



# 模拟电路基础（下）

## 半导体二极管以及等效模型



### ➤ 教学要求

- 1 了解半导体材料的基本结构以及PN结的形成
- 2 掌握PN结单向导电性的工作原理
- 3 理解二极管的伏安特性以及主要性能指标
- 4 掌握二极管电路的分析方法

### ➤ 教学重点

- 1 本征半导体、P型半导体、N型半导体的概念
- 2 PN结单向导电性的工作原理、以及击穿特性
- 3 半导体二极管的结构以及伏安特性
- 4 二极管电路的分析方法

## 第2章 半导体二极管以及等效模型

3



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 教学难点

- 1 半导体材料的结构以及形成；
- 2 PN结击穿特性；
- 3 二极管的伏安特性以及分析；
- 4 二极管电路的分析方法特别是小信号分析方法

### ➤ 教学学时

- 1 理论学时4学时
- 2 实践学时1学时

## 2.1 半导体的导电性

4



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 半导体的定义

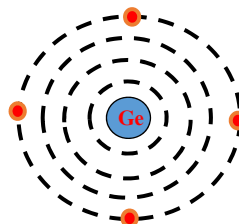
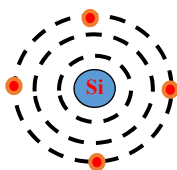
导体：电阻率在 $10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ 以下的容易导电的物质

