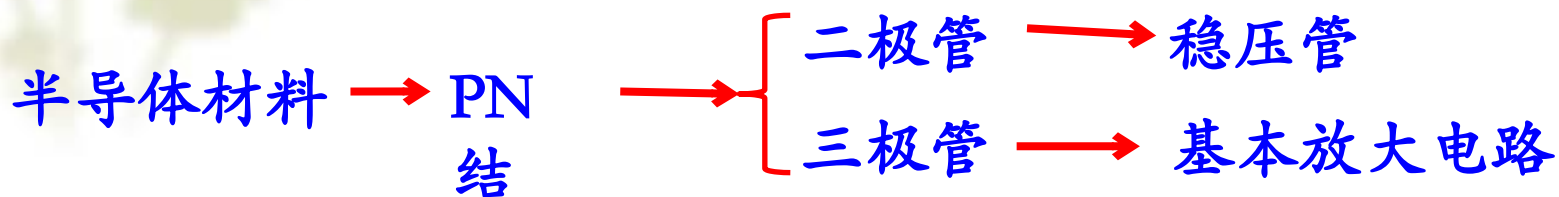
集成运算放大器

负反馈放大电路

信号的运算、处理及波形发生电路

直流电源

半导体二极管和三极管



主要内容有：

- ◆ 半导体的导电特性
- ◆ PN 结的形成（重点）及单向导电性
- ◆ 半导体器件（二极管、三极管）的结构、工作特性、具体应用。（重点）

1. 半导体

物质根据其导电性能分为：

导体：低价元素（原子最外层的电子在 3 个及以下，形成自由电子）

绝缘体：高价元素（原子最外层的电子在 5 个及以上，形成稳定的共价键）

半导体：最外层存在 4 个电子。

1. 半导体

(1) 半导体的物理特性

半导体的导电能力具有独特的性质：

- ① 温度升高或受到光照时，纯净的半导体的导电能力显著增加；
- ② 在纯净半导体材料中加入微量的“杂质”元素，它的电导率就会成千上万倍地增长；

半导体为什么具有以上的导电性质？

半导体的这种特殊的导电性质是由其原子结构所决定的。

1. 半导体

(2) 半导体的晶体结构

简化原子结构模型如图 4-1(a) 的简化形式。

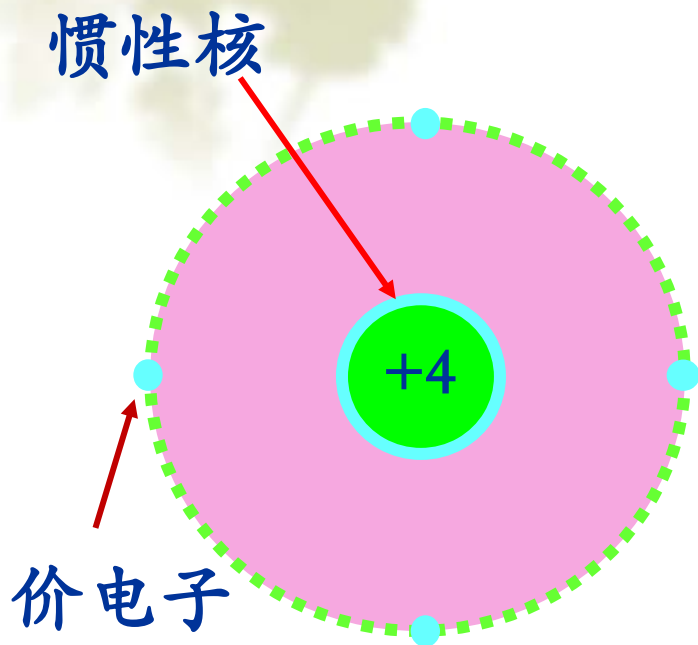


图 4-1 (a) 硅和锗的简化原子模型

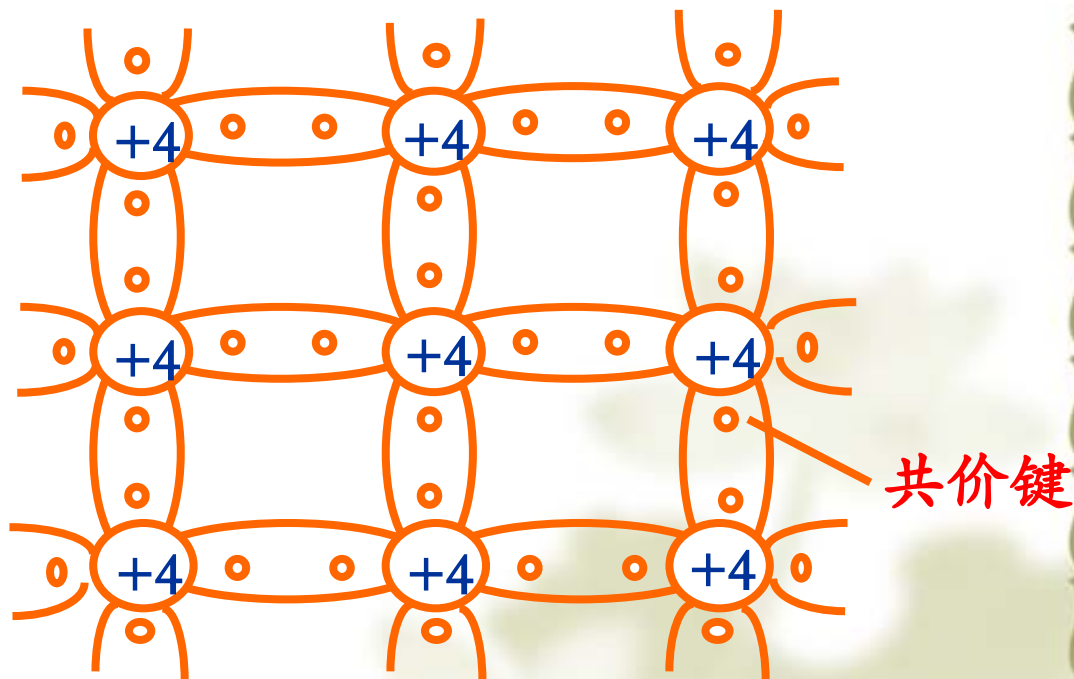
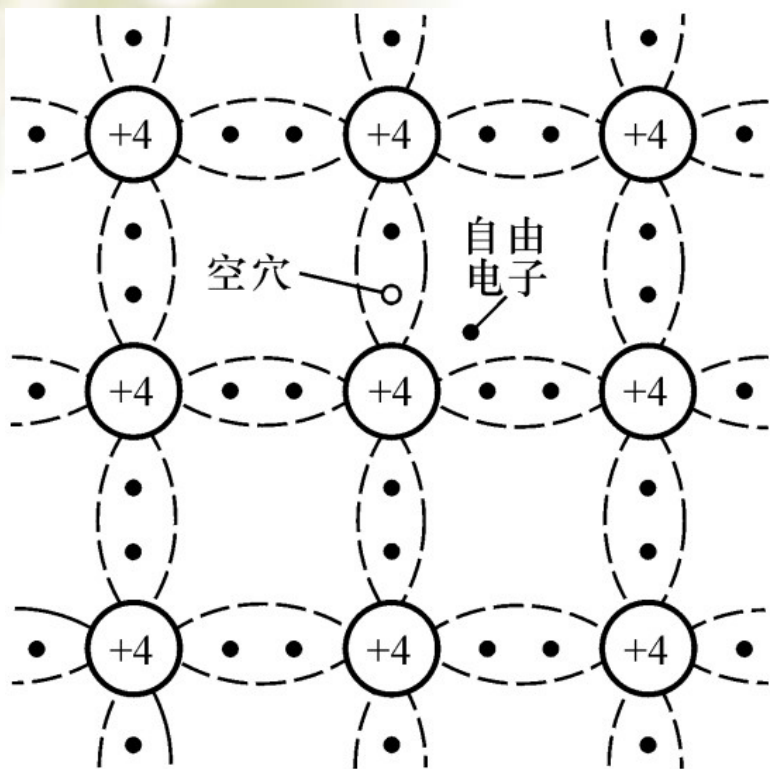


