



# 第1章 半导体基础和二极管

2学时

# 半导体基础和二极管

## 作业

思考 1-3

习题 1-8、1-9、1-10

# 重点和难点

## 重点

从使用的角度理解普通二极管、稳压二极管工作原理，掌握其外部特性及主要参数。

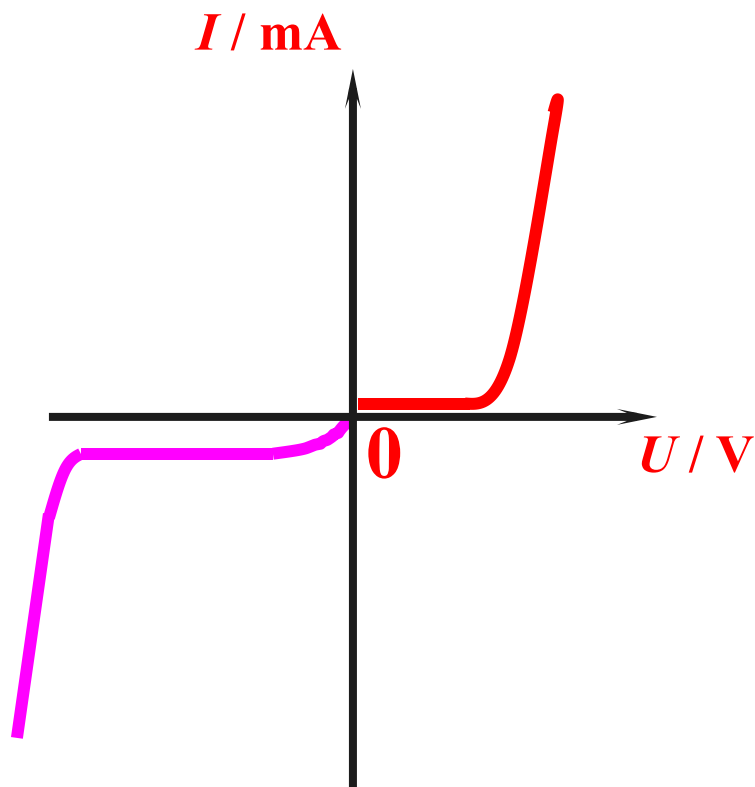
## 难点

半导体中载流子的运动，以及用载流子运动来说明半导体二极管工作原理。

难点不是重点！

# 重点和难点

## 二极管的伏安特性



# 1.1 半导体的基本知识

## 本征半导体

纯净的没有结构缺陷的半导体单晶称为**本征半导体**。

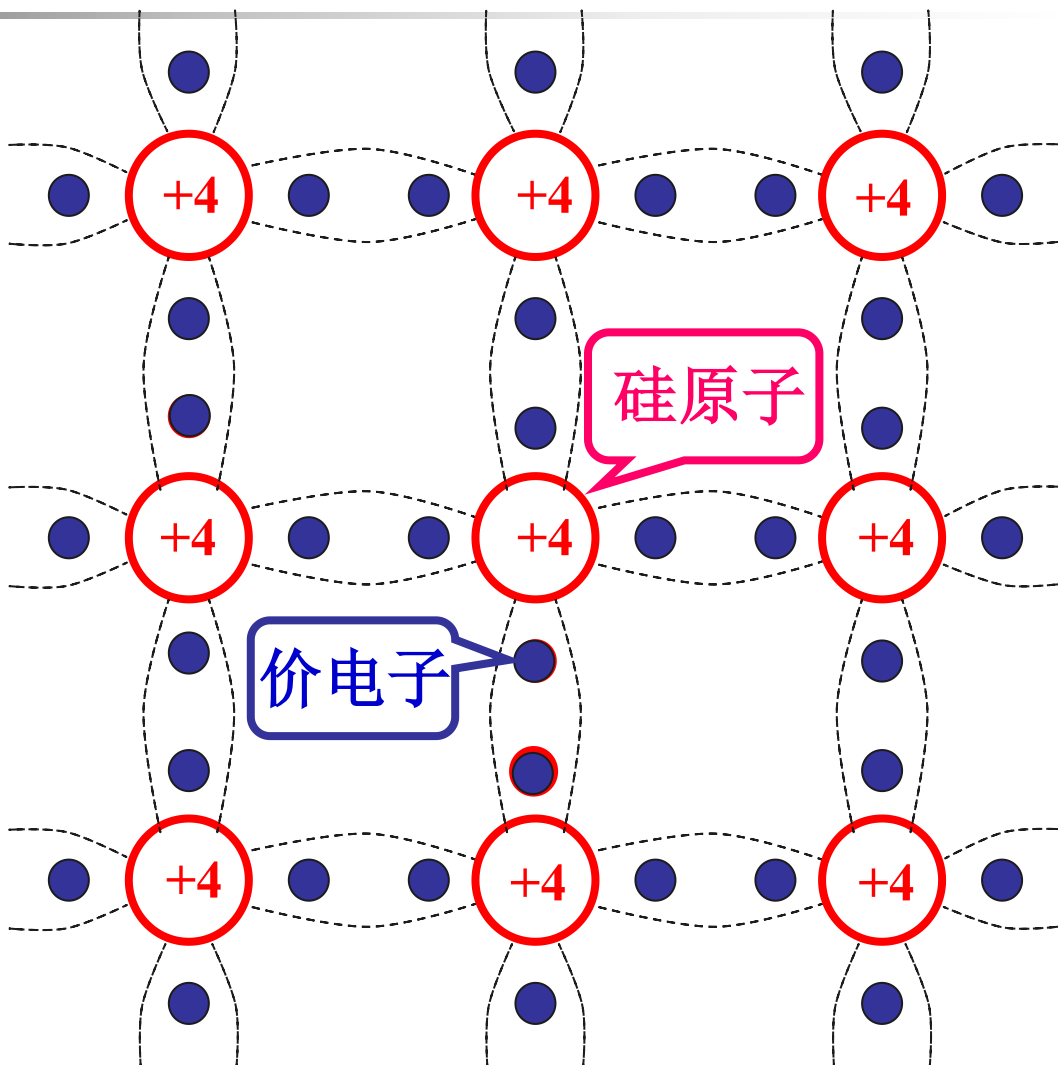
半导体导电能力介于导体和绝缘体之间。

常用半导体材料为**硅 (Si)** 和**锗 (Ge)**，  
它们均为四价元素。

# 本征半导体结构

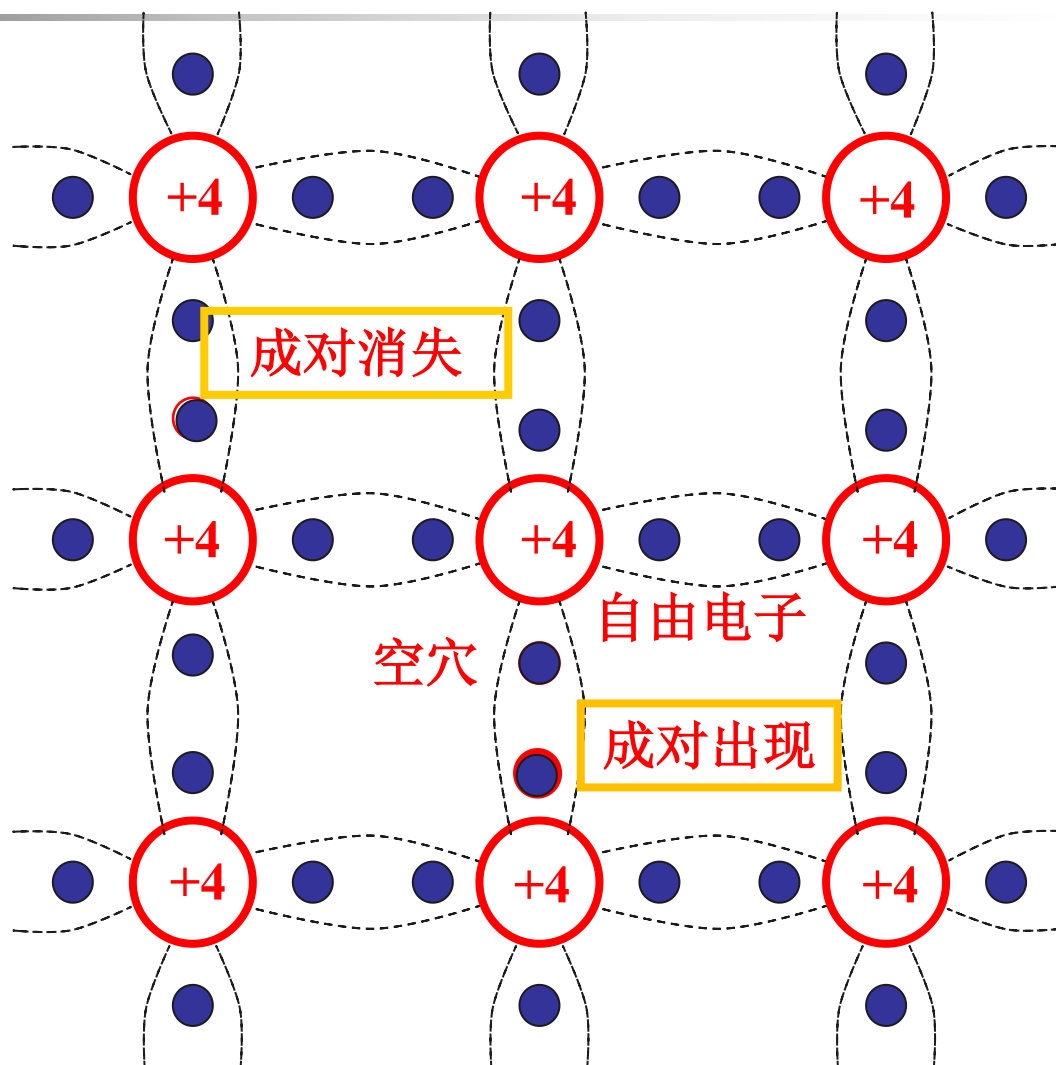
## 硅晶体中的共价键结构

在热力学  