绝缘体：电阻率在 $10^{10}\Omega\cdot\text{cm}$ 以上的不易导电的物质

半导体：电阻率介于导体和绝缘体之间的物体

### ➤ 本征半导体

#### 1. 原子结构与简化模型：



## 2.1 半导体的导电性

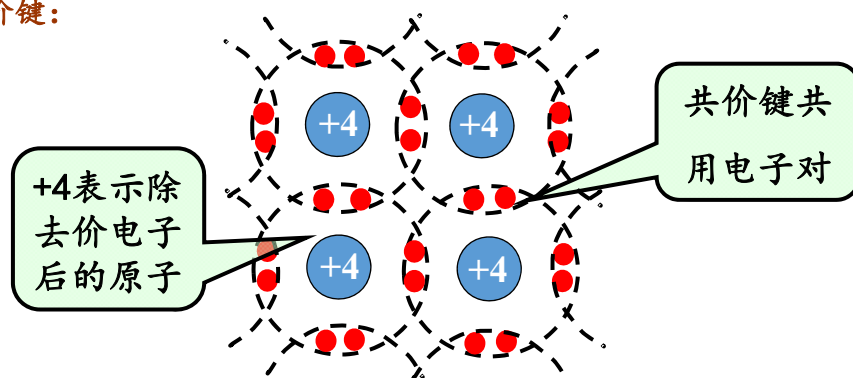
5



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 本征半导体

#### 2. 共价键:



共价键中的两个电子被紧紧束缚在共价键中，称为**束缚电子**，常温下束缚电子很难脱离共价键成为**自由电子**。

## 2.1 半导体的导电性

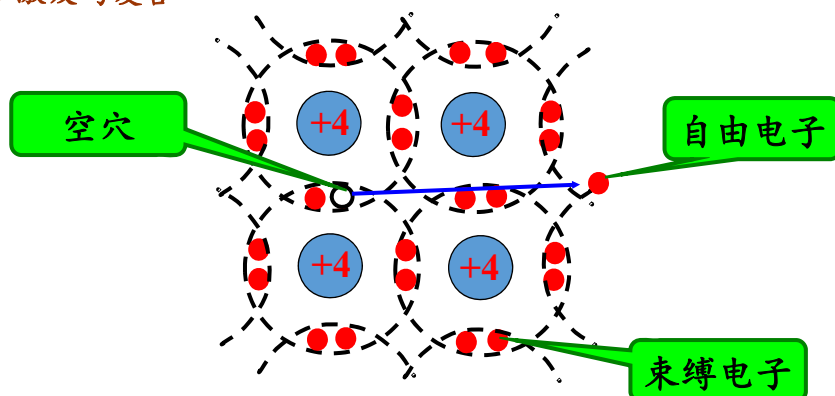
6



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 本征半导体

#### 3. 本征激发与复合



## 2.1 半导体的导电性

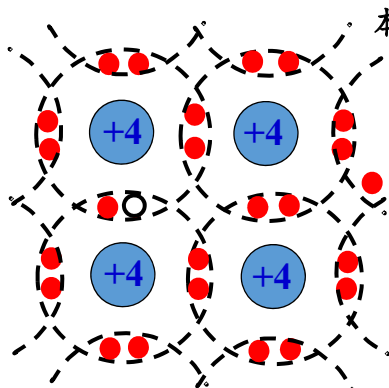
7



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 本征半导体

#### 4. 本征半导体的导电机理



本征半导体中存在数量相等的两种载流子，自由电子和空穴。

在力的作用下，空穴吸引附近的电子来填补，这样的结果相当于空穴的迁移，而空穴的迁移相当于正电荷的移动，因此可以认为空穴是载流子。

温度越高，载流子的浓度越高。本征半导体的导电能力越强，温度是影响半导体性能的一个重要的外部因素。

## 2.1 半导体的导电性

8



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 本征半导体

#### 5. 本征半导体的载流子浓度

$$n_i = AT^{3/2} e^{-\frac{E_{g0}}{2kT}}$$

A是常数(硅 $3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$  锗 $1.76 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ )

K为波尔兹曼常数  $8.63 \times 10^{-5} \text{ eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

300K 硅的 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

硅原子的浓度为 $4.96 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$

#### 6. 本征半导体的性质

➤  $n_0 p_0 = n_i^2$

➤ 本征半导体的电子和空穴的浓度相等。

➤ 温度每增加11/12度，本征硅/锗的电子和空穴的浓度增加1倍。

➤ 本征半导体的浓度与原子的浓度相比占很小的比例，导电能力很弱。

## 2.1 半导体的导电性

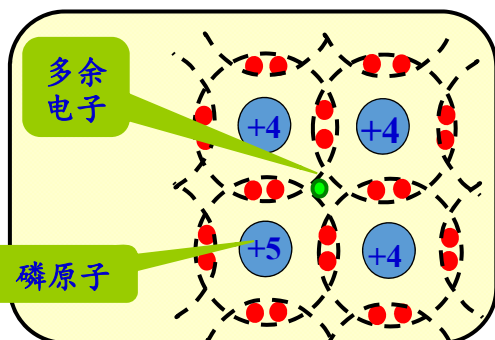
9



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 杂质半导体

#### 1. N型半导体



- 硅或锗晶体中掺入少量的**五价元素**磷（或锑）
- 晶体点阵中的某些半导体原子被杂质取代，磷原子的最外层有五个价电子
- 杂质原子的四个与相邻的原子形成共价键，必定多出一个电子，这个电子几乎不受束缚，很容易被激发而成为自由电子
- 这样杂质原子就成了不能移动的带正电的离子。
- 每个杂质原子给出一个电子，称为**施主原子**。
- 掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度，所以，自由电子浓度远大于空穴浓度。自由电子称为**多数载流子（多子）**，空穴称为**少数载流子（少子）**。

## 2.1 半导体的导电性

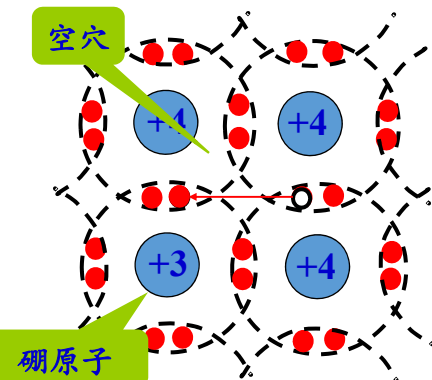
10



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 杂质半导体

#### 2. P型半导体



- 硅或锗晶体中掺入少量的**三价元素**硼（或铟）
- 晶体点阵中的某些半导体原子被杂质取代，硼原子的最外层有三个价电子
- 杂质原子的三个价电子与相邻的原子形成共价键，必定留下一个空位，这个空位吸引附近的自由电子来填补
- 这样杂质原子就成了不能移动的带负电的离子。
- 每个杂质原子给出一个空穴，称为**受主原子**。
- 掺杂浓度远大于本征半导体中载流子浓度，所以，自由空穴浓度远大于电子浓度。**空穴称为多数载流子（多子）**，自由电子称为**少数载流子（少子）**。