图 4-1(b) 晶体共价键结构平面示意图

本征半导体：由天然的硅或锗材料制成的纯净半导体

1. 半导体

(3) 本征半导体：导电原理



在绝对零度的条件下
($T=0\text{K}$ 相当于 $T=-273^{\circ}\text{C}$)，本征半导体中没有自由电子，不能导电，如同绝缘体一样。当本征半导体受到热或光的激发获得足够能量后，形成“电子—空穴对”，本征半导体就具有了导电能力。这个过程叫“本征激发”。

半导体和导体在导电原理的本质区别：

在导电原理上，导体的载流子是自由电子；绝缘体没有载流子；而半导体的载流子有两种：自由电子和空穴。

1. 半导体

(1) 半导体的物理特性

本征半导体

半导体的导电能力具有独特的性质。

- ① 温度升高或受到光照时，纯净的半导体的导电能力显著增加；
- ② 在纯净半导体材料中加入微量的“杂质”元素，它的电导率就会成千上万倍地增长；

杂质半导体

动画

1. 半导体

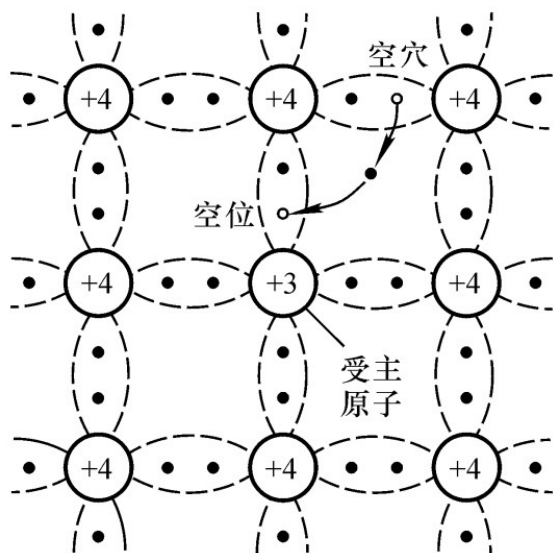
(4) 杂质半导体

杂质半导体：通过扩散工艺，在本征半导体中掺入少量合适的**杂质元素**，从而使半导体的导电能力得到极大的改善。

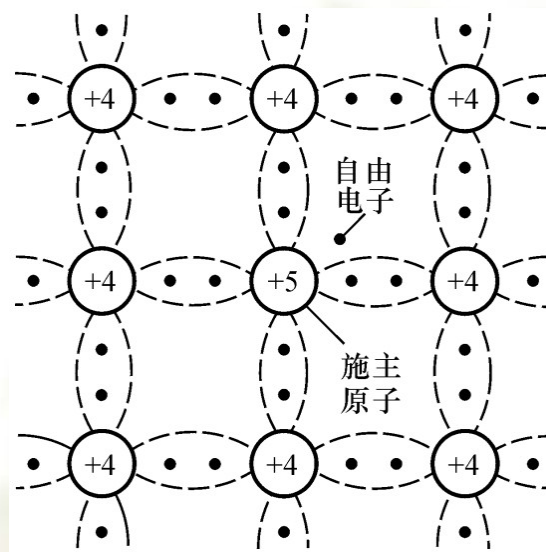
杂质半导体可分为：**N型半导体**和**P型半导体**。

区别：加入的杂质元素不同

P
型
半
导
体



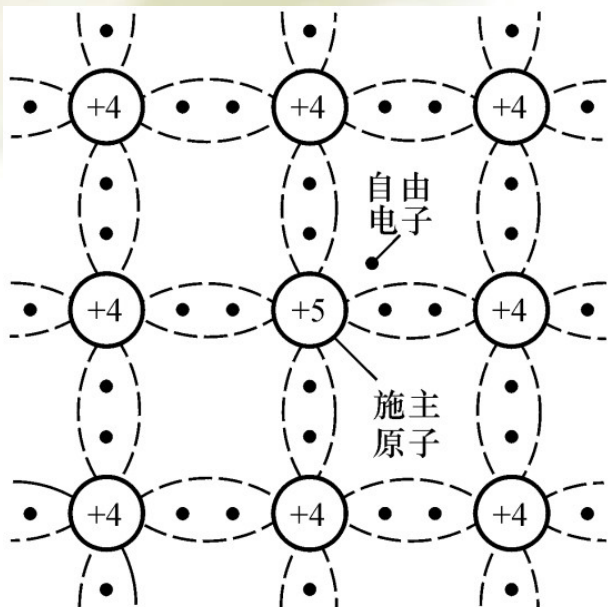
N
型
半
导
体



1. 半导体

(4) 杂质半导体

(一) N型半导体的导电原理



在本征半导体中，掺入微量的**五价元素**（如磷），就形成了**N型半导体**。

由于五价元素的原子最外层有5个价电子，所以除了与周围的原子形成共价键外，还多出了一个**电子**，可自由移动，导电能力大大增强。

多数载流子，**多子**

少数载流子，**少子**

自由电子的浓度大大高于**空穴**的浓度。 ($n_i \gg$

自由电子的浓度 n_i = 本征激发的电子浓度 + 杂质元素浓度

空穴的浓度 p = 本征激发的空穴浓度

例题：对于一个本征半导体而言，它的原子浓度 $= 10^{22}/\text{cm}^3$ 。在常温下，它可以本征激发出的载流子浓度 $= 10^{10}/\text{cm}^3$ 。现在，往本征半导体中掺入百万分之一的五价元素磷，求：

① 此时的自由电子浓度 $n_i = ?$ 空穴浓度 $p_i = ?$

② 请比较本征半导体和杂质半导体的导电能力。

③ 已知当温度升高 10°C ，本征激发的载流子浓度增加一倍， $n_i' = ?$ $p_i' = ?$

解答：① \because 本征激发的是电子—空穴对 $\therefore n_1 = p_1 = 10^{10}/\text{cm}^3$
杂质的原子浓度 $= 10^{-6} \times 10^{22}/\text{cm}^3 = 10^{16}/\text{cm}^3$

\therefore 由杂质原子所提供的自由电子浓度 $n_2 = 10^{16}/\text{cm}^3$

$\therefore n_i = n_1 + n_2 = 10^{16}/\text{cm}^3 + 10^{10}/\text{cm}^3$

$p_i = p_1 = 10^{10}/\text{cm}^3$

$n_i \gg p_i$

$$\textcircled{2} \quad \frac{n_i + p_i}{n_1 + p_1} = \frac{10^{16}/\text{cm}^3 + (10^{10}/\text{cm}^3 \times 2)}{10^{10}/\text{cm}^3 \times 2} \approx 5 \times 10^5$$

导电能力，大大增强

$$\textcircled{3} \quad \text{若当温度升高 } 10^\circ\text{C}: \quad n_1 = p_1 = 10^{10}/\text{cm}^3$$

$$\times 2 \quad \therefore \quad n_i' = n_1 + n_2 =$$

$$10^{16}/\text{cm}^3 + (10^{10}/\text{cm}^3 \times 2)$$

$$n_i' + p_i' \approx 10^{16}/\text{cm}^3 \times 2$$

虽然 n_1 p_1 增大两倍，但 $n_i' + p_i'$ 增大两倍基本不变。

结论：在N型半导体中， $n_i \gg p_i$ ，多子是自由电子，少子是空穴。多子的浓度取决于掺入的杂质浓度，几乎不受温度影响。而少子的浓度则取决于温度的变化。