温度零度和没  
有外界激发时,  
本征半导体不  
导电。



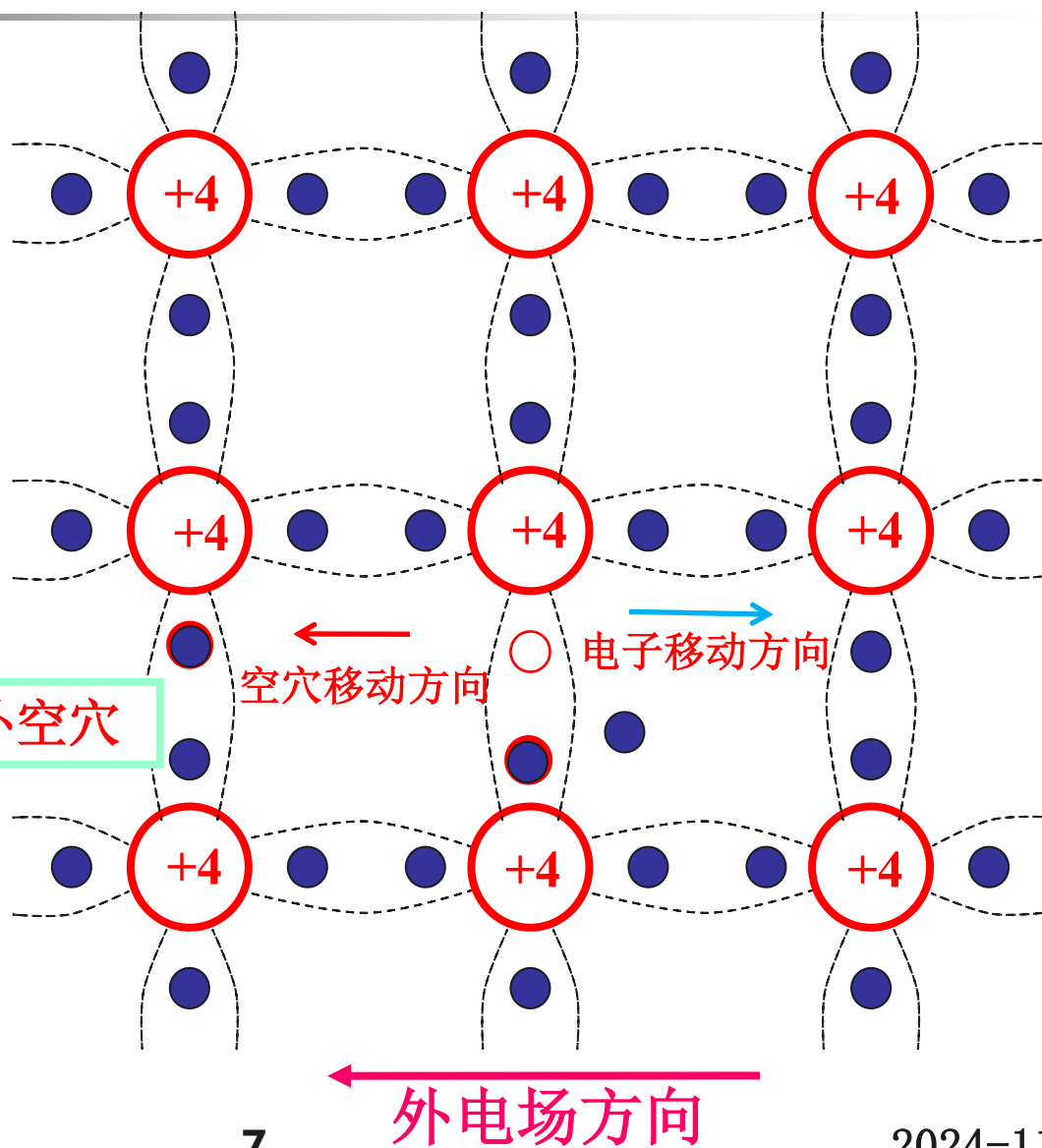
## 本征半导体中的两种载流子

温度一定  
时，空穴浓  
度和自由电  
子浓度一定  
且相等。



外电场作用下，电子和空穴均能参与导电。

价电子填补空穴

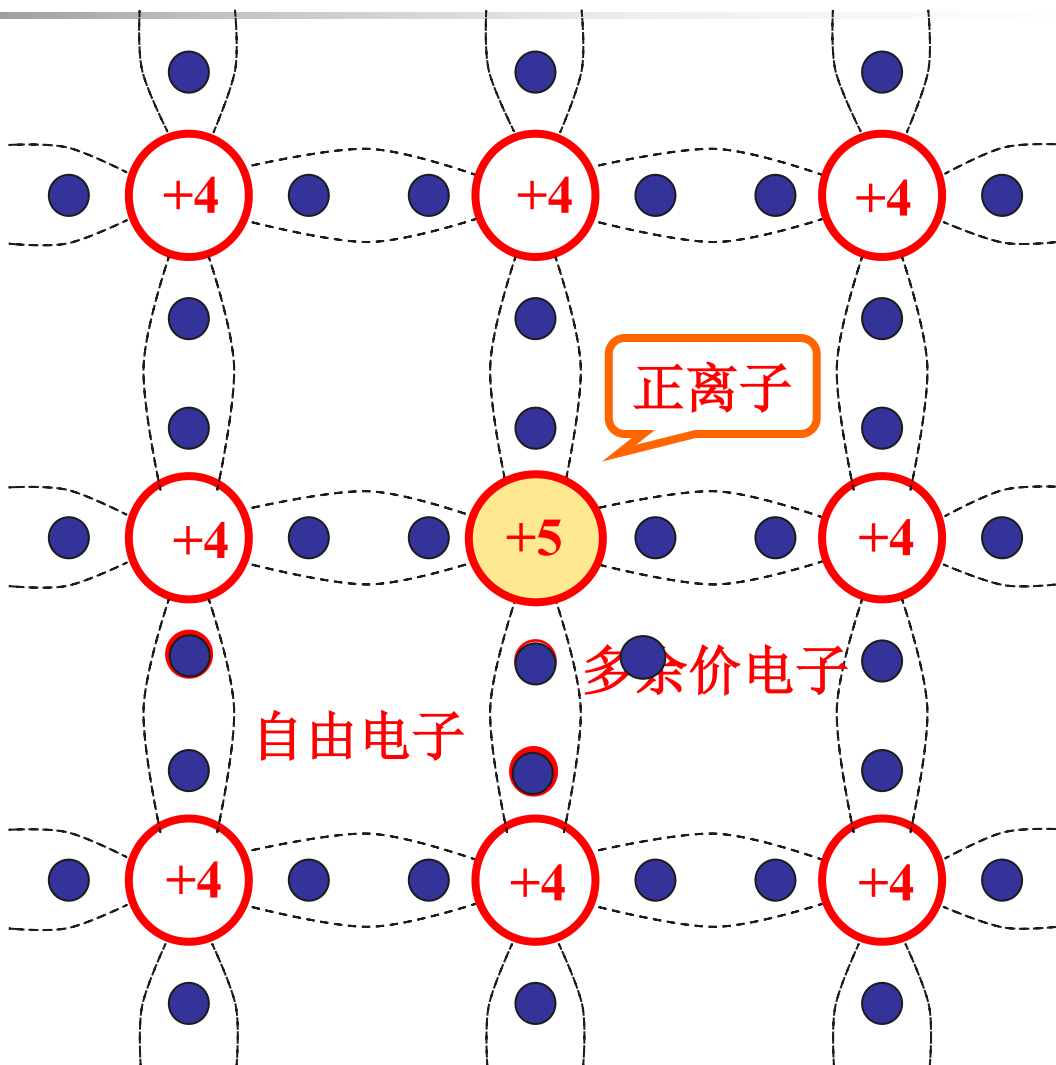




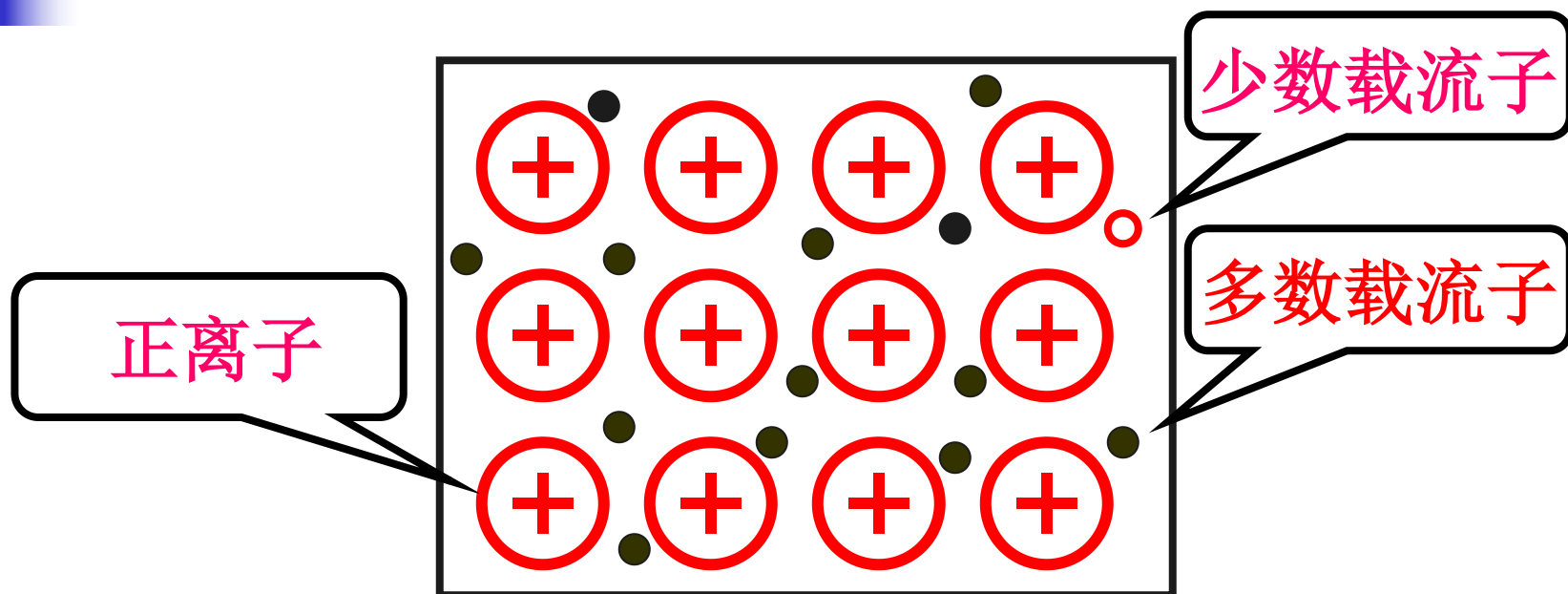
# 杂质半导体

## N型半导体

在四价硅  
或锗的晶体  
中掺入少量  
的**五价**元素,  
如磷,则形成  
**N型**半导体。



## N型半导体结构示意图

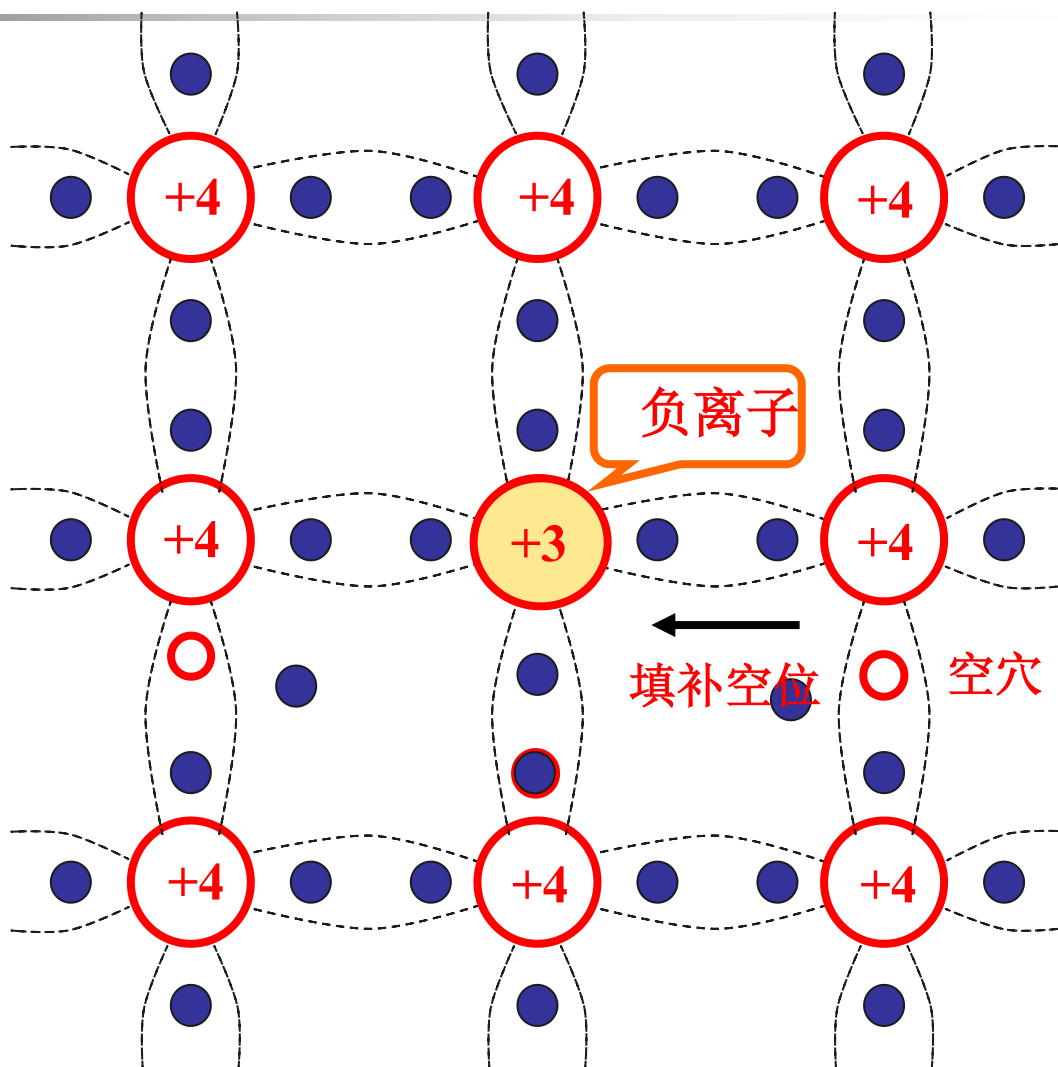


在N型半导体中,电子是多数载流子,空穴是少数载流子。

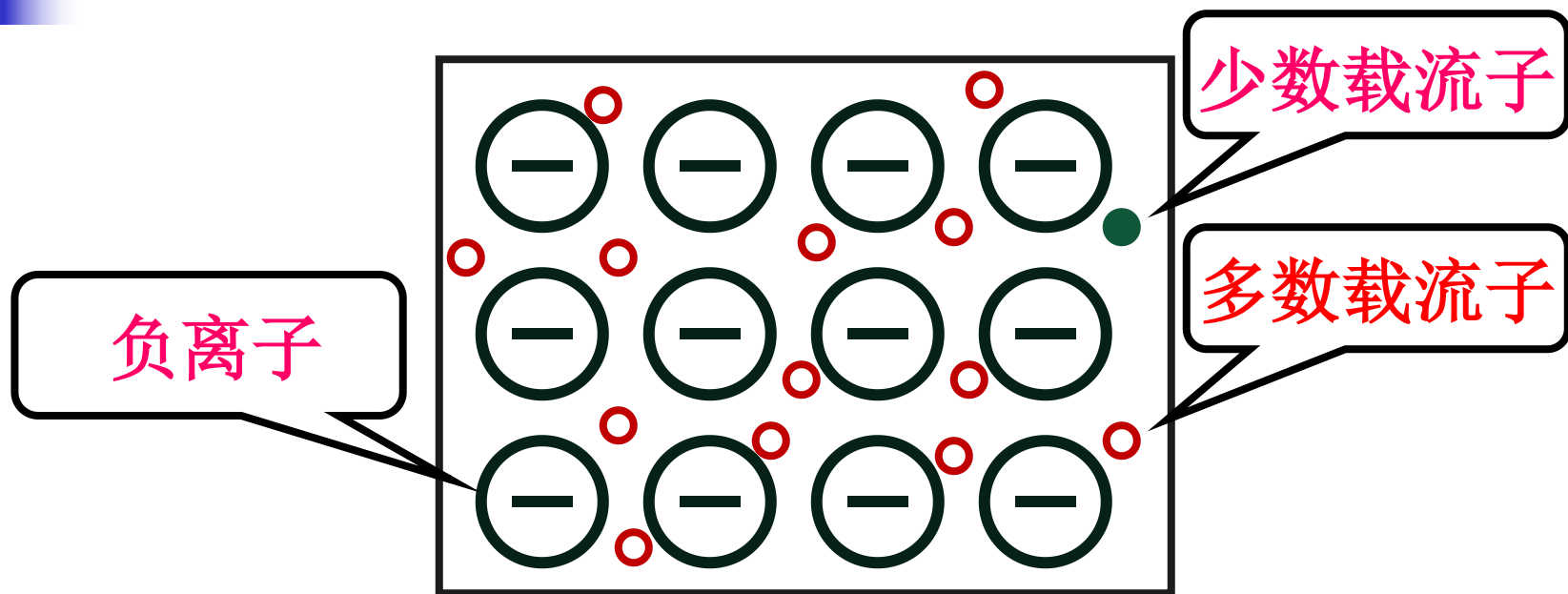
