

## 半導體物理知識點要點

### 第一章 半导体电子状态

#### 1.1 半导体

通常是指导电能力介于导体和绝缘体之间的材料，其导带在绝对零度时全空，价带全满，禁带宽度较绝缘体的小许多。

**1.2 能带** 晶体中，电子的能量是不连续的，在某些能量区间能级分布是准连续的，在某些区间没有能级分布。这些区间在能级图中表现为带状，称之为能带。

**1.2 能带论是半导体物理的理论基础，试简要说明能带论所采用的理论方法。**

答：能带论在以下两个重要近似基础上，给出晶体的势场分布，进而给出电子的薛定谔方程。通过该方程和周期性边界条件最终给出 E-k 关系，从而系统地建立起该理论。

**单电子近似：**

将晶体中其它电子对某一电子的库仑作用按几率分布平均地加以考虑，这样就可把求解晶体中电子波函数的复杂的多体问题简化为单体问题。

**绝热近似：**近似认为晶格系统与电子系统之间没有能量交换，而将实际存在的这种交换当作微扰来处理。

#### 1. 金刚石

1) 结构特点：

- 由同类原子组成的复式晶格。其复式晶格是由两个面心立方的子晶格彼此沿其空间对角线位移  $1/4$  的长度形成
- 属面心晶系，具立方对称性，共价键结合四面体。
- 配位数为 4，较低，较稳定。(配位数：最近邻原子数)
- 一个晶体学晶胞内有  $4 + 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 8$  个原子。

2) 代表性半导体：IV 族的 C, Si, Ge 等元素半导体大多属于这种结构。

#### 2. 闪锌矿

1) 结构特点：

- 共价性占优势，立方对称性；
  - 晶胞结构类似于金刚石结构，但为双原子复式晶格；
  - 属共价键晶体，但有不同的离子性。
- 2) 代表性半导体：GaAs 等三五族元素化合物均属于此种结构。

#### 3. 电子共有化运动：

原子结合为晶体时，轨道交叠。外层轨道交叠程度较大，电子可从一个原子运动到另一原子中，因而电子可在整个晶体中运动，称为电子的共有化运动。

#### 4. 布洛赫波：

$$\varphi_k(x) = u_k(x)e^{i2\pi kx}$$

晶体中电子运动的基本方程为：
$$u_k(x) = u_k(x + na)$$
，K 为波矢， $u_k(x)$  为一个与晶格同周期的周期性函数，

#### 5. 布里渊区：

禁带出现在  $k = n/2a$  处，即在布里渊区边界上；

允带出现在以下几个区：第一布里渊区： $-1/2a < k < 1/2a$  (简约布里渊区)

第二布里渊区： $-1/a < k < -1/2a, 1/2a < k < 1/a$

$E(k)$  也是  $k$  的周期函数，周期为  $1/a$ ，即  $E(k) = E(k + n/a)$ ，能带愈宽，共有化运动就更强烈。

#### 1.2 导带与价带

#### 1.3 有效质量

有效质量是在描述晶体中载流子运动时引进的物理量。它概括了周期性势场对载流子运动的影响，从而使外场力与加速度的关系具有牛顿定律的形式。其大小由晶体自身的 E-k 关系决定。

#### 1.4 本征半导体

既无杂质有无缺陷的理想半导体材料。

**1.4 空穴** 空穴是为处理价带电子导电问题而引进的概念。设想价带中的每个空电子状态带有一个正的基本电荷，并赋予其与电子符号相反、大小相等的有效质量，这样就引进了一个假想的粒子，称其为空穴。它引起的假想电流正好等于价带中的电子电流。

#### 1.4 空穴是如何引入的，其导电的实质是什么？

答：空穴是为处理价带电子导电问题而引进的概念。设想价带中的每个空电子状态带有一个正的基本电荷，并赋予其与电子符号相反、大小相等的有效质量，这样就引进了一个假想的粒子，称其为空穴。

这样引入的空穴，其产生的电流正好等于能带中其它电子的电流。所以空穴导电的实质是能带中其它电子的导电作用，而事实上这种粒子是不存在的。

#### 1.5 半导体的回旋共振现象是怎样发生的（以 n 型半导体为例）

答案：

首先将半导体置于匀强磁场中。一般 n 型半导体中大多数导电电子位于导带底附近，对于特定的能谷而言，这些电子的有效质量相近，所以无论这些电子的热运动速度如何，它们在磁场作用下做回旋运动的频率近似相等。当用电磁波照射该半导体时，如若频率与电子的回旋运动频率相等，则半导体对电磁波的吸收非常显著，通过调节电磁波的频率可观测到共振吸收峰。这就是回旋共振的机理。

#### 1.5 简要说明回旋共振现象是如何发生的。

半导体样品置于均匀恒定磁场，晶体中电子在磁场作用下运动

$\vec{v}$  与  $\vec{B}$  夹角  $\theta$

$$\vec{f} = -q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$|f| = qvB \sin \theta = qv_{\perp} B$$

运动轨迹为螺旋线，圆周半径为  $r$ ，

回旋频率为  $\omega_c$

$$v_{\perp} = r\omega_c, \text{向心加速度 } a = v_{\perp}^2 / r$$

$$m_n^* \cdot v_{\perp}^2 / r = qv_{\perp} B \Rightarrow m_n^* = qBr / v_{\perp}$$

$$\Rightarrow \omega_c = qB / m_n^*$$

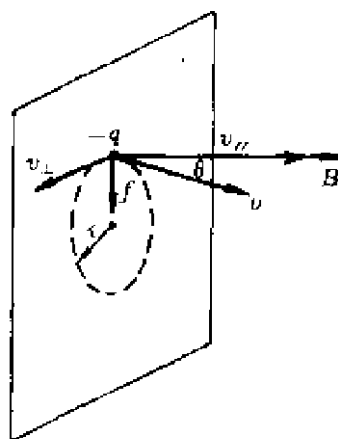


图 1-21 电子在恒定磁场中的运动

当晶体受到电磁波辐射时，在频率为  $\omega$  时便观测到共振吸收现象。

#### 1.6 直接带隙材料

如果晶体材料的导带底和价带顶在 k 空间处于相同的位置，则本征跃迁属直接跃迁，这样的材料即是所谓的直接带隙材料。

#### 1.6 间接带隙材料

如果半导体的导带底与价带顶在 k 空间中处于不同位置，则价带顶的电子吸收能量刚好达到导带底时准动量还需要相应的变化

### 第二章 半导体杂质和缺陷能级

#### 2.1 施主杂质受主杂质

某种杂质取代半导体晶格原子后，在和周围原子形成饱和键结构时，若尚有一多余价电子，且该电子受杂质束

縛很弱、电离能很小，所以该杂质极易提供导电电子，因此称这种杂质为施主杂质；反之，在形成饱和键时缺少一个电子，则该杂质极易接受一个价带中的电子、提供导电空穴，因此称其为受主杂质。