## 2.1 半导体的导电性

11



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 杂质半导体

#### 3. 杂质半导体的载流子浓度

##### ➤ 质量作用定律

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2$$

$$n_{p0} \cdot p_{p0} = n_i^2$$

##### ➤ 浓度关系式

$$n_{n0} = N_d + p_{n0}$$

$$p_{p0} = N_a + n_{p0}$$

$$n_{n0} \approx N_d$$

$$p_{p0} \approx N_a$$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_a}$$

## 2.1 半导体的导电性

12



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 杂质半导体

#### 4. 漂移与漂移电流

$$J_{pt} = qp u_p E$$

$$J_{nt} = -(-q)n u_n E$$

$u_p$  和  $u_n$  分别为空穴和自由电子的迁移率(Mobility)。迁移率表示单位场强下的平均漂移速度，单位为  $\text{cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$

#### 5. 扩散与扩散电流

$$J_{nd} = -(-q)D_n \frac{dn(x)}{dx} = qD_n \frac{dn(x)}{dx}$$

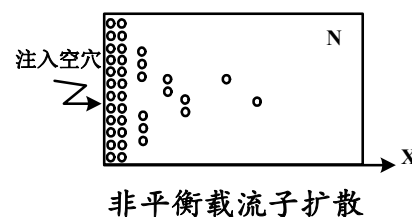
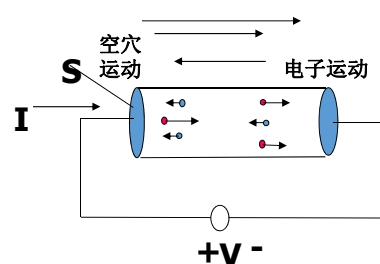
$$J_{pd} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$$

➤  $D_n$  和  $D_p$  为比例常数，分别称为自由电子扩散系数和空穴扩散系数

➤ 单位是  $\text{cm}^2 / \text{s}$ ，其值随温度升高而增大，

➤ 空穴的  $D_p$  小于自由电子的  $D_n$ 。

➤ 在硅材料中，室温时  $D_n = 34 \text{cm}^2 / \text{s}$ ， $D_p = 13 \text{cm}^2 / \text{s}$ 。



## 2.1 半导体的导电性

13



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 杂质半导体

#### 6. 爱因斯坦关系式

1905年，爱因斯坦发现扩散系数和迁移率之间存在内在的联系

$$\frac{D_p}{u_p} = \frac{D_n}{u_n} = \frac{kT}{q} = V_T$$

- 当  $T=300\text{K}$  时,  $k=1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$ ,  $q=1.6 \times 10^{-19}\text{C}$
- 可求得  $V_T \approx 0.026\text{V} = 26\text{mV}$ 。
- 在讨论器件的性能时，均假定在室温的条件下，热电压  $V_T$  常用  $26\text{mV}$  来表示。

