

第1章 半导体二极管及其应用

一. 半导体基本知识

1. 基本知识

物体根据其导电能力(电阻率)分

导体	电阻率 $< 10^{-7} \Omega \cdot \text{cm}$
半导体	
绝缘体	电阻率 $> 10^8 \Omega \cdot \text{cm}$

半导体: 电阻率约在 $1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm} - 1 \text{ G}\Omega \cdot \text{cm}$ 范围内, 但温度、光照及掺杂因素都会改变半导体材料的导电特性。

最常用的半导体材料

硅
锗

2. 主要特性

- ① 热敏特性: 当温度升高时, 多数半导体材料的电阻率下降。
温度变化过大, 导致电子电路稳定性差。
- ② 光敏特性: 光敏电阻, 光敏二极管, 光敏晶体管
- ③ 掺杂特性: 在纯净的半导体中掺入微量其它元素材料后, 其导电率将增加几百万至几百万倍。

3. 本征半导体

本征半导体就是完全纯净的半导体。

本征激发使空穴和自由电子成对产生; 相遇复合时, 又成对消失。

温度 T 一定时

{	空穴浓度 (n_p) = 电子浓度 (n_n)
	$n_p \times n_n = k(T)$ ($k(T)$ — 与温度有关的常数)

在半导体中有两种载流子：带正电的自由电子、带正电的空穴

本征半导体的特点：电阻率大、导电性能随温度变化大

本征半导体不能在本征半导体器件中直接使用

4. 掺杂半导体

在本征半导体硅或锗中掺入微量的其他价态元素后所形成的半导体。

根据掺杂的不同，掺杂半导体分为：N型半导体、P型半导体

A. N型半导体

a. 掺入五价杂质元素（如磷、砷）的本征半导体。

b. 产生大量的（自由）电子和正离子。

c. 电子是多数载流子，简称电子；空穴是少数载流子，称少子。

d. $n_p \times n_n = k(T)$

e. 因电子带负电，称N型半导体为N(negative)型或电子型半导体。

f. 掺入的杂质能给出电子，称为施主杂质。

B. P型半导体

a. 掺入少量三价杂质元素（如硼）。

b. 产生大量的空穴和负离子。

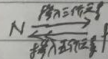
c. 空穴是多数，电子是少子

d. $n_p \times n_n = k(T)$

e. 因空穴带正电，称P(positive)型或空穴型半导体。

f. 掺入的杂质能接受电子，称为受主杂质。

C. 掺杂半导体的类型：



掺入三价杂质浓度大于五价时，N→P

掺入五价杂质浓度大于三价时，P→N

D. 掺杂半导体中本征激发仍然存在

电子——数目取决于掺杂多少

空穴——数目主要取决于温度

注意：半导体中电子和空穴总数相等，宏观呈电中性。

二. PN结的形成与特点

1. PN结的形成

以N型半导体为基片，通过半导体扩散工艺，使半导体的另一面形成P型区，另一边形成P型区。在杂质浓度的作用下，两边电子互相扩散。在P区N区交界面上，靠P区一侧不能移动的负离子与PN结区称为空间电荷层。

PN结内形成内电场，一方面阻碍多子的扩散，另一方面加速少子的漂移，形成动态平衡。

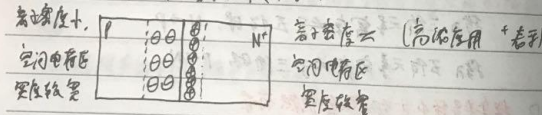
当扩散与漂移作用平衡时：

a. 通过PN结的净电流为零。

b. PN结的厚度一定（约几微米）。

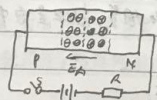
c. 接触电阻一定（约几欧姆）。

当N区和P区的掺杂浓度不同时：



2. PN结的单向导电性

A. PN结正向偏置



当开关闭合时，合成电场被削弱，PN结变窄，电子进行扩散运动，PN结呈现低阻、导通状态。

B. PN结反向偏置

合成电场增强，PN结变宽，不利于电子扩散，有利于电子漂移，PN结呈现高阻、截止状态。

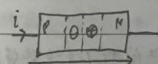
因为浓度主要与温度有关，反向电流与正向电流几乎相等，的电流称为反向饱和电流，记为 I_s 。

C. 总结

PN结的主要特性：单向导电性

状态	PN结	电阻	电压	电流
正向	降低	变窄	正向	正向电流
反向	增高	变宽	反向	反向电流

3. PN结的电压与电流关系



$$i = I_s (e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad \text{式中 } U_T (\text{热电压}) = \frac{kT}{q}, K \text{ 为玻尔兹曼常数}$$

