

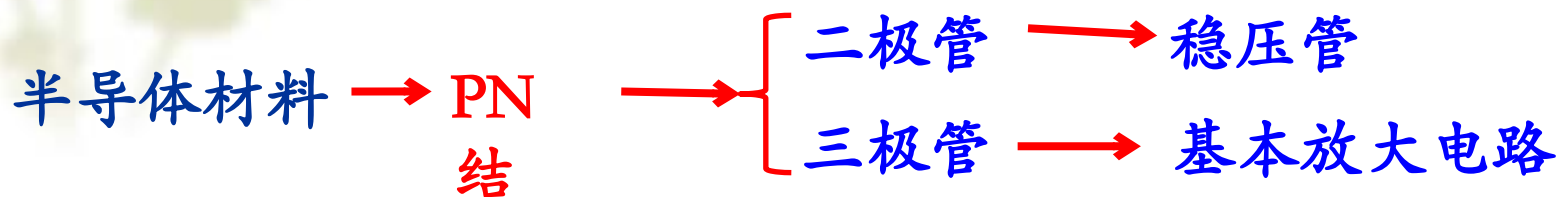
基础电路与电子学

主讲：陈开志

办公室：学院 2 号楼 304

Email: ckz@fzu.edu.cn

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；

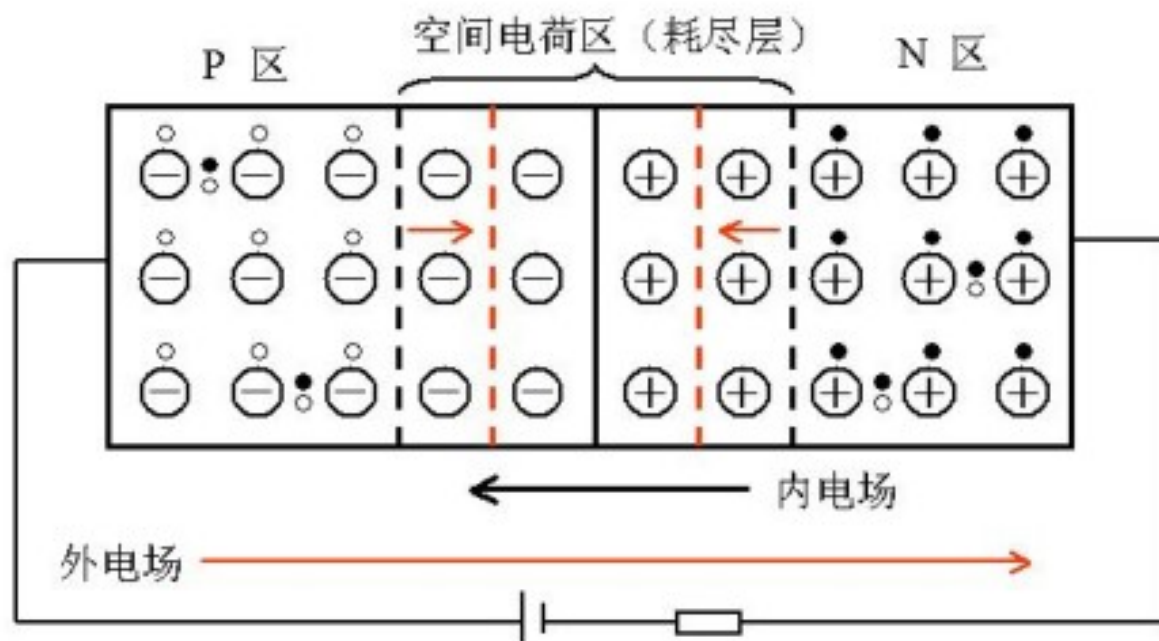
称“**PN 结外接反向电压**”和“**PN 结反向偏置**”

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**”

$$V_P > V_N$$

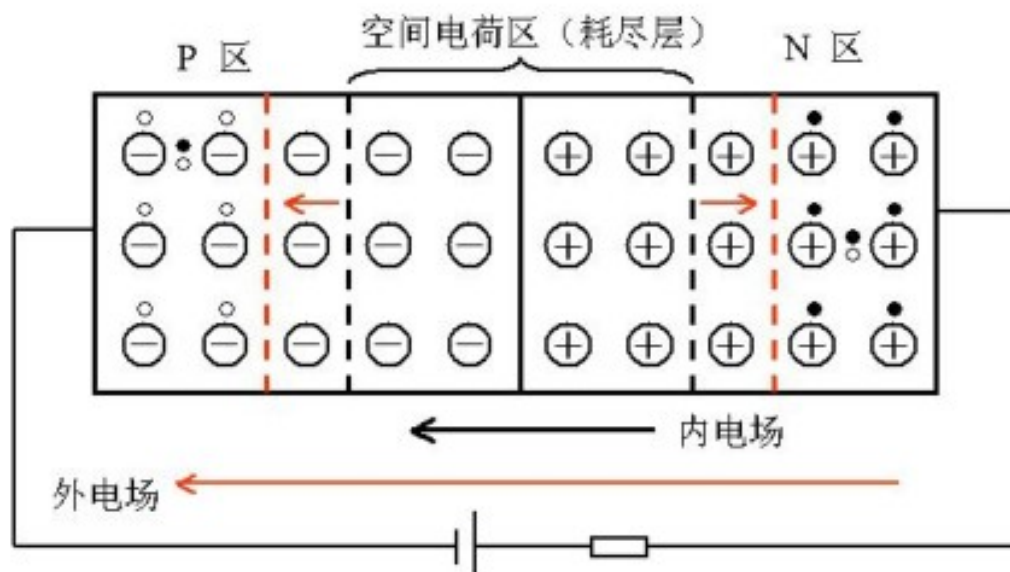


- ◆ 外电场的方向正好和内电场的方向相反，因而削弱了内电场，空间电荷区变窄。多子的扩散运动加剧，少子的漂移运动减弱。
- ◆ 当外电场远大于内电场时，多子的扩散运动将形成一个较大的正向电流 I （方向：P→N）这时，由于PN结有电流流通，因此称此时PN结正向导通。

