

一、半导体 $1m\Omega\text{cm} \sim 1G\Omega\text{cm}$

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

热敏特性: 温度, 电阻率下降

光敏特性 掺杂特性

1. 本征半导体: 本征激发 成对产生空穴与自由电子

相遇时复合

• T一定, $n_p = n_n$

$n_p \times n_n = k(T)$ (与T有关常数)

• 电子逆着外电场运动 \rightarrow 正电荷

• 价电子填补空穴, 使空穴移动, 形成空穴电流 (顺着外电场方向)

★ 半导体两种载流子 $\begin{cases} \text{负的自由电子} \\ \text{正的空穴} \end{cases}$

本征半导体 $\begin{cases} \text{电阻率大,} \\ \text{热敏效应明显} \end{cases}$ 不能在半导体器件中直接使用

2. N型 加五价杂质元素 (磷, 砷)

多个自由电子, 出现一个正价离子

• N 本征加少量五价

N 产生大量自由电子, 正离子

电子为多数载流子 \rightarrow 多子, 空穴 \rightarrow 少子

带负电 \rightarrow N (negative) 型

掺入杂质能给出电子 \rightarrow 施主杂质

3. P型 加三价杂质元素 (硼)

出现一个空穴, \therefore 出现一个负离子

• P 产生大量空穴与自由电子

$\begin{matrix} \text{多子} & \text{少子} \end{matrix}$ (空穴 $>$ 电子)

$n_p \times n_n = k(T)$

空穴带正电 P (positive) 型 or 空穴型

掺入杂质能接受电子 \rightarrow 受主杂质

半导体中正负电荷相等

宏观 \rightarrow 电中性

多子 \rightarrow 取决于掺多少

少子 \rightarrow 数目取决于温度

本征激发



1.2.1 PN结的形成与特点

N型半导体为基片，多掺一些三价，使一侧成为P型区

浓度差作用下，电子从N→P扩散

空穴从P→N扩散

分界线两侧自由电子与空穴复合，且不再移动

耗尽层
PN结

有PN结形成内电场，阻碍多子扩散，加速少子漂移

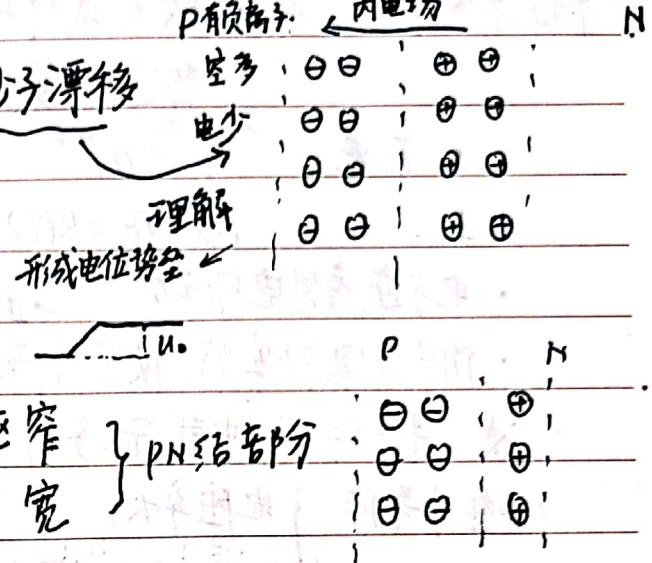
当扩散与漂移平衡时

a. 流过PN结净电流为0

b. PN结厚度一定 (几μm)

c. 结触发电压一定 (0.几伏)

高掺杂 例 N^+ ，离子e大，空间电荷区窄
P e小 宽



1.2.2 PN结单向导电性

1. PN结正向偏置 (P接正, N接负)

• PN结变窄，内电场被削弱

• 有利于多子扩散，不利少子漂移

• PN结低阻导通

• 势垒降低

2. PN结反偏 (P接负, N接正)

• PN结变宽，内电场变强

• 不利多子扩散，有利少子漂移

• PN结高阻截止

• 势垒↑

1.2.3 PN结电压与电流关系

$$i = I_s (e^{u/u_T} - 1)$$

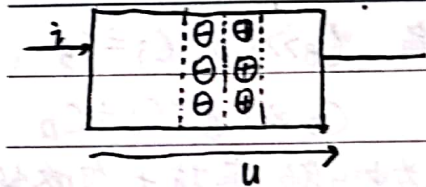
I_s : PN结反向饱和电流

u_T : 热电压 $u_T = kT/q$ $T=300K, u_T=26mV$ (用来估算)

