

- 1.模拟电子技术 是 电子技术的一个分类。
- 2.模电连续，数电不连续。
- 3.工程性强，近似多，精度要求不高。市场上卖的电阻精度最高百分之1。
- 4.数电的实验比模电简单，抗干扰能力强。
- 5.典型电路结构+电路分析方法：a.直流交流分开：叠加原理；b.交流：等效原理。
- 6.真空电子管：大功率、可靠性低；半导体管/晶体管：有高频的、功耗低的  
集成电路：上亿个晶体管
- 7.自然界中很多的物理量，如温度，压力，都是连续变化的，属于模拟信号，功率小、有噪声，转化成电信号，做放大，做滤波。然后功率放大器，执行。
- 8.或者前端获得的模拟量，转换为数字量，交给计算机处理，交给数模转换器，转换为模拟信号，再执行。

## 前三章 电路 《电路原理》

## 第四章 模拟

## 第五章 电压电流放大 难点

## 第六章 功率

## 第七章 集成内部分立元件

## 第八章 集成电路 运算

## 第九章 直流电源如何产生

### 4.1PN 结

#### 1.半导体

##### 1).物理特性

①.温度升高，或受到光照时，价电子能量提高，冲破共价键束缚，纯净的半导体导电能力显著升高。

②.纯净的半导体加入微量杂质元素，导电能力增高。

## 2).晶体结构

①.惯性核：核与内层电子构成的整体，亦即《原子物理》中的原子实，相对不动；以突出其外层的价电子的作用。

②.金刚石结构，与周围四个顶点的原子间，通过共价键联系。【为作图方便，可画成十字形平面结构】

## 2.导电原理

### 1).本征半导体【纯净的、不含杂质元素的半导体】

①.0K 时候绝缘体，室温导电。

②.载流子：带电荷+外加电场后可定向移动的 carrier；比如空穴和自由电子。

③.空穴：价电子挣脱共价键的束缚，留下一个空位。称为电子空穴对。【空穴能否定向移动，决定了它是不是载流子：空穴的运动实质上是价电子填补空穴形成的】

④.本征激发：半导体中共价键分裂产生电子空穴对的过程。【温度/光/射线】

⑤.一定温度下，电子和空穴成对出现和消失(激发后的电子运动一定时间后损失能量，填补新的空穴，恢复共价键，称为载流子的复合)，电子空穴对的产生和复合达到动态平衡，浓度不变且相等。

⑥.本征的电导体电导率小，且受光和温度影响甚大，不能用于制造半导体器件。

### 2).杂质半导体

①.常见的杂质元素：

**五价**：N 型半导体；自由电子浓度 > 空穴浓度；电子：多数载流子；空穴：少子(对电路一般是危害，反向微电流)【N=Negative,即 5 价元素相对于+4 价多了一价，就得多个负电子；而其固定离子又是正的】

a.第 5 个价电子，只受它的原子核束缚，不受共价键束缚(没它的位置了/没有多余的空穴了)，在室温下得到足够多能量的激发为自由电子。

b.原子核失去 1 个电子，正离子，但不能正向移动，不是载流子，不参加导电，只是保持电中性。

**三价**: P 型半导体; 自由电子浓度<空穴浓度; 电子: 少子; 空穴: 多子。

【P=Positive,即 3 价元素为了与+4 价元素的惰性核一致, 将引入一个正电荷; 但其固定离子是负的】

a.每掺一个 3 价元素, 多一个空位。能级一样, 别的共价键上的电子可来填补。

b.原子核获得 1 个电子, 负离子, 也不能移动, 不是载流子, 不参加导电, 只是保持电中性。

【这个很奇怪: 与之前的不同, 我们并不能形象地接受原子核“获得了”负离子这一事实。——5 价元素失去了一个电子成为正离子好说, 但 3 价元素是怎么获得一个电子的? 这么说吧, 这完全是为了理论上的自圆其说: 空穴怎么就带正电了呢? 我们从来就没说空穴带了正电! 这就是关键: 空穴就是空的穴, 是个尚未占有的位置, 没有电子来, 也没有正电荷来, 不带电。但是一个共价键里只有一个电子, 它相对于有两个电子的共价键, 相当于有一个正电子跑来中和了一个价电子, 因此整个体系要想成电中性, 需要引入一个负电子给固定的 3 价的元素的惰性核上。】

【当然你也可以这样想, 假设原先均+4 价的惰性核, 对比 Si 或 Ge 的标准模型: 对于 3 价元素, 空穴位置上引入一个+(准确地说是引入了+的地方变成了空穴), 则对应位置的+4 价的惰性核需引入一个电子, 变成+3 价, 即符合现实; 对于 5 价元素, 空穴早已被电子占满, 价电子只能游离在共价键之外的空间, 即相对于 Si 或 Ge 的标准模型, 在之外多引入了一个-, 此时需为对应的+4 价的惰性核引入一个正电荷, 将其变为+5 价, 以符合电中性和现实】