**电中性。**

## P型半导体

在四价硅或锗的晶体中掺入少量的三价元素,如硼,则形成P型半导体。



## P型半导体结构示意图

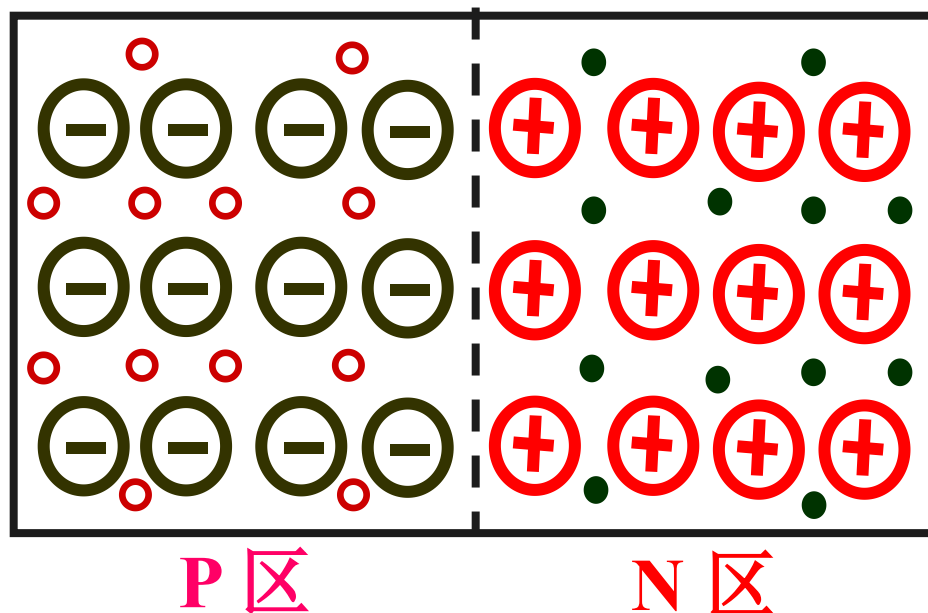


在P型半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子。

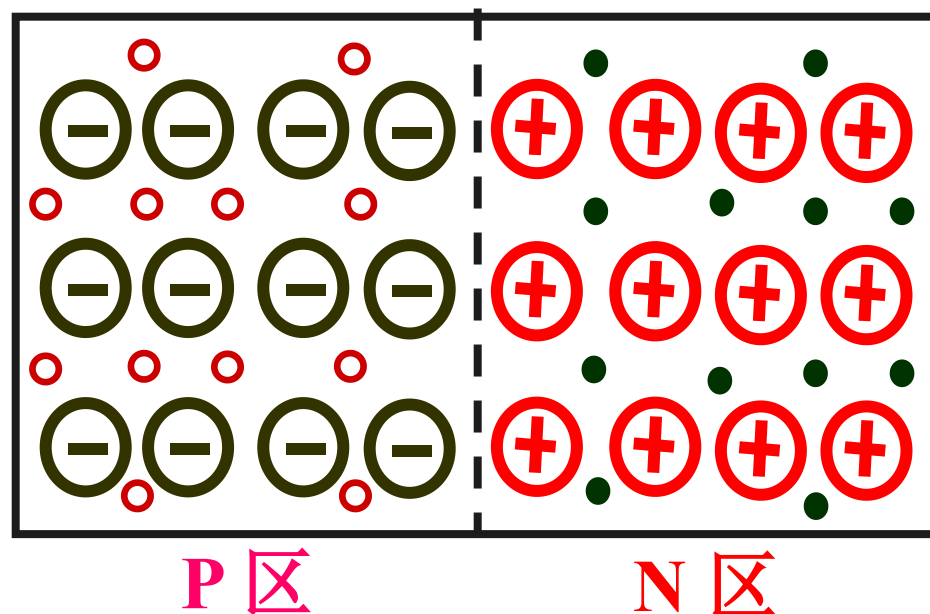
电中性。

# PN结

用专门的制造工艺在同一块半导体单晶上,形成P型半导体区域和N型半导体区域,在这两个区域的交界处就形成了一个PN结。

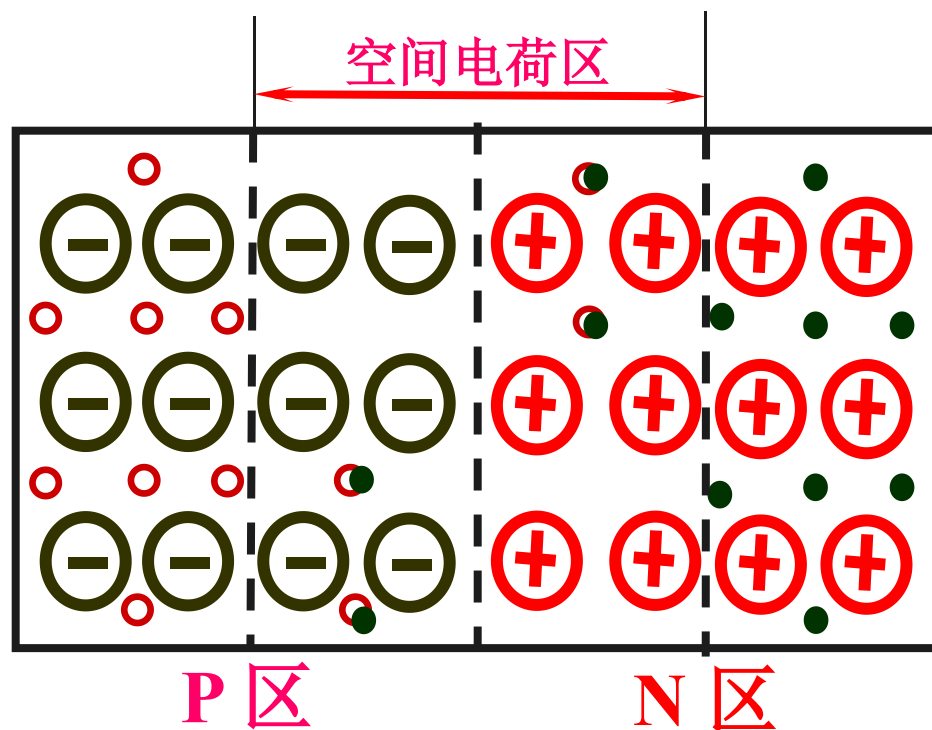


由于载流子的浓度差，P区的空穴向N区扩散，N区的电子向P区扩散。这种由于浓度差引起的运动称为**扩散运动**。



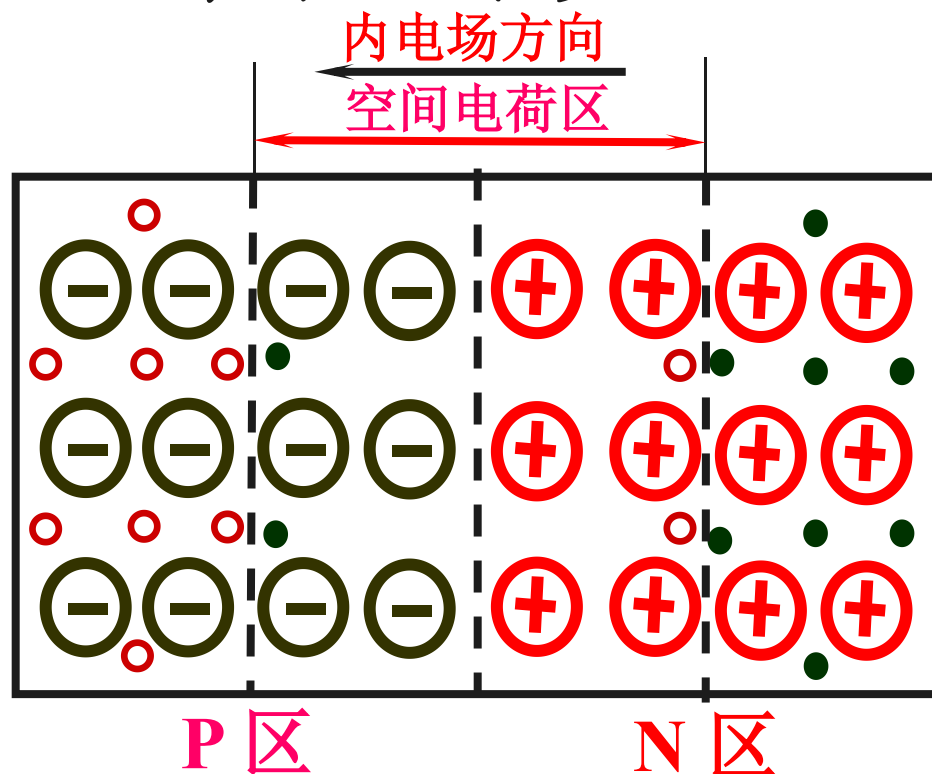
随着扩散运动的进行，N区出现正离子区，P区出现负离子区，这个不能移动的电荷区叫空间电荷区。