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**”

$$V_P < V_N$$



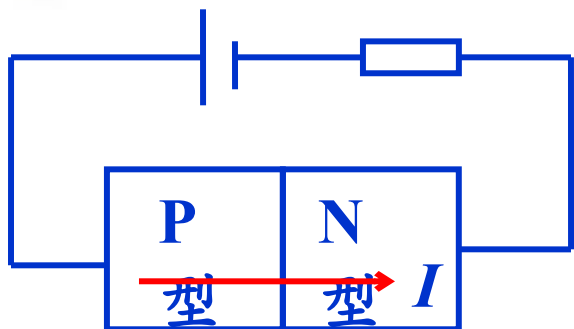
- ◆ 外电场的方向正好和内电场的方向**相同**，因而**加强**了内电场。使得空间电荷区**变宽**。这将进一步阻碍多子的扩散运动，而有利于少子的漂移运动。
- ◆ 由于少子的浓度很低，所以形成的电流（又称为**反向饱和电流 I_s** ）极其微小，小到往往可以忽略不计，即几乎不导通，我们称此时**PN结反向截止**。

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

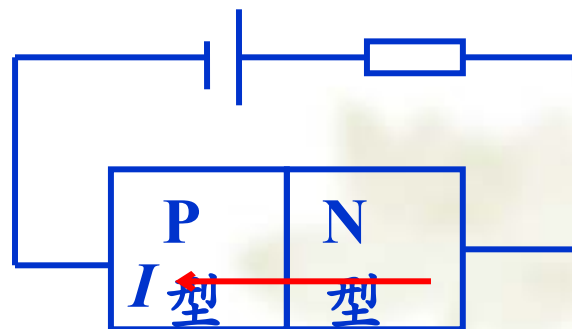


以多子的扩散运动为主

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

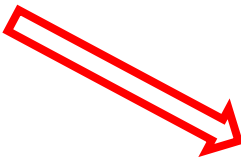
室温下约 26mV

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

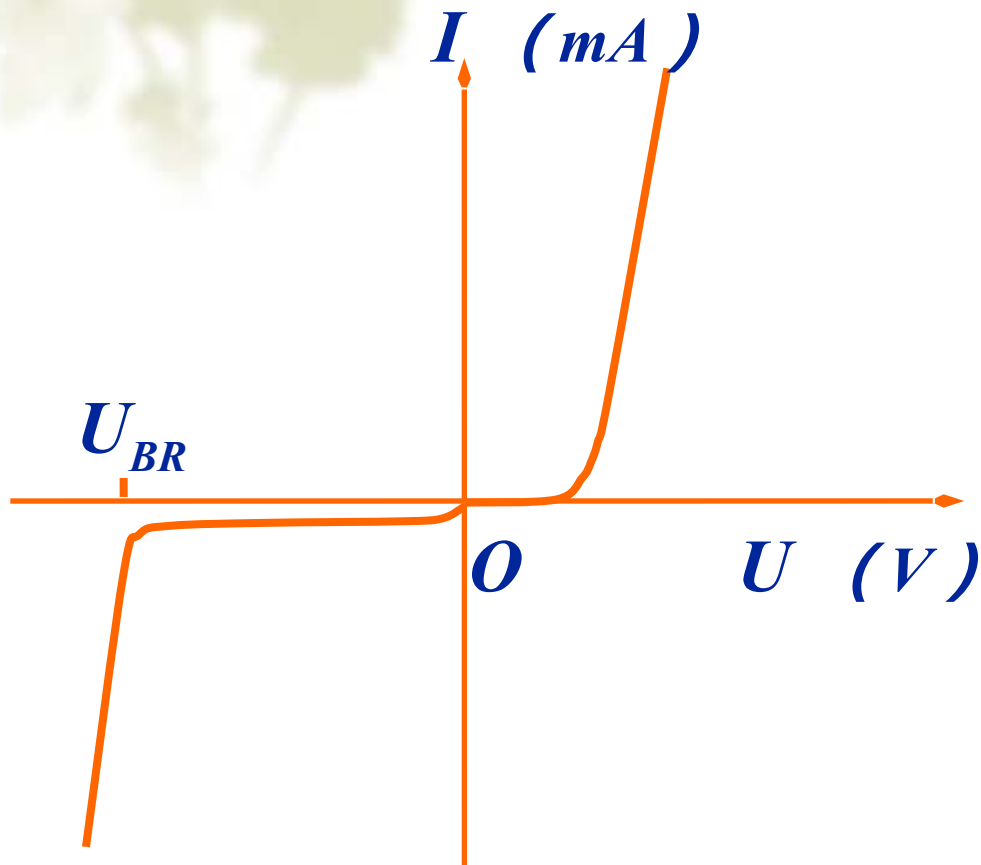


