

模拟电子技术基础

第一章 半导体二极管及其应用

1. 半导体基础知识

(1)、主要特性:

① 热敏特性: 温度升高时半导体的电阻率下降 (电阻升高)
因此当温度变化过大时, 电子电路稳定性差

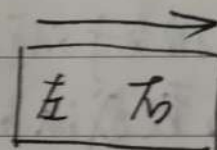
② 光敏特性: 可用于传感器, 光照激发产生光电流

③ 掺杂特性: 在纯净半导体中掺入其他元素后, 导电率增加

(2)、本征半导体 (完全纯净的半导体)

① 半导体材料会发生本征激发, 即其价键中的电子脱离价键成为自由电子, 同时脱离的位置产生一个空穴, 而当电子与空穴相遇时又会复合形成其价键, 故电子和空穴同时产生, 同时复合

当在本征半导体上加从左到右的电场时:



左、右侧同时有受热本征激发的电子和空穴, 受电场作用右侧电子向左运动, 同时与左边的空穴复合, 因此宏观上就像是电子从右向左运动, 空穴从左向右运动 因此半导体的载流子有两种: 自由电子和空穴, 这是半导体和金属中的载流子区别

② 由于自由电子和空穴总或时出现, 成对复合, 因此在本征半导体中总有两种载流子浓度相同

(3)、掺杂半导体—N型半导体

① N型半导体掺杂了少量五价元素 (如 N, P)

② 五价元素外有 5 个电子, 但只能和周围的硅/锗形成 4 个共价键, 多余

的一个电子极易失去而形成自由电子，但此时并非形成带正电的空穴，而是五价原子变为正一价离子，但该离子位置固定无法移动。故在N型半导体中，除硅/锗本征激发形成自由电子和空穴外，五价原子形成自由电子。N型半导体中自由电子比空穴多，电子为多数载流子，简称多子，空穴为少子。掺杂的元素为半导体提供电子，故称施主杂质。

14. 掺杂半导体——P型半导体

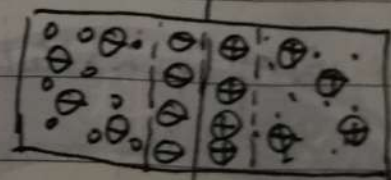
- ① P型半导体中掺杂了三价元素，如B
- ② 三价元素外有三个电子，无法形成4根共价键，此时，三价元素会吸引一个自由电子以形成4根键，此时变为负一价离子，而吸引电子的位置固定空穴，故相当于三价原子形成空穴。P型半导体的载流子中空穴比自由电子多，空穴为多数载流子，简称多子，自由电子为少子。掺杂的元素为半导体提供电子，故称受主杂质。

注意：不论什么掺杂半导体，多子的种类取决于掺杂元素，数目取决于掺杂元素的浓度。少子全部来自于本征激发，少数载流子浓度（本征激发）。N型掺三价可转为P型，P型掺五价可转为N型。

2. PN结的形成与特点

1. PN结的形成过程

半导体的左侧形成P型区，右侧形成N型区



这样一来左侧有高浓度的空穴（多子），右侧有高浓度的自由电子（多子）。由于扩散作用，两边的多子会向对面扩散，导致两种载流子在中间区

成复合。因此在P型区和N型区之间存在一个没有载流子的区域（载流子全部复合了）该区域称为PN结，也称为空间电荷区。空间电荷区的P区为正电，N区为负电。在这个PN结中存在着由N区到P区的电场。该电场会对P区的空穴及N区的电子扩散起到阻碍作用。这种阻碍作用称为势垒。同时该电场对两区的少数运动到另一区域起促进作用。多子扩散形成的电流称为扩散电流，少子形成的电流称为漂移电流。当两电流达到平衡时，PN结稳定形成。