杂质半导体主要依靠多子导电，所以当多子的浓度越高时，杂质半导体的导电性能越好，导电的稳定性也越好。

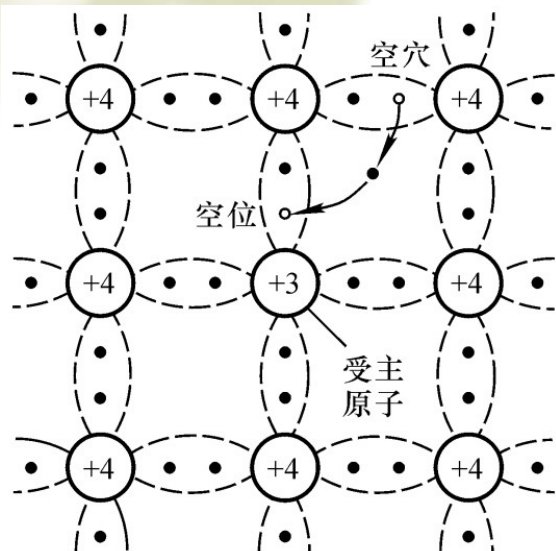
1. 半导体

(4) 杂质半导体

(二) P型半导体的导电原理

在本征半导体中，掺入微量的三价元素（如硼），就形成了P型半导体。

由于三价元素的原子最外层只有3个价电子，所以当它与周围的原子形成共价键时，就产生了一个空穴。导电能力大大增强。



多数载流子，多子

少数载流子，少子

空穴的浓度大大高于自由电子的浓度。 ($p_i \gg n_i$)

自由电子的浓度 n_i = 本征激发的电子浓度

空穴的浓度 p_i = 本征激发的空穴浓度 + 杂质元素浓度

度

1. 半导体

(5) 载流子的漂移运动和扩散运动

杂质半导体如何导电？

① 漂移运动 (Drift Movement)

- ★ 有电场力作用时，电子和空穴便产生定向运动，称为**漂移运动**。
- ★ 漂移运动产生的电流称为**漂移电流**。电流和电场强度和载流子浓度有关

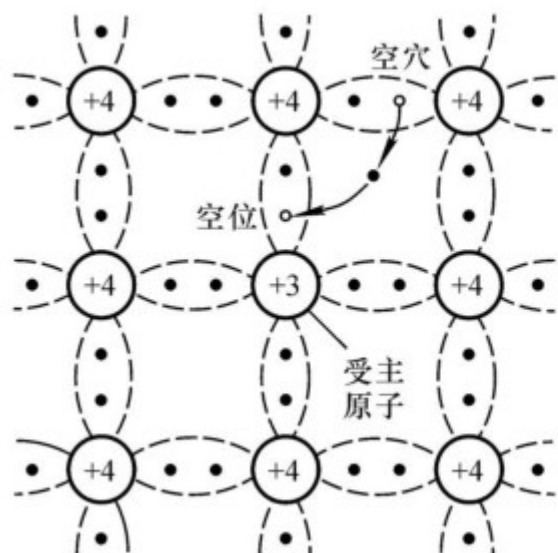
② 扩散运动

- ★ 由于**浓度差**而引起的定向运动称为**扩散运动** (Diffusion Movement)，载流子扩散运动所形成的电流称为**扩散电流**。
- ★ 扩散是由浓度差引起的，所以扩散电流的大小与**载流子的浓度梯度**成正比。

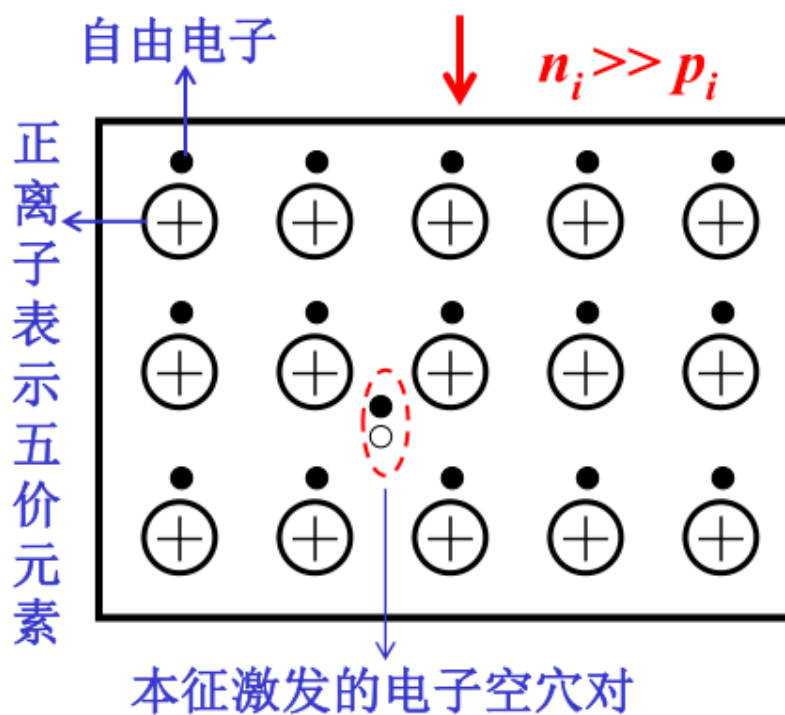
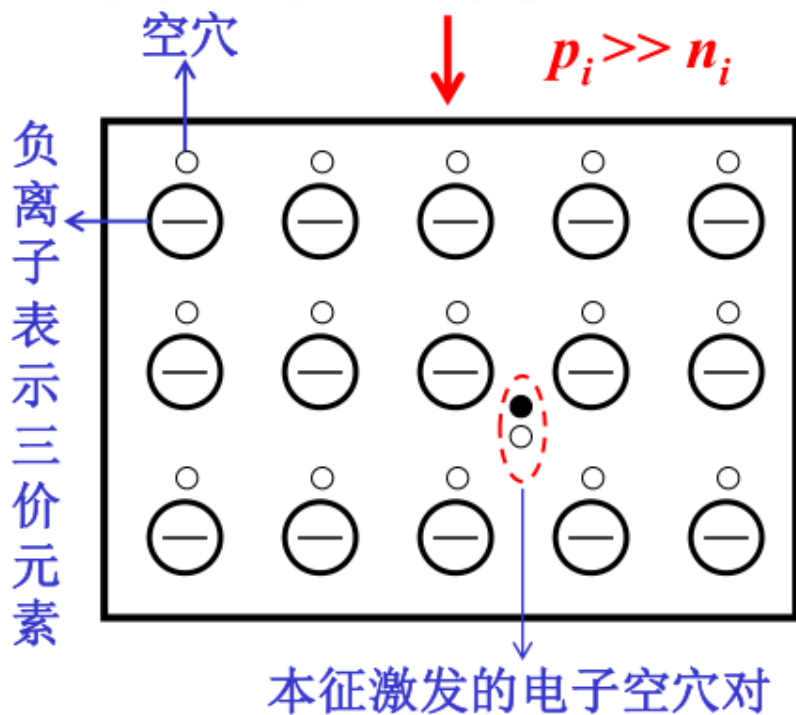
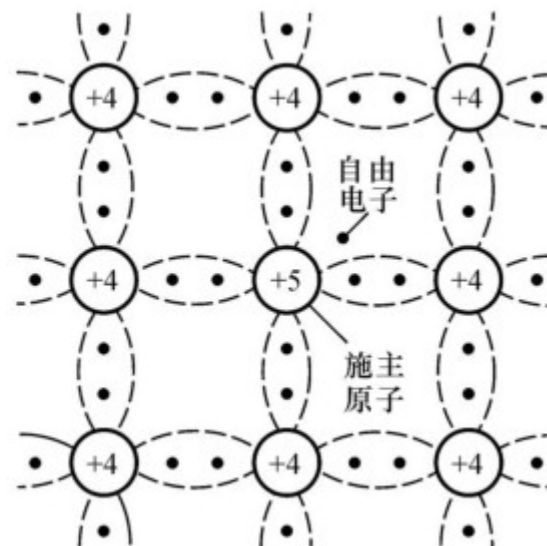
1. 半导体