## 2.2 PN结

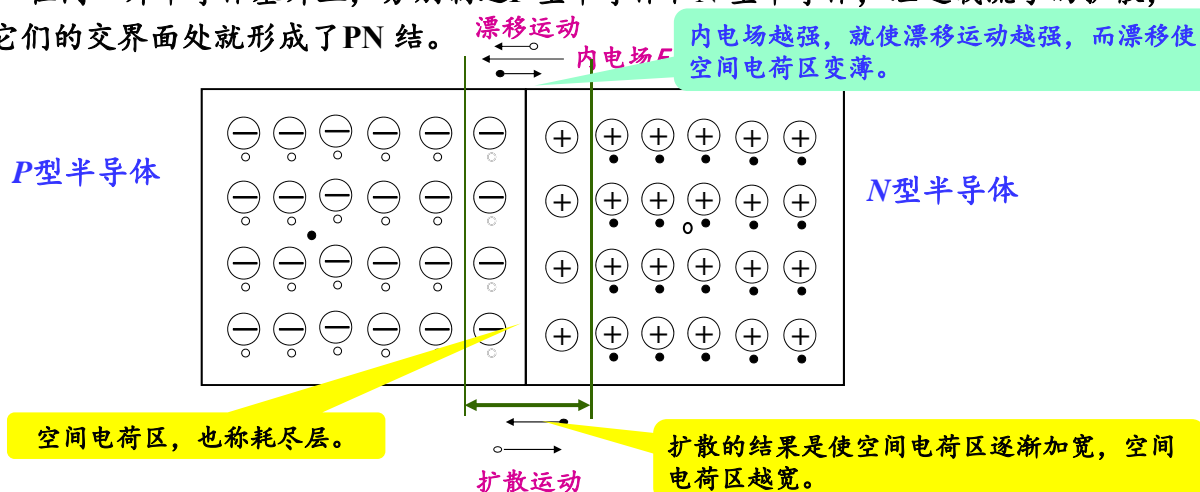
14



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的形成

在同一片半导体基片上，分别制造P型半导体和N型半导体，经过载流子的扩散，在它们的交界面处就形成了PN结。



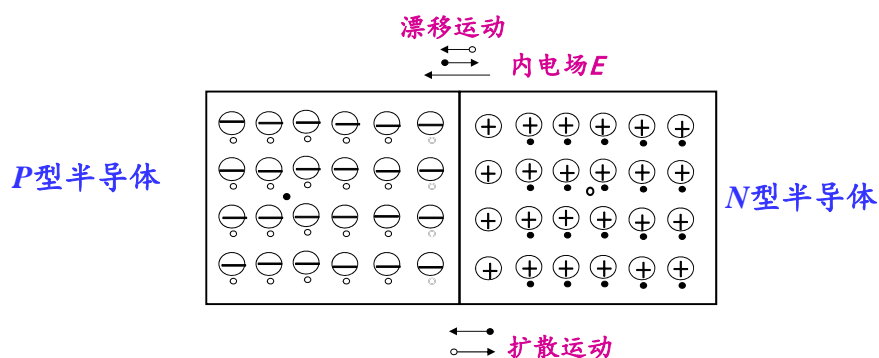
## 2.2 PN结

15



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的形成



所以扩散和漂移这一对相反的运动最终达到平衡，相当于两个区之间没有电荷运动，空间电荷区的厚度固定不变。

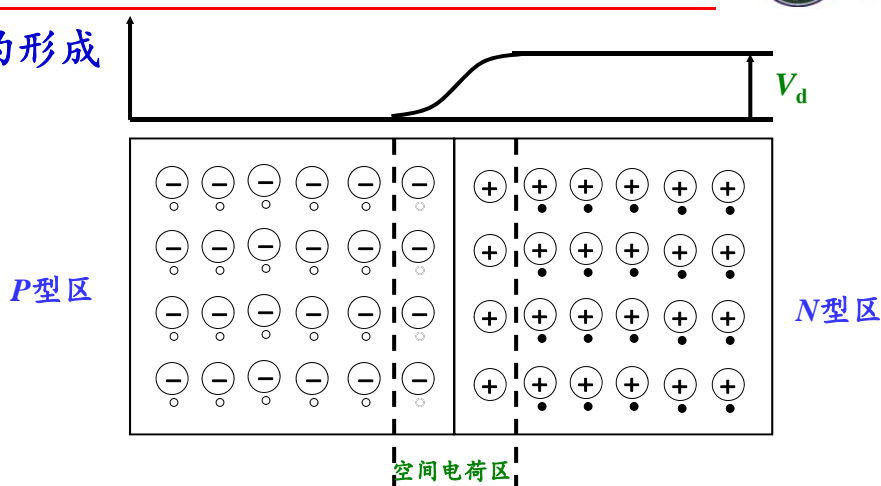
## 2.2 PN结

16



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的形成



- 空间电荷区中内电场阻碍P中的空穴、N区中的电子(都是多子)向对方运动(扩散运动)
- P 区中的电子和N区中的空穴(都是少子)，数量有限，因此由它们形成的电流很小。