图 4-6 PN 伏安特性

- 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

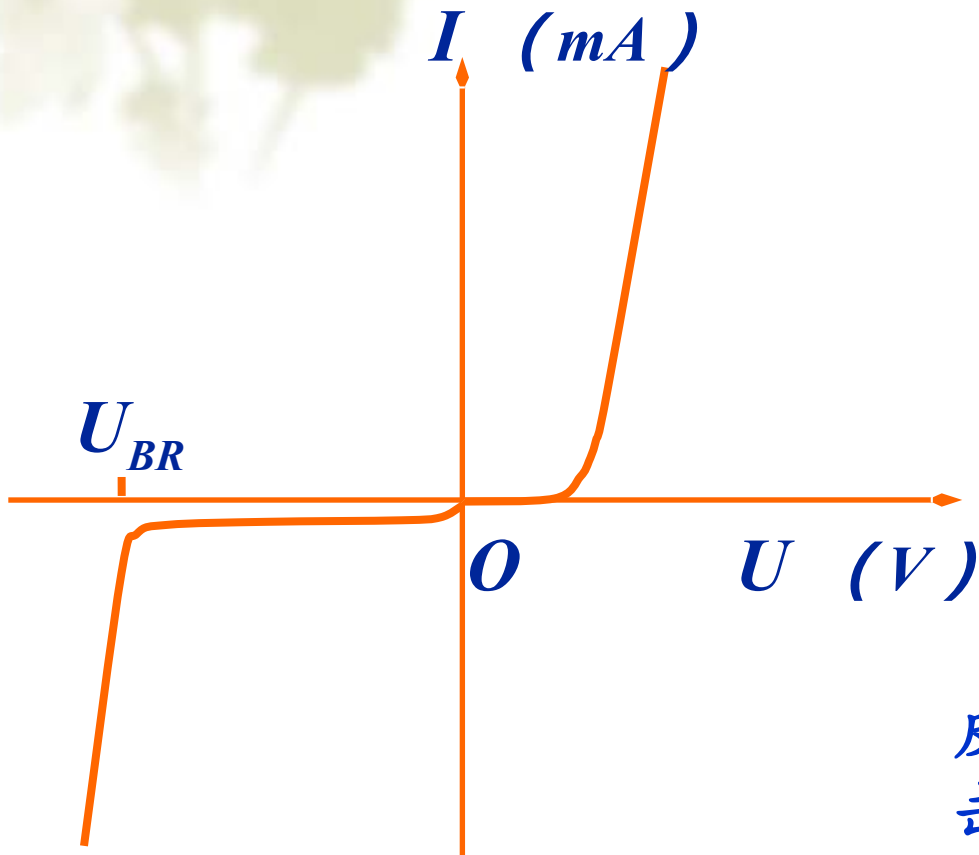


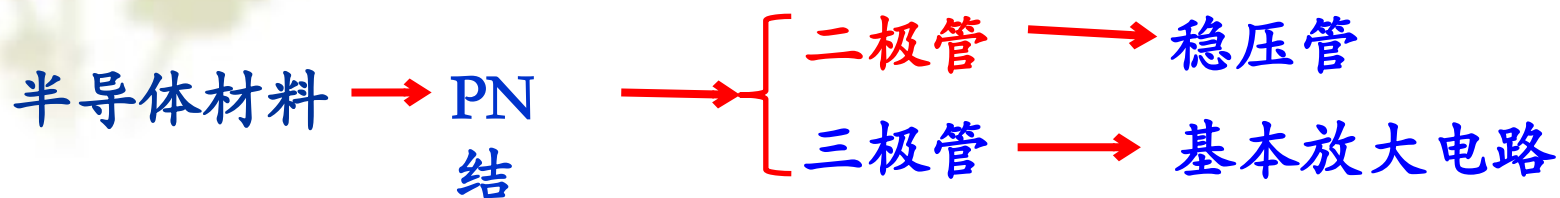
图 4-6 PN 结反向击穿

- 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



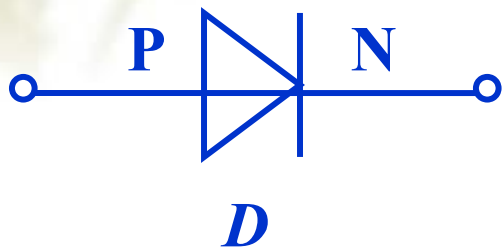
主要内容有：

- ◆ 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

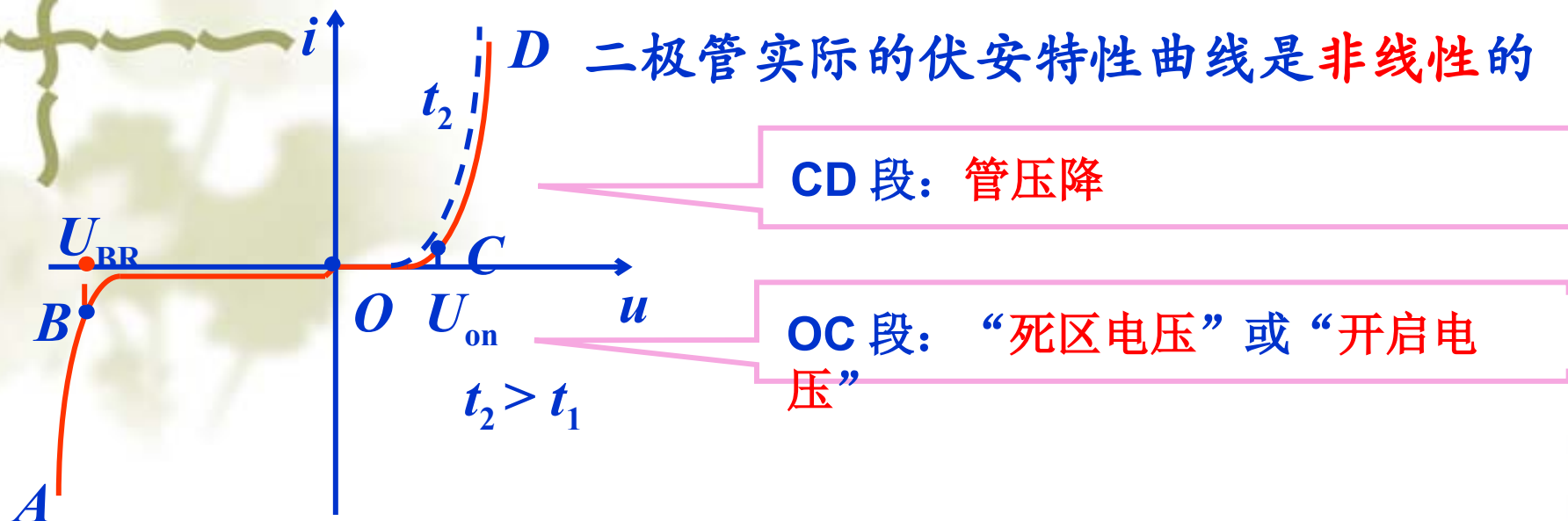
(1) 二极管的结构

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 =

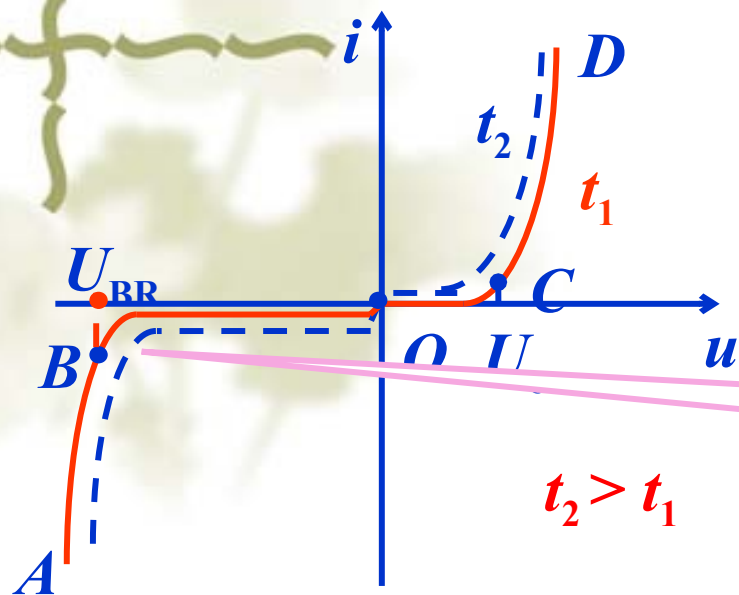
※ 二极管两端的电压

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)