因没有载流子，也叫耗尽层、势垒区、阻挡层。



由空间电荷区产生,方向为N区指向P区的内建电场阻碍了扩散运动。

使少数子产生**漂移运动**,即N区的空穴向P区漂移, P区的电子向N区漂移。

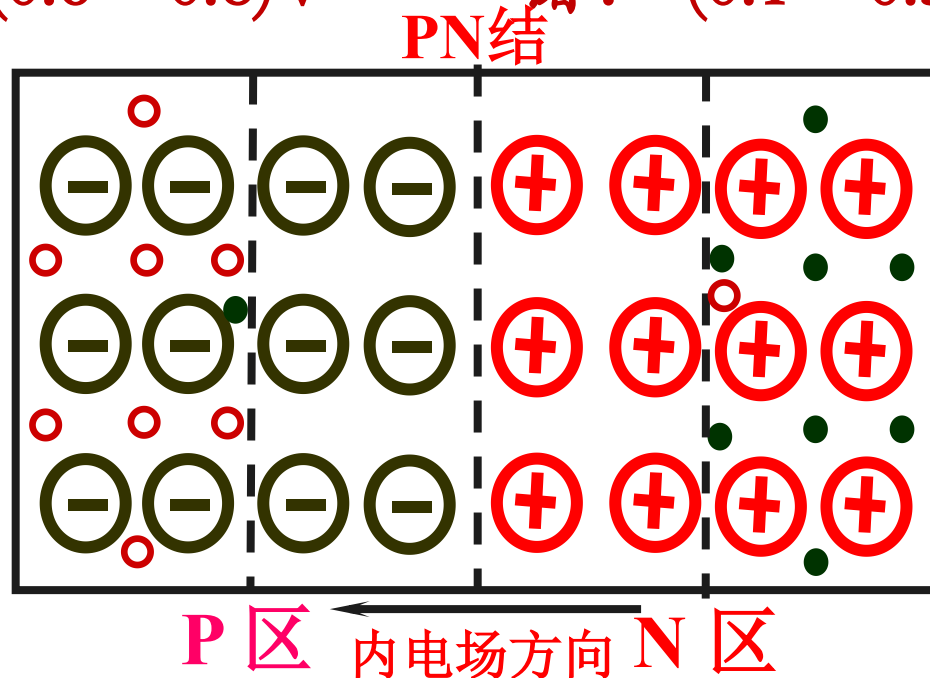




当漂移运动和扩散运动达到动态平衡时，扩散电流等于漂移电流，且方向相反，PN结中电流为零，PN结宽度及电位差 $U_{ho}$ 为恒定值。

在室温条件下，内建电场的电位差：

硅：(0.6~0.8)V      锗：(0.1~0.3)V



## PN结特性

### PN结单向导电性

PN结在不同极性外加电压作用下，其导电能力有极大差异的特性。

正向接法（正偏）：

P区接电源正极，N区接电源负极；

反向接法（反偏）：

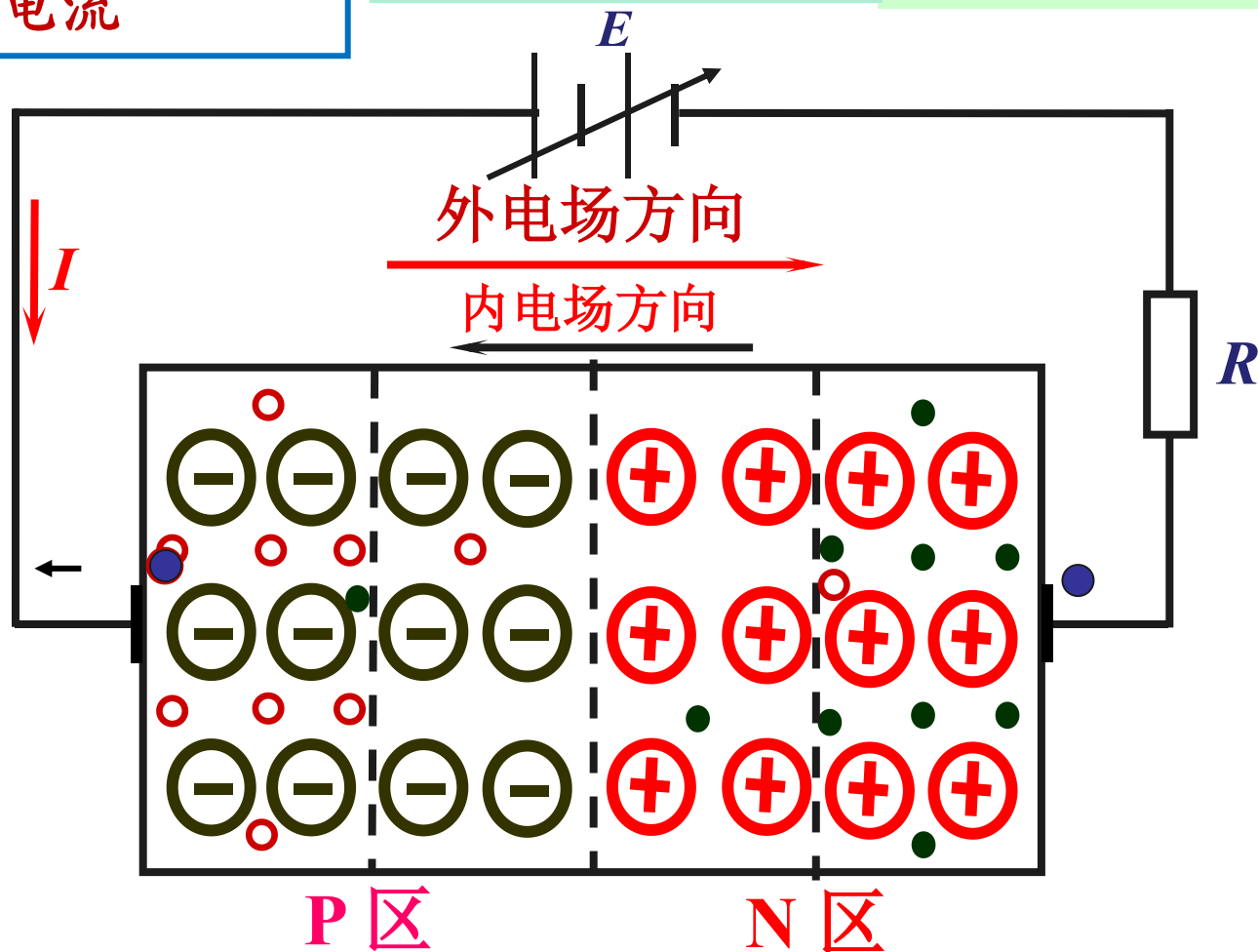
N区接电源正极，P区接电源负极。

外电场和内电场方向相反，空间电荷区变窄，形成较大的正向电流

空间电荷区变窄

外电场驱使P区的空穴进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷

N区电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷

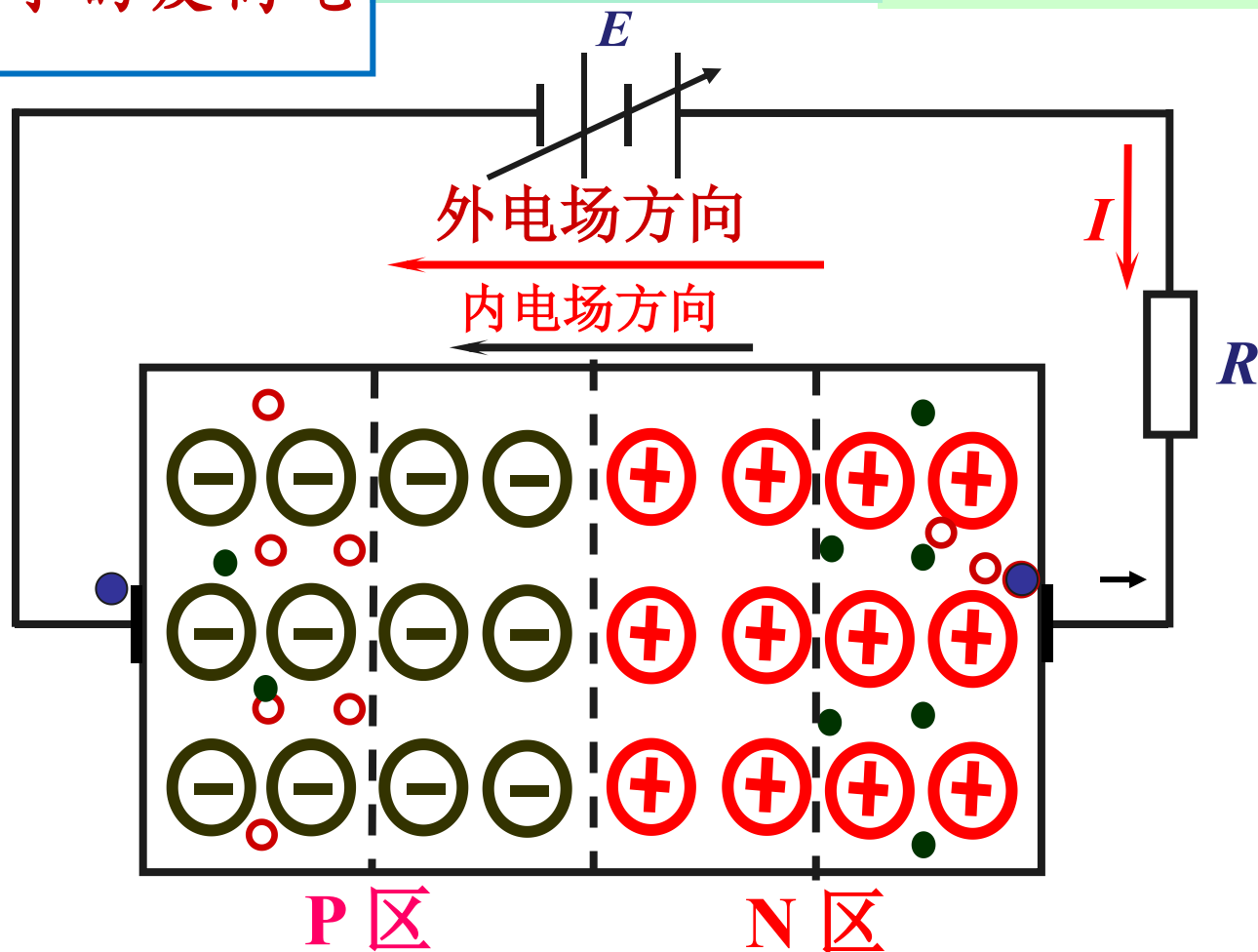


外电场和内电场方向相同，空间电荷区变宽，只有少数载流子越过PN结形成的很小的反向电流。

外电场驱使P区的空穴向电源负极移动，远离空间电荷区

N区电子向电源正极移动，离空间电荷区更远

空间电荷区变宽



## PN结的单向导电性

PN结正偏时的正向电流（是扩散电流）数值较大，容易导电；

PN结反偏时的反向电流（是漂移电流）数值很小，几乎不导电。

# PN结的伏安特性及其表达式

$U_T$ : 温度电压当量

$$I = I_s (e^{U/U_T} - 1)$$

$I_s$  为反向饱和电流

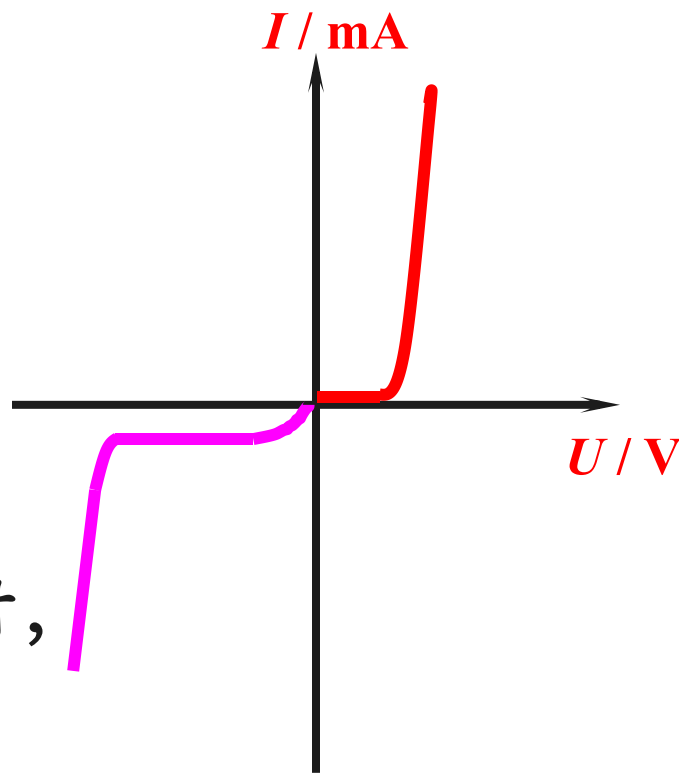
常温时:  $U_T \approx 26\text{mV}$

PN加正向电压, 且  $U \gg U_T$  时,

$$I \approx I_s e^{U/U_T}$$

PN加反向电压, 且  $|U| \gg U_T$  时,

$$I \approx -I_s$$



温度对反向电流的影响大:  $T \uparrow$  少子  $\uparrow \uparrow$   $I_s \uparrow \uparrow$