k : 玻耳兹曼常量



扫描全能王 创建



$$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$$

u 为外加电压

$$u = 0 \text{ 时 } i = 0$$

$$u > 0 \text{ 且 } u \gg U_T \quad i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$$

$$u < 0 \text{ 且 } |u| \gg U_T \quad i \approx -I_s$$

1.2.4 PN结反向击穿

反向偏置 \rightarrow 高阻, 截止

加大反向电压, PN结出现大电流

机理	掺杂浓度	PN结	击穿电压	温度系数	形成原因
齐纳击穿	高	薄	$< 4V$	负	PN结的价电子从共价键中激发出来
雪崩击穿	低	厚	$> 6V$	正	电场使PN结中少数载流子碰撞电离, 共价键中价电子

较低反向 U_T 空间电荷区有较强电场

负温度系数 $T \uparrow$, 所需击穿电压 \downarrow

正 $T \uparrow$ $U_{BR} \uparrow$

1.2.5 PN结电容效应

(1) 扩散电容 C_D

PN结正偏 P区非平衡少数载流子积累

正向电压越高 N-P堆积的电子

P区积累的非平衡少数载流子越多

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

(2) 势垒电容 (空间电荷层电量)



非线性, PF级

$$C_j = C_B + C_D$$

a. 正向偏置 U_D , PN结, 电荷量 \downarrow $C_B \downarrow$ 反偏 $C_B \gg C_D$ $C_j \approx C_B$
 b. 反偏 U_D , 电荷量 \uparrow $C_B \uparrow$ 正偏 $C_D \gg C_B$ $C_j \approx C_D$

信号为中低频, 容抗大, 忽略不计

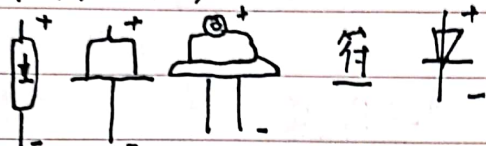
1.3 半导体二极管

• 点型

面型

• 二极管 (封装PN结)

• 外型



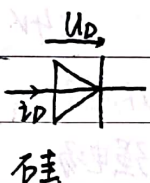
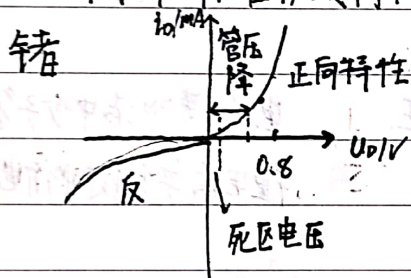
• 插件二极管 (有引脚)

贴片二极管

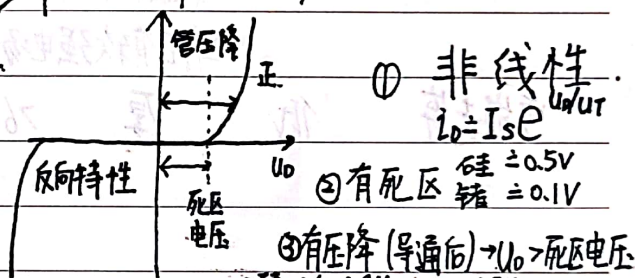
• 硅管

锗管

1.3.2 半导体二极管伏安特性



$$I_D = f(U_D) \quad 1. \text{ 正向特性}$$



管压降 U_D { 硅 0.6~0.8V 锗 0.2~0.3V } 估算 0.7V 0.3V

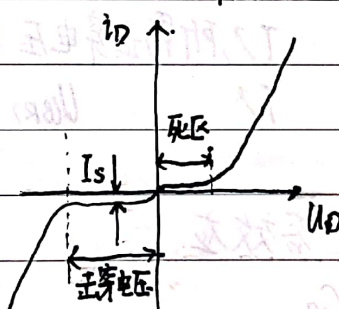
2. 反向

击穿

(1) 反偏区 $|U_D| < U_{BR}$ $|I_D| \approx I_S$

I_S { 硅 $< 0.1\mu A$ 锗 $几 \mu A \sim 几 mA$ }

(2) 击穿区 $|U_D| > U_{BR}$, 反向 I 急剧 \uparrow , 二极管反向



可逆 电击穿 a. 击穿后功耗 $P_D (=|U_D||I_D|)$ 不大 b. $T < \begin{cases} \text{硅 } 150 \sim 200^\circ C \\ \text{锗 } 75 \sim 100 \end{cases}$ c. 降 U_D 仍可工作