§ 2 PN结

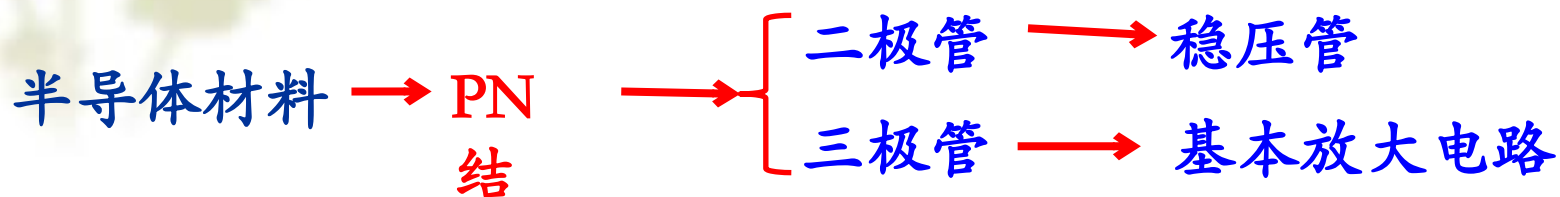
P型半导体



N型半导体



半导体二极管和三极管



主要内容有：

- (1) PN 结的形成
- (2) PN 结的特性

2. PN 结

- P 型和 N 型半导体接触一起会怎样？

- PN 结：

是指在 P 型半导体和 N 型半导体的交界处形成的空间电荷区。

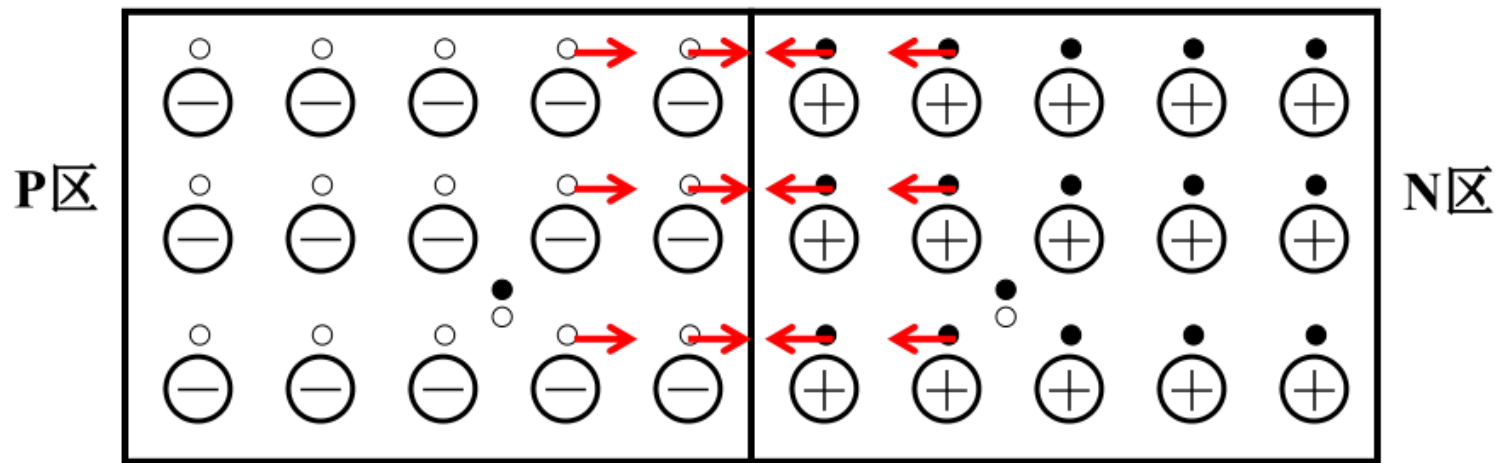
- PN 结是构成多种半导体器件的基础。

二极管的核心是一个 PN 结；三极管中包含了两个 PN 结。

2. PN 结

(1) PN 结的形成

注意：能够自由移动的只有空穴和自由电子，正负离子不能移动



空穴浓度高
自由电子浓度低

自由电子浓度高
空穴浓度低

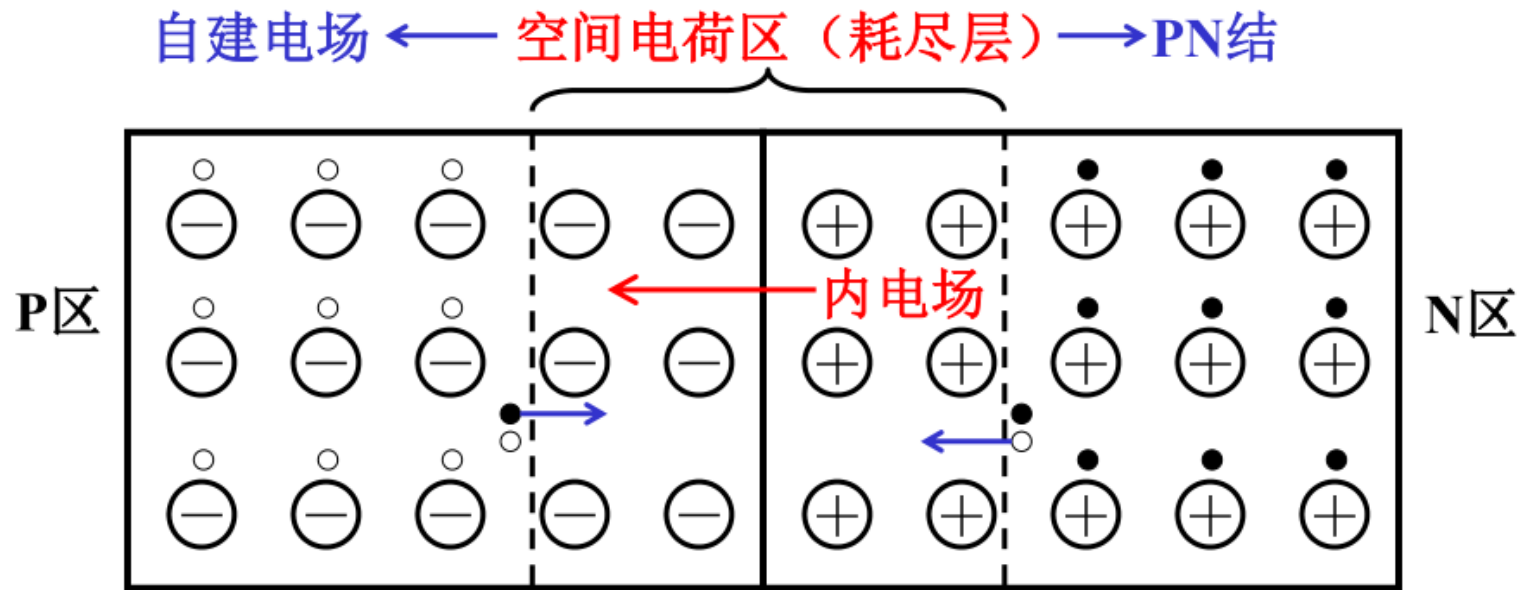
存在着极大的载流子的浓度差

扩散 —> 浓度差减小 —> 扩散减弱 —> 扩散电流减小

自建电场上升 —> 漂移电流增大 —> 扩散 = 漂移，方向相反，达到平衡

2. PN 结

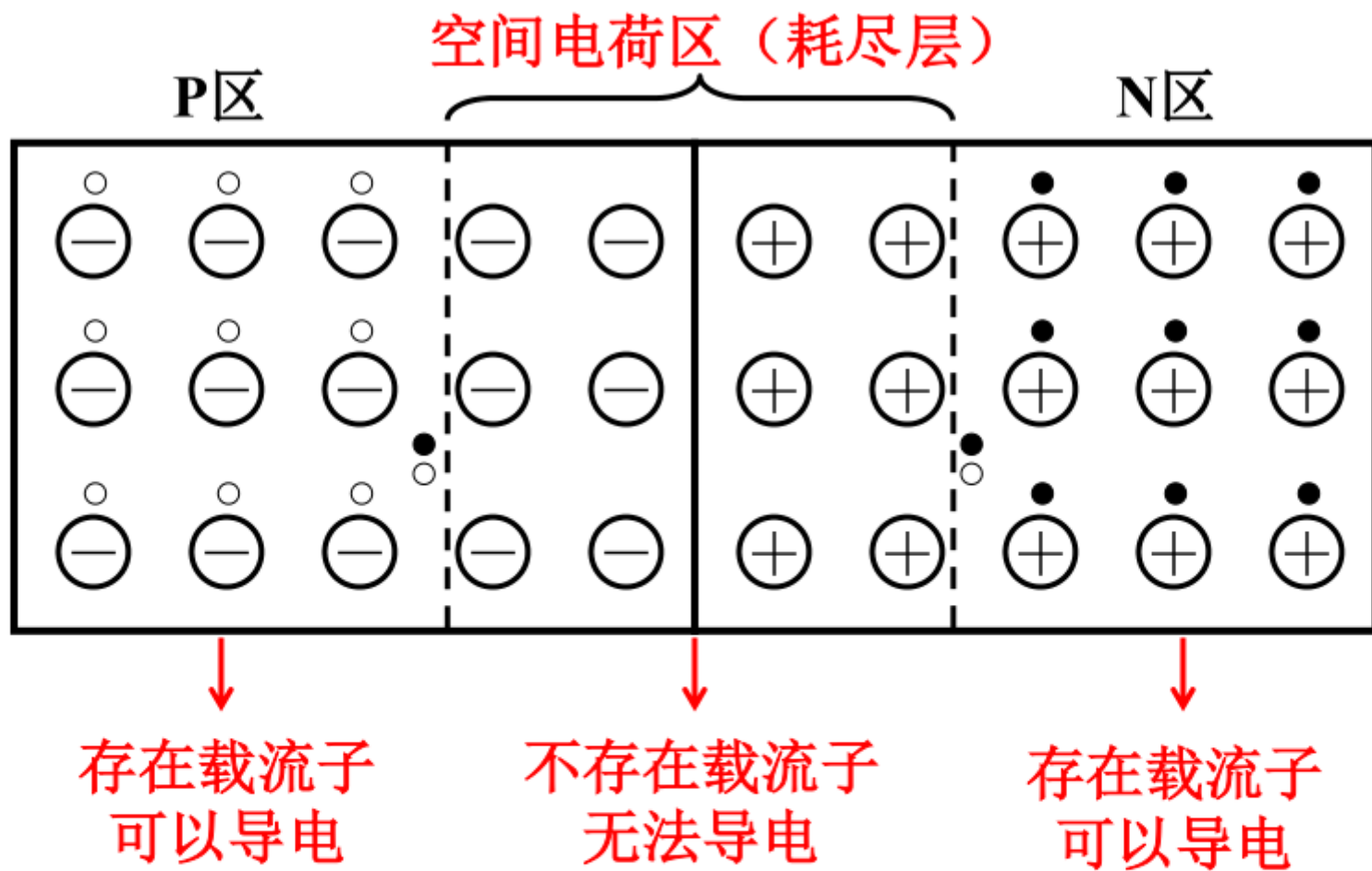
