

# 模拟电子技术基础

## 第一章 半导体极管及其应用

### 1. 半导体基本知识

物质按导电能力(电阻率)分为

导体	电阻率 $< 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$
半导体	
绝缘体	电阻率 $> 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$

最常用半导体材料

- 硅(Si)
- 锗(Ge)
- 此外有砷化镓、磷化铟、金属氧化物...

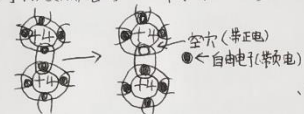
半导体特性

- 光敏特性:  $T \uparrow$ , 电阻率  $\downarrow$
- 热敏特性: 光强  $\downarrow$ , 电阻率  $\downarrow$
- 掺杂特性: 在纯净半导体中, 掺入微量其它元素, 导电率上升 几千万 ~ 几百万倍

### 2. 本征半导体

本征半导体即为完全纯净的半导体  $\rightarrow$  具有晶体结构, 故也称晶格管。

本征半导体受热/光时  $\Rightarrow$  部分价电子挣脱原子核束缚成为自由电子, 并产生对应空穴  $\Rightarrow$  此过程即为 本征激发



1. 本征激发产生成对的电子与空穴  
 又自由电子(-)在运动中会与空穴(+)(带正电)成对的复合, 电子空穴成对的消失。  
 2. 温度一定时, 半导体中电子与空穴的产生与复合处于动态平衡  
 即温度一定时, 本征半导体中电子与空穴浓度是一定的。

在外电场作用下, 电子逆着电场运动, 形成电子电流, 又因为价电子填补空穴, 形成空穴电流  
 所以半导体电有两种载流子: 自由电子(-), 空穴(+)

此为半导体与金属导电原理的本质区别。

$$n_i = p_i = A \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

个自由电子浓度      个空穴浓度      绝对温度

$E_g$  禁带宽度

价电子挣脱共价键所需能量 (禁带宽度)

本征半导体特性

- 1. 电阻率大
- 2. 导电性能随温度变化大
- 3.  $\downarrow$  本征半导体不能在半导体器件中直接使用

当  $T=0$  时,  $n_i = p_i = 0 \text{ cm}^{-3}$   
 当  $T=300 \text{ K}$  时,  $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} [\text{Si}]$   
 $n_i = p_i = 2.38 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} [\text{Ge}]$

### 3. 掺杂半导体 [利用掺杂特征]

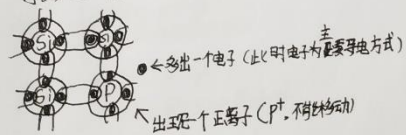
(杂质) 掺杂半导体: 在本征半导体中掺入微量杂质元素后所形成的半导体。

掺杂不同, 掺杂半导体

- N型半导体 [加入五价元素, P]
- P型半导体 [加入三价元素, N]

#### ① N型半导体 [Negative], 也叫电子型半导体

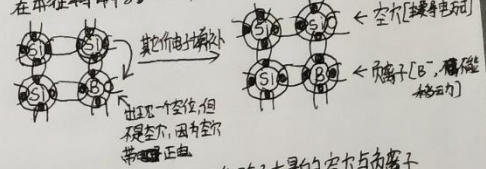
掺入五价元素 [硅、磷]



$\Rightarrow$  N型半导体中除了大量的自由电子与正离子, 还有少量的由本征激发产生的空穴  
 自由电子  $\rightarrow$  多数载流子  $\rightarrow$  多子  
 空穴  $\rightarrow$  少数载流子  $\rightarrow$  少子

#### ② P型半导体 [Positive], 也叫空穴型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素 [硼、铝]



$\Rightarrow$  P型半导体除了大量的空穴与负离子, 还有少量由本征激发产生的自由电子  
 自由电子  $\rightarrow$  少子  
 空穴  $\rightarrow$  多子

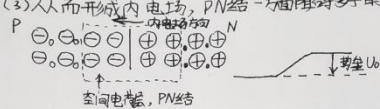
多子取好, 掺杂多少, 少子取决于温度, 同时保持电中性

半导体电子技术基础

## 4. PN结的形成

2页

- (1) 以N型(P型)半导体为晶片,通过半导体扩散工艺,使半导体一边形成N型区,一边形成P型区。
- (2) 在浓度差作用下,电子从N区向P区扩散,空穴从P区向N区扩散,两边电子互相扩散,在P区与N区的交界面上,留下了一层不能移动的正负离子。
- (3) 从而形成内电场,PN结一方面阻碍多子的扩散,一方面加速少子的漂移。