当P与N的掺杂浓度相同时，PN结在P与N的长度相同。浓度不同时，浓度较小的一边长度较长（电荷数相同，浓度小，长度就大）。

(2). PN结的单向导电性

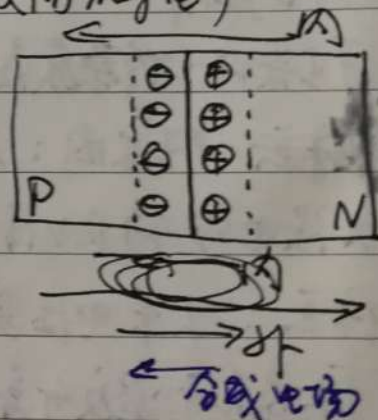
① 单向导电性是PN结最主要的特性。（正向导电，反向不导电）

② PN结正向偏置（正向指电场方向从P到N）

加入外电场后，内电场将会被削弱，势垒降低。

此时有利于多子扩散，不利于少子漂移。

因此呈现导电性。

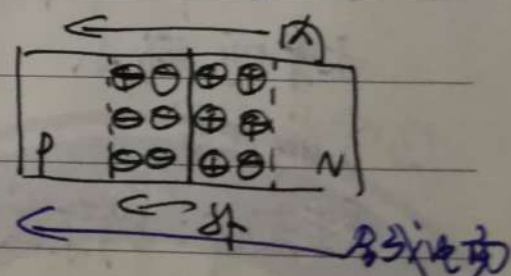


③ PN结反向偏置

加入外电场后，内电场增强，势垒升高。

此时有利于少子漂移，不利于多子扩散。

因此呈现不导电的性质，但实际上由于少子漂



移，仍会形成很微弱的电流。该电流在很小的外电压下达到饱和，称为反向饱和电流。

⑥	掺杂	PN结长度	多子扩散	少子漂移	状态
正偏	降低	变窄	有利	不利	低阻(导通)
反偏	增高	变宽	不利	有利	高阻(截止)

(3). PN结电压与电流的关系

$i = I_s (e^{\frac{u}{U_T}} - 1)$ 其中 I_s 为反向饱和电流. u 为外电压. 当 u 为正时表示正向偏置. u 为负时表示反偏. $U_T = \frac{kT}{q}$. k 为玻耳兹曼常数

U_T 在室温 $T=300K$ 时 $U_T \approx 26mV$

在 $u \gg U_T$ 时 $i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}}$. 在 $u < 0$ 且 $|u| \gg U_T$ 时. $i \approx -I_s$

(4). PN结的反向击穿

① 反向击穿指当PN结反偏电压超过一定值时. 反向电流急剧增加.

② 齐纳击穿

产生条件: 掺杂浓度高. 反向电压较低 (低于 $4V$)

产生原因: 在上述条件下. PN结宽度很窄. 而PN结中电场很强. 该强电场将PN结中原子的中子激发出来. 使少子浓度增大. 反向电流增大

特点: 击穿电压具有负的温度系数 (击穿电压随温度升高而减小)

原因在于温度升高使价电子能量升高. 此时较小电压即可激发中子. 因此击穿电压减小.

③ 雪崩击穿

产生条件: 掺杂浓度低. 反向电压较高 (高于 $6V$)

产生原因: 在上述条件下. PN结宽度较宽. 因此漂移的少子可在PN结中加速. 因运动时间长. 此时少子会与价键中价中子碰撞. 产生新 (碰撞电离)

的载流子。新的载流子重复以上过程。产生越来越多的载流子。反向电流增大
 特点：温度升高后，原子的热运动加剧，电子在运动中与原子碰撞的次数增加，又有更多的电子发生碰撞电离，因此需要更高的反向电压。
 击穿电压具有温度系数。

(5). PN结的电容效应

① 扩散电容 C_D

当PN结正偏时，多子扩散有利，扩散到另一侧半导体的多子称为非平衡少数载流子。距PN结的距离越远，非平衡少数载流子的浓度越低，存在着非平衡少数载流子的浓度梯度。当反向电流增大时，即扩散的多子增多，此时非平衡少数载流子积累，浓度梯度增大。PN结两端电压变化引起电量变化的特性用扩散电容 C_D 表征。即 $C_D = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$

正偏时，扩散电容大；反偏时，扩散电容小，可以忽略

② 势垒电容 C_b

C_b 是由空间电荷层中的电荷量变化而形成的。当正偏电压增大时，PN结变窄，PN结中电量减少。这种电压变化使空间电荷层中电量发生变化的现象是一种电容效应，用势垒电容表征。其大小与PN结的面积成正比，与宽度 L 成反比。反偏时 L 很大，因而 C_b 很小。正偏时 L 很小，因而 C_b 大