## PN结的击穿特性

当PN结反向电压超过一定数值 $U_{BR}$ 后，反向电流急剧增加，该现象称为**反向击穿**， $U_{BR}$ 称为**反向击穿电压**。

{ 齐纳击穿  
雪崩击穿

## 齐纳击穿

在参杂浓度高的情况下，不大的反向电压可以在耗尽层产生很强的电场，直接破坏共价键，形成电子-空穴对，导致电流急剧增加。

硅材料一般在4V以下。



## 雪崩击穿

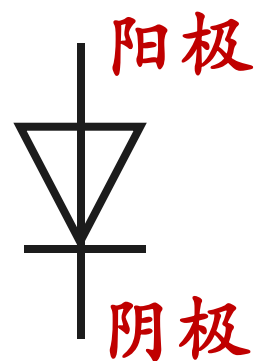
参杂浓度低，当反向电压比较大时，耗尽层中的少子加快漂移速度，撞击共价键，形成电子-空穴对，新的电子和空穴在电场的作用下加速运动，撞出新的价电子。载流子雪崩式倍增，导致电流急剧增加。一般在7V以上。

在4 ~ 7V之间，两者都有，其温度特性较好。

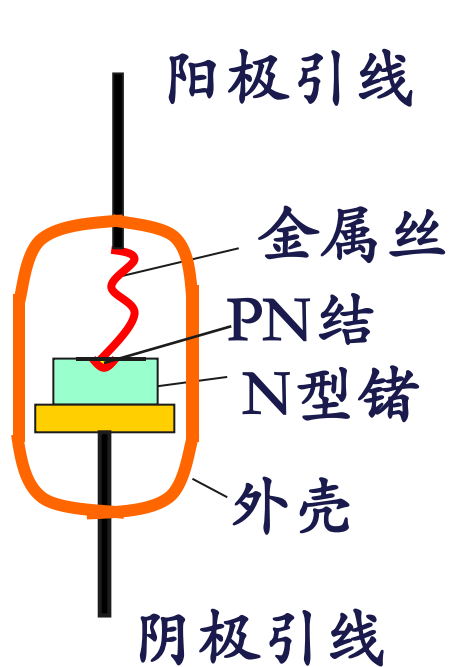
# 1.2 半导体二极管

## 二极管的结构和符号

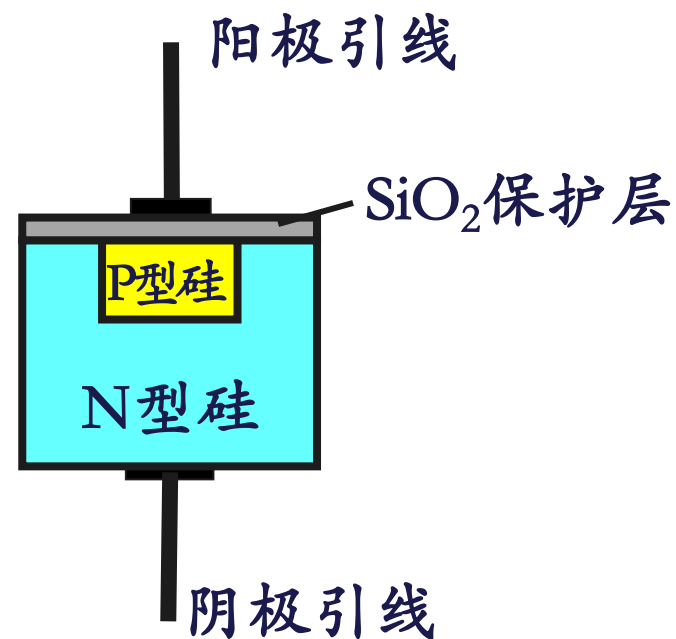
将PN结用外壳封装起来，并加上电极引线就构成了半导体二极管，由P区引出的电极为**阳极**，N区引出的电极为**阴极**。



二极管的符号



点接触型二极管



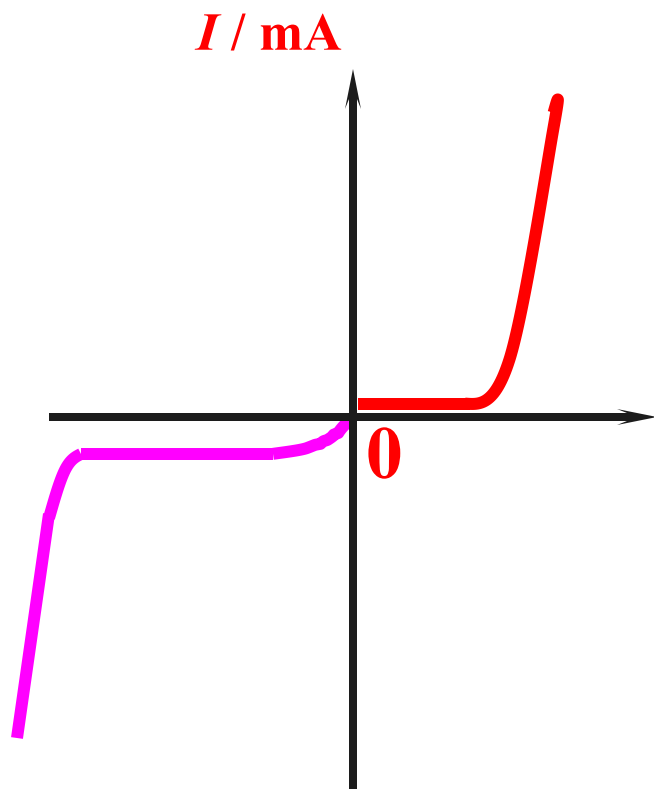
面接触型二极管

## 二极管的伏安特性

二极管和PN结一样具有单向导电性。

和PN结相比，二极管具有半导体体电阻和引线电阻，外加电压相同时，二极管的电流比PN结的电流小。

因存在表面漏电流，二极管的反向电流比PN结大。



在近似分析时，通常用PN结的电流方程描述二极管的伏安特性。

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

## 正向特性

阈值电压  $U_{th}$ :

使二极管开始导通的临界电压。

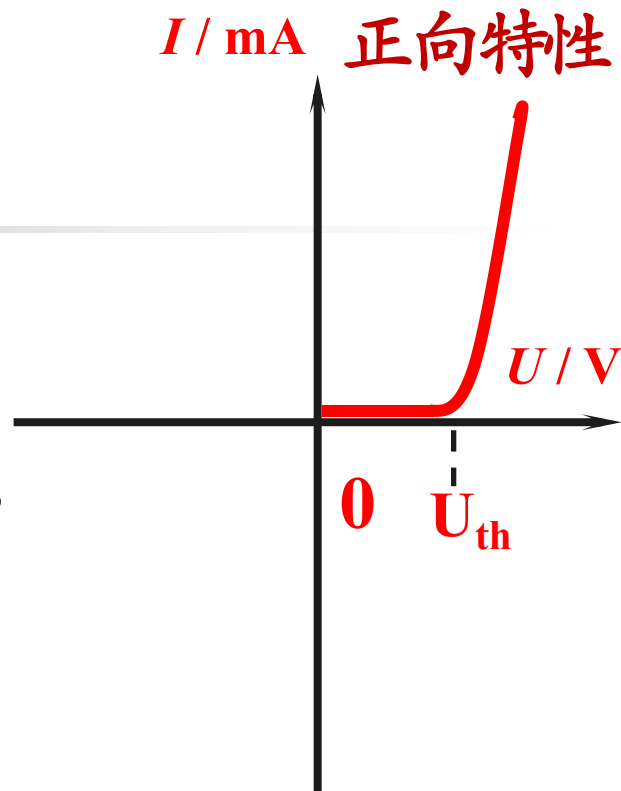
常温时：硅管  $U_{th} \approx 0.5V$

锗管  $U_{th} \approx 0.2V$

正向导通，电流不大时导通电压：

硅  $(0.6 \sim 0.8)V$  (一般取  $0.7V$ )

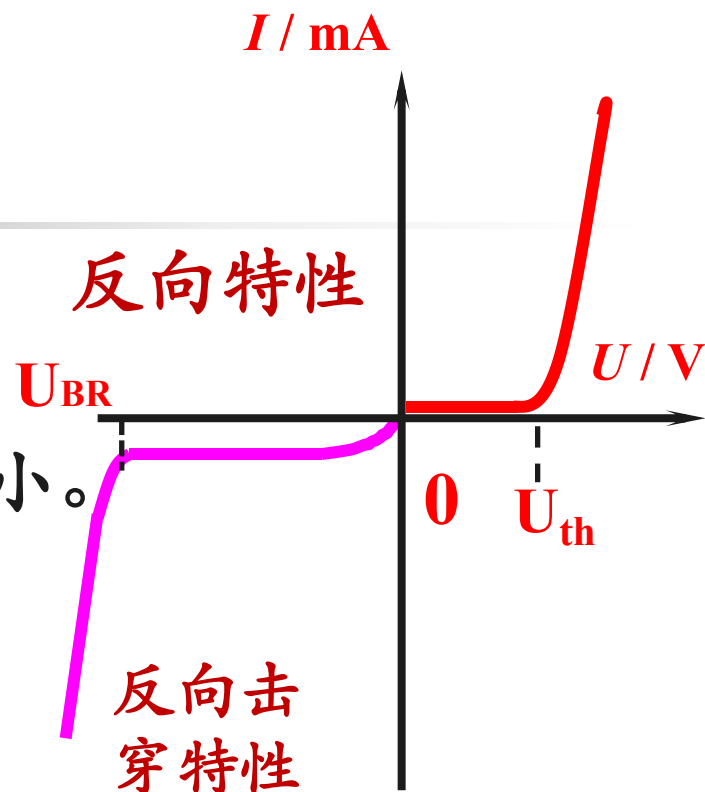
锗  $(0.1 \sim 0.3)V$  (一般取  $0.2V$ )