不热, 烧坏

1.3.3

$T \uparrow$ { 死区 $U_D \downarrow$ } 相当于区线左移
 { 管 $U_D \downarrow$ } 相同 I_D 下, 管 $U_D \downarrow$
 { 反向饱和 $I_S \uparrow$ } 平均 $T \uparrow 1^\circ C$, I_S 变大一倍



扫描全能王 创建

1.3.4 主要电参数

1. 额定电流，长期允许的平均值。

2. U_{BR} ：能承受的反向最高电压 普通 > 10 优

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

4. 反向电流 I_R 加上规定反向电压测得的 硅 NA级 锗 MA级
越小，单向导电性 \nearrow

5. 正向电压降

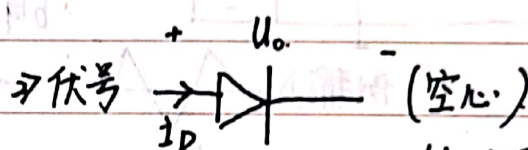
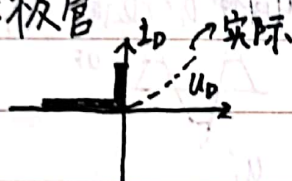
6. 最高工作频率，当 f 过高，单向导电性变差

1.3.5 模型

1. 开关—理想二极管

▷ 伏安

忽略压降

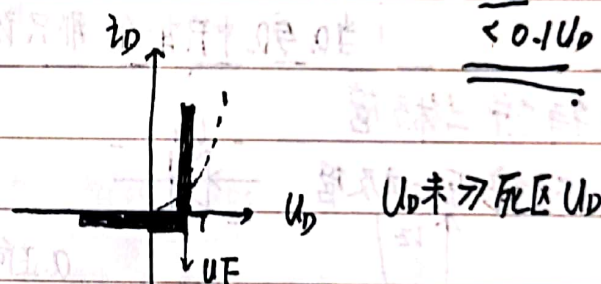
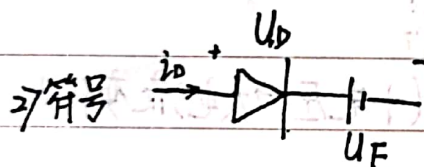


$U_D \gg$ 死区 U_D

$< 0.1 U_D$

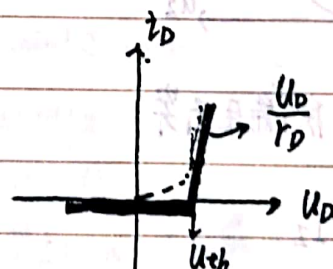
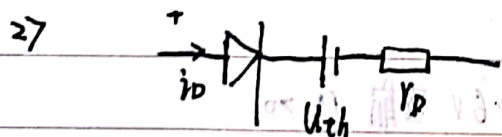
2. 恒压模型

估算认为导通后正向压降恒定



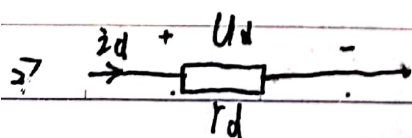
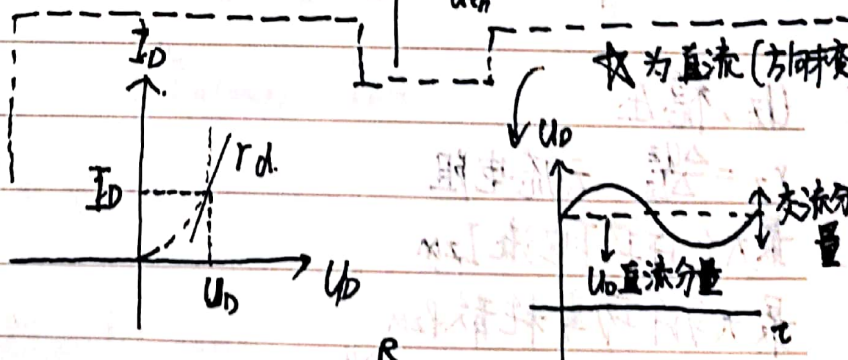
3. 折线模型