## 2.1 替位式杂质

杂质原子进入半导体硅以后，杂质原子取代晶格原子而位于晶格点处，称为替位式杂质。

形成替位式杂质的条件：杂质原子大小与晶格原子大小相近

## 2.1 间隙式杂质

杂质原子进入半导体硅以后，杂质原子位于晶格原子间的间隙位置，称为间隙式杂质。

形成间隙式杂质的条件：

- (1) 杂质原子大小比较小
- (2) 晶格中存在较大空隙

形成间隙式杂质的成因

半导体晶胞内除了晶格原子以为还存在着大量空隙，而间隙式杂质就可以存在在这些空隙中。

## 2.1 杂质对半导体造成的影响

杂质的出现，使得半导体中产生了局部的附加势场，这使严格的周期性势场遭到破坏。从能带的角度来讲，杂质可导致导带、价带或禁带中产生了原来没有的能级

## 2.1 杂质补偿

在半导体中同时存在施主和受主时，施主能级上的电子由于能量高于受主能级，因而首先跃迁到受主能级上，从而使它们提供载流子的能力抵消，这种效应即为杂质补偿。

## 2.1 杂质电离能

杂质电离能是杂质电离所需的最少能量，施主型杂质的电离能等于导带底与杂质能级之差，受主型杂质的电离能等于杂质能级与价带顶之差。

## 2.1 施主能级及其特征

施主未电离时，在饱和共价键外还有一个电子被施主杂质所束缚，该束缚态所对应的能级称为施主能级。

特征：

- ①施主杂质电离，导带中出现  
施主提供的导电电子；
- ②电子浓度大于空穴浓度，  
即  $n > p$ 。

## 2.1 受主能级及其特征

受主杂质电离后所接受的电子被束缚在原来的空状态上，该束缚态所对应的能级称为受主能级。特征：

- ①受主杂质电离，价带中出现  
受主提供的导电空穴；
- ②空穴浓度大于电子浓度，  
即  $p > n$ 。

浅能级杂质的作用：

- (1) 改变半导体的电阻率
- (2) 决定半导体的导电类型。

深能级杂质的特点和作用：

- (1) 不容易电离，对载流子浓度影响不大
- (2) 一般会产生多重能级，甚至既产生施主能级也产生受主能级。
- (3) 能起到复合中心作用，使少数载流子寿命降低。
- (4) 深能级杂质电离后成为带电中心，对载流子起散射作用，  
使载流子迁移率减少，导电性能下降。

## 第三章 半导体载流子分布

3.1. 若半导体导带底附近的等能面在  $k$  空间是中心位于原点的球面，证明导带底状态密度函数的表达式为

$$g_c(E) = 4\pi V \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2}$$

答案：

$k$  空间中，量子态密度是  $2V$ ，所以，在能量  $E$  到  $E+dE$  之间的量子态数为

$$dZ = 2V \times 4\pi k^2 dk \quad (1)$$

根据题意可知

$$E(k) = E_c + \frac{h^2 k^2}{2m_n^*} \quad (2)$$

由 (1)、(2) 两式可得

$$dZ = 4\pi V \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2} dE \quad (3)$$

由 (3) 式可得状态密度函数的表达式

$$g_c(E) = \frac{dZ}{dE} = 4\pi V \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2} \quad (4 \text{ 分})$$

3.1 已知半导体导带底的状态密度函数的表达式为  $g_c(E) = 4\pi V \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} (E - E_c)^{1/2}$

试证明非简并半导体导带中电子浓度为  $n_0 = 2 \frac{(2\pi m_n^* k_0 T)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right)$

证明：对于非简并半导体导带，由于

$$dN = f_B(E) g_c(E) dE \quad (3 \text{ 分})$$

将分布函数和状态密度函数的表达式代入上式得

$$dN = 4\pi V \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) (E - E_c)^{1/2} dE$$

因此电子浓度微分表达式为

$$dn = \frac{dN}{V} = 4\pi \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) (E - E_c)^{1/2} dE \quad (3 \text{ 分})$$

则

$$n_0 = \int_{E_c}^{E_c'} 4\pi \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) (E - E_c)^{1/2} dE$$

由于导带顶电子分布几率可近似为零，上式积分上限可视为无穷大，则积分可得

$$n_0 = 2 \frac{(2\pi m_n^* k_0 T)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right) \quad (4 \text{ 分})$$

### 3.2 费米能级

费米能级不一定是系统中的一个真正的能级，它是费米分布函数中的一个参量，具有能量的单位，所以被称为费米能级。它标志着系统的电子填充水平，其大小等于增加或减少一个电子系统自由能的变化量。

3.2 以施主杂质电离 90%作为强电离的标准，求掺砷的 n 型硅在 300K 时，强电离区的掺杂浓度上限。

$$(\Delta E_D = 0.049\text{eV}, N_c = 2.8 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}, n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3},$$

$$f_D(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_D - E_F}{k_0 T}\right)}$$

解：

随着掺杂浓度的增高，杂质的电离度下降。因此，百分之九十电离时对应的掺杂浓度就是强电离区掺杂浓度的上限。此时

$$n_D^+ = [1 - f_D(E)]N_D = \frac{N_D}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_D - E_F}{k_0 T}\right)} = 0.9N_D$$

由此解得  $E_D - E_F = 0.075\text{eV}$ ，而  $E_C - E_D = 0.049\text{eV}$ ，所以  $E_C - E_F = 0.124\text{eV}$ ，则

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_C}{k_0 T}\right) = 2.38 \times 10^{17}\text{cm}^{-3} = 0.9N_D \text{ 由此得，强电离区的上限掺杂浓度为 } 2.6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}。$$

3.2 以受主杂质电离 90%作为强电离的标准，求掺硼的 p 型硅在 300K 时，强电离区的掺杂浓度上限。

$$(\Delta E_A = 0.045\text{eV}, N_c = 1.1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}, n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3},$$

$$f_A(E) = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{E_F - E_A}{k_0 T}\right)}$$