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**

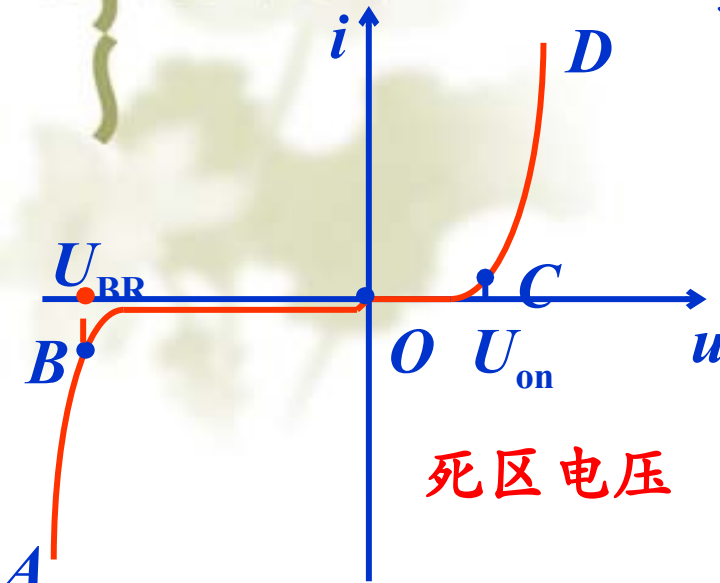
死区电压

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

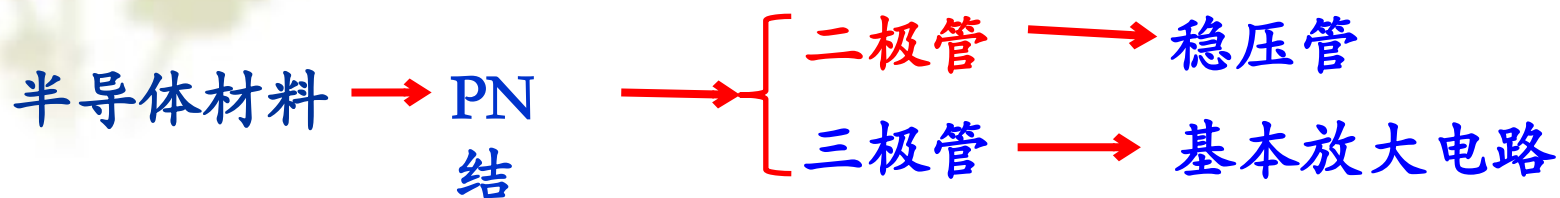
1、最大整流电流 I_F

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



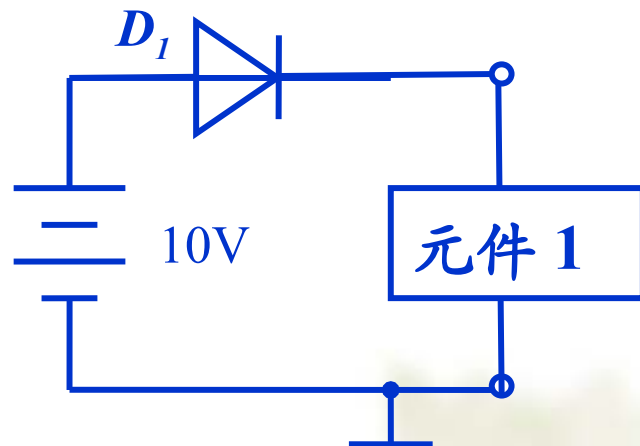
主要内容有：

- ◆ 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

(4) 二极管的等效电路与应用

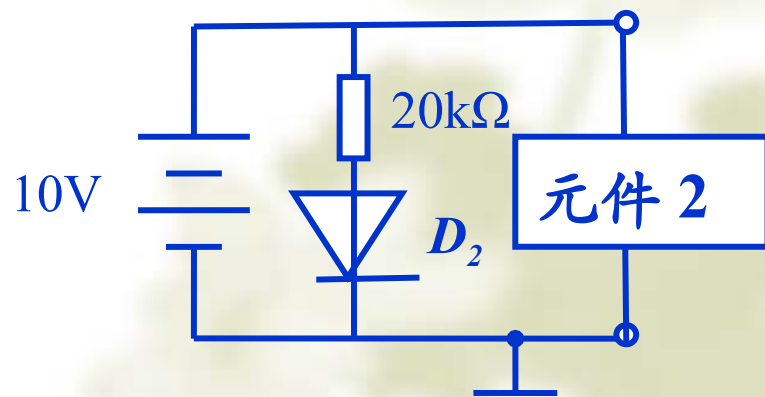
问题：以下二极管有什么用。