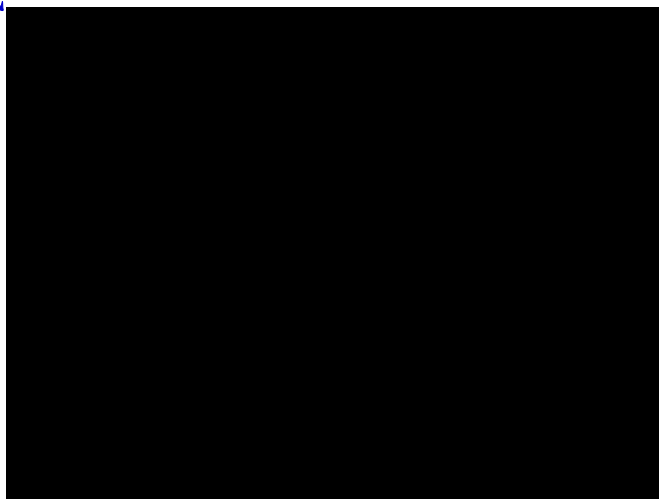
## 2.2 PN结

17



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的形成



负离子   
 空穴   
 正离子   
 自由电子

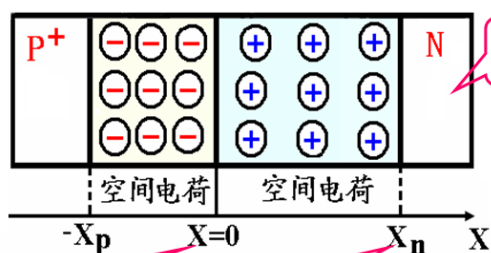
## 2.2 PN结

18



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结（阻挡层）的宽度



两中性区  
没有电场

$$\text{P区 } Q_- = -qsx_p N_a$$

$$\text{N区 } Q_+ = qsx_n N_d$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a} \cdot x_n$$

交界面处  
电场最强

结边界处  
电场强度为零

➤ 阻挡层在任一侧的宽度与该侧掺杂浓度成反比。即掺杂浓度低的一侧阻挡层宽。

➤ 阻挡层主要向掺杂浓度低的一侧扩展

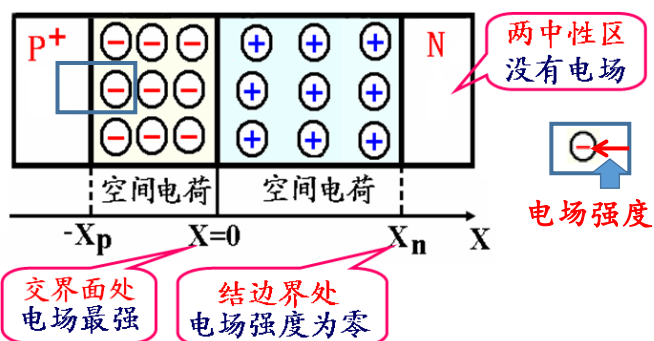
## 2.2 PN结

19

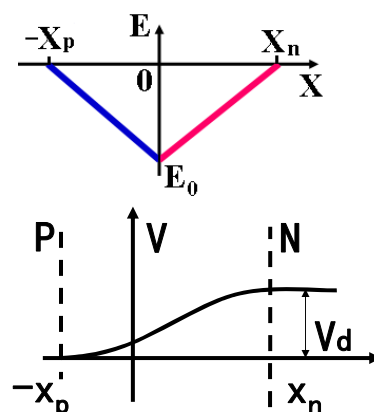


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的内建电位差



动态平衡时不对称的  
PN结的电场场强分布:



## 2.2 PN结

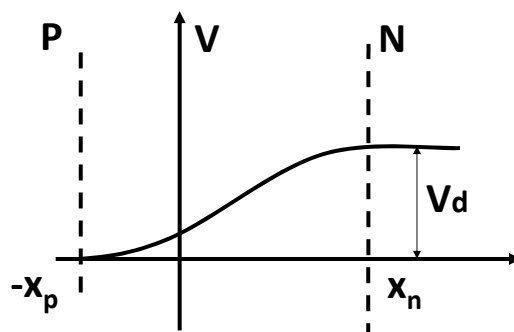
20



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的内建电位差

$$\begin{aligned}
 V_d &= \int_{V(-x_p)}^{V(x_n)} dV = -\int_{-x_p}^{x_n} E(x) dx = -\int_{-x_p}^{x_n} \frac{J_{PD}}{\sigma} dx \\
 &= V_T \int_{p_{p0}}^{p_{n0}} \frac{1}{p} dp \\
 &\approx V_T \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}
 \end{aligned}$$



➤ 锗的 $V_d$ 为0.2-0.3V，硅的 $V_d$ 为0.5-0.7V。

➤ 温度升高时， $n_i$ 增大的影响比 $V_T$ 大， $V_d$ 将相应减小。

➤ 通常温度每升高1°C， $V_d$ 约减小2.5mV。

## 2.2 PN结

21

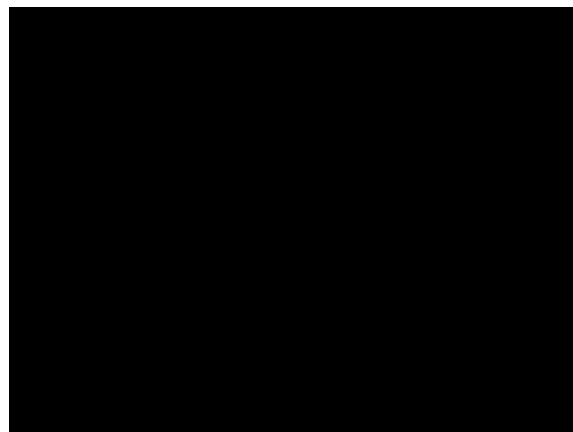


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的正向导电特性

P区的电位高于N区的电位，称为加**正向电压**，简称**正偏**；

- 外电场方向与PN结内电场方向相反，削弱了内电场。
- 内电场对多子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流加大。
- P区和N区的多子边扩散、边复合，形成连续的扩散电流。**PN结呈现低阻性。**