解：

随着掺杂浓度的增高，杂质的电离度下降。因此，百分之九十电离时对应的掺杂浓度就是强电离区掺杂浓度的上限。此时

$$p_A^- = [1 - f_A(E)]N_A = \frac{N_A}{1 + 2 \exp\left(-\frac{E_F - E_A}{k_0 T}\right)} = 0.9N_A$$

由此解得  $E_F - E_A = 0.075\text{eV}$ ，而  $E_A - E_V = 0.045\text{eV}$ ，所以  $E_F - E_V = 0.12\text{eV}$ ，则

$$p_0 = N_v \exp\left(\frac{E_v - E_F}{k_0 T}\right) = 1.1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3} = 0.9 N_A$$

由此得，强电离区的上限掺杂浓度为  $1.2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。

### 3.6 简并半导体

当费米能级位于禁带之中且远离价带顶和导带底时，电子和空穴浓度均不很高，处理它们分布问题时可不考虑包利原理的约束，因此可用波尔兹曼分布代替费米分布来处理在流子浓度问题，这样的半导体被称为非简并半导体。反之则只能用非米分布来处理载流子浓度问题，这种半导体为简并半导体。

## 第四章 半导体导电性

### 4.1 漂移运动：

载流子在外电场作用下的定向运动。

#### 4.1 迁移率

单位电场作用下载流子的平均漂移速率。

### 4.2 散射

在晶体中运动的载流子遇到或接近周期性势场遭到破坏的区域时，其状态会发生不同程度的随机性改变，这种现象就是所谓的散射。

#### 4.2 散射几率

在晶体中运动的载流子遇到或接近周期性势场遭到破坏的区域时，其状态会发生不同程度的随机性改变，这种现象就是所谓的散射。散射的强弱用一个载流子在单位时间内发生散射的次数来表示，称为散射几率。

#### 4.2 平均自由程

两次散射之间载流子自由运动路程的平均值。

#### 4.2 平均自由时间：

连续两次散射间自由运动的平均运动时间

### 4.3. 迁移率与杂质浓度和温度的关系

答案：一般可以认为半导体中载流子的迁移率主要由声学波散射和电力杂质散射决定，因此迁移率  $k$  与电离杂质浓度  $N$  和温度间的关系可表为

$$k \propto \frac{1}{AT^{3/2} + BNT^{-3/2}}$$

其中  $A$ 、 $B$  是常量。由此可见

- (1) 杂质浓度较小时， $k$  随  $T$  的增加而减小；
- (2) 杂质浓度较大时，低温时以电离杂质散射为主、上式中的  $B$  项起主要作用，所以  $k$  随  $T$  增加而增加，高温时以声学波散射为主、 $A$  项起主要作用， $k$  随  $T$  增加而减小；
- (3) 温度不变时， $k$  随杂质浓度的增加而减小。

### 4.3 以 n 型硅为例，简要说明迁移率与杂质浓度和温度的关系。

杂质浓度升高，散射增强，迁移率减小。

杂质浓度一定条件下：

低温时，以电离杂质散射为主。温度升高散射减弱，迁移率增大。

随着温度的增加，晶格振动散射逐渐增强最终成为主导因素。因此，迁移率达到最大值后开始随温度升高而减小。



4.3 在只考虑声学波和电离杂质散射的前提下，给出半导体迁移率与温度及杂质浓度关系的表达式。

根据  $\mu_i \propto T^{3/2}/N_i; \quad \mu_s \propto T^{-3/2}$

可得  $\frac{1}{\mu} = AN_i T^{-3/2} + BT^{3/2}$  其中 A 和 B 是常数。

4.4 以 n 型半导体为例说明电阻率和温度的关系。

答：低温时，温度升高载流子浓度呈指数上升，且电离杂质散射呈密函数下降，因此电阻率随温度升高而下降；当半导体处于强电离情况时，载流子浓度基本不变，晶格震动散射逐渐取代电离杂质散射成为主要的散射机构，因此电阻率随温度由下降逐渐变为上升；高温时，虽然晶格震动使电阻率升高，但半导体逐渐进入本征状态使电阻率随温度升高而迅速下降，最终总体表现为下降。

4.4 室温下，在本征硅单晶中掺入浓度为  $10^{15} \text{cm}^{-3}$  的杂质硼后，再在其中掺入浓度为  $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的杂质磷。试求：

(1) 载流子浓度和电导率。

(2) 费米能级的位置。

(注：电离杂质浓度分别为  $10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、 $3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 、 $4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  和时，电子迁移率分别为 1300、1130 和  $1000 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ，空穴迁移率分别为 500、445 和  $400 \text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ；在 300K 的温度下， $k_0 T = 0.026 \text{eV}$ ， $N_C = 0.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ， $N_V = 0.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ， $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ )

09

答案：室温下，该半导体处于强电离区，则多子浓度

$$n_0 = (3-1) \times 10^{15} = 2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$$

少子浓度  $p_0 = n_i^2 / n_0 = 1.125 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ ；(

电导率  $\sigma = q\mu_n n_0 = 1.6 \times 10^{-19} \times 1000 \times 2 \times 10^{15} = 0.32 / \Omega \text{cm}$  (2 分)

(2) 根据  $n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_0 T}\right)$

可得  $E_F - E_i = 0.31 \text{eV}$

所以费米能级位于禁带中心之上 0.31eV 的位置。

4.6 强电场效应

实验发现，当电场增强到一定程度后，半导体的电流密度不再与电场强度成正比，偏离了欧姆定律，场强进一步增加时，平均漂移速度会趋于饱和，强电场引起的这种现象称为强电场效应。

4.6 载流子有效温度  $T_e$ ：

当有电场存在时，载流子的平均动能比热平衡时高，相当于更高温度下的载流子，称此温度为载流子有效温度。

4.6 热载流子：

在强电场情况下，载流子从电场中获得的能量很多，载流子的平均能量大于晶格系统的能量，将这种不再处于热平衡状态的载流子称为热载流子。

第五章 非平衡载流子

5.1 非平衡载流子注入：

产生非平衡载流子的过程称为非平衡载流子的注入。

### 5.1 非平衡载流子的复合:

复合是指导带中的电子放出能量跃迁回价带,使导带电子与价带空穴成对消失的过程。非平衡载流子逐渐消失的过程称为非平衡载流子的复合,是被热激发补偿后的净复合。

### 5.2 少子寿命 (非平衡载流子寿命)

非平衡载流子的平均生存时间。

5.2 室温下,在硅单晶中掺入  $10^{16}\text{cm}^{-3}$  的磷,试确定  $E_F$  与  $E_i$  间的相对位置。再将此掺杂后的样品通过光照均匀产生非平衡载流子,稳定时  $\Delta N = \Delta P = 10^{12}\text{cm}^{-3}$ ,试确定  $E_F'$  与  $E_F$  的相对位置;去掉光照后  $20\mu\text{s}$  时,测得少子浓度为  $5 \times 10^{11}\text{cm}^{-3}$ ,求少子寿命  $\tau_p$  为多少。(室温下硅的本征载流子浓度为  $1.5 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$ ,  $k_0T = 0.026\text{eV}$ )