1 已知：元件 1 接电源正负极接反向时会烧毁。



问题：以下二极管有什么用。

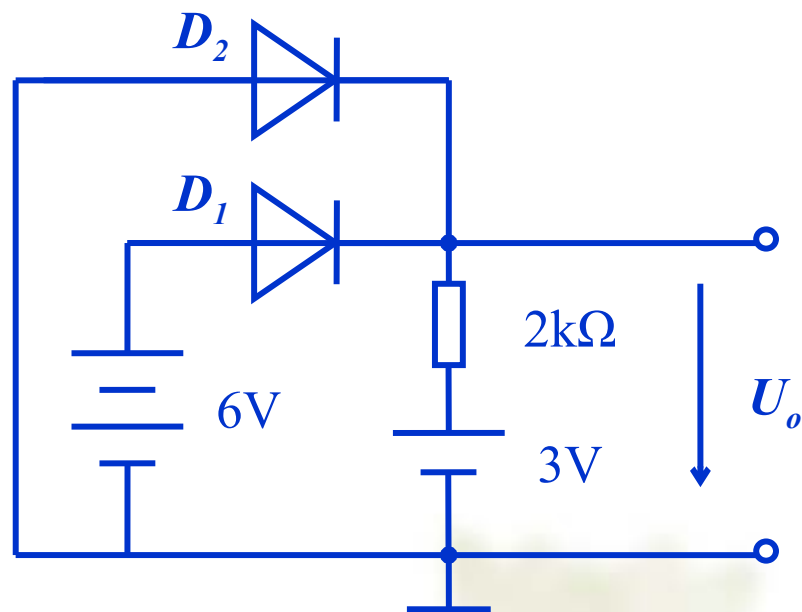
2 已知：D2 是发光二极管，即正向导通时发光，反向时不发光。



(4) 二极管的等效电路与应用

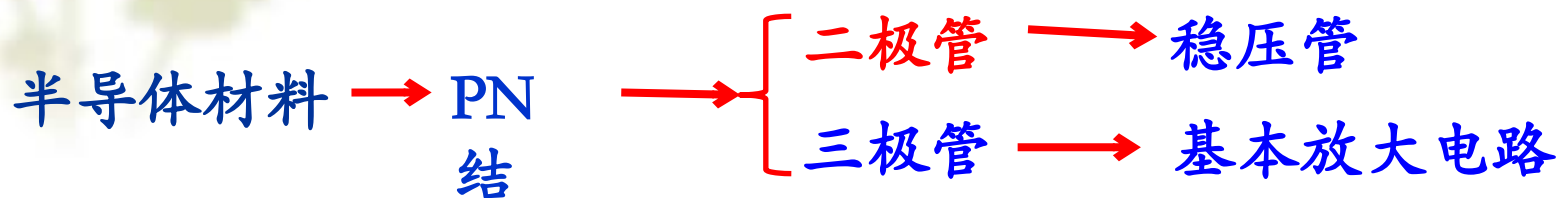
问题：

已知： D_1 、 D_2 为理想二极管，求 $U_o = ?$



二极管特性曲线的非线性，给二极管电路的分析带来一定困难。为了简化分析，常常要做一些**近似处理**，可用线性电路元件来等效二极管，画出二极管的**等效电路**。

半导体二极管和三极管

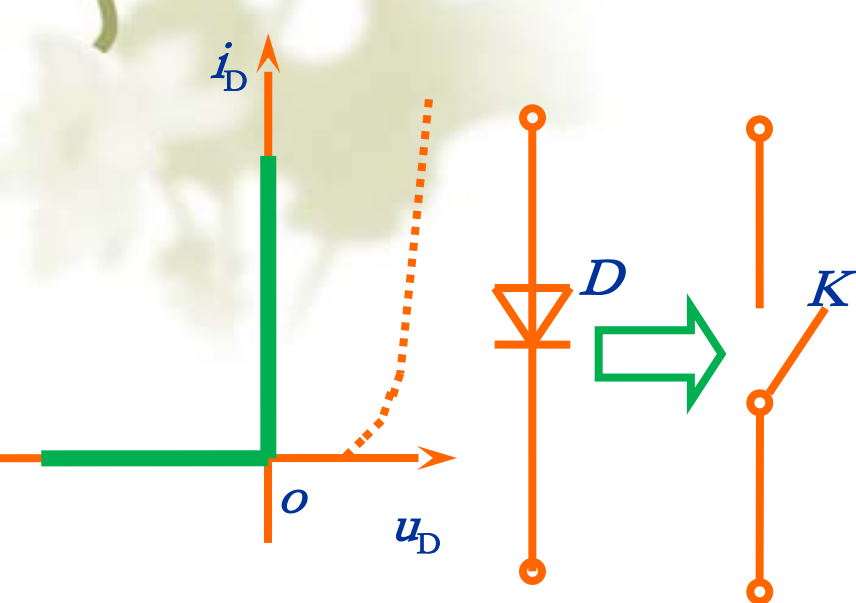


主要内容有：

- ◆ 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

(4) 二极管的等效电路与应用