▷ 考虑正向压降，又考虑正向电阻

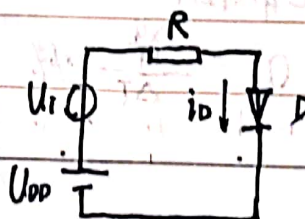


4. 小信号动态模型

▷ 动态电阻 $r_d = \frac{\Delta U_D}{\Delta i_D} \bigg|_{U_D=U_D, i_D=I_D}$



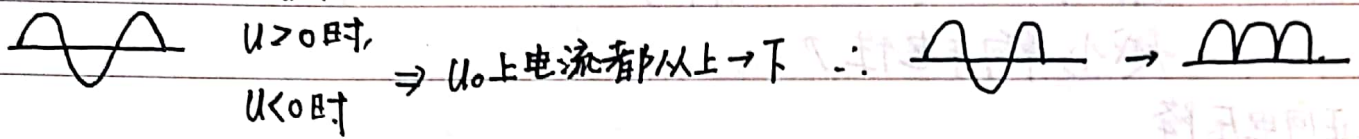
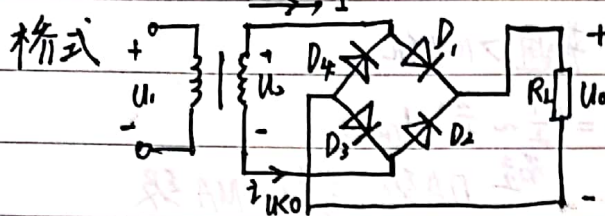
直流交流叠加
= 极管始终导通



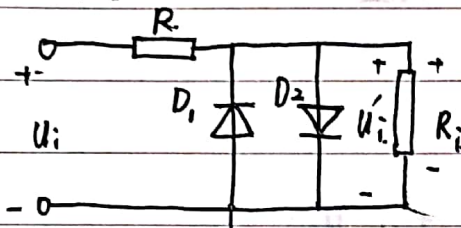
扫描全能王 创建

1.4 半导体二极管应用

1.4.1 整流电路 $U_i > 0$

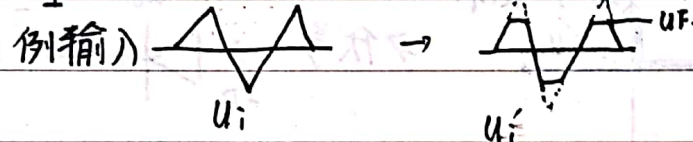


1.4.3 限幅电路



a. 当 U_i 小, 小于死区 U_D , D_1, D_2 截止, $U_i' = U_i \frac{R_i}{R_i + R}$

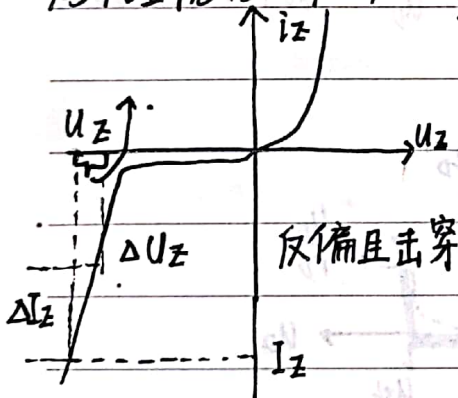
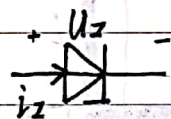
b. 同一时间使 D_1 或 D_2 通, $U_i' = U_F$ (管压降) 硅 0.7 锗 0.3



当 D_1 与 D_2 中只有一个, 那只改变一侧的 U_i'

1.5 特种二极管

1.5.1 稳压二极管



a. 正向与普通管一样

b. 反向击穿特性很快 (小电压 → 大电流变化)