当扩散与漂移作用平衡时  
 1. 此时PN结净电流为0  
 2. PN结厚度一定 (约几个微米)  
 3. 接触电势一定 (约零点几伏)

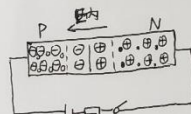
当P区与N区掺杂浓度不等时



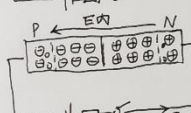
最主要性质:  
 1. 耗尽区大, 空间电荷的密度越高  
 2. 耗尽区小, 空间电荷的密度越低

### 1.1.2 PN结的单向导电性

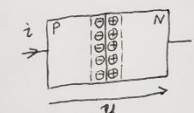
1. PN结正向偏置:  
 合成电场被削弱, 势垒降低  
 多子扩散有利  
 状态: 低阻导通
2. PN结反向偏置:  
 合成电场增强, 势垒增高  
 阻碍多子扩散, 有利于少子漂移  
 状态: 高阻截止



因为少子浓度主要与温度有关, 反向电流与反向电压几乎无关, 此电流称为反向饱和电流, 记为  $I_S$ 。



### 1.1.3 PN结的电压与电流关系



$$i = I_S (e^{U/U_T} - 1)$$

讨论:  
 当  $U=0$  时,  $i=0$   
 当  $U>0$  且  $U \gg U_T$  时,  $i = I_S \cdot e^{U/U_T}$   
 当  $U<0$  且  $|U| \gg U_T$  时,  $i = -I_S$

PN结  
 $I_S$ : 反向饱和电流  
 $U_T$ : 热电压,  $U_T = KT/q$   
 在室温 ( $T=300K$ ) 时,  $U_T$  为 26mV

$K$ : 玻尔兹曼常数  
 $q$ : 电子电量  
 $T$ : 绝对温度

### 1.1.4 PN结的反向击穿

当PN结的反向偏置电压超过一定值时, 反向电流急剧增大, PN结被反向击穿。

#### 1. 齐纳击穿

条件: 掺杂高, PN结薄, 空间电荷层薄  
 在较低的反向电压下, 空间电荷区就有较强的电场

击穿机理: 电场将PN结的价电子从共价键中激发出来

击穿特点:  
 1. 击穿电压小于4V  
 2. 击穿电压具有负的温度系数

$T \uparrow$ , 价电子能量  $\uparrow$   
 价电子激发所需能量  $\downarrow$

#### 2. 雪崩击穿

条件: 掺杂低, PN结厚, 空间电荷层厚  
 需要更高的反向电压才能产生较强的电场

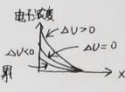
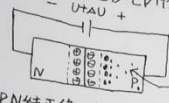
击穿机理: 电场使PN结中的少子加速, 碰撞电离, 产生新的载流子

击穿特点:  
 1. 击穿电压高于6V  
 2. 具有正的温度系数

$T \uparrow$ , 晶体中原子热运动加剧, 被加速少子在碰撞电离前与原子发生碰撞机会增大, 损耗更多能量, 需要更高反向电压。

### 1.1.5 PN结的电容效应

#### 1. 扩散电容 $C_D$ [Diffusion]



$\Delta U$  变化时, 正负电荷的分布

$$C_D = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$$

PN结正偏, 自由电子从N区扩散至P区, P区电子为少数, 由于此电子与本征激发产生的电子不同, 称为非平衡少数电子。

[将扩散至N区区域的多数载流子称为非平衡少数载流子, 简称非平衡少数]

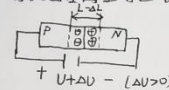
在PN结交界面处, 非平衡少数载流子浓度最高, 由于扩散运动, 离PN结交界面越远, 非平衡少数载流子浓度越低。

当正向偏置电压增大, 扩散电流越大, 在N区交界面处的非平衡少数载流子越多。

这种由于PN结两端电压变化, 所引起的非平衡少数载流子数量的变化所形成的电容效应为扩散电容  $C_D$ 。

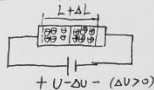
#### 2. 势垒电容 $C_B$ [Barrier]

