### 补充: PN结和PN结二极管

#### core concepts:

- 1. 常用半导体材料、本征半导体
- 2.掺杂、多子和少子
- 3. 价带和导带、电子电流和空穴电流
- 4.PN结
- 4.1 耗尽区和内建电场(内建电位差)
- 4.2 扩散和漂移
- 4.3 正向偏置和反向偏置
- 4.3.1 正偏导通
- 4.3.2 反偏截止
- 4.3.3 反向击穿: (热击穿) 、齐纳击穿和雪崩击穿
- 5. 二极管的伏安特性
- 5.1 指数律
- 5.2 直流电阻和微分电阻

### 器件基础:半导体材料

Si、Ge、GaAs、SiC等是常用的半导体材料

纯净半导体(本征半导体)在热运动下部分价带中的电子会跑到导带中,从而产生自由电子和空穴,室温下可以导电(电子和空穴时刻产生,也时刻复合)

电导率直接取决于自由电子和空穴的数目  $\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h)$  p = n

为了提高半导体的导电性,可以通过掺杂(doping)的方法,向本征半导体中添加杂质(5价或者3价),使得其内部自由电子数目或者空穴数目增加,从而提高导电性。

- 如果掺杂五价元素,会使得半导体内的空穴数目多于自由电子,则称为P型半导体(Positive):此时 $p\gg n$   $\sigma\approx ep\mu_h$
- 如果如果掺杂半导体内的自由电子数目多于空穴,则称为N型半导体(Negative):此时 $n\gg p$   $\sigma\approx en\mu_e$  可以通过调整掺杂浓度实现电导率的调整。

PS: 多子和少子, 多数载流子称为多子, 反之为少子

### 电子电流和空穴电流:

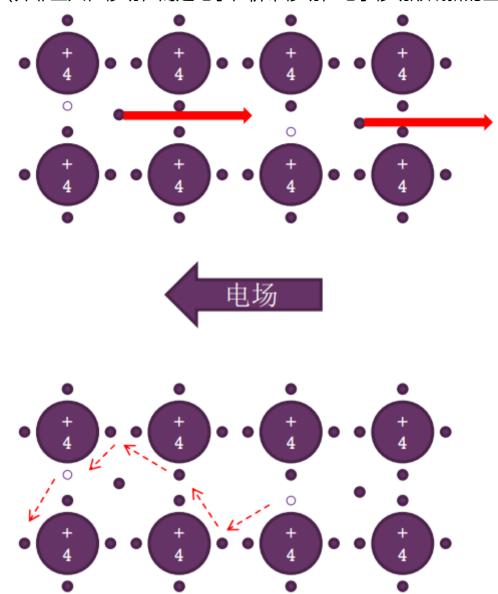
### 价带和导带:

价带(Valence Band)是指在固体中,电子在低能级状态下所占据的能带。在晶体中,原子间的相互作用形成了能带结构,其中价带是最低的一个能带。价带中的电子通常与原子核紧密地结合在一起,难以自由移动。因此不能随意移动,不能产生定向电流导带(Conduction Band)是位于价带之上的能带,其能级高于价带。在导带中,电子可以相对自由地移动,可被激发到更高的能级或导电。导带中的电子对于电子传导和导电性质至关重要。当外部能量(如热激发或电场)作用于固体时,导带中的电子可以被激发到更高的能级,形成电子流,导致电流的传导。

### 电子电流和空穴电流:

在一片硅晶体两端施加电压(电场)后导带内的电子反电场方向移动,形成电子电流electron current;价带内有空穴,空穴邻近的价带电子受到电场作用,反电场方向移动到空穴位置,在原位置形成新的空穴,犹如空穴在价带朝电场方向运动,故而称其为空穴电流hole current

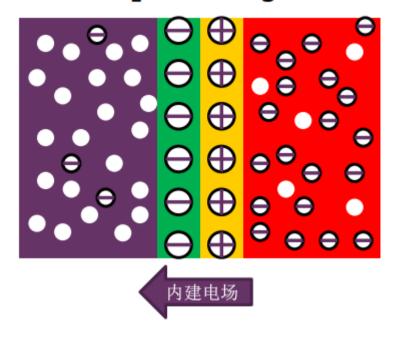
(并非空穴在移动, 而是电子在价带移动, 电子移动形成新的空穴) 晶体内的总电流为电子电流和空穴电流之和。