(1) PN 结的形成



在这个区域内没有任何的载流子，只剩下不能移动的正负离子区

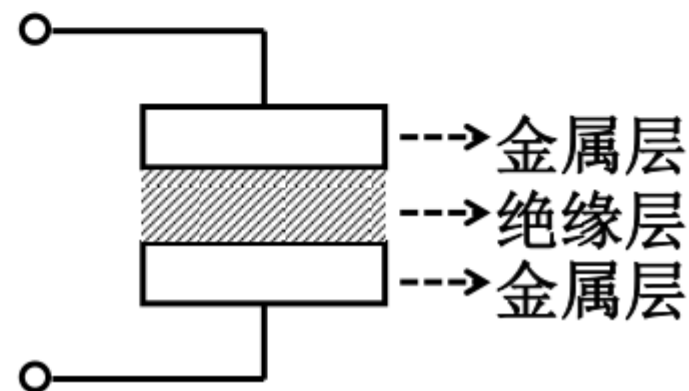
扩散 → 浓度差减小 → 扩散减弱 → 扩散电流减小

自建电场上升 → 漂移电流增大 → 扩散 = 漂移，方向相反，达到平衡

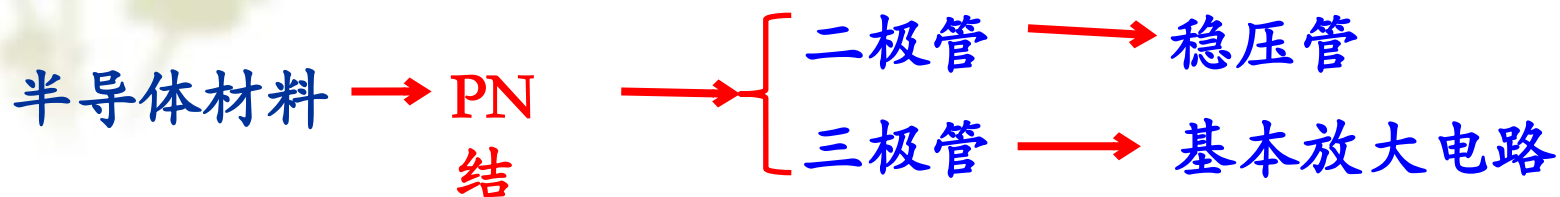


PN结具有“电容效应” **P86-87**

PN结的电容很小，只在高频交流电路才需要考虑，一般可忽略不计



半导体二极管和三极管



主要内容有：

- (1) PN 结的形成
- (2) PN 结的特性

2. PN 结

(2) PN 结的特性

如果在 PN 结的两端**外加电压**，就将破坏原来的动态平衡。当外加**电压的极性不同时**，PN 结将表现出截然不同的导电性能。

(1) P 区接正极，N 区接负极；

称“**PN 结外接正向电压**”和“**PN 结正向偏置**”

(2) P 区接负极，N 区接正极；

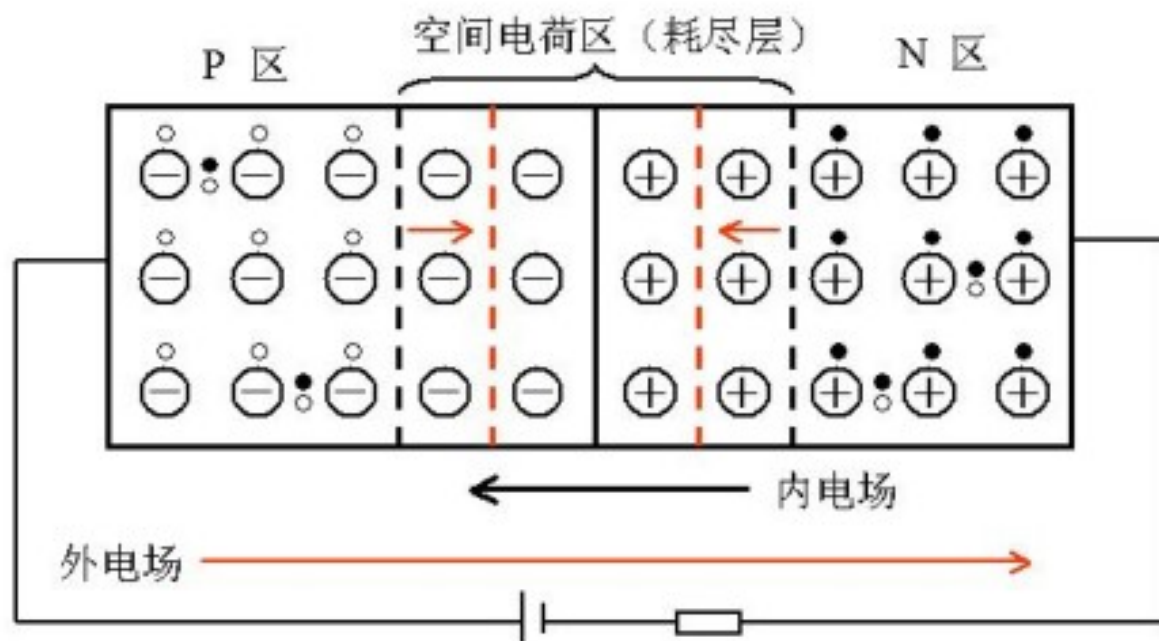
称“**PN 结外接反向电压**”和“**PN 结反向偏置**”