势垒电容由空间电荷层中电荷量的变化引起的



当PN结正向偏置电压增大

PN结势垒空间电荷层中电荷量减少



当PN结反向偏置电压增大

PN结势垒空间电荷层中电荷量增大

这种由于PN结两端电压变化, 所引起的空间电荷层中电荷量的变化, 所形成的电容效应为势垒电容  $C_B$ 。

PN结结电容  $C_j$ :  $C_j = C_D + C_B$

非线性电容, 单位量级: 皮法 [pF]

当PN结反偏  $C_B \gg C_D$ ,  $C_j \approx C_B$

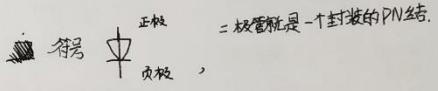
当PN结正偏  $C_D \gg C_B$ ,  $C_j \approx C_D$

当信号为中低频时, 结电容容抗较大, 忽略它的影响

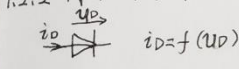
### 1.2 半导体二极管

#### 1.2.1 半导体二极管的结构和类型

按材料区分: 硅管, 锗管  
按结构区分: 平面型, 点接触型



#### 1.2.2 半导体二极管的伏安特性



##### 1. 正向特性

(1) 非线性:  $i_D \propto e^{U_D/U_T}$

(2) 有死区: ( $i_D \approx 0$  的区域)

死区电压: 硅管: 0.5V, 锗管: 0.1V

(3) 有压降: 导通后 ( $U_D$  大于死区电压),

$$\frac{d i_D}{d U_D} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{U_D}{U_T}} \approx \frac{i_D}{U_T}$$

即  $U_D$  升高,  $i_D$  急剧增大。

管压降  $U_D$  约为: 硅管 0.6~0.8V, 锗管 0.2~0.3V

估算时取压降  $U_D$ : 硅管: 0.7V, 锗管: 0.3V

##### 2. 反向特性

(1) 反偏区:

当  $|U_D| < U_{BR}$  时,  $i_D \approx I_S$

$I_S$ : 硅管:  $< 0.1 \mu A$ , 锗管: 几十到几百  $\mu A$

(2) 击穿区

当  $|U_D| > U_{BR}$  时, 反向电流急剧增大, 二极管发生反向击穿。

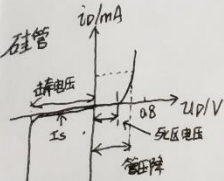
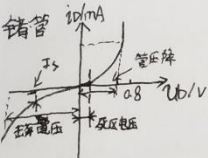
按击穿可逆性分为: 电击穿, 热击穿 [不可逆]。

电击穿条件

$|I_S|$  和  $P_{(U_D=0)}$  不大  
PN结温度低于允许最高结温: 硅管 150~200°C, 锗管 75~100°C  
降低反向电压, 二极管仍能正常工作

热击穿:

PN结被损坏造成二极管永久损坏。





## 模拟电子技术

### 1.2.3 温度对半导体二极管特性的影响。

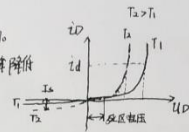
1. 温度上升, 死区电压缩小, 正向管压降低

$$\frac{\Delta U_D}{\Delta T} = -(2 \sim 2.5) \text{ mV/}^\circ\text{C}$$

2. 温度升高, 反向饱和电流增大

$$I_S(T) = 2^{\frac{T-T_0}{10}} I_S(T_0)$$

即平均温度升高  $10^\circ\text{C}$ , 反向饱和电流增大一倍。



在相同的电流  $I_D$  下,  
管压降随温度升高而降低

小结:  $T \uparrow \Rightarrow \begin{cases} \text{死区电压} \downarrow \\ U_D \downarrow \\ I_S \uparrow \end{cases}$

### 1.2.4 半导体二极管的主要参数。

1. 额定电流  $I_F$ : 管子长期运行所允许的通过电流平均值。

2. 反向击穿电压  $U_{(BR)}$ : 二极管承受的最高反向电压, 一般几十伏以上。

3. 最高允许反向工作电压  $U_R$ :  $U_R = (1/2 \sim 2/3) U_{(BR)}$

4. 反向电流  $I_R$ : 室温下加上规定的反向电压时测得的电流

PS. 反向电流越小, 管子单向导电性越好。  
硅管为  $\mu\text{A}$  级, 锗管为  $\text{mA}$  级

5. 正向管压降  $U_F$ : 指通过一定直流测试电流时的管压降。

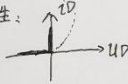
6. 最高工作频率  $f_M$ : 当工作频率过高时, 其单向导电性明显变差。