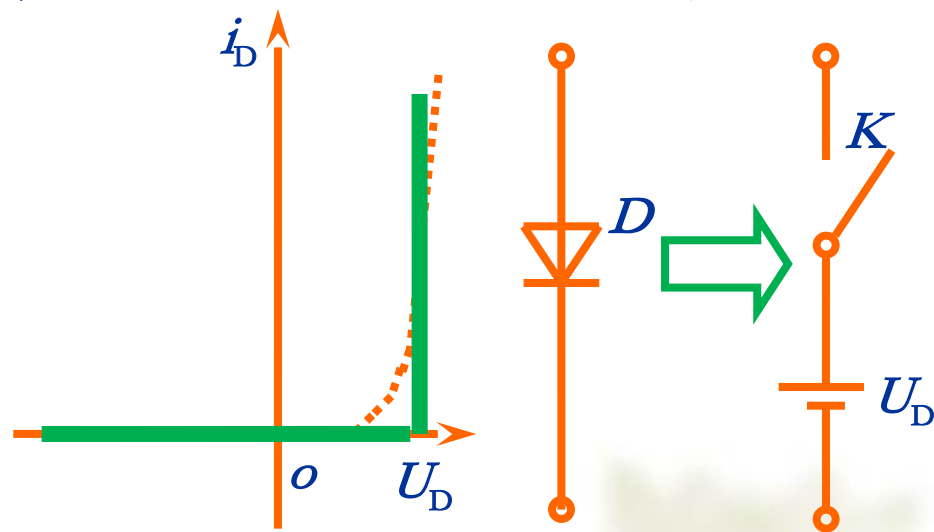
正向伏安特性曲线，非线性，常用的近似方法有两种：



1 理想二极管等效电路

理想二极管的特性是：

- ① 正向偏置， D 导通，相当于导线；
- ② 反向偏置， D 截止，相当于断开；



2 考虑正向压降的等效电

U_D 路 (硅管取 0.7V，锗管取 0.2V) 实际二极管的特性是：

- ① 正向电压大于 U_D 时， D 导通；
否则， D 截止，相当于断开；

4, 二极管的等效电路与应用

问题 1: 已知: D_1 为理想二极管, 求 $U_o = ?$

分析方法: 断开二极管, P 端为正, N 端为负, 判断加在两端电压大小。大于正向压降电压 (稳压管电压) 则导通。

解: 对于 D_1 而言: $V_{a1} = 6V$ $V_{b1} = 3V$

$$\because V_{a1} > V_{b1}$$

$\therefore D_1$ 正向偏置, 导通, 相当于导线