2. PN 结

(2) PN 结的特性

- (1) P区接正极，N区接负极；
称“**PN结外接正向电压**”
或“**PN结正向偏置**”

$$V_P > V_N$$

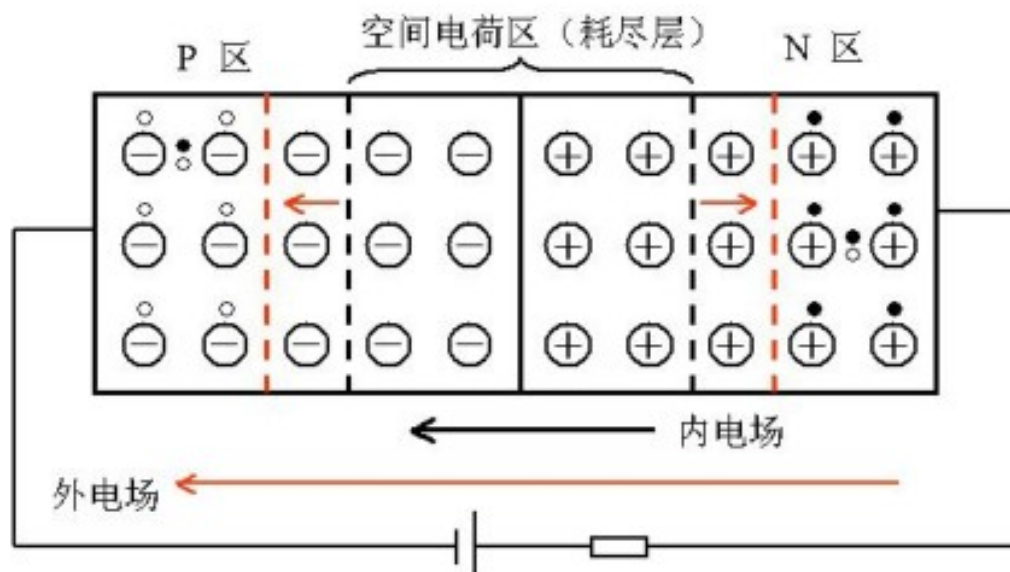


- ◆ 外电场的方向正好和内电场的方向相反，因而削弱了内电场，空间电荷区变窄。多子的扩散运动加剧，少子的漂移运动减弱。
- ◆ 当外电场远大于内电场时，多子的扩散运动将形成一个较大的正向电流 I （方向：P→N）这时，由于PN结有电流流通，因此称此时PN结正向导通。

2. PN 结

(2) P区接负极，N区接正极；
称“**PN结外接反向电压**”
或“**PN结反向偏置**”

$$V_P < V_N$$



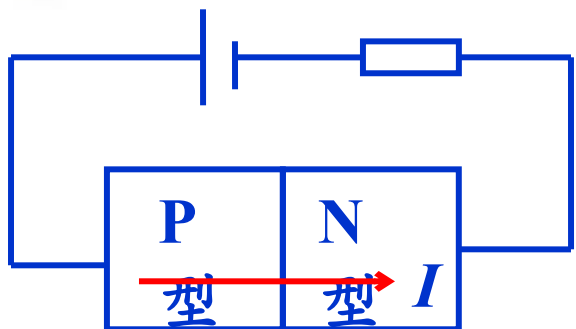
- ◆ 外电场的方向正好和内电场的方向**相同**，因而**加强**了内电场。使得空间电荷区**变宽**。这将进一步阻碍多子的扩散运动，而有利于少子的漂移运动。
- ◆ 由于少子的浓度很低，所以形成的电流（又称为**反向饱和电流 I_s** ）极其微小，小到往往可以忽略不计，即几乎不导通，我们称此时**PN结反向截止**。