②.多子浓度主要取决于杂质浓度, 少子浓度主要取决于本征激发, 与温度有关。

【多、少子也均不完全取决于对应过程, 比如杂质浓度会掩盖一部分本征激发的效果, 因为杂质产生的多子, 也会填补本征激发的空穴; 而杂质产生的空穴, 也会作为母性去取抢夺、吸引和占有本征激发的电子。同样, 本征激发也会贡献少许多子, 这倒是纯净的。】

### 3).漂移运动与扩散运动

a.漂移运动: 电场力+两种载流子=分别定向运动。

漂移电流: 由空穴顺电场方向、电子逆电场方向, 二者的同向电流, 相加合成。

b.扩散运动: 同类载流子的浓度差。【只针对同类载流子, 空穴和电子非同类】

扩散强度: 由同类载流子的浓度梯度决定。

### 3.PN 结的形成

多子的扩散+少子的飘移:

①.PN 交界处, 浓度差引起载流子(多子)的扩散中和。【主要表现为 P 的多子和 N 的多子相互渗透并抵消——因为 P 的多子对于 N 来说是 N 的少子, 这就产生了同类载流子的浓度差, 将引起扩散运动; 但一般我们只考虑 N 的多子向 P 区渗透, 与 P 区的多子中和, 因为我们熟悉电子这个东西, 而空穴被认为是被动被填补的。——所以我们一般只考虑单向过程, 且是两个意义上的单向——针对扩散, 不考虑 P,N 区本征激发的少子的扩散运动(因为如果你考虑了 N 区的多子的话, 就不用考虑 P 区的少子了, 它俩是一类载流子), 而多子也只考虑 N 区的多子】

②.多子扩散结果形成自建电场(由 N 区固定的正离子惯性核指向 P 区的负离子)。

③.空间电荷区(即 PN 结, 只有固定的惯性核, 没有多子存在)变宽→(P,N 区各自的多子均)浓度梯度减小、自建电场变强→扩散变弱(N 区的多子被自建电场拉回)、漂移开始变强(N 区的少子顺着自建电场到 P 区, 去补充和作为 P 区的多子, 提高 P 区的那些被 N 区的多子扩散来中和得差不多了的多子的浓度)。

④.扩散漂移动态平衡, 空间电荷区固定电荷数不再变化, 空间电荷区宽度不再增加。(N 区的多子和少子去中和、补充 P 区的多子, 数量大致相当; 通过交界面净载流子数=0; P、N 区的多子浓度不再变化)。

空间电荷区, 是载流子缺少的地区, 所以电阻率很高, 是高阻区, 称作耗尽层、势垒区、阻挡层、PN 结。

如果 P,N 区掺杂浓度不同, 两个区域里的空间电荷区宽度不相同, 掺杂浓度高的那区多子密度大, 固定离子数目小, 空间电荷区窄, 形成不对称的 PN 结。

#### 4.PN 结的特性

##### 1).单向导电性

①.外加正向电压/PN 结正向偏置(P 区接电源正极):

P 区多数载流子为正子, 被迫去与 N 区的多子电子中和, 空间电荷区变薄, 自建电场变弱, 对多子扩散阻止变少, 电阻变小, 扩散电流变大, 导电(∵导电是多子飘移的结果; 但在这里称为扩散电流)。

不大的电压, 产生相当大的 PN 结正向电流。(直流电阻小)

外加电压的微小变化, 扩散电流变化较大。(交流电阻小)

②.反向电压:

载流子被拉回来。加强内电场。扩散变弱，少数载流子形成漂移电流，且与外加电压无关(少子浓度由本征激发决定)，通常叫做反向饱和电流。【注：反向电流对于外电场和内电场而言，也是正向的，即 P,N 区的少子漂移电流也朝着 PN 结自建电场方向：N→P；它们和多子运动方向相反，但构成的电流方向一致。可能反向电流一词，仅仅来源于反向电压】

电流很小，电压大，电阻大。如果忽略不计反向电流，则 PN 结截止，电阻无穷大。

如果电压非常大，击穿，正向电流。若有焦耳热，烧坏。

## 2).伏安特性

理论导出 $I=I_S(e^{qU/kT} - 1)$ ，其中  $I$  为流过 P 区、N 区、PN 结的电流； $U$  本为外加电压，但由于 P、N 区的电阻很小，因此认为  $U$  全加在 PN 结上，即 PN 结上的电压。 $I_S$  为反向饱和电流， $k$  为玻尔兹曼常数， $q$  为电子电量 $>0$ 。