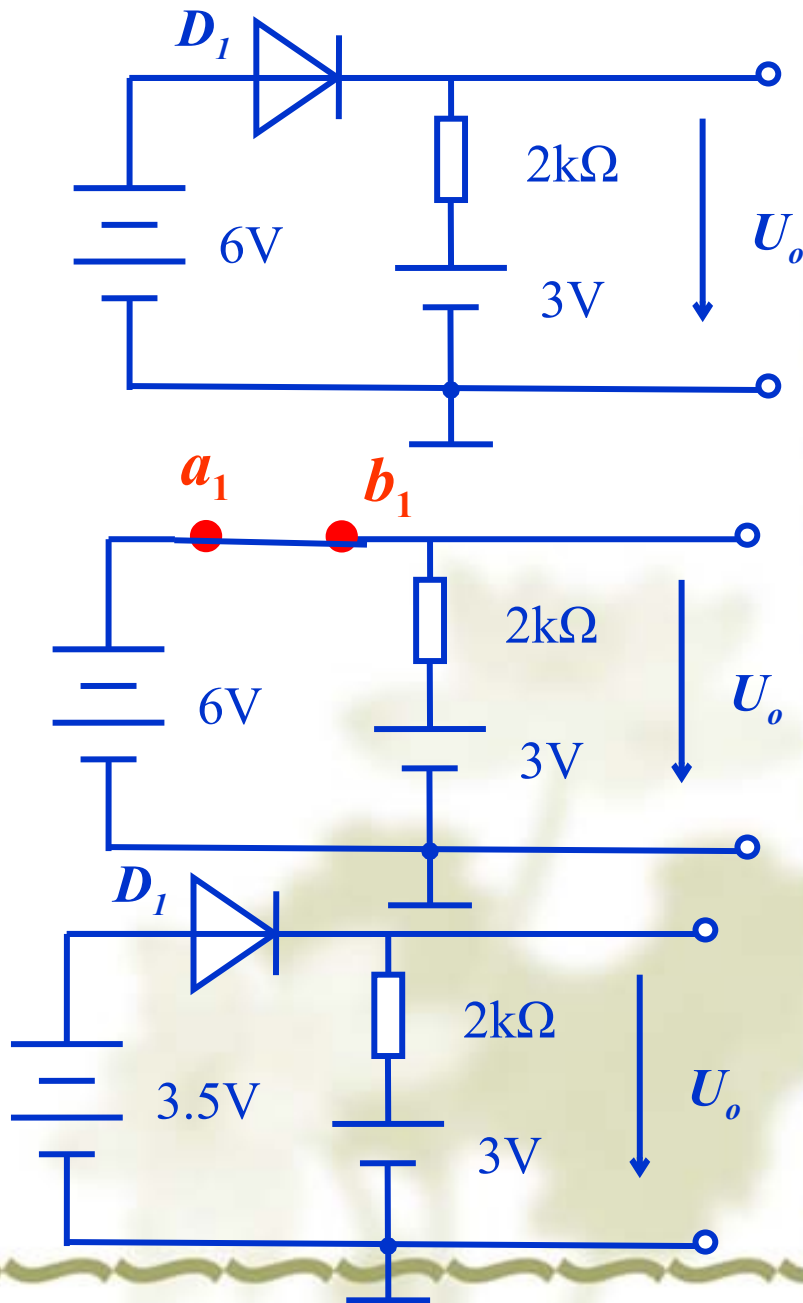
$$\therefore U_o = 6V$$

问题 2: 考虑实际二极管管压降 (0.7V) 时, 求 $U_o = ?$

解: D_1 导通, $U_o =$

$$5.3V$$

问题 3: 如果 6V 电压源改为 3.5V, 仍然考虑管压降, 求 U_o



已知： D_1 、 D_2 为理想二极管，求 $U_o = ?$

分析方法：断开二极管，P 端为正，N 端为负，判断加在两端电压大小。大于正向压降电压（稳压管电压）则导通。

解题关键：判断二极管是否导通？

对于 D_1 而言： $V_{a1} = 6V$ $V_{b1} = 3V$

$\because V_{a1} > V_{b1}$

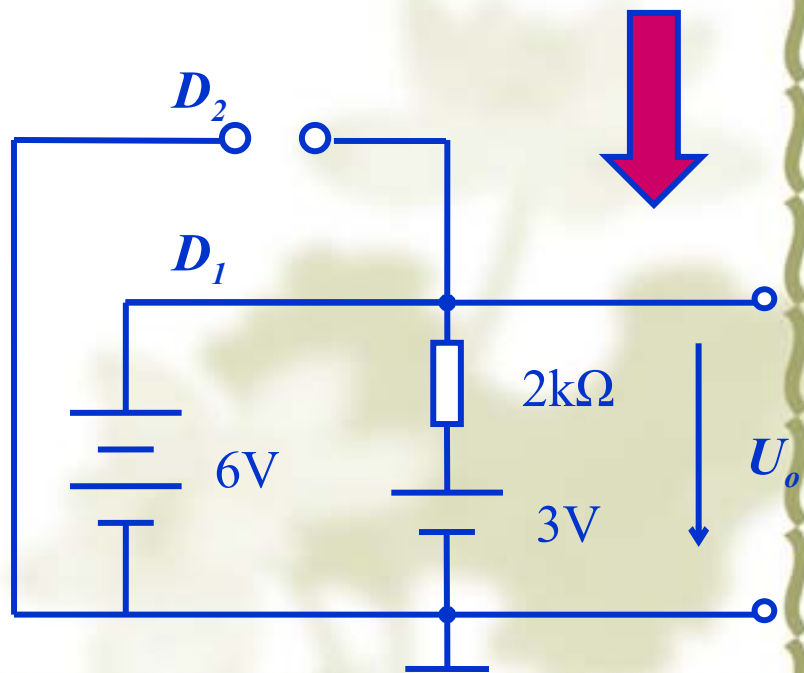
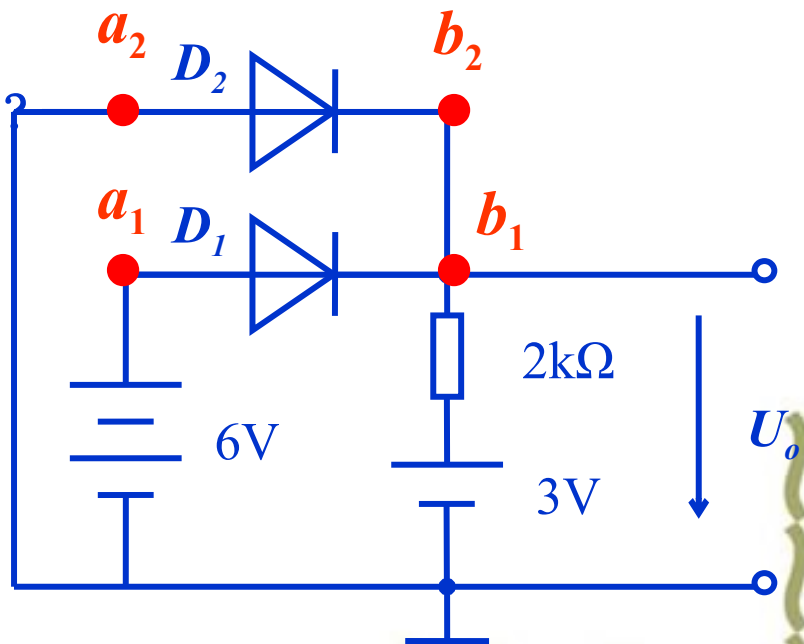
$\therefore D_1$ 正向偏置，**导通**，相当于**导线**