③ 结电容

PN结的结电容 C_j 是 $C_b + C_D$ ，正偏时 C_j 以 C_D 为主，反偏时近似等于 C_b 。

3. 半导体二极管

(1). 半导体二极管的结构和类型

半导体二极管以PN结为核心. 在P、N区各引出一电极. 封装
P区电极为阳极(正接). N区电极为阴极(负接)

二极管的分类: 按材料: 硅管和锗管 按结构: 点接触型和平面型

点接触型: PN结的面积小. 结电容小. 适用于高频及小电流电路

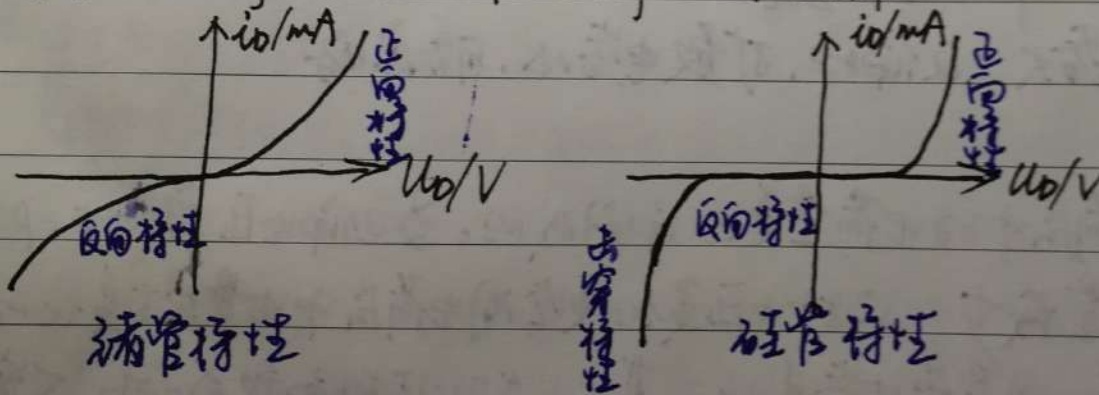
平面型: 当PN结面积较大时. PN结电容较大. 适用于低频及大电流

PN结面积较小时. PN结电容较小. 适用于高频及小电流电路

(2). 半导体二极管的伏安特性

用 U_D 表示二极管两端电压. i_D 表示^{流过}二极管的电流

U_D, i_D 大于0表示正偏. 小于0表示反偏



① 正向特性

非线性: 正向曲线接近于指数曲线 $i_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$

有死区: 当正偏电压较小时. PN结仍较宽. i_D 近似为零. 这一电压区域称为死区. 死区的电压范围称为死区电压. 硅管的死区电压约为0.5V. 锗管为0.1V.

有压降。二极管两端的电压要达到一定程度才可正常工作。正常工作的最低电压称为压降 硅管 $0.7V$ 。锗管 $0.3V$

② 反向特性

反向电流极小。

反向电压较大时会发生反向击穿。当反向电流还不太大时，二极管的功耗 $P_D (= |I_D U_D|)$ 不大，PN结的温度还不超过最高结温，二极管不会损坏。这种击穿是可逆的，称为电击穿。

反向电压继续增大则会令二极管功耗过大，超过允许温度而烧坏。造成二极管永久损坏。不逆，称为热击穿。

(3). 温度对半导体二极管特性的影响

温度升高时，二极管死区缩小，死区电压和正向压降将降低。

温度升高 $10^\circ C$ 左右时，反向饱和电流将翻一番。

设温度为 T_0 时反向饱和电流为 $I_S(T_0)$ ，则当温度变为 T 时

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

(4). 半导体二极管的主要参数

① 额定整流电流 I_F 通过二极管的电流平均值不能超过大于这一数值。

否则会使二极管中PN结中的温度超过允许值而损坏。

② 反向击穿电压 U_{CAR} 二极管能承受的最低反向电压，超过后将被击穿。

③ 最高允许反向工作电压 U_R ($U_R = \frac{1}{2} U_{CAR}$) 管子长期工作时，最高反向工作电压不应超过此值。

④ 反向电流 I_R 加上规定反向电压测得时的电流。反向电流越小，导电性能越好。


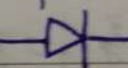
- ⑤ 正向电压降 U_F 通过一定的直流测试电流时的压降
- ⑥ 最高工作频率 f_m 由于PN结具有电容效应, 当使用频率过高时, 单向导电性明显变差