令 $U_T=kT/q>0$ ，称为温度的电压当量，是温度  $T$  的函数。室温时， $T\approx 300K$ ，算得此时 $U_T\approx 26mV$ 。此时 $I=I_S(e^{U/U_T} - 1)$ 。

①.当  $U \gg U_T$  时， $I \approx I_S \cdot e^{qU/kT}$ ，指数规律。

②.当  $U \ll -U_T$  时， $I \approx -I_S$ ，即加反向电压时，PN 结只流过很小的反向电流。

## 3).反向击穿

当  $U \ll -U_T$  时，实际与理论不符：当  $U < U_{BR}$ (反向击穿电压)时，PN 结的反向电压 $|U|$ 只需增大很小，对应的反向电流 $|I|$ 急剧增大。

①.雪崩击穿：掺杂浓度低，再加上反向电压，加速区间长，(P 区)漂移过 PN 结的少子(电子)有足够大的动能，将(N 区)共价键中的电子撞出来，形成新的电子空穴对。

②.齐纳击穿：掺杂浓度高，空间电荷区薄，只需加小的反向电压，即可将电子从 P 区的共价键中拉出。

电击穿，可逆；热击穿，不可逆。

## 4).电容效应

①.势垒电容 $C_B$ ：多子充放电。【反向偏置明显】

空间电荷区的正负离子和空间，相当于介质；载流子(多子)相当于(空间)电荷。PN 结上外加电压大小和极性发生改变时，多子进入或远离 PN 结，中和或 reveal 部分空

间电荷，空间电荷区变薄或变厚，对应多子的充电和放电。【正比于空间电荷区宽度，反比于其面积。反向电压时(变厚时)较明显】

②.扩散电容 $C_D$ ：少子充放电。【正向偏置明显】

正向电压，N区的多子电子，到P区后变为P区的(非平衡)少子，它与P区的多子空穴的复合，有个过程，近的空穴被填满了，远离空间电荷区的还没被填满，形成了P区少子的浓度梯度；它与N区少子空穴的浓度梯度，均是以靠近PN结端浓度高，远离端浓度低。【非平衡少子，一方面指的是浓度梯度；另一方面指的是“非己成分”，因为P区的少子本来是没有浓度梯度的、各处平衡的，只有过来的N区的多子，这一部分少子，作为舶来品，P区总少子中的一部分，才是不平衡的、有浓度梯度的】

高频电压，才考虑 $C_j = C_B + C_D$ ，因 $C_j$ 很小。

## 4.2 半导体二极管

### 1. 结构&类型

一个PN结、两个P,N区半导体、电极引线、管壳。

符号：阳极(Anode)=P区= $\triangle$ 底部；阴极(cathode)=N区= $\triangle$ 头部+横。

### 2. 伏安特性

与PN结的理论伏安特性稍有不同：不完全符合 $i_D = I_S(e^{qu_D/kT} - 1)$ ，其中的符号 $I, U$ 用 $i_D, u_D$ 表示，D代表二极管(double)，而不再是PN结了。

1).正向、反向电压较小时，正向反向电流近乎=0，正向多了个死区电压 $U_r$ ：Si: 0.5V/Ge: 0.1V；反向也有个反向击穿电压 $U_{BR}$ 。

2).正向电流较大时，曲线接近直线，因为PN结此时电阻较小，与之串联的半导体体电阻，电极引线等的电阻，成为主要部分，而且都是线性元件。

3).对温度敏感，温度升高时，正向特性曲线左移、反向特性曲线下移。

### 3. 二极管的等效电路

1).理想的等效电路：一个开关，D相当于S。

2).考虑正向压降的等效电路：一个有条件的开关/与电压源串联的开关： $u_D > U_D = \text{Si: } 0.7\text{V/Ge: } 0.2\text{V}$ 时，二极管正向导通。【相当于取线性段的正向压降 $u_D$ 的平均值为 $U_D$ ，大写表示平均值，下一段也将介绍】

3).利用二极管的单向导电性,完成交流电到直流电的转换:整流电路。

单相桥式全波整流电路:设交流(小写)电源  $u$  的  $U_m = \sqrt{2}U$ ,  $U$  为有效值。若  $U_m \gg U_D$ , 则可用理想二极管等效电路来分析。分析结果:

负载  $R_L$  两端的输出电压  $u_o$  的平均值  $U_o$  (大写表示平均值), 为  $U_o = 0.9U$ , 也即直流成分的电压值。同样的道理,  $i_o$  的平均值  $I_o = \frac{U_o}{R_L} = 0.9 \frac{U}{R_L}$ 。

过每个二极管。