## 反向特性

加反向电压时，反向电流很小。

(与电压基本无关)



## 击穿特性

当二极管承受的反向电压超过击穿电压  $U_{BR}$  后，反向电流急剧增加。

## 两种不同材料二极管的比较

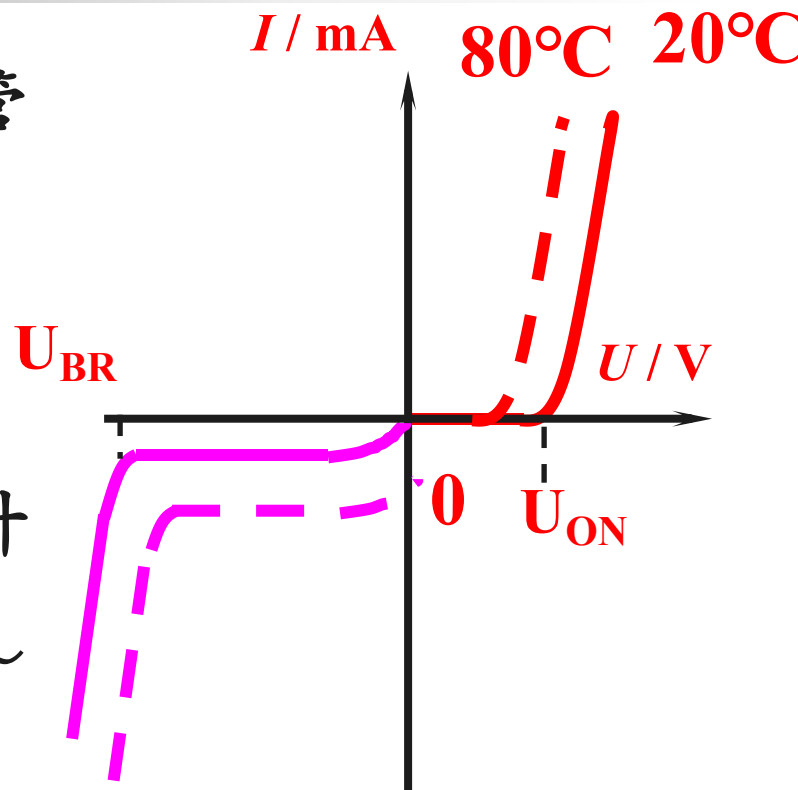
材料	阈值电压 $U_{th}$ (V)	导通电压 (V)	反向饱和电 流( $\mu A$ )
硅	$\approx 0.5$	$0.6 \sim 0.8$	$< 0.1$
锗	$\approx 0.1$	$0.1 \sim 0.3$	几十



## 温度对二极管的影响

环境温度升高，二极管的正向特性曲线将左移，反向特性曲线下移。

在室温附近，温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，正向压降减小 $2\sim 2.5\text{mV}$ ；温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ，反向电流增加约1倍。



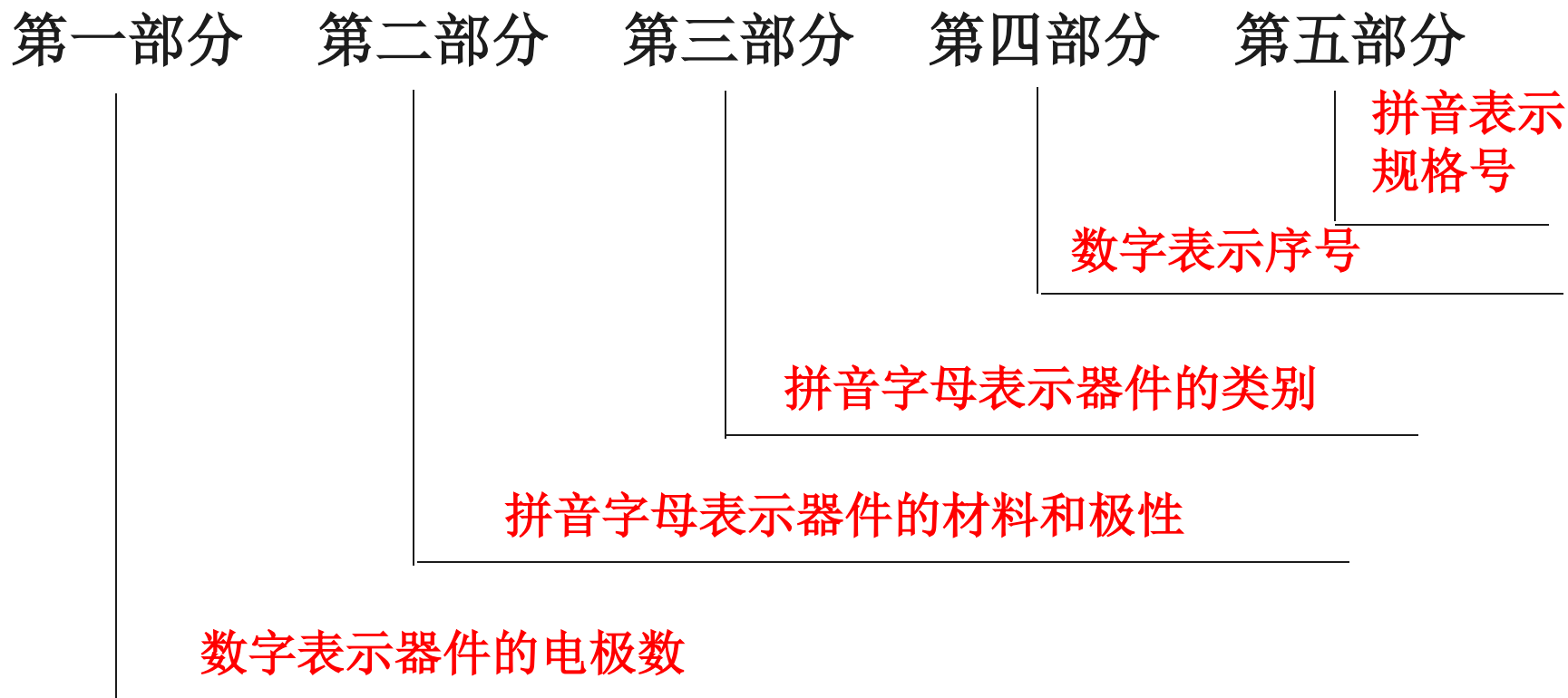
## 二极管主要参数

- **最大整流电流  $I_F$** : 二极管长期运行允许通过的最大正向平均电流。
- **最高反向工作峰值电压  $U_R$** : 二极管工作时允许外加的最大反向电压。通常为击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半。
- **反向电流  $I_R$** : 二极管未击穿时的反向电流, 值越小, 二极管的单向导电性越好。
- **最高工作频率  $f_M$** : 上限工作频率。超过此值 (由于结电容的作用) 二极管的单向导电性将受到影响。

二极管的应用范围很广,它可用于整流、检波、限幅、元件保护以及在数字电路中作为开关元件等。

# 半导体二极管的型号及选择

## 一、国产半导体器件型号命名方法



2CP10: N型硅材料 小信号 二极管。

## 二极管选用原则

要求导通后正向压降小的选锗管；

要求反向电流小选硅管；

工作电流大时选面接触型；

工作频率高时选点接触型；

反向击穿电压高时选硅管；

要求耐高温时选硅管。

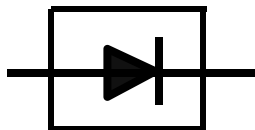
## 二极管的等效电路

二极管具有非线性的伏安特性，为便于分析，在一定条件下，对其进行线性化处理，建立二极管的“线性模型”。

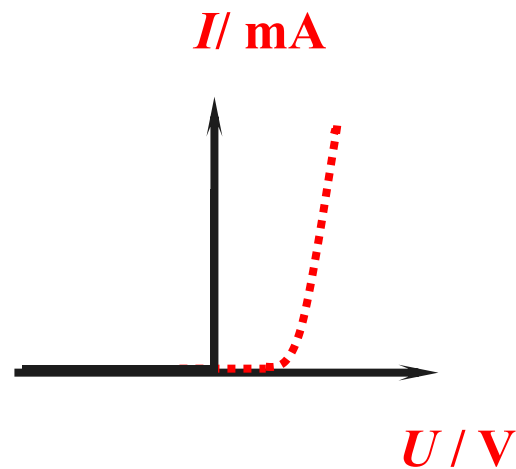
根据二极管的不同工作状态及分析精度的要求，可选择不同的模型。

# 理想二极管等效模型

模型：

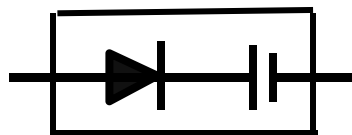


正偏时压降为零；  
反偏时电流为零。



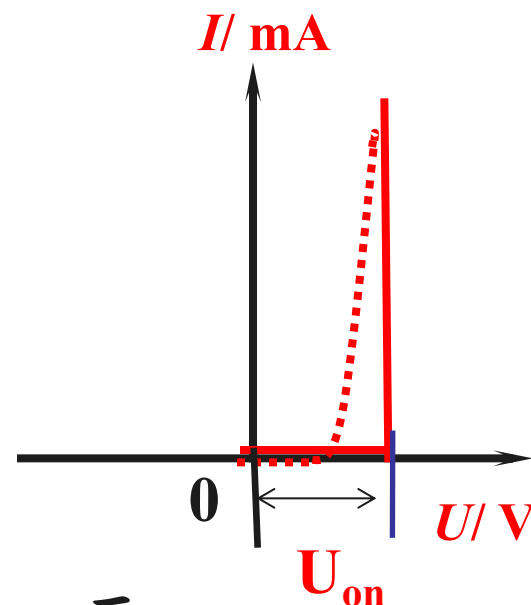
## 理想二极管恒压源模型

模型：



$U_{on}$ 是二极管的导通电压

只有正偏电压超过导通电压，二极管才导通，其两端电压为常数；否则二极管不导通，电流为零。





## 微变信号模型

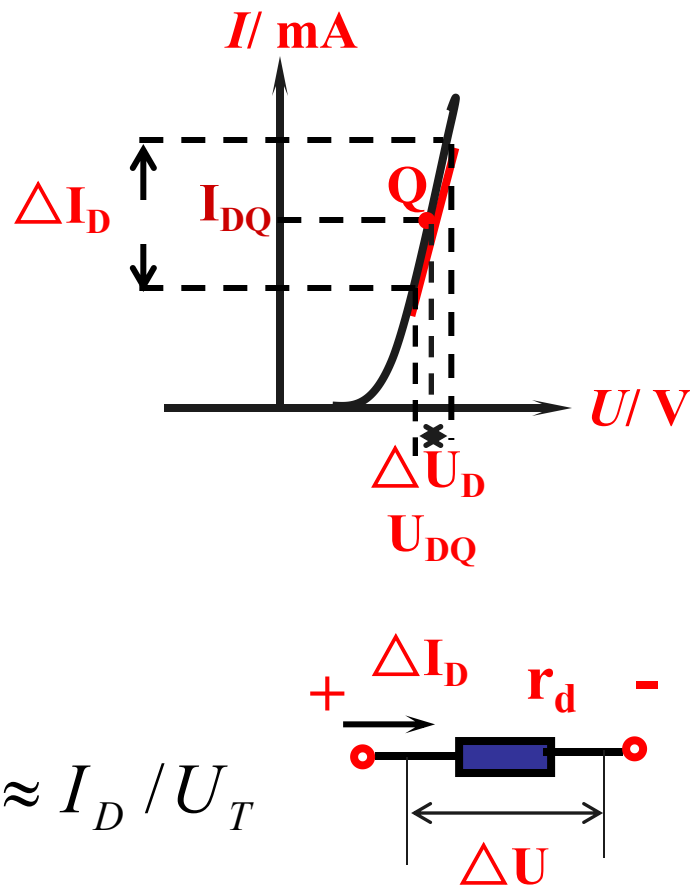
在直流信号上，再叠加微小变化的交流信号，可以用伏安特性在Q处的切线近似表示实际的这段曲线。