### 5.3 准费米能级

对于非平衡半导体,导带和价带间的电子跃迁失去了热平衡。但就它们各自能带内部而言,由于能级非常密集、跃迁非常频繁,往往瞬间就会使其电子分布与相应的热平衡分布相接近,因此可用局部的费米分布来分别描述它们各自的电子分布。这样就引进了局部的非费米能级,称其为准费米能级。

### 5.4 直接跃迁

准动量基本不变的本征跃迁,跃迁过程中没有声子参与。

### 5.4. 直接复合

导带中的电子不通过任何禁带中的能级直接与价带中的空穴发生的复合

### 5.4 间接复合:

杂质或缺陷可在禁带中引入能级,通过禁带中能级发生的复合被称作间接复合。相应的杂质或缺陷被称为复合中心。

### 5.4 表面复合:

在表面区域,非平衡载流子主要通过半导体表面的杂质和表面特有的缺陷在禁带中形成的复合中心能级进行的复合。

### 5.4 表面电子能级:

表面吸附的杂质或其它损伤形成的缺陷态,它们在表面处的禁带中形成的电子能级,也称为表面能级。

### 5.4 俄歇复合:

载流子从高能级向低能级跃迁,发生电子-空穴复合时,把多余的能量付给另一个载流子,使这个载流子被激发到能量更高的能级上去,当它重新跃迁回低能级时,多余的能量常以声子形式放出,这种复合称为俄歇复合。

俄歇复合包括:带间俄歇复合以及与杂质和缺陷有关的俄歇复合。

5.4 试推证:对于只含一种复合中心的间接带隙半导体晶体材料,在稳定条件下非平衡载流子的净复合率公式

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

答案:

题中所述情况,主要是间接复合起作用,包含以下四个过程。

甲:电子俘获率  $= r_n n (N_t - n_t)$

乙:电子产生率  $= r_n n_1 n_t$        $n_1 = n_i \exp((E_t - E_i)/k_0T)$

丙:空穴俘获率  $= r_p p n_t$

丁:空穴产生率  $= r_p p_1 (N_t - n_t)$        $p_1 = n_i \exp((E_i - E_t)/k_0T)$

稳定情况下净复合率

$$U = \text{甲} - \text{乙} = \text{丙} - \text{丁} \quad (1)$$

稳定时

$$\text{甲} + \text{丁} = \text{丙} + \text{乙}$$

将四个过程的表达式代入上式解得



$$n_t = N_t \frac{n r_n + p_1 r_p}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} \quad (2)$$

将四个过程的表达式和 (2) 式代入 (1) 式整理得

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_1 p_1)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} \quad (3)$$

由  $p_1$  和  $n_1$  的表达式可知  $p_1 n_1 = n_i^2$  代入上式可得

$$U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$$

#### 5.4 试推导直接复合情况下非平衡载流子复合率公式。

答案：在直接复合情况下，复合率

$$R = np \quad (2 \text{ 分})$$

非简并条件下产生率可视为常数，热平衡时产生率

$$G = R_0 = m_0 p_0 = m_i^2 \quad (2 \text{ 分})$$

因此净复合率

$$U_d = R - G = r(np - n_i^2) \quad (2 \text{ 分})$$

5.4 已知室温下，某 n 型硅样品的费米能级位于本征费米能级之上 0.35eV，假设掺入复合中心的能级位置刚好与本征费米能级重合，且少子寿命为 10 微秒。如果由于外界作用，少数载流子被全部清除，那么在这种情况下电子-空穴对的产生率是多大？

(注：复合中心引起的净复合率  $U = \frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)}$ ；在 300K 的温度下， $k_0 T = 0.026 \text{ eV}$ ，

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3})$$

答案：

根据公式

$$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_0 T}\right)$$

可得

$$n_0 = 1.05 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

根据题意可知产生率

$$G = -U = -\frac{N_t r_n r_p (np - n_i^2)}{r_n (n + n_1) + r_p (p + p_1)} = \frac{N_t r_p n_i^2}{n_0} = \frac{n_i^2}{\tau_p n_0} = 2.1 \times 10^9 \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$$

#### 5.5 陷阱效应

当半导体的非平衡载流子浓度发生变化时，禁带中杂质或缺陷能级上的电子浓度也会发生变化，若增加说明该

能级有收容电子的作用，反之有收容空穴的作用，这种容纳非平衡载流子的作用称为陷阱效应。

### 5.5 陷阱中心

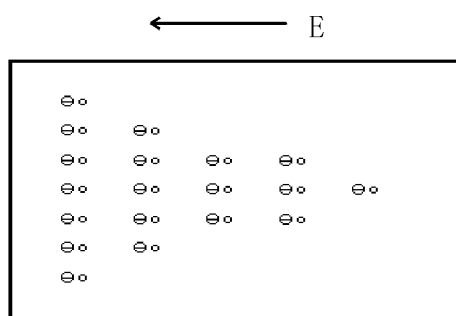
当半导体的非平衡载流子浓度发生变化时，禁带中杂质或缺陷能级上的电子浓度也会发生变化，若增加说明该能级有收容电子的作用，反之有收容空穴的作用，这种容纳非平衡载流子的作用称为陷阱效应。具有显著陷阱效应的杂质或缺陷称为陷阱中心。