2. PN 结

(2) PN 结的特性

※ 总结：在 PN 结的内部，存在着两种运动：**多子的扩散运动**和**少子的漂移运动**。PN 结具有**单向导电性**（正通反止）。

当 PN 结正向偏置时

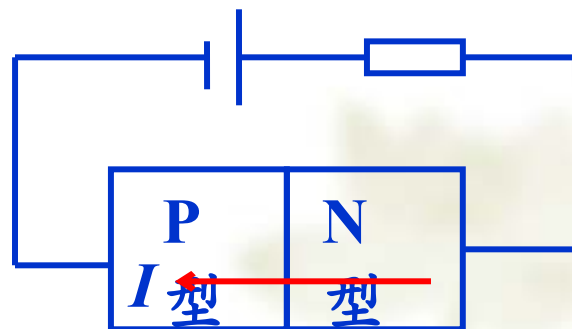


以多子的扩散运动为主

流过一个**较大**的正向电流

PN 结正向导通

当 PN 结反向偏置时



以少子的漂移运动为主

流过一个**极小**的反向电流

PN 结反向截止

动画

2. PN 结

(2) PN 结的特性

PN 结的伏安特性

- 定量描绘 PN 结两端电压和流过结的电流的关系的曲线——PN 结的伏安特性。
- 根据理论分析，PN 结的伏安特性方程为

$$I = I_S (e^{\frac{qU}{kT}} - 1)$$

反向饱和电流

外加电压

令 $\frac{kT}{q} = U_T$ 则 $I = I_S (e^{\frac{U}{U_T}} - 1)$

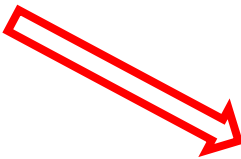
室温下约 26mV

2. PN 结

(2) PN 结的特性

PN 结的伏安特性

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

当正向电压 U 大于 U_T 数倍时, $e^{\frac{U}{U_T}} \gg 1$  $I = I_S e^{\frac{U}{U_T}}$

➤ 结论：正向电流随正向电压的增加以指数规律迅速增大。

外加反向电压时, U 为负值, 当 $|U|$ 比 U_T 大几倍时,

$$e^{\frac{U}{U_T}} \ll 1 \quad \text{此时 } I \approx$$

➤ 结论：加反向电压时, PN 结只流过很小的反向饱和电流。
 $-I_S$

2. PN 结

(2) PN 结的特性

PN 结的理论伏安特性

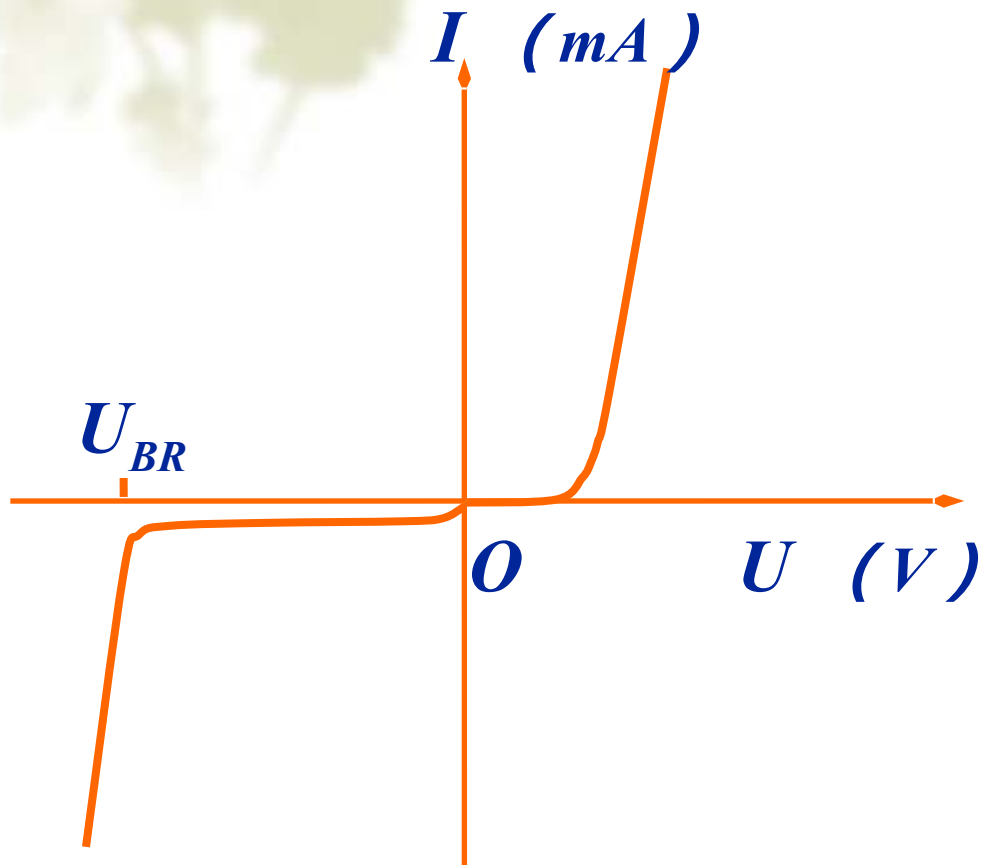


图 4-6 PN 伏安特性

- 画出 PN 结的理论伏安特性曲线。
- 曲线 OD 段表示 PN 结正向偏置时的伏安特性，称为正向特性；
- 曲线 OB 段表示 PN 结反向偏置时的伏安特性，称为反向特性。

2. PN 结

(2) PN 结的特性

PN结的反向击穿

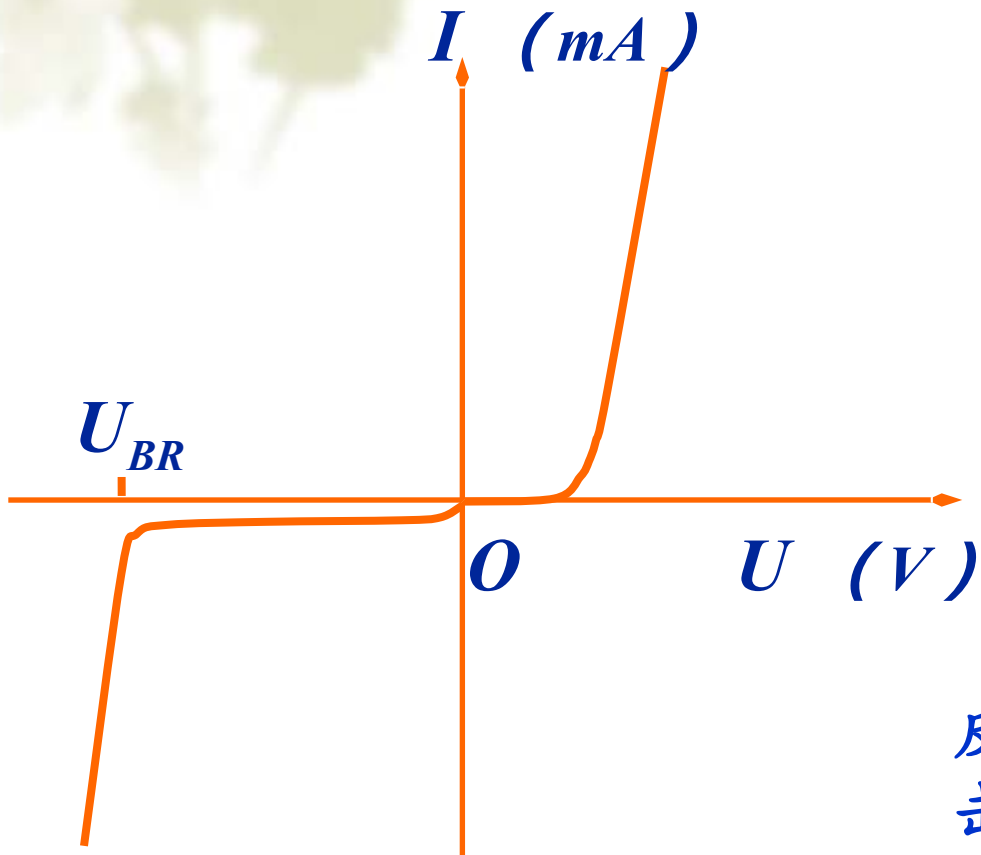


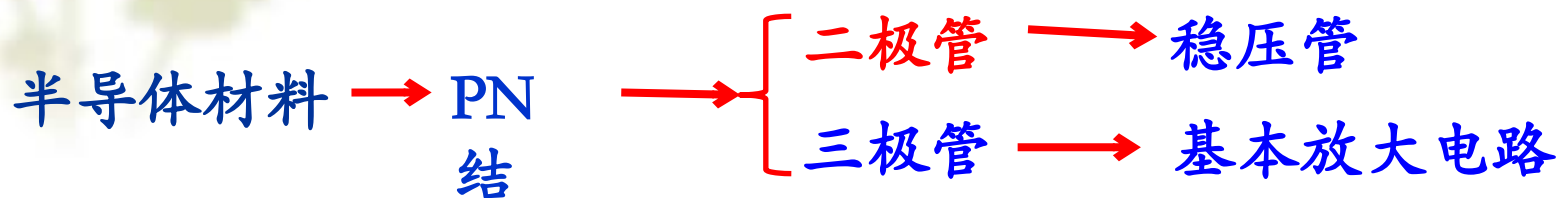
图 4-6 *PN* 结反向击穿

- 加大 PN 结的反向电压到某一值时，反向电流突然剧增，这种现象称为 PN 结击穿，发生击穿所需的电压称为击穿电压，如图所示。
- 反向击穿的特点：反向电压增加很小，反向电流却急剧增加。