此切线斜率的倒数为二极管在Q处的动态等效电阻。

$$r_d = \Delta U / \Delta I$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\Delta I}{\Delta U} \approx \frac{dI}{dU} = d[I_s e^{U/U_T} - 1] / dU \approx I_D / U_T$$

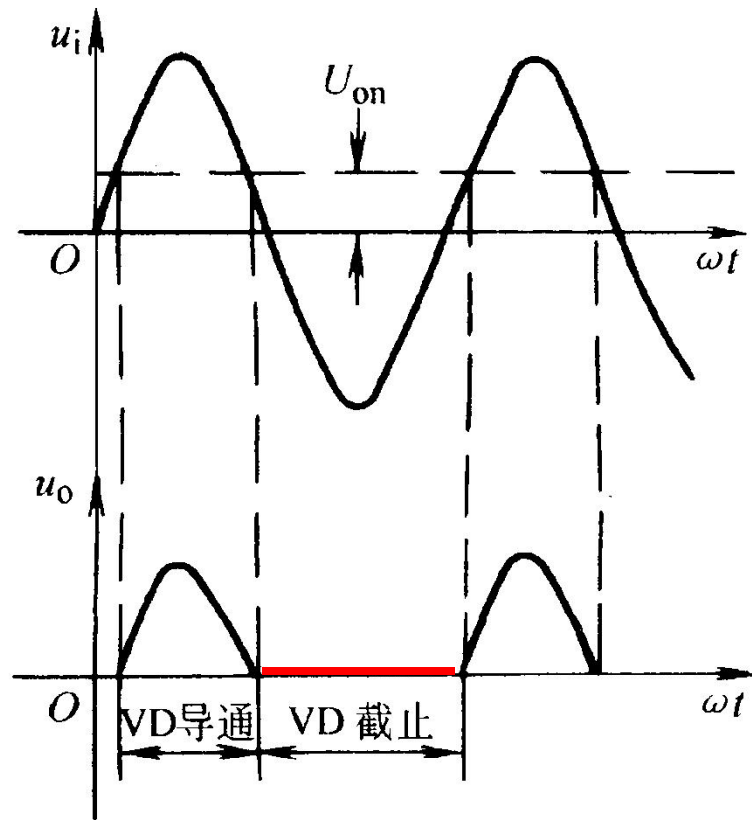
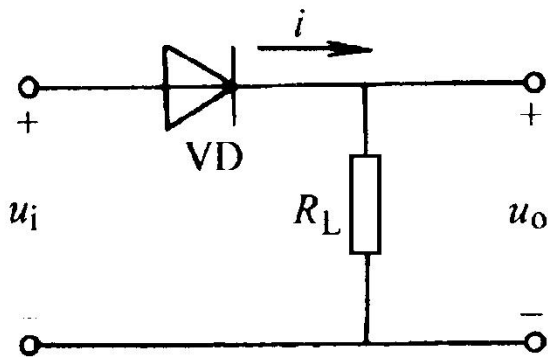
$$r_d \approx U_T / I_D = 26\text{mV} / I_D \text{ (动态电阻与直流工作点位置有关)}$$



# 半导体二极管应用举例

## 1. 串联限幅电路

二极管与  
负载电阻  
串联



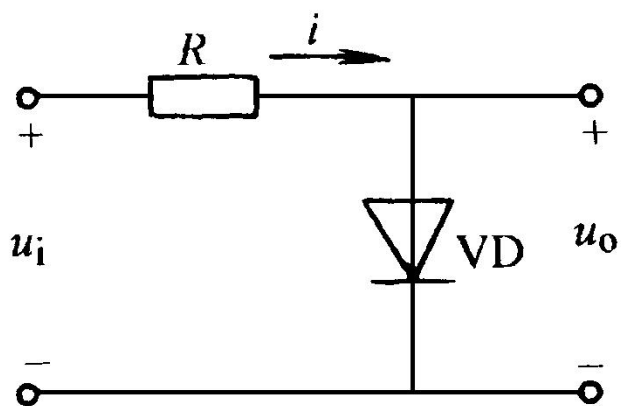
$u_i$  正半周且数值大于导通电压,

管导通,  $u_o = u_i - U_{on}$

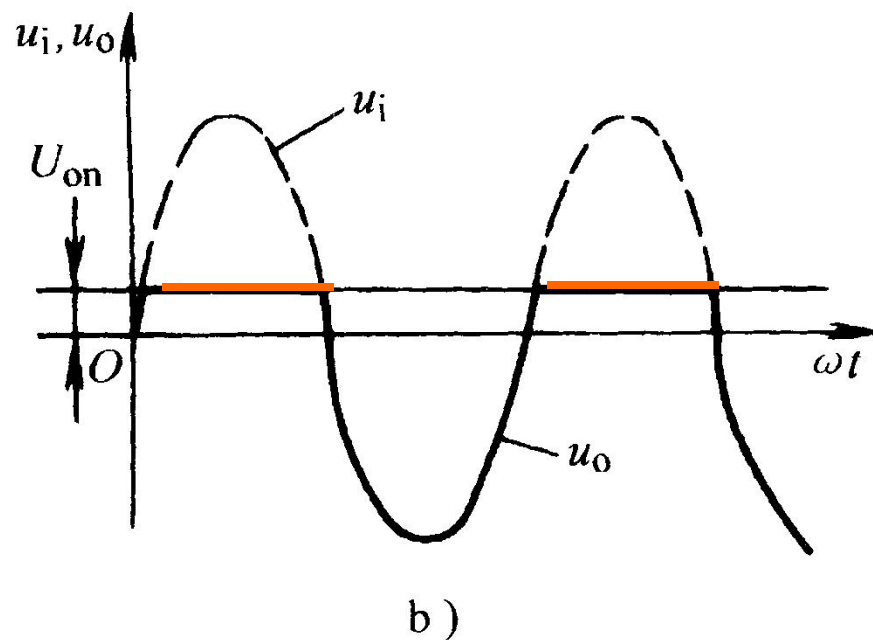
$u_i$  负半周或数值小于导通电压,

管截止,  $u_o = 0$

## 2. 并联限幅电路

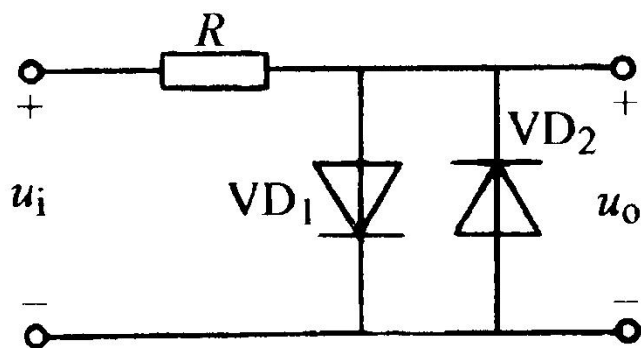


二极管与负载电阻并联



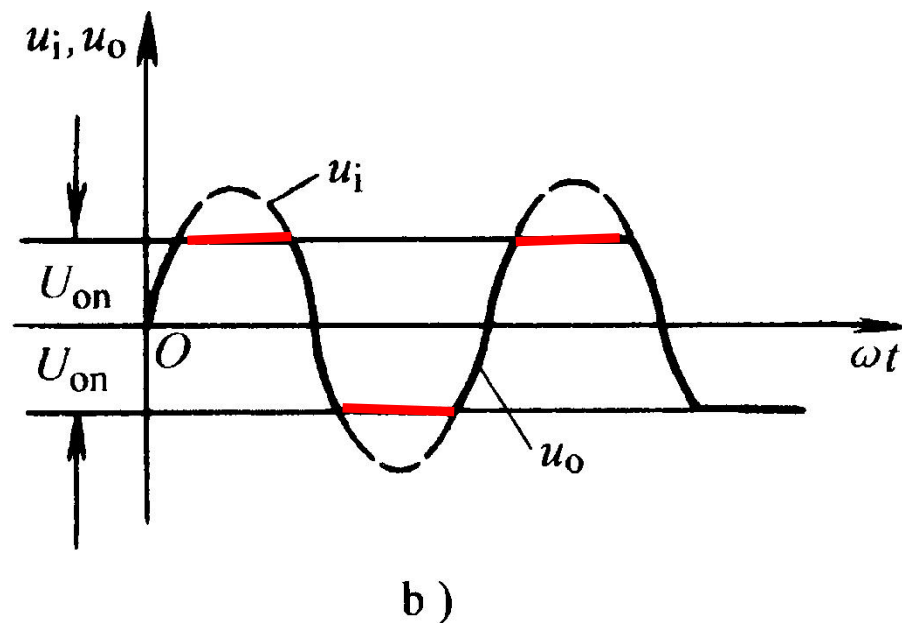
$u_i$  正半周且数值大于导通电压，二极管导通， $u_o = U_{on}$   
 $u_i$  负半周或数值小于导通电压，二极管截止， $u_o = u_i$

### 3. 双向限幅电路

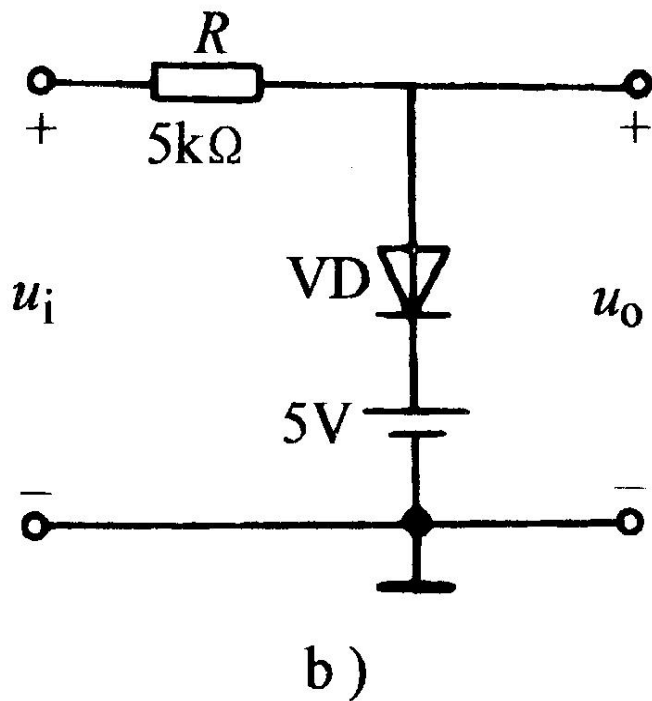
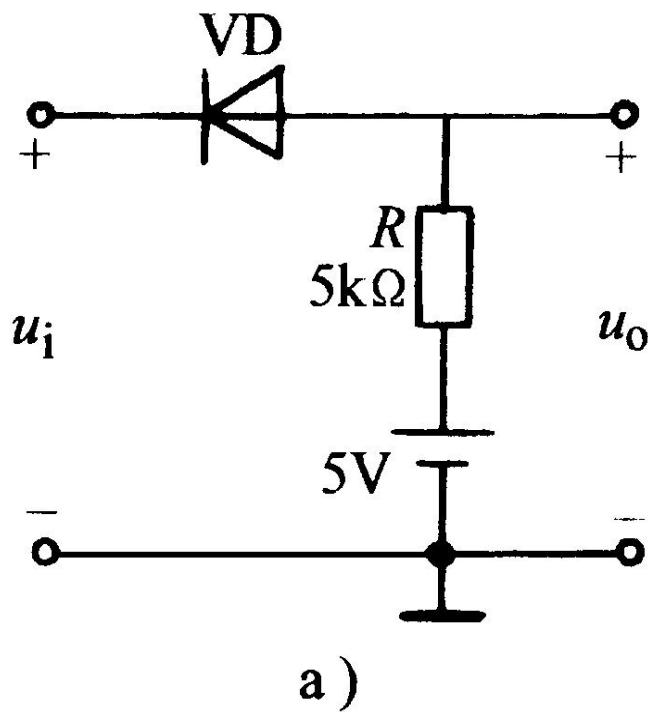