### 5.6 扩散：

由于浓度不均匀而导致的微观粒子从高浓度处向低浓度处逐渐运动的过程。

### 5.6 漂移运动：

载流子在外电场作用下的定向运动。



### 5.7 证明爱因斯坦关系式： $D_n = \frac{k_0 T}{q} \cdot \mu_n$

答案：

建立坐标系如图，由于掺杂不均，空穴扩散产生的电场如图所示，空穴电流如下：

$$(J_p)_{\text{扩}} = -qD_p \frac{dp_0(x)}{dx}, \quad (J_p)_{\text{漂}} = q\mu_p p_0(x)|E|$$

$$\text{平衡时：} (J_p)_{\text{扩}} - (J_p)_{\text{漂}} = 0 \quad \therefore -D_p \frac{dp_0(x)}{dx} = \mu_p p_0(x)|E| \quad (10 \text{ 分})$$

$$\therefore |E| = -\frac{dV}{dx} \quad p_0(x) = N_v \exp\left[\frac{E_v + qV(x) - E_F}{K_0 T}\right]$$

$$\frac{dp_0(x)}{dx} = p_0(x) \frac{q}{K_0 T} \frac{dV(x)}{dx}$$

$$\therefore \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{K_0 T}{q} \quad \text{同理} \quad D_n = \frac{k_0 T}{q} \cdot \mu_n \quad (10)$$

### 5.8 以空穴为例推导其运动规律的连续性方程。

根据物质不灭定律：

空穴浓度的变化率=扩散积累率+迁移积累率+其它产生率-非平衡载流子复合率

扩散积累率: 
$$-\frac{dS_{p\uparrow}}{dx} = D_p \frac{d^2 p}{dx^2}$$

迁移积累率: 
$$-\frac{dS_{p\text{漂}}}{dx} = -\frac{d[\mu_p p |E|]}{dx}$$

净复合率: 
$$U = \frac{\Delta p}{\tau}$$

其它因素的产生率用  $g_p$  表示, 则可得空穴的连续性方程如下:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p |E| \frac{\partial p}{\partial x} - \mu_p p \frac{\partial |E|}{\partial x} + g_p - \frac{\Delta p}{\tau}$$

5.8 已知半无限大硅单晶 300K 时本征载流子浓度  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 掺入浓度为  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的受主杂质,

(1) 求其载流子浓度和电导率。

(2) 再在其中掺入浓度为  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的金, 并由边界稳定注入非平衡电子浓度为  $(\Delta n)_0 = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 如果晶体中的电场可以忽略, 求边界处电子扩散电流密度。

注: 电离杂质浓度分别为  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时, 电子迁移率分别为 1300 和  $1200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ , 空穴迁移率分别为 500 和  $450 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ ;  $r_n = 6.3 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ ;  $r_p = 1.15 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ ;  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ; 在 300K 的温度下,  $k_0 T = 0.026 \text{ eV}$

08 10

答:

(1) 此温度条件下, 该半导体处于强电离区, 则多子浓度  $p_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

少子浓度  $n_0 = n_i^2 / p_0 = 1.5^2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ; (3 分)

电导率  $\sigma = q\mu_p p = 1.6 \times 10^{-19} \times 500 \times 10^{15} = 0.08 / \Omega \text{ cm}$

(2) 此时扩散电流密度:  $J = qD_n \frac{(\Delta n)_0}{L_n} = q \sqrt{\frac{D_n}{\tau_n}} (\Delta n)_0$

将  $D_n = \mu_n \frac{k_0 T}{q}$  与  $\tau_n = \frac{1}{N_t r_n}$  代入上式:  $J = \sqrt{q\mu_n k_0 T N_t r_n} (\Delta n)_0$ ; 取电子迁移率为  $1200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  并将其它数据代

入上式, 得电流密度为  $7.09 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$

## 第七章 金属半导体接触

### 7.1 功函数

#### 7.1 接触电势差

两种具有不同功函数的材料相接触后, 由于两者的费米能级不同导致载流子的流动, 从而在两者间形成电势差, 称该电势差为接触电势差。

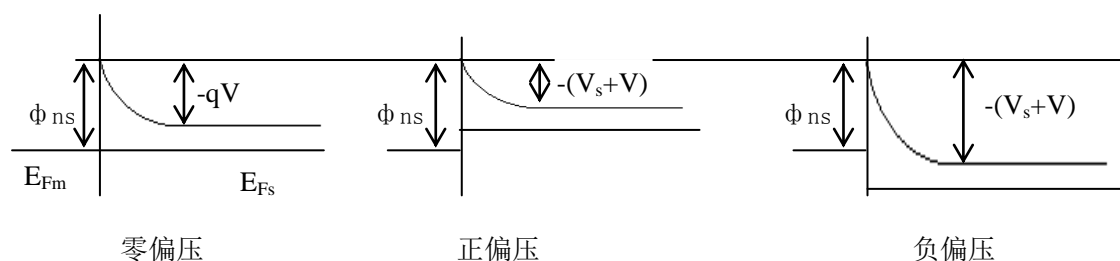
#### 7.1 电子亲和能

导带底的电子摆脱束缚成为自由电子所需的最小能量。

## 7.2 试用能级图定性解释肖特基势垒二极管的整流作用；

答：

以 n 型半导体形成的肖特基势垒为例，其各种偏压下的能带图如下



若用  $J_{s \rightarrow m}$  表示电子由半导体发射到金属形成的电流；用  $J_{m \rightarrow s}$  表示电子由金属发射到半导体形成的电流，则零

偏时  $J_{m \rightarrow s} = -J_{s \rightarrow m}$  系统处于平衡状态，总电流为零。

正偏时(金属接正电位)  $V > 0$ ，偏压与势垒电压反向，半导体一侧势垒高度下降，而金属一侧势垒高度不变，如能带图所示。所以  $J_{m \rightarrow s}$  保持不变。非简并情况下，载流子浓度服从玻尔兹曼分布，由此可得  $J_{s \rightarrow m} \propto \exp \frac{Vq}{k_0 T}$

反偏时  $V < 0$ ，偏压与势垒电压同向，半导体一侧势垒高度上升，而金属一侧势垒高度仍不变，如能带图所示。因此  $J_{s \rightarrow m}$  随  $V$  反向增大而减小， $J_{m \rightarrow s}$  保持不变。 $J_{s \rightarrow m}$  很快趋近于零，所以反向电流很快趋近于饱和值  $J_{m \rightarrow s}$ 。由于  $\phi_{ns}$  较大，所以反向饱和电流较小。