T 绝对温度。

在室温 ($T=300K$) 时， $U_T \approx 26mV$ 。

当 $U=0$ 时， $i=0$

当 $U>0$ ，且 $U \gg U_T$ 时， $i \approx I_s e^{\frac{U}{U_T}}$

当 $U<0$ ，且 $|U| \gg U_T$ 时， $i \approx -I_s$

4. PN结的反向击穿

当PN结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。

A. 齐纳击穿

条件 { 掺杂浓度高, PN结薄
在较低反向电压下, 空间电荷区就有较强烈的电场。

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 { 击穿电压 < 4V
击穿电压具有负的温度系数。

负温度系数: 当 T ↑ 时, 所需的击穿电压 (U_{BR}) ↓。

正: T ↑, U_{BR} ↑。

B. 雪崩击穿

条件 { 掺杂浓度低, PN结厚
需要更高的反向电压才能在空间电荷区产生较强的电场。

机理: 电场使PN结中的少数“碰撞电离”共价键中的价电子……

特点 { $U_{BR} > 6V$
 U_{BR} 有正的温度系数。

C. 总结

掺杂浓度	PN结	U_{BR}	温度系数	形成原因
较高	薄	< 4V	负	价电子受激发
雪崩	厚	> 6V	正	外加碰撞电离

5. PN结的电容效应。

A. 扩散电容 C_D

PN结正偏, 自由电子从N区扩散至P区, P区电子少。这些少子

与少数载流子产生的少子不同, 称为非平衡少子。

内电场 ΔU 变化时, P区积累的平衡少子浓度分布图:

PN结正向偏置电压越高, 积累的平衡少子越多。

电荷电势与扩散电容 C_D 特征: $C_D = \frac{dQ}{dU}$

B. 势垒电容 C_B

a. 当PN结正向偏置电压升高时 $U \rightarrow 0.1$
PN结电容 ($L \sim L$), 空间电荷层中的电荷量减少 ($\Delta U > 0$)

b. 反向偏置 $U \rightarrow -0.1$
势垒电容 ($L \sim L$) 增大 ($U \rightarrow -0.1, \Delta U > 0$)

PN结的偏置电压能使空间电荷层中电荷量发生变化。

这种电容效应用势垒电容 C_B 表征。

C. 小结

PN结的结电容 C_j : $C_j = C_D + C_B$

当PN结正向偏置: $C_D \gg C_B$, $C_j \approx C_D$

反向偏置: $C_B \gg C_D$, $C_j \approx C_B$

PN结的结电容 C_j 是非线性电容, 大约与偏压 (PF) 呈反比。

当偏压与频率较低时, 结电容的影响较小, 可忽略它的影响。

Date

三. 半导体二极管

1. 半导体二极管的结构和类型

二极管就是一个封装的PN结。

类型: { 点接触型 (材料) { 硅管
{ 平面型 { 锗管

符号:

2. 半导体二极管的伏安特性

硅管 $i_D \sim I_s e^{U_D/U_T}$

锗管 $i_D \sim I_s e^{U_D/U_T}$

A. 正向特性

a. 非线性: 整个特性曲线近似地呈现指数关系形式 $i_D \sim I_s e^{U_D/U_T}$

b. 有死区 (i_D 为 0 的区域)

死区电压约为 { 硅管 0.5V
 { 锗管 0.1V

C. 有压降 导通后 (U_D 为死区电压后)

No. Date

$\frac{d i_D}{d U_D} \propto I_s e^{U_D/U_T} \cdot \frac{1}{U_T} \approx \frac{i_D}{U_T}$