15. 二极管 = 极管的模型

由二极管的伏安特性可知, 二极管是非线性元件。因此在分析电路时需要进行线性化处理, 用分析线性电路的方法来分析二极管电路。在不同情况下建立不同的线性模型:

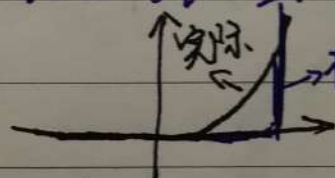
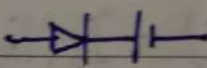
① 理想二极管模型

正偏时视为导通, 反偏时视为开路, 就像开关一样

伏安特性:  模型 \rightarrow 实际 \rightarrow 电路模型:  空心二极管
无死区, 无压降

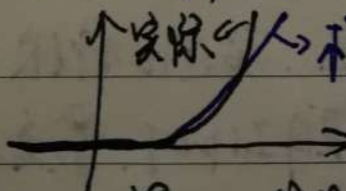
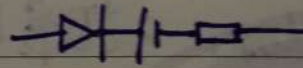
② 二极管的恒压降模型

该模型在理想模型的基础上, 加入了死区和压降, 但当电压达到压降时, 仍视为导通

 实际 \rightarrow 模型 \rightarrow 电路模型: 

③ 二极管的折线模型

在恒压降的模型上, 用折线代替直线。

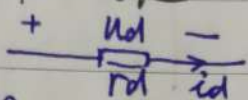
 实际 \rightarrow 模型 \rightarrow 电路模型: 

④ 二极管的小信号模型

小信号模型针对二极管已经导通的情况, 若二极管外加激励为

直流信号加上一个小的交流信号. 则在交流信号的影响下, 二极管的特性会表现出微小变化. 若电压改变了 Δu_D , 电流改变了 Δi_D .

则二极管可用一个动态电阻 $r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$ 来表示.

此时电路模型为 

r_d 的值也可由公式得到 $i_D = I_S (e^{\frac{u_D}{U_T}} - 1)$

$$\therefore \frac{di_D}{du_D} = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{u_D}{U_T}}$$

若在 Q 点处求导, 则 $\left. \frac{di_D}{du_D} \right|_Q = \frac{I_S}{U_T} e^{\frac{u_{DQ}}{U_T}}$

$$\therefore r_d = \frac{du_D}{di_D} \bigg|_Q = \frac{U_T}{I_{DQ}}$$

$$= \frac{I_{DQ} + 1}{U_T} \approx \frac{I_{DQ}}{U_T}$$

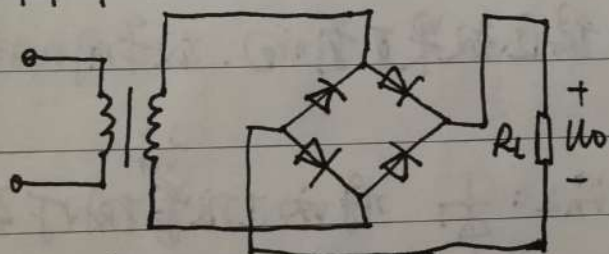
4. 二极管整流的应用

(1) 整流.

整流: 将交流电变为直流电的过程

常见的整流电路: 半波整流电路, 全波整流电路, 桥式整流电路

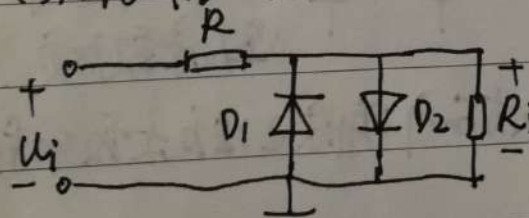
桥式整流:



不论变压器中电压方向如何, 加在电阻两端的电压方向不变

(2) 用于全波电路.

(3) 限幅电路.



当 u_i 较小时, D_1 反偏, D_2 未导通. 此时

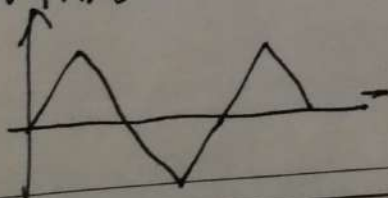
$$R_i \text{ 两端电压为 } u_i' = \frac{R_i}{R+R_i} u_i$$

当 u_i 较大时, D_1 反偏, D_2 导通有压降.