综上所述，说明了阻挡层具有整流作用，这就是肖特基势垒二极管的工作原理。

**7.3 欧姆接触** 欧姆接触是指金属和半导体之间形成的接触电压很小，基本不改变半导体器件特性的非整流接触。

## 第八章 MIS 结构

**8.1 表面态** 它是由表面因素引起的电子状态，这种表面因素通常是悬挂键、表面杂质或缺陷，表面态在表面处的分布几率最大。

### 8.1. 达姆表面态

表面态是由表面因素引起的电子状态，这种表面因素通常是悬挂键、表面杂质或缺陷，表面态在表面处的分布几率最大。其中悬挂键所决定的表面态是达姆表面态

### 8.2 表面电场效应

在半导体 MIS 结构的栅极施加栅压后，半导体表面的空间电荷区会随之发生变化，通过控制栅压可使半导体表面呈现出不同的表面状态，这种现象就是所谓的表面电场效应。

**8.2 利用耗尽层近似，推导出 MIS 结构中半导体空间电荷区微分电容的表达式。**

根据耗尽层近似： $\rho = -qN_A$

则耗尽层内的泊松方程：
$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{rs} \epsilon_0}$$

结合边界条件：体内电势为零，体内电场为零。

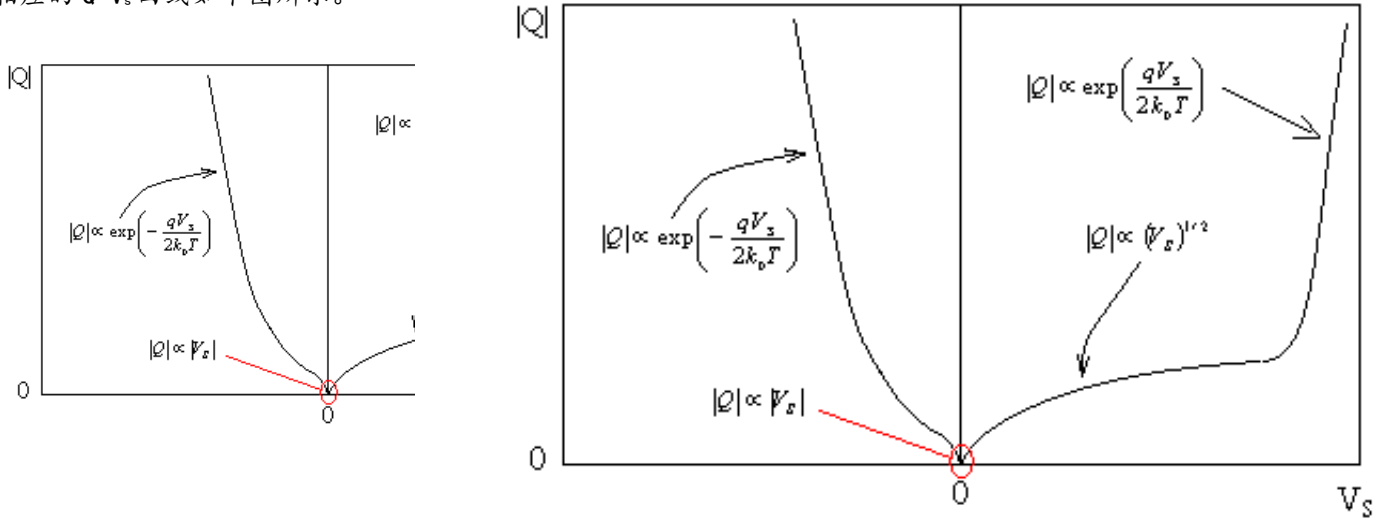
可得空间电荷层厚度的表达式为：
$$X_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_{rs}\epsilon_0 V_s}{qN_A}}$$

则由  $Q_s = -qN_A X_d$

可得  $C_s = \left| \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} \right| = \left( \frac{N_A q \epsilon_{rs} \epsilon_0}{2V_s} \right)^{1/2} = \frac{\epsilon_{rs} \epsilon_0}{X_d}$

**8.2 以 p 型半导体形成的理想 MIS 结构为例，定性说明半导体空间电荷层电荷面密度  $Q$  随表面势  $V_s$  的变化规律，并画出相应的  $Q$ - $V_s$  关系曲线。**

答：相应的  $Q$ - $V_s$  曲线如下图所示。



对于 p 型半导体形成的理想 MIS 结构，当  $V_s$  为零时半导体表面处于平带状态，此时空间电荷层在  $|qV_s| \ll k_0T$

的范围内可以认为是一个固定电容，即平带电容。因此  $|Q| \propto |V_s|$

当  $V_s$  向负方向变化时，空间电荷层从平带状态变为多子堆积状态，此时  $|Q| \propto \exp\left(\frac{-qV_s}{2k_0T}\right)$

当  $0 < V_s \leq 2V_B$  时，空间电荷层从平带状态变为耗尽和弱反型状态，此时可利用耗尽层近似来确定电荷与表面

势间的关系，因此  $|Q| \propto (V_s)^{1/2}$

当  $V_s > 2V_B$  时，空间电荷层从弱反型状态变成强反型，因此电荷与表面势间的关系逐渐变为  $|Q| \propto \exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)$

### 8.3 平带电压

使半导体表面处于平带状态所加的栅电压。

### 8.3 开启电压

使半导体空间电荷层处于临界强反型时，在 MIS 结构上所加的栅压。

在 MIS 结构中，当半导体表面处于临界强反型时，栅极与衬底间所加的电压为开启电压。

### 8.3 导出理想 MIS 结构的开启电压随温度变化的表达式。

当表面势  $V_s$  等于  $2V_B$  时所对应的栅压为开启电压  $V_T$ ，下面以 p 型半导体形成的 MIS 结构为例给出其表达式。

$$\text{显然 } V_T = V_0|_{V_s=2V_B} + 2V_B$$

$$\text{在杂质全电离情况下 } p_0 = n_i \exp \frac{qV_B}{k_0T} = N_A \quad V_B = \frac{k_0T}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$\text{作为绝缘层电压 } V_0|_{V_s=2V_B} = -\frac{Q_s}{C_0} = \frac{qN_A X_{dm}}{C_0} = \frac{qN_A X_{dm} d_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\text{最大空间电荷层宽度 } X_{dm} = \left( \frac{4\epsilon_{rs}\epsilon_0 V_B}{qN_A} \right) = \left[ \frac{4\epsilon_{rs}\epsilon_0 k_0T}{q^2 N_A} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{综合以上各式可得 } V_T = \left( \frac{4k_0T d_0^2 N_A \epsilon_{rs}}{\epsilon_r^2 \epsilon_0} \ln \frac{N_A}{n_i} \right)^{\frac{1}{2}} + 2 \frac{k_0T}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp \frac{E_g}{k_0T}$$