### 1.2.5 二极管的模型

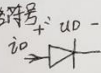
由于含二极管的电路为非线性电路, 对二极管的非线性特性进行线性化处理, 建立线性模型或线性等效电路, 然后用分析线性电路的方法来分析二极管电路。

#### 1. 开关模型 (理想二极管)

1) 伏安特性:

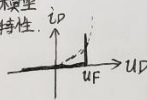


2) 电路符号:

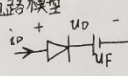


#### 2. 恒压模型

1) 伏安特性:



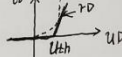
2) 电路模型:



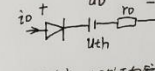
当信号幅度小时, 估算认为恒压  
后管压降恒定

#### 3. 折线模型

1) 伏安特性:

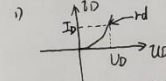


2) 电路模型:

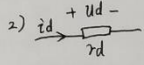


即视为二极管正向管压降  
又视为正向电阻

#### 4. 小信号动态模型



$$\text{动态电阻 } r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} \Big|_{U_D=U_D, I_D=I_D}$$



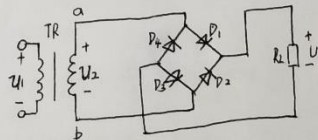
### 1.3 二极管的应用

#### 1.3.1 在整流电路中的应用

整流: 将交流电变为直流电的过程

整流电路: 完成整流功能的电路

常见整流电路:  $\begin{cases} \text{半波整流电路} \\ \text{全波整流电路} \\ \text{桥式整流电路} \rightarrow \text{最常用} \end{cases}$

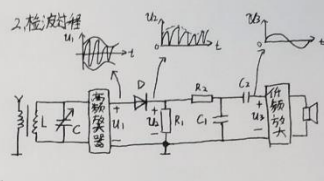
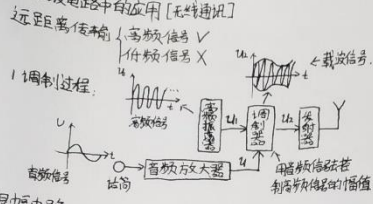


当  $U_2 > 0$ ,  $D_2, D_4$  截止,  $a \rightarrow D_1 \rightarrow R_L \rightarrow D_3 \rightarrow b$   
当  $U_2 < 0$ ,  $D_1, D_3$  截止,  $b \rightarrow D_2 \rightarrow R_L \rightarrow D_4 \rightarrow a$   
负载电流始终从上至下,

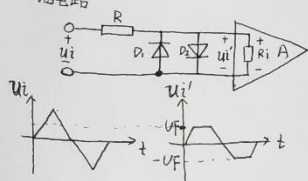
$\Rightarrow$  输出波形  $M \dots$   
完成交流到直流的转换过程。

# 模拟电子技术

## 1.3.2 在模拟电路中的应用 [无线通讯]



## 1.3.3 限幅电路

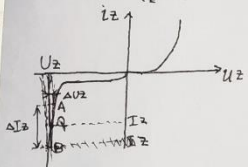


工作原理: ① 当  $U_i$  较小时, 使二极管  $D_1, D_2$  截止时  
 $U_i' = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_i$ , 电路正常放大  
 ② 当  $U_i$  使二极管  $D_1$  或  $D_2$  导通时  
 $U_i' \propto U_i$

## 1.4 特种二极管

### 1.4.1 稳压二极管 = 极管

#### (1) 伏安特性



特点: 1) 正向特性与普通二极管一样  
 2) 反向击穿特性很陡  
 小电压增大电流的变化

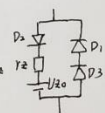
∴ 稳压管工作于“反向击穿状态”, 用来稳定直流电压。  
 PS: 在一定电流范围内, 稳压管被热击穿。

即稳压管 (3)  
 也是稳压管

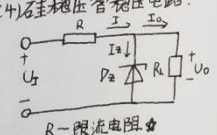
- 稳压管主要的电参数:
- ① 稳定电压  $U_Z$
  - ② 动态电阻  $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$  → 越小越好
  - ③ 最大允许工作电流  $I_{ZM}$
  - ④ 最大允许功率耗散  $P_{ZM}$
  - ⑤ 温度系数  $\alpha_U$