对于 D_2 而言： $V_{a2} = 0V$ $V_{b2} = 3V$

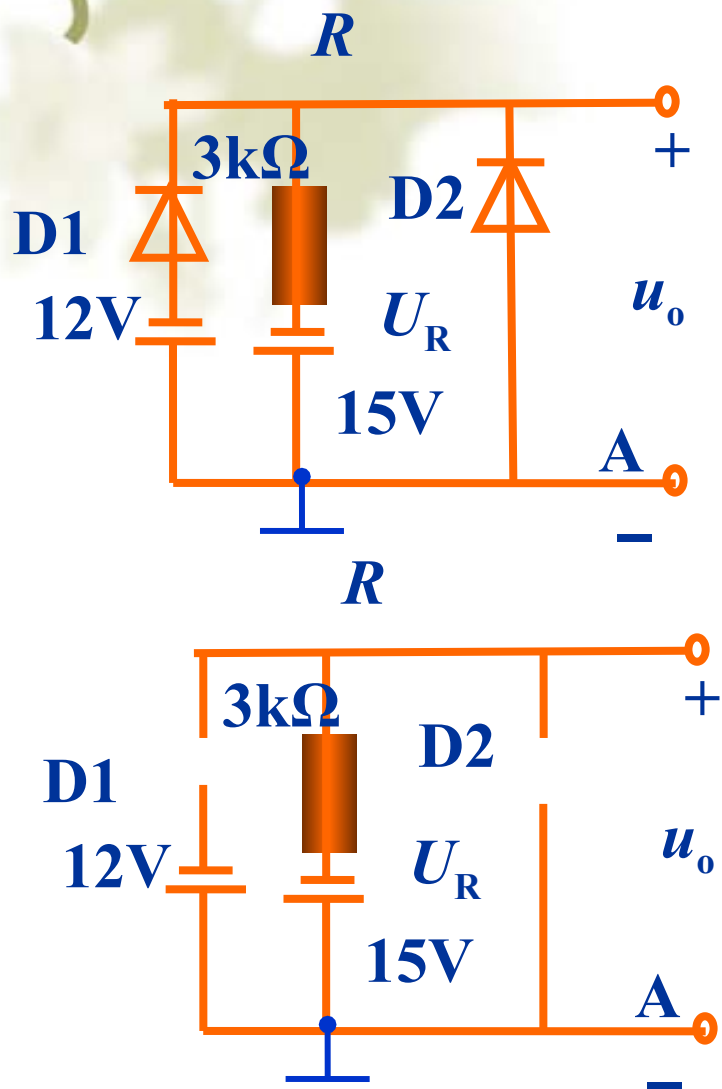
$\because V_{a2} < V_{b2}$

$\therefore D_2$ 反向偏置，**截止**，相当于**断开**

$\therefore U_o = 6V$



例题：二极管正向导通电压都为 $0.7V$ ，求 u_o 。



断开二极管，判断加在两端电压大小。
以 A 点为 0 电位，将二极管看成断路。
D1 两端正向电压差 $-12 - (-15) = 3V$ ，
D2 两端正向电压差 $0 - (-15) = 15V$ 。

都导通，

验证：由 12V 和 D1 导通得 $U_0 = -12.7V$

由 D2 导通得 $U_0 = -0.7V$ ，不一致。

多个二极管时电路分析方法：

电位差大的二极管优先导通，在此基础上再去分析其它二极管。

如 D2 优先导通后，D1 两端正向电压差 $-12 - (-0.7) = -11.3V$ ，D1 截止。
得 $U_0 = -0.7V$

4，二极管的等效电路与应用

二极管电路分析方法：

- 1，判断采用理想模型还是管压降的模型
- 2，断开二极管，P端为正，N端为负，判断加在两端电压大小。大于正向压降电压（稳压管电压）则导通，否则截止。
- 3，如果电路中有多个二极管时，电位差大的二极管优先导通，在此基础上再去分析其它二极管。