反向击穿状态来稳定直流电压

U_Z , 稳压

$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 动态电阻

最大允许工作电流 I_{ZM}

最大允许功率耗散 P_{ZM}

温度系数 α_u $\alpha_u = \frac{\Delta U}{U} \times 100\%$

$U > 6V$ 雪崩 $\alpha_u > 0$

$U < 4V$ 齐纳 $\alpha_u < 0$

4~6 不定



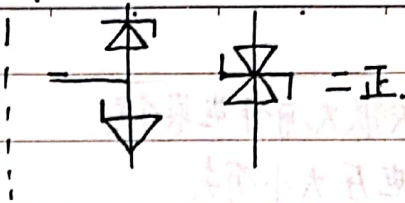
扫描全能王 创建

TL, 一个上, 一个下, 补偿

Date

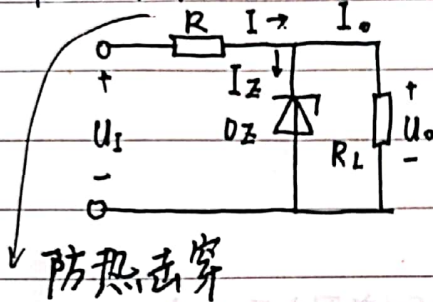
温度补偿 D_{Z1} 本 D_{Z2} 本

- 正 - 负



2. 稳压管稳压电路

(1) 原理: (a) U_I 不稳, 反向变化敏感.



① $U_I \uparrow \rightarrow U_O \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I \uparrow \rightarrow IR \uparrow$
 $U_O \leftarrow \text{-----}$

(b) R_L 变

② $R_L \downarrow \rightarrow U_O \downarrow \rightarrow U_Z \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I \downarrow \rightarrow IR \downarrow$
 $U_O \uparrow \leftarrow \text{-----}$

防热击穿

(2) 计算限流电阻

输出电压 $U_Z \cdot \frac{R_L}{R+R_L} \geq U_Z$, 此时不被击穿才能稳压,

否则 = 极管仍反偏 看成断路

↑ 击穿 热击穿
 $I_{Zmin} \leq I_Z \leq I_{Zmax}$

稳压管正常工作的
 对应的 U 都记为 U_Z (一个值), 反向击穿电压,

$$I = \frac{U_I - U_Z}{R}$$

① $U_I \max$ 有 I_{\max} 此时, I_O 为 I_{Omin} 时 I_Z 最大

$$\frac{U_{I(max)} - U_Z}{R} - I_{O(min)} \leq I_{ZM}$$

$$I_Z = I - I_O$$

$$\Rightarrow R \geq \frac{U_{I(max)} - U_Z}{I_{O(min)} + I_{ZM}}$$

② $U_{I(min)}$ 有 I_{min} ③ I_O 为 I_{\max} I_Z 最小

$$\frac{U_{I(min)} - U_Z}{R} - I_{O(max)} \geq I_{ZM}$$

$$R \leq \frac{U_{I(min)} - U_Z}{I_{O(max)} + I_{Z(min)}}$$

做题: ① 当一个输入电压, 看是否能击穿 (通过分压判断)

② 反向击穿有 U_Z , 正向流过有管压降

③ 两个串: 正 - 负 (注意 U_Z 与正向压降) b. 并, 无论正负 $U_{AB1} = \text{看中的 } U_{\text{管}}$

准

7



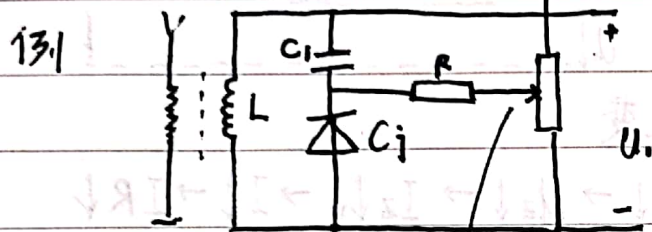
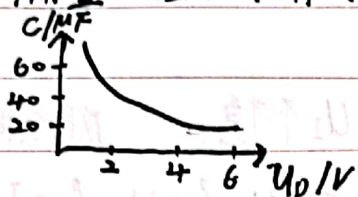
扫描全能王 创建

1.5.2 变容二极管

a. 二极管反向偏置, $\because R$ 很大可作电容使用

b. C 与所加反向偏置电压大小有关

$$U_0 \uparrow \rightarrow \frac{1}{C} \uparrow$$



通过移动变阻器改变反向偏置电压大小

谐振 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$$C = \frac{C_1 C_j}{C_1 + C_j}$$

当 $C_1 \gg C_j$ $C = C_j$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_j}}$$