考虑到

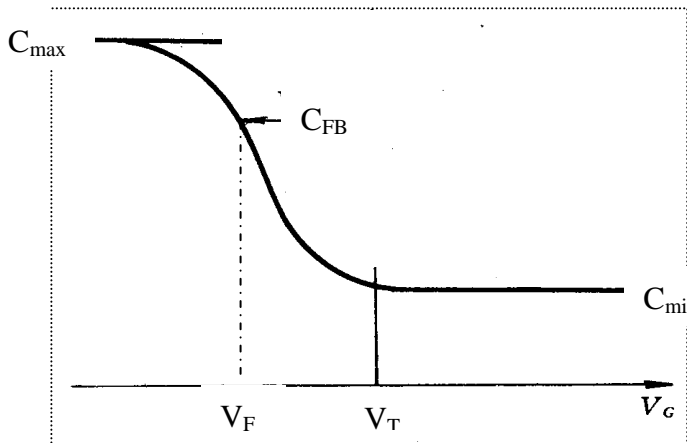
从而可得  $V_T$  与温度的关系为

$$V_T = \left( \frac{2k_0T d_0^2 N_A \epsilon_{rs}}{\epsilon_r^2 \epsilon_0} \left( \ln \left( \frac{N_A^2}{N_C N_V} \right) - \frac{E_g}{k_0T} \right) \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{k_0T}{q} \ln \left( \frac{N_A^2}{N_C N_V} \right) - \frac{E_g}{q}$$

**8.3 用 p 型半导体形成的 MOS 结构进行高频 C-V 特性测试，测得该结构单位面积上的最大电容为  $C_{\max}$ 、最小电容为  $C_{\min}$ 、开启电压为  $V_T$ 、平带电压为  $V_{FB}$ 。若忽略表面态的影响，画出该 MOS 结构单位面积上的电容与栅压间的关系曲线，并给出计算绝缘层厚度和掺杂浓度的方法。**

答案：

1. 电容与栅压间的关系曲线如下



2. 根据最大电容可求出绝缘层厚度  $d_0$



$$C_{\max} = C_0 = \frac{\epsilon_{r0}\epsilon_0}{d_0} \quad (4 \text{ 分})$$

根据最小电容可求出空间电荷层最小电容  $C_{s\min}$

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_{s\min}}$$

由此可得最大空间电荷层厚度  $x_{dm}$

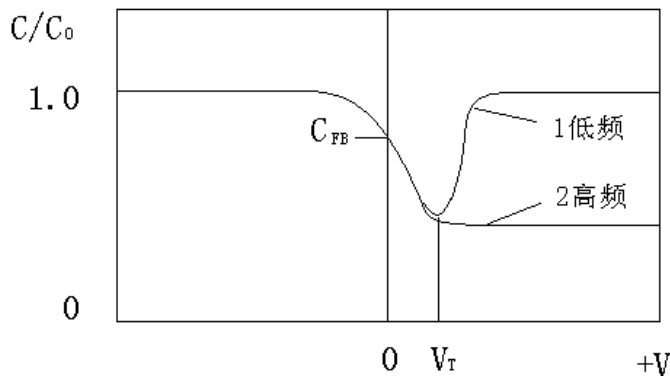
$$C_{s\min} = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{x_{dm}}$$

这样就可根据耗尽层近似求出掺杂浓度  $N_A$

$$x_{dm} = \left( \frac{4\epsilon_{rs}\epsilon_0 k_0 T}{q^2 N_A} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \right)^{1/2}$$

### 8.3 画出 p 型半导体形成的理想 MIS 结构的 C-V 特性曲线，并说明高频情况与低频情况的差别。 09 10

p 型半导体形成的理想 MIS 结构特性曲线的 C-V 如下 (7 分)



高频和低频情况的区别在于接近强反型时，低频情况空间电荷层电容迅速增加并趋近于无穷大，而高频情况空间电荷层电容则会保持在最小值上。前者是由于半导体表面处于强反型时，由于反型层中的电子浓度与表面势呈指数关系，导致空间电荷层电容随表面势变化呈指数规律，即， $C_s \propto \exp(qV_s/2k_0T)$ 。而  $C/C_0 = 1/(1+C_0/C_s)$ ，所以 C-V 特性曲线在  $V_0 > V_T$  后迅速增加，最终趋近于 1。

(4 分)

高频时，由于没有少子产生与复合的时间，因此反型电子对电容没有贡献，只能通过空间电荷层的宽度变化来承担表面势的变化，所以  $C_s$  仍与空间电荷层宽度  $X_d$  成反比。弱反型时， $X_d$  随表面势而增加。当  $V_0 > V_T$  后，开始进入强反型， $X_d$  很快趋于饱和，所以曲线保持在最小值上。

(4 分)

### 8.4 MOS 结构中的固定电荷

在 MOS 结构的  $\text{SiO}_2$  层中靠近 Si 表面大约 20nm 的范围内，存在一层不随偏压而移动的正电荷，一般认为其实质

是过剩硅离子。

**霍尔效应** 将通有  $x$  方向电流的晶体置于  $z$  方向的磁场中，则在洛伦兹力作用下在  $y$  方向会产生附加电场，这种现象被称为霍尔效应。

**霍尔角** 在磁场作用下，半导体中的电流可能与电场不在同一方向上，两者间的夹角称为霍尔角。

以  $p$  型半导体为例，简要说明霍尔效应的形成机理。

若半导体沿  $x$  方向通电流， $z$  方向加磁场，则在  $y$  方向将产生横向电场，该现象称为霍尔效应

产生的横向电场称为霍尔电场  $E_y$ ，它与  $x$  方向电流密度  $J_x$  和  $z$  方向磁感应强度  $B_z$  成正比，比例系数成为霍尔系数。是由于运动电荷受洛伦兹力作用的结果。

稳定条件下，横向电流为零，则  $f_E + f_B = 0$

$$\text{由此可得: } E_y = v_x B_z = \frac{J_x}{pq} \cdot B_z$$

$$\text{显然, 对于 } p \text{ 型半导体: } R_H = \frac{1}{pq}$$

6. 简并半导体 & 非简并半导体:

● 若费米能级进入了导带，说明  $n$  型杂质掺杂浓度很高(即  $N_D$  很大)；也说明了导带底附近的量子态基本上被电子所占据了。若费米能级进入了价带，说明  $p$  型杂质掺杂浓度很高(即  $N_A$  很大)；也说明了价带顶附近的量子态基本上被空穴所占据了。此时要考虑泡利不相容原理，而玻尔兹曼分布不适用，必须用费米分布函数。这此情况称为载流子的简并化。