## 2.2 PN结

22

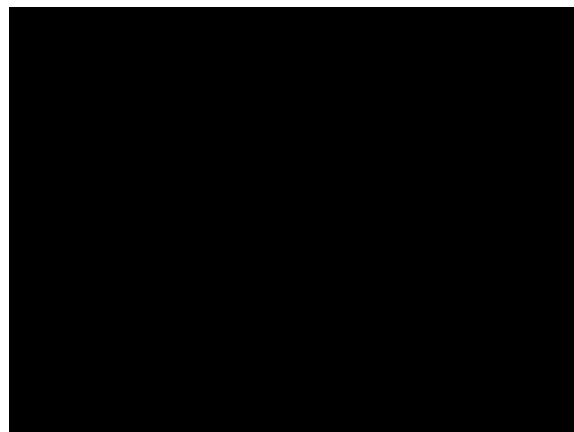


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的反向导电特性

P区的电位低于N区的电位，称为加**反向电压**，简称**反偏**；

- 外电场与PN结内电场方向相同，增强内电场。
- 内电场对多子扩散运动阻碍增强，扩散电流大大减小。少子在内电场的作用下形成的漂移电流加大。
- 此时PN结区少子漂移电流大于扩散电流，可忽略扩散电流。**PN结呈现高阻性。**



## 2.2 PN结

23



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的伏安特性

$$i_D = I_S (e^{\frac{v_D}{mV_T}} - 1)$$

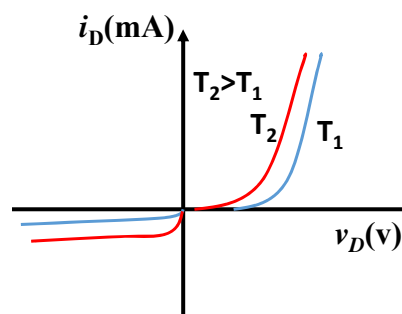
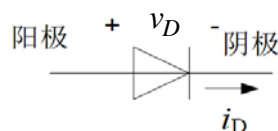
$I_S \rightarrow$  饱和电流;

$m=1$  为尺寸系数

$V_T = kT/q \rightarrow$  热电压

$k \rightarrow$  波尔兹曼常数;

$T=300\text{K}$  (室温) 时  $V_T = 1.38 \times 10^{-23} \times 300 / 1.6 \times 10^{-19} \approx 26\text{mV}$



• 当加正向电压时:  $I = I_S e^{v_D/V_T} \quad (v_D \gg V_T)$

• 当加反向电压时:  $I = -I_S$

## 2.2 PN结

24



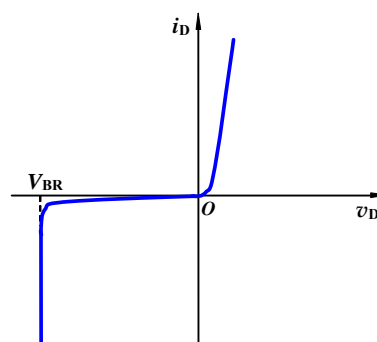
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的伏安特性

当PN结的反向电压增加到一定数值时, 反向电流突然快速增加, 此现象称为PN结的**反向击穿**。

热击穿——不可逆

雪崩击穿 } 电击穿——可逆  
齐纳击穿 }



- 雪崩击穿电压随温度升高而增大, 具有**正的温度系数**。(加速过程受热震动阻碍)
- 齐纳击穿电压随温度升高而降低, 具有**负的温度系数**。(电子能量提升, 易逃离)
- 雪崩击穿所需要的电压较高, 齐纳击穿所需要的电压较低。