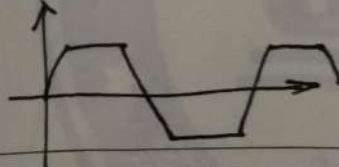
此时 $u_i' = U_F$ (二极管压降).

重要
提示

当 u_i 信号为:



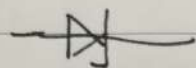
时, 电阻两端信号为:



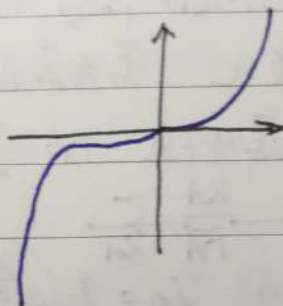
5. 特种二极管

1. 稳压二极管

电路符号:



伏安特性:



特点:

- a. 正向特性与普通二极管类似
- b. 反向击穿特性

稳压管工作于反向

电击穿状态, 用来稳定直流电压

① 稳压二极管的主要参数

稳压管在正向导通时电压

稳压管稳定电压 U_Z 当稳压管两端电压高于 U_Z 时, 两端电压为 U_Z .

动态电阻 $r_z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 电压在 U_Z 附近的斜率

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 $U_Z > 6V$ 时雪崩击穿, α_U 为已. $U_Z < 4V$ 时齐纳击穿.

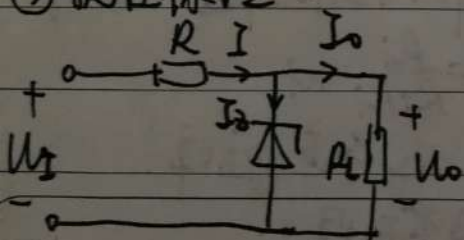
② 具有温度补偿的稳压二极管

由于稳压管具有温度系数, 温度会对稳压效果产生影响. 故常用几种方法减小温度影响

法1: 将一个正温度系数和一个负温度系数的稳压管串联, 效果互相抵消

法2: 将两二极管阴极对阴极或阳极对阳极, 正向导通时, 温度系数相反

③ 稳压原理



R 为限流电阻


该方法可消除温度系数的影响

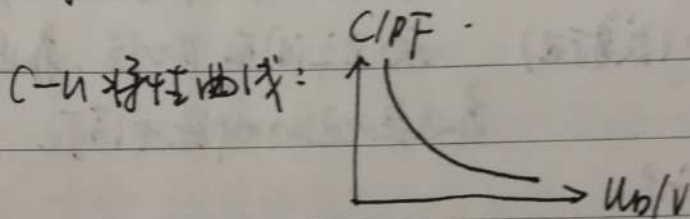
当 U_i 突然升高时，稳压管 U_Z 和 R_L 两端电压增加。由于稳压管的击穿特性很陡，故 I_Z 升高很多。此时，干路电流 I 也升高， R 两端电压升高，使限流电阻分压增大， R_L 两端电压下降，起到稳压作用。
当稳压管两端电压小于稳定电压时稳压管视为开路。

④ 限流电阻的计算

为保证稳压管正常工作，限流电阻必须在一定范围内。
首先稳压管两端电压必须被击穿，即 $U_Z \leq U_i \frac{R_L}{R+R_L}$
其次稳压管不能被烧毁击穿

(2) 变容二极管

电路符号： $\nabla \neq$



所以通过调整变容二极管两端电压改变其电容，从而改变电路的谐振频率

课后习题：

- 1.1. $I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1)$ 当 $U_D = -2V$ 时， $I_D \approx -10pA$
 当 $U_D = 0V$ 时 $I_D = 0pA$ ，当 $U_D = +0.6V$ 时 $I_D = 10.5A$ 。
 $I_D = 2A$ 时， $\frac{U_D}{U_T} = 2.42$ ， $\therefore U_D = 0.56V$
 1.3. $U_D = U - 2 = 2\cos(\omega t) - 2$ 因此二极管无电流通过，反向峰值电压为 $4V$
 $U_D' = 2\cos(\omega t) - 0.7$ 因 $\cos \omega t > \frac{0.7}{2}$ 时导通，反向峰值为 $2.7V$