二极管反向并联在输出端

限制了输出信号的正负幅度  $u_o = \pm U_{on}$



1-8



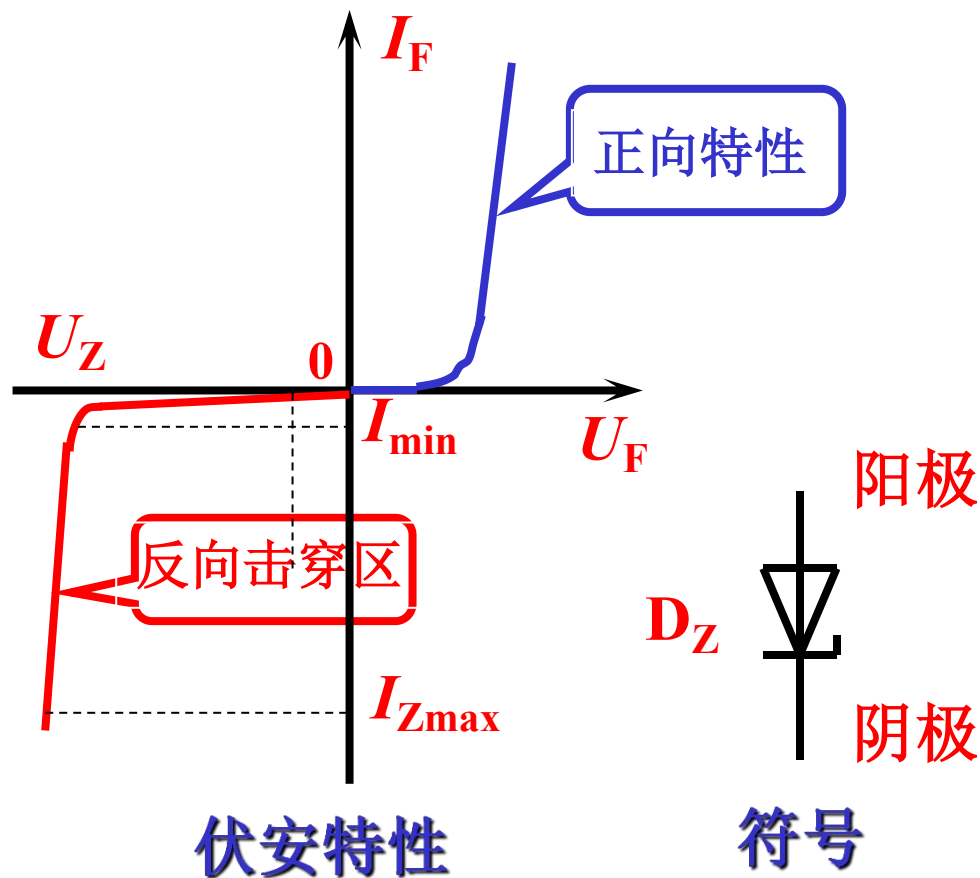
# 稳压二极管

稳压二极管是一种用硅材料制成的面接触型半导体二极管，简称稳压管。

稳压管在反向击穿时，在一定电流范围内，端电压几乎不变，表现出稳压特性。

# 稳压二极管的伏安特性

稳压管工作在反向击穿区。由于其曲线很陡，稳压特性好。



## 稳压二极管主要参数

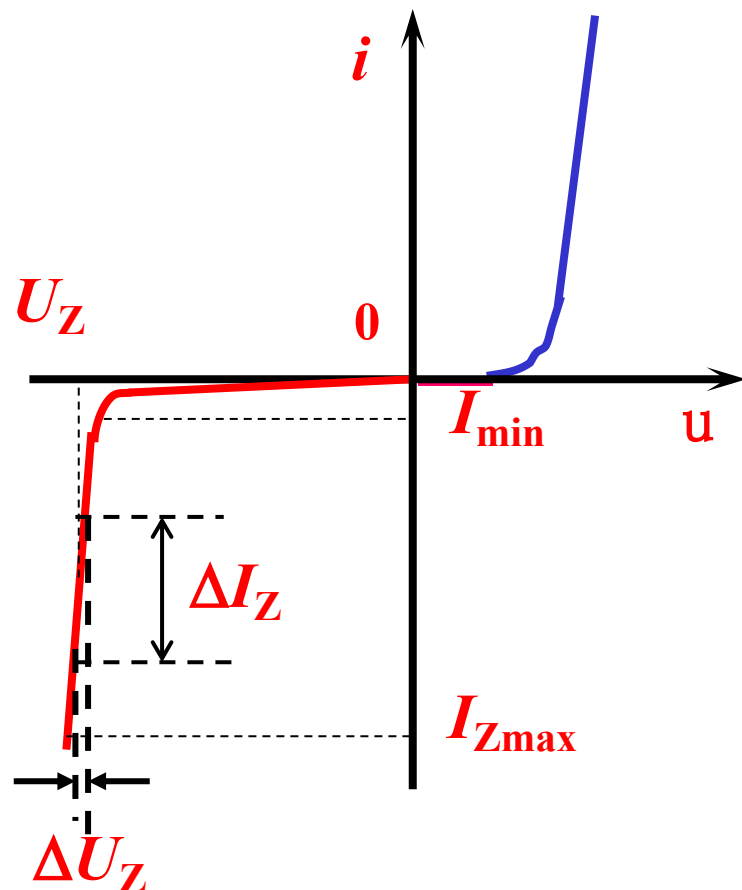
- **稳定电压**  $U_Z$  : 电流为规定值时稳压管两端的电压值
- **最小稳定电流**  $I_{Zmin}$  : 稳压正常工作时的最小电流
- **最大稳定电流**  $I_{Zmax}$  : 稳压正常工作时的最大电流
- **最大允许耗散功率**  $P_{ZM}$  :  $P_{ZM} = U_Z I_{Zmax}$
- **动态电阻**  $r_Z$  :  $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$  越小稳压特性越好
- **温度系数**  $\alpha$  :  $\alpha = \frac{\Delta U_Z}{U_Z \Delta T} \times 100\%$

温度每变化 $1^\circ \text{C}$ , 稳定电压 $U_Z$ 的相对变化量

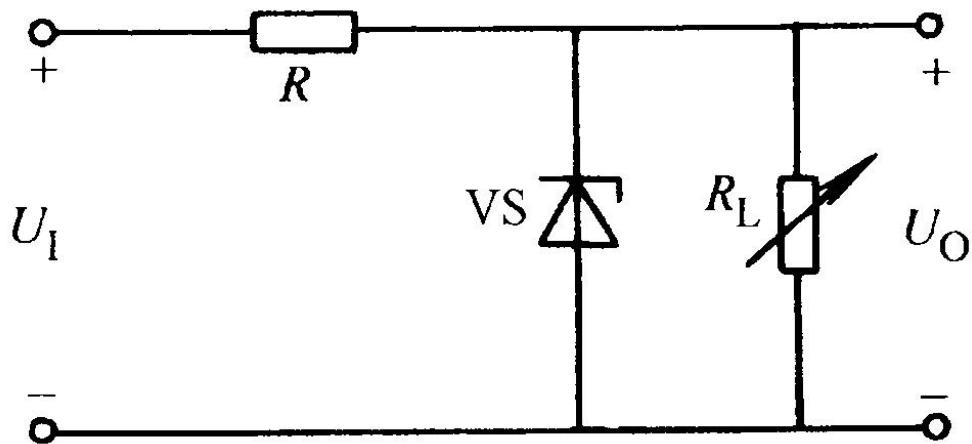


## 稳压二极管正常工作条件

- 工作在反向击穿状态
- 工作电流在最小稳定电流和最大稳定电流之间



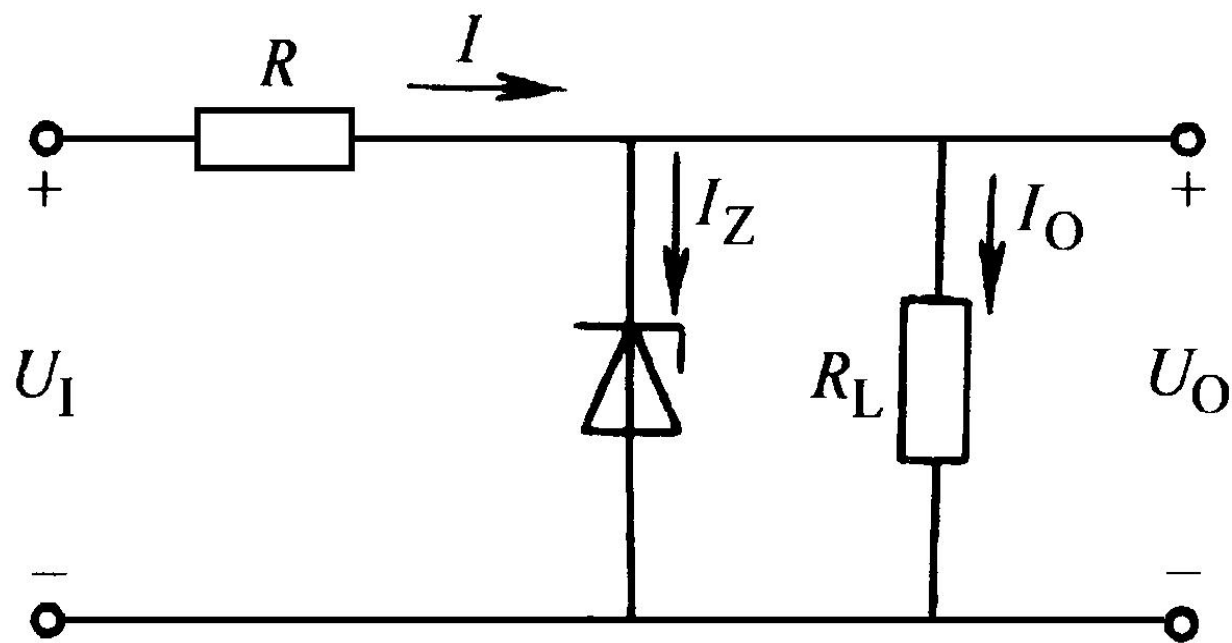
## 稳压管应用电路



限流电阻 $R$   
必不可少

$$U_o = U_z$$

1-10



# 其他类型二极管

## 发光二极管

当外加正向电压使其正向电流足够大时，二极管开始发光。发光二极管也具有单向导电性，它的开启电压比普通二极管大。具有不同种类型（可见光、不可见光、激光等）。

可见光发光二极管颜色与材料有关，颜色不同，开启电压不同，一般红色的在1.6—1.8V之间，绿色的为2V左右。

## 光电二极管

为远红外线接收管。

是一种光能与电能进行转换的器件，将接收到的光的变化转换成电流的变化。

# 本章小结

**半导体二极管**

**稳压管**

# 基本要求

## 重点掌握

普通二极管、稳压管外部特性和主要参数

普通二极管、稳压管的基本应用