● 发生载流子简并化的半导体称为简并半导体。

$$E_c - E_F \leq 0 \quad \text{简并}$$

$$0 < E_c - E_F \leq 2k_0T \quad \text{弱简并}$$

$$E_c - E_F > 2k_0T \quad \text{非简并, 低掺杂}$$

$$\text{简并化的标准 } E_c - E_F < -2k_0T \quad E_F \text{ 可能进入导带底}$$

## 重要名詞解釋

1. **有效质量**: 粒子在晶体中运动时具有的等效质量, 它概括了半导体内部势场的作用。
2. **费米能级**: 费米能级是  $T=0\text{ K}$  时电子系统中电子占据态和未占据态的分界线, 是  $T=0\text{ K}$  时系统中电子所能具有的最高能量。
3. **准费米能级**: 半导体处于非平衡态时, 导带电子和价带空穴不再有统一的费米能级, 但可以认为它们各自达到平衡, 相应的费米能级称为电子和空穴的准费米能级。
4. **金刚石型结构**: 金刚石结构是一种由相同原子构成的复式晶体, 它是由两个面心立方晶胞沿立方体的空间对角线彼此位移四分之一空间对角线长度套构而成。每个原子周围都有 4 个最近邻的原子, 组成一个正四面体结构。
5. **闪锌矿型结构**: 闪锌矿型结构的晶胞, 它是由两类原子各自组成的面心立方晶格, 沿空间对角线彼此位移四分之一空间对角线长度套构而成。
6. **N 型半导体**: 在纯净的硅晶体中掺入五价元素 (如磷), 使之取代晶格中硅原子的位置, 就形成了 N 型半导体。
7. **P 型半导体**: 在纯净的硅晶体中掺入三价元素 (如硼), 使之取代晶格中硅原子的位置, 形成 P 型半导体。
8. **状态密度**: 在能带中能量  $E$  附近每单位能量间隔内的量子态数
9. **费米分布函数**: 大量电子在不同能量量子态上的统计分布
10. **非平衡载流子**: 半导体处于非平衡态时, 比平衡态时多出来的那一部分载流子称为非平衡载流子。  $\Delta p = \Delta n$
11. **直接复合**: 电子从导带直接跃迁至价带与空穴相遇而复合。
12. **间接复合**: 电子通过禁带中的能级而跃迁至价带与空穴相遇而复合。
13. **施主能级**: 通过施主掺杂在半导体的禁带中形成缺陷能级, 被子施主杂质束缚的电子能量状态称施主能级。
14. **受主能级**: 通过受主掺杂在半导体的禁带中形成缺陷能级。正常情况下, 此能级为空穴所占据, 这个被受主杂质束缚的空穴的能量状态称为受主能级。
15. **陷阱中心**: 半导体中的杂质和缺陷在禁带中形成一定的能级, 这些能级具有收容部分非平衡载流子的作用, 杂质能级的这种积累非平衡载流子的作用称为陷阱效应。把产生显著陷阱效应的杂质和缺陷称为陷阱中心。
16. **复合中心**: 半导体中的杂质和缺陷可以在禁带中形成一定的能级, 对非平衡载流子的寿命有很大影响。杂质和缺陷越多, 寿命越短, 杂质和缺陷有促进复合的作用, 把促进复合的杂质和缺陷称为复合中心。(2 分)
17. **等电子复合中心**: 等电子复合中心: 在 III—V 族化合物半导体中掺入一定量的与主原子等价的某种杂质原子, 取代格点上的原子。由于杂质原子和主原子之间电负性的差别, 中性杂质原子可以束缚电子或空穴而成为带电中心, 带电中心会吸引和被束缚载流子符号相反的载流子, 形成一个激子束缚态。

**18. 迁移率**: 单位电场作用下, 载流子获得的平均定向运动速度, 反映了载流子在电场作用下的输运能力, 是半导体物理中重要的概念和参数之一。迁移率的表达式为:  $\mu = q \tau / m^*$ 。可见, 有效质量和弛豫时间 (散射) 是影响迁移率的因素。

**19. 漂移运动**: 载流子在电场作用下的运动。总漂移电流密度

$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)E$$

**20. 扩散运动**: 当半导体内部的载流子存在浓度梯度时, 引起载流子由浓度高的地方向浓度低的地方扩散, 扩散运动是

$$J_{n, diff} = qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_{p, diff} = -qD_p \frac{dp}{dx}$$

**21. 简并半导体**: 对于重掺杂半导体, 费米能级接近或进入导带或价带, 导带/价带中的载流子浓度很高, 泡利

不相容原理起作用, 电子和空穴分布不再满足玻耳兹曼分布, 需要采用费米分布函数描述。称此

类半导体为简并半导体。满足的条件为

$$|E_C - E_F| \leq 3kT \text{ 或 } |E_V - E_F| \leq 3kT$$

**22. 非简并半导体**: 掺杂浓度较低, 其费米能级  $E_F$  在禁带中的半导体; 半导体中载流子分布可由经典的玻耳兹曼分布代替费米分布描述时, 称之为非简并半导体

**23. 迁移率**: 单位电场作用下, 载流子获得的平均定向运动速度, 反映了载流子在电场作用下的输运能力, 是半导体物理中重要的概念和参数之一。迁移率的表达式为:  $\mu = q \tau / m^*$ 。可见, 有效质量和弛豫时间 (散射) 是影响迁移率的因素。

#### 4、俄歇复合

电子与空穴复合的方式之一, 属非辐射复合, 其中没有光子的发射。

载流子从高能级向低能级跃迁, 发生导带电子与价带空穴复合时, 不是通过辐射光子或声子

的方式释放能量, 而是通过碰撞将多余的能量传递给另一个载流子, 使这个载流子被激发到能量更高的能级上去。然后, 获得高能的载流子通过与晶格的连续散射方式 (不断放出声子) 逐渐释放其较高动能的过程。

带间俄歇复合在窄禁带半导体中及高温情况下起着重要作用, 而与杂质和缺陷有关的俄歇复

合过程, 则常常是影响半导体发光器件发光效率的重要原因。

#### 1、迁移率

参考答案:

单位电场作用下, 载流子获得的平均定向运动速度, 反映了载流子在电场作用下的输运能力,

是半导体物理中重要的概念和参数之一。迁移率的表达式为:

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

可见, 有效质量和弛豫时间 (散射) 是影响迁移率的因素。