即 U_D 升高, i_D 急剧增大

管压降 U_D 约为 { 硅: 0.6~0.8V
 { 锗: 0.1~0.3V

B. 反向特性

a. 反偏压 当 $|U_D| < U_{(BR)}$ 时, $|i_D| \approx I_s$

I_s { 硅管 < 10μA
 { 锗管 1μA 到 1mA

b. 击穿压 当 $|U_D| > U_{(BR)}$ 时, 反向电流急剧增大

二极管分为正向击穿。

根据击穿可逆性分为

(1) 电击穿 { 损耗 $P_D = I_D U_D$ 不大
 { PN结的温度 < 允许的最高结温
 { 降低反向电压, 二极管仍能正常工作。

(2) 热击穿: PN结被破坏, 永久损坏。

3. 温度对半导体二极管特性的影响

A. 温度上升时

死区电压减小, 正向管压降降低。

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

即温度每升高 $1^\circ C$, 管压降降低 (2~2.5)mV

B. 温度升高, 反向饱和电流增大

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

即每升高 10°C , 反向饱和电流增大一倍。

C. 半导体二极管的主要参数

A. 额定电流 I_F : 管子长期运行所允许通过的电流平均值。

B. 反向击穿电压 U_{BR}

C. 最高允许反向工作电压 U_R

$$U_R = (\frac{1}{2} \sim \frac{2}{3}) U_{BR}$$

D. 反向电流 I_R

硅管与 (1A) 级, 锗管与 (μA) 级

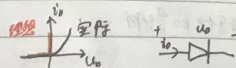
I_R 越小, 管子的单向导电性越好

E. 正向电压降 U_F

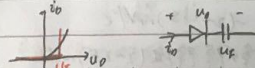
F. 最高工作频率 f_M

5. 半导体二极管的模型

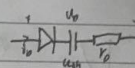
A. 开关模型 - 理想二极管



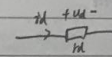
B. 恒压模型



2. 折线模型



3. 符号动态模型



四. 半导体二极管的应用

1. 在整流电路中的应用

整流: 将交流电变成直流电的过程

整流电路: 完成整流功能的电路

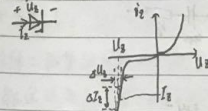
半波整流电路 { 半波整流电路
全波
桥式

2. 在检波电路中的应用 (无线电路)

3. 限幅电路

五. 稳压二极管

1. 稳压二极管



特点: 正向特性与普通二极管类似, 反向特性稳压

A. 主要参数

a. 稳压电压 U_Z

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

c. 最大允许工作电流 I_{ZM}

d. 最大允许功率耗散 P_{ZM}

e. 温度系数 α_U : 定义: 温度每变化 1°C 时 U_Z 的相对变化率。

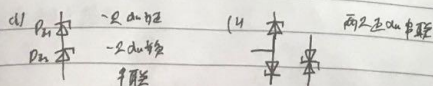
$$\alpha_U = \frac{\frac{\Delta U_Z}{U_Z}}{\Delta T} \times 100\%$$

$U_Z > 6\text{V}$ 管子出现雪崩击穿, $\alpha_U < 0$

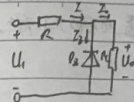
$U_Z < 4\text{V}$, 二极管击穿, $\alpha_U > 0$

$4\text{V} < U_Z < 6\text{V}$, α_U 可正可负, 可能为 0

具有温度补偿的稳压管



B. 稳压管稳压电路



R - 限流电阻

a. 稳压原理

(1) U_1 不稳定: $U_1 \uparrow \rightarrow U_0 \uparrow \rightarrow U_Z \uparrow \rightarrow I_Z \uparrow \rightarrow I_F \uparrow \rightarrow U_2 \uparrow$

$U_0 \downarrow$

(2) R_L 改变: $R_L \downarrow \rightarrow U_0 \downarrow \rightarrow U_Z \downarrow \rightarrow I_Z \downarrow \rightarrow I_F \downarrow \rightarrow U_2 \downarrow$

$U_0 \uparrow$

b. 限流电阻计算

稳压管稳压电路的条件: $U_1 \frac{R_L}{R_L + R_Z} > U_0$ (保证稳压管稳压)

稳压管稳压电路的条件: $I_Z(\min) \leq I_Z \leq I_Z(\max)$

当 U_1 最小时, I_Z 值最大, 此时为 I_Z 最大值; I_Z 最大

小

小

大

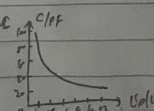
大

限流电阻需满足: $\frac{U_{1(\max)} - U_Z}{I_{Z(\min)} + I_{L(\max)}} \leq R \leq \frac{U_{1(\max)} - U_Z}{I_{Z(\max)} + I_{L(\min)}}$

2. 变容二极管


符号: 变容二极管

C-U 特性曲线




特点：当二极管的偏置时，因电阻很大，可作电容作用
电容量与所加的偏置电压的大小有关。

其他特殊二极管

A. 发光二极管 LED 

正向时，发光二极管电子扩散，复合时，一部分能量会产生光子。

正向压降大约 1.6~2V。

B. 光敏二极管：

反向偏置时，光电二极管会产生光电流，光电流一般小于 $1\mu A$ 以上。

C. OLED 有机发光二极管