反向击穿

- 电击穿：可逆
 - 雪崩击穿
 - 齐纳击穿
- 热击穿：不可逆

半导体二极管和三极管



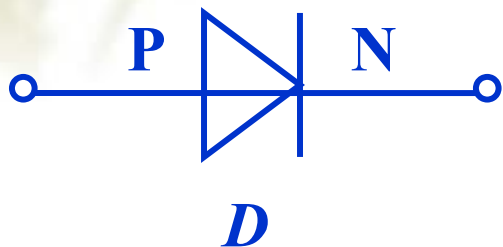
主要内容有：

- ◆ 二极管的结构
- ◆ 二极管的伏安特性
- ◆ 二极管的主要参数
- ◆ 二极管的等效电路与应用
- ◆ 稳压二极管

3 半导体二极管

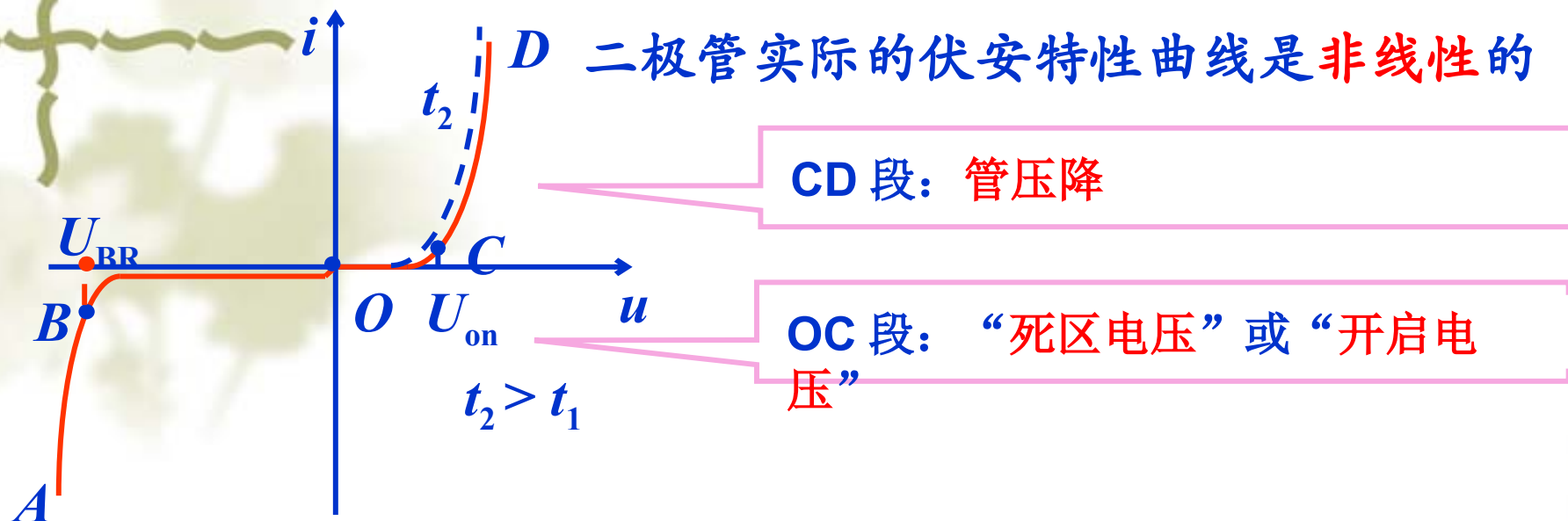
(1) 二极管的结构

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，用 D 表示二极管。



由 P 区引出的电极称为阳极，

由 N 区引出的电极称为阴极。



※ 硅二极管的死区电压 = **0.5V** ; 锗二极管的死区电压 =

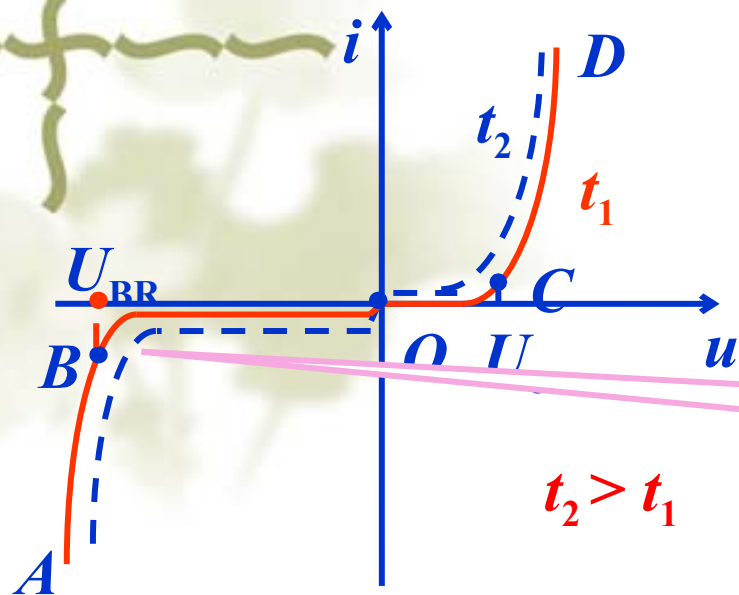
※ 二极管两端的电压

硅二极管: $U_D = 0.6V \sim 1V$, 一般取 **0.7V**

锗二极管: $U_D = 0.2V \sim 0.5V$, 一般取 **0.2V**

※ 当温度升高时, 正向特性曲线将略微**向左移动**, 二极管的死区电压和管压降都将有所减小。

2、反向特性曲线 (OA)



OB 段：反向击穿电压 U_{BR}

$$t_2 > t_1$$

反向特性曲线的**注意点**：

由于反向电流是由少子的漂移运动引起的，而少子的浓度又取决于温度，因此**反向电流受温度影响很大**。当温度**升高**时，少子浓度会随之**增大**，反向电流也会随之**增大**，所以当温度升高时，反向特性曲线会**向下移动**。

二极管实际的伏安特性曲线是**非线性**的

1、正向特性曲线

2、反向特性曲线

① OB 段: $i \approx 0$

① OC 段: $i = 0$

二极管**尚未导通**

二极管**反向截止**

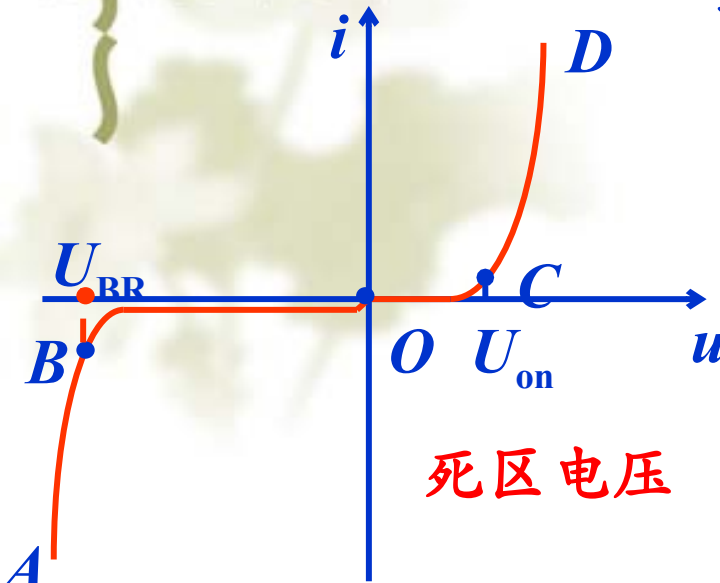
死区电压

② CD 段: ($u > U_{on}$) 二极管处于**导通状态**,

② BA 段:
“反向击穿”

二极管完全导通后,
存在电压降

(**管压降**, $0.7V$ ---
Si)



3 半导体二极管

(3) 二极管的特性 半导体二极管的主要参数

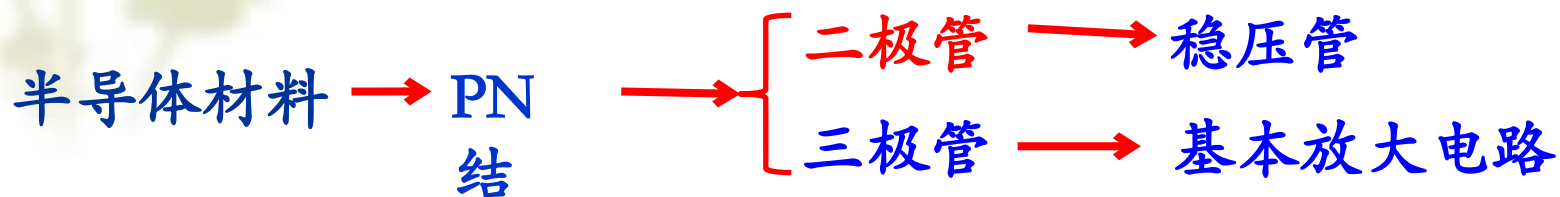
1、最大整流电流 I_F

2、反向工作峰值电压 U_R

3、反向工作峰值电流 I_R

4、最高工作频率 f_M

半导体二极管和三极管



主要内容有：

- ◆ 二极管的结构
- ◆ 二极管的伏安特性
- ◆ 二极管的主要参数
- ◆ 二极管的等效电路与应用
- ◆ 稳压二极管