## 2.2 PN结

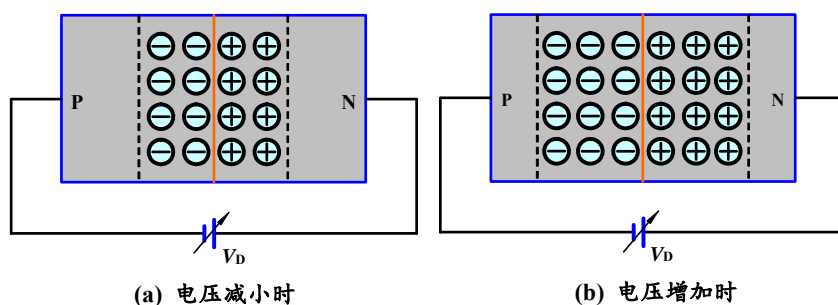
25



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的电容特性

势垒电容  $C_b$



外加电压变化  $\longrightarrow$  离子层厚薄变化  $\longrightarrow$  等效于电容充放电

## 2.2 PN结

26



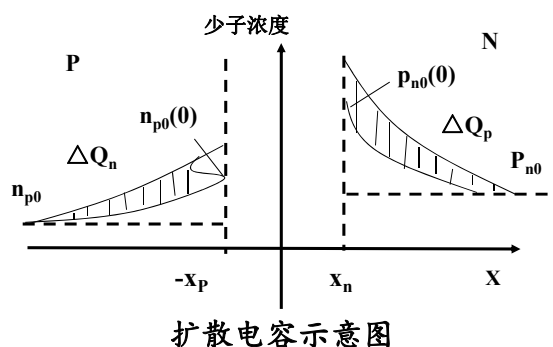
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的电容特性

扩散电容  $C_d$

外加电压变化

- 多子扩散到对方区域（成为少子）在靠近PN结附近累积的载流子浓度发生变化
- $\longrightarrow$  等效于电容充放电



- 当外加反偏电压时，PN结的电容主要由势垒电容来决定；
- 当外加正向偏置时，PN结的电容以扩散电容为主。

## 2.2 PN结

27



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ PN结的主要参数

将PN结封装，引出两个电极，就构成了二极管。

#### (1) 最大整流电流 $I_F$

二极管长时间安全工作所允许流过的最大正向平均电流。

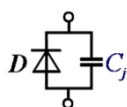
#### (2) 反向击穿电压 $V_{BR}$

二极管反向击穿时的电压值。

#### (3) 反向电流 $I_R$

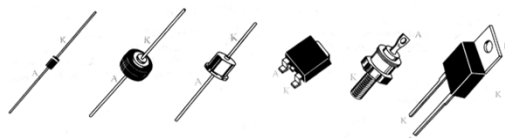
二极管未被击穿时，流过二极管的反向电流。

#### (4) 极间电容 $C_d$ ( $C_B$ 、 $C_D$ )



#### (5) 反向恢复时间 $T_{RR}$

开关状态切换的时间



## 2.2 PN结

28



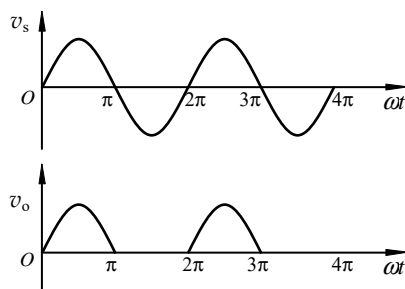
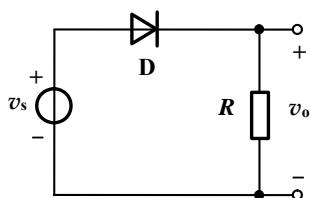
武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 二极管的主要类型