### PN结:

因为N型半导体和P型半导体粒子浓度的不同,两者接触后,接触面附近会形成PN结 (PN Junction) ,并可以因此形成二极管 (diode) 特性

### 耗尽区 **Depletion region**



### 耗尽区和内建电场、扩散和漂移:

扩散:指载流子从高浓度区向低浓度区扩散的过程,浓度差导致势差,产生了力,推动载流子运动。

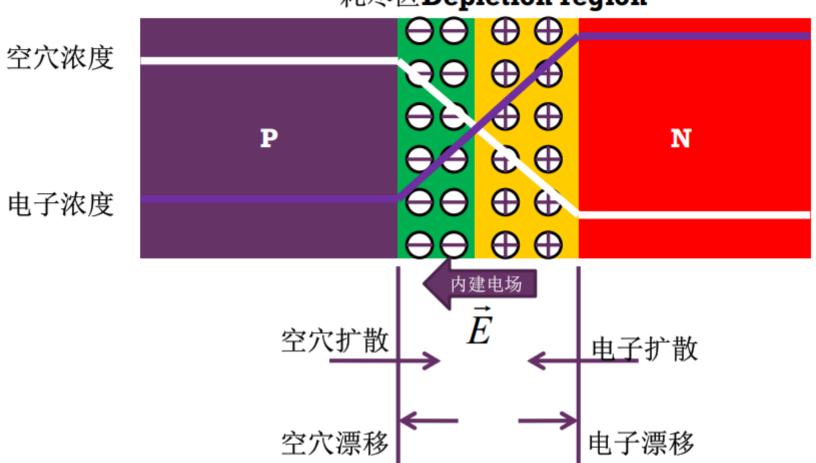
而因为在接触部位正负电荷相抵消,因此就会产生耗尽区(留下带有正/负电荷的离子,从而建立内建电场)这个内建电场和PN的方向刚好是反方向的(详见上图)

漂移:因为内建电场作用带来的电荷运动:电场导致电势差,产生了力,推动电荷移动。

漂移和扩散的共同作用见下图:

低阻区 高阻区 低阻区

#### 耗尽区Depletion region



PS:低阻区和高阻区形成是因为载流子密度在中间耗尽区下降,导致电导率下降,从而形成高阻区。因为有内建电场,所以自然产生了内建电位差,也被称为势垒电压

#### 偏置电压:

#### 正偏导通:

正向偏置电压克服内建电位差对多子扩散的阻力,使得多子在耗尽区的扩散得以继续。在电源电动势作用下,从电源负极流出的电子,经导线流入N区,经过N区(低阻区),到达结区,电子扩散通过结区,和P区的多子空穴复合。P区端点每流出一个电子,P区内就生成一个空穴,该空穴在电源电动势作用下,向结区运动,在结区向N区扩散,可以视为和N区扩散过来的电子复合。而P区端点流出的电子,沿导线移向电源正极。

这时候的(正向)电流是多子扩散电流,因此可以比较大。

#### 反偏截止:

电源负极向P区推入电子,从N区抽出电子,电荷在结区积累,使得PN结耗尽区加宽。因此外加电场增强,在外加电场作用下,N区空穴向P区漂移,P区电子向N区漂移,存在反向电流。但是因为反向电流是少子漂移电流,而少子数目极少,所以电流极小,可以视为开路。此时二极管呈现高阻特性,限流电阻不起作用。

### 反向击穿:

持续增加反向电压, PN结可能反向击穿:

在未超过允许功率之前,击穿是可逆的。但一旦超过,会导致能量转换为热能,热能无法及时耗散出去,会出现不可逆的热击穿。

### 齐纳击穿: Zener breakdown

掺杂浓度高的PN结,结区窄,电场强,容易引发齐纳击穿:结区电场足够强,强电场直接将原子的价电子从共价键中拉出来,在结区产生大量的电子-空穴对,从而导致PN结反向电流急剧增加。

#### 雪崩击穿: avalanche breakdown

掺杂浓度低的PN结,结区宽,随着外加反向电压增加,结区电场增强,在尚未引发齐纳击穿时电子可能在不断增强的电场作用下漂移速度越来越快,碰撞结区原子,将结区原子的价电子撞出价带,形成电子空穴对,新生成的电子被强场加速,继续撞击原子,产生更多的电子空穴对。导致PN结反向电流急剧增大。

### 二极管伏安特性:

PN结二极管是将一个PN结封装后的二端器件(单端口网络)

二极管伏安特性: 正偏导通、反偏截止、反向击穿

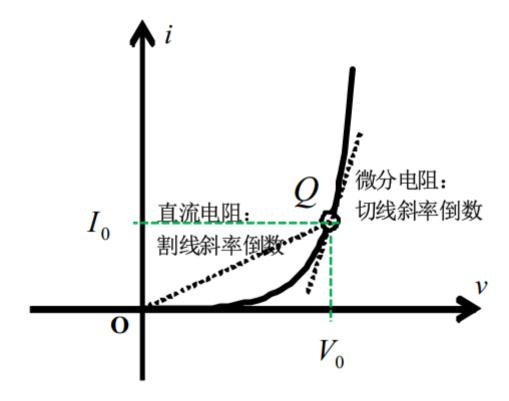
## 零偏附近: 指数律

当 $V_D$ 在零附近时,伏安特性满足指数律关系 PN结特性起主导地位: $i_D=I_{S0}(e^{\frac{v_D}{v_T}}-1)$  其中 $v_T=\frac{kT}{q}=26mV, T=(25+273.15)K$ 

 $I_{S0}$ 是反向饱和电流

PS: 一般认为二极管的开启电压是0.7V, 恰好近似等于势垒电压

# 直流电阻和微分电阻:



$$r_{ac}=r_{d}=\left(rac{di}{d
u}
ight)_{Q}^{-1}$$

一般来说直流电阻在后面很少使用, 微分电阻更常使用