$\alpha_U$  定义为每变化  $1^\circ\text{C}$  时  $U_Z$  的相对变化率。  
 $\alpha_U = \frac{\frac{\Delta U_Z}{U_Z}}{\Delta T} \times 100\%$   
 $U_Z > 6V$ , 雪崩击穿,  $\alpha_U$  为正  
 $U_Z < 4V$ , 齐纳击穿,  $\alpha_U$  为负  
 $U_Z$  在  $4 \sim 6V$ ,  $\alpha_U$  可能为正, 可能为负。  
 ↓ 对稳压管进行温度补偿

(2) 等效电路: 正向时:  
 反向时:  $U_Z = U_{Z0} + I_Z r_Z$   
 击穿



### (4) 稳压管稳压电路



由图可知:

$$\begin{cases} U_0 = U_Z \\ I_0 = \frac{U_0}{R_L} = \frac{U_Z}{R_L} \\ I_Z = I - I_0 \\ I = \frac{U_1 - U_0}{R} = \frac{U_1 - U_Z}{R} \end{cases}$$

由  $I = \frac{U_1 - U_Z}{R}$   
 $I_Z = I - I_0$   
 知: 当  $U_1$  最大时,  $I$  最大  
 若此时  $I_0$  最小, 则  $I_Z$  最大。

$$\therefore \frac{U_1(\max) - U_Z}{R} - I_0(\min) \leq I_{ZM}$$

$$\Rightarrow R \geq \frac{U_1(\max) - U_Z}{I_0(\min) + I_{ZM}}, \text{ 不然稳压管热击穿}$$

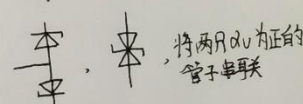
$$\text{同理: } \frac{U_1(\min) - U_Z}{R} - I_0(\max) \geq I_Z(\min)$$

$$\Rightarrow R \leq \frac{U_1(\min) - U_Z}{I_0(\max) + I_Z(\min)}, \text{ 不然稳压管截止}$$

$$\text{综上 } \frac{U_1(\max) - U_Z}{I_0(\min) + I_{ZM}} \leq R \leq \frac{U_1(\min) - U_Z}{I_0(\max) + I_Z(\min)}$$

$R$  大, 电路稳压效果好, 功耗大  
 $R$  小, 电路稳压效果差, 功耗小

①  $D_{Z1}$  和  $D_{Z2}$  将两只  $\alpha_U$  为正的管子与两只  $\alpha_U$  为负的管子串联  
 $\therefore U_Z = U_{Z1} + U_{Z2}$   
 $|dU'| < \{|dU_1|, |dU_2|\} \min$



两个管子仅一导通, 一反向击穿

∴ 正向管压降: 随  $T$  升高而降低, 即负温度系数

∴  $|dU'|$  一定减小

### ① 稳压原理

a.  $U_1$  不稳定 (忽增忽减)  
 假如  $U_1 \uparrow \rightarrow U_0 \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow IR \uparrow$   
 $U_0 \downarrow \leftarrow$

b.  $R_L$  改变 (忽增忽减)  
 假如  $R_L \downarrow \rightarrow U_0 \downarrow \rightarrow U_Z \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow IR \downarrow$   
 $U_0 \uparrow \leftarrow$

### ② 限流电阻的计算

电路正常工作条件  
 $U_1 \cdot \frac{R}{R+R_L} \geq U_Z$  (保证稳压管被击穿)  
 $I_Z(\min) \leq I_Z \leq I_{ZM}$

模电电子技术

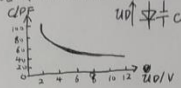
1.4.2 变容二极管

a 当二极管反向偏置时,反向电阻很大,其结电容的作用大,可作电容使用。

b 电容值与所加的反向偏置电压的大小有关

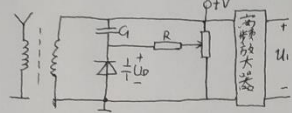
符号:  $\nabla \parallel$

C-U特性曲线:



$U0 \parallel \nabla \parallel C$

示例:



$$\text{谐振频率: } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\text{由于 } C_1 \gg C_2, \quad C \approx \frac{C_1 C_2}{C_1} \approx C_2$$

$$\therefore f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_2}}$$