#### 整流二极管（单向导电特性）

整流二极管(rectifier diode)一种用于将交流电转变为直流电的半导体器件。

选用时主要考虑最大整流电流、最大反向工作电流、截止频率及反向恢复时间等参数。



## 2.2 PN结

29

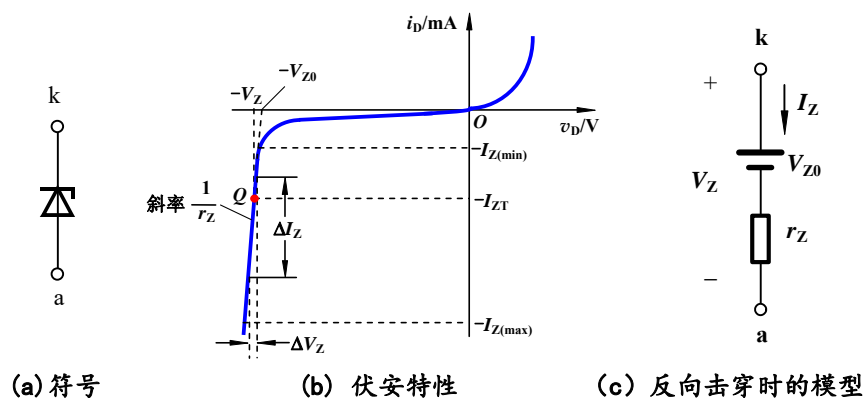


武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 二极管的主要类型

#### 稳压二极管（击穿特性）

利用二极管反向击穿特性实现稳压。稳压二极管稳压时工作在反向电击穿状态。



## 2.2 PN结

30



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 二极管的主要类型

#### 稳压二极管（击穿特性）

##### (1) 稳定电压 $V_Z$

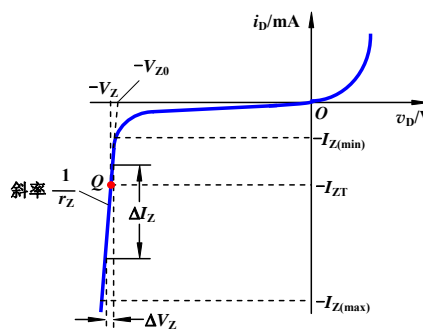
在规定的稳压管反向工作电流  $I_Z$  下，所对应的反向工作电压。

##### (2) 动态电阻 $r_Z$

$$r_Z = \Delta V_Z / \Delta I_Z$$

##### (3) 最大耗散功率 $P_{ZM}$

##### (4) 最大稳定工作电流 $I_{Z(max)}$ 和最小稳定工作电流 $I_{Z(min)}$



## 2.2 PN结

31



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

### ➤ 二极管的主要类型

#### 稳压二极管（击穿特性）

已知  $R_L = 2\text{k}\Omega$   $V_Z = 10\text{V}$ ,  $I_{Z\text{max}} = 20\text{mA}$ ,  $I_{Z\text{min}} = 5\text{mA}$

要求当输入电压由正常值发生 $\pm 20\%$ 波动时，负载电压基本不变。

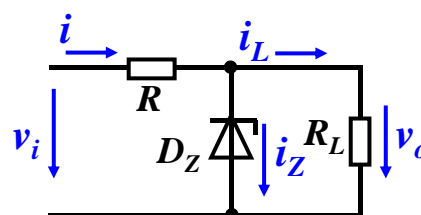
求：电阻 $R$ 和输入电压  $v_i$  的正常值。

解：令输入电压达到上限时，流过稳压管的电流为 $I_{Z\text{max}}$ 。

$$i = I_{Z\text{max}} + \frac{V_Z}{R_L} = 25\text{mA} \quad \Rightarrow \quad 1.2v_i = iR + V_Z = 25R + 10$$

$$i = I_{Z\text{min}} + \frac{V_Z}{R_L} = 10\text{mA} \quad \Rightarrow \quad 0.8v_i = iR + V_Z = 10R + 10$$

联立方程1、2，可解得：  $v_i = 18.75\text{V}$ ,  $R = 0.5\text{k}\Omega$



## 2.2 PN结

32



武汉大学  
WUHAN UNIVERSITY

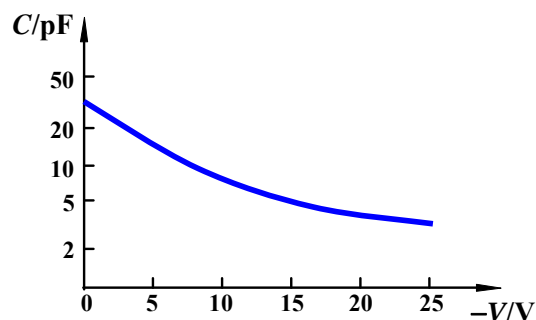
### ➤ 二极管的主要类型

#### 变容二极管（电容特性）

➤ PN结外加反向电压时，它的反向电流很小，近似开路，是一个主要由势垒电容构成的较理想的电容器件。



(a)



(b)

➤ 其增量电容值随外加反向电压而变化。利用这种特性制作的二极管称为变容二极管

(a) 符号 (b) 结电容与电压的关系（纵坐标为对数刻度）