

1-1、 什么叫本征激发？温度越高， 本征激发的载流子越多， 为什么？试定性说明之。

1-2、 试定性说明 Ge、Si 的禁带宽度具有负温度系数的原因。

1-3、 试指出空穴的主要特征。

1-4、 简述 Ge、Si 和 GaAs 的能带结构的主要特征。

1-5、 某一维晶体的电子能带为

$$E(k) = E_0 \left[1 - \frac{0.1 \cos(ka)}{2} - \frac{0.3 \sin(ka)}{2} \right]$$

其中 $E_0=3\text{eV}$ ，晶格常数 $a=5 \times 10^{-11}\text{m}$ 。求：

- (1) 能带宽度；
- (2) 能带底和能带顶的有效质量。

1-1、 解：在一定温度下，价带电子获得足够的能量（ $\geq E_g$ ）被激发到导带成为导电电子的过程就是本征激发。其结果是在半导体中出现成对的电子-空穴对。

如果温度升高， 则禁带宽度变窄， 跃迁所需的能量变小， 将会有更多的电子被激发到导带中。

1-2、 解：电子的共有化运动导致孤立原子的能级形成能带， 即允带和禁带。 温度升高， 则电子的共有化运动加剧， 导致允带进一步分裂、变宽；允带变宽， 则导致允带与允带之间的禁带相对变窄。反之， 温度降低， 将导致禁带变宽。

因此，Ge、Si 的禁带宽度具有负温度系数。

1-3、解：空穴是未被电子占据的空量子态，被用来描述半满带中的大量电子的集体运动状态，是准粒子。主要特征如下：

A、荷正电： $+q$ ；

B、空穴浓度表示为 p （电子浓度表示为 n ）；

C、 $E_p = -E_n$

D、 $m_p^* = -m_n^*$ 。

1-4、解：

(1) Ge、Si:

a) $E_g(\text{Si} : 0\text{K}) = 1.21\text{eV}$; $E_g(\text{Ge} : 0\text{K}) = 1.170\text{eV}$;

b) 间接能隙结构

c) 禁带宽度 E_g 随温度增加而减小；

(2) GaAs :

a) $E_g(300\text{K})$

第二篇 习题-半导体中的杂质和缺陷能级

刘诺 编

2-1、什么叫浅能级杂质？它们电离后有何特点？

2-2、什么叫施主？什么叫施主电离？施主电离前后有何特征？试举例说明之，并用能带图表征出 n 型半导体。

2-3、什么叫受主？什么叫受主电离？受主电离前后有何特征？试举例说明之，并用能带图表征出 p 型半导体。

2-4、掺杂半导体与本征半导体之间有何差异？试举例说明掺杂对半导体的导电性能的影响。

原创力文档
max.book118.com
预览与源文档一致,下载高清无水印

2-5、两性杂质和其它杂质有何异同？

2-6、深能级杂质和浅能级杂质对半导体有何影响？

2-7、何谓杂质补偿？杂质补偿的意义何在？

第二篇 题解 半导体中的杂质与缺陷能级

刘诺 编

2-1、解：浅能级杂质是指其杂质电离能远小于本征半导体的禁带宽度的杂质。

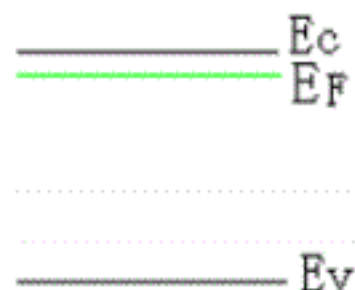
它们电离后将成为带正电（电离施主）或带负电（电离受主）的离子，并同时向导带提供电子或向价带提供空穴。

2-2、解：半导体中掺入施主杂质后，施主电离后将成为带正电离子，并同时向导带提供电子，这种杂质就叫施主。

施主电离成为带正电离子（中心）的过程就叫施主电离。

施主电离前不带电，电离后带正电。例如，在 Si 中掺 P，P 为 V 族元素，本征半导体 Si 为 IV 族元素，P 掺入 Si 中后，P 的最外层电子有四个与 Si 的最外层四个电子配对成为共价电子，而 P 的第五个外层电子将受到热激发挣脱原子实的束缚进入导带成为自由电子。这个过程就是施主电离。

n 型半导体的能带图如图所示：其费米能级位于禁带上方



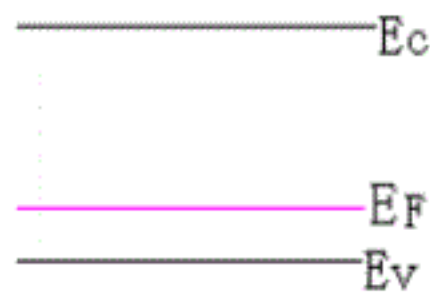
2-3、解：半导体中掺入受主杂质后，受主电离后将成为带负电的离子，并同时向价带提供空穴，这种杂质就叫受主。

受主电离成为带负电的离子（中心）的过程就叫受主电离。

受主电离前不带电，电离后带负电。

例如，在 Si 中掺 B，B 为 III 族元素，而本征半导体 Si 为 IV 族元素，P 掺入 B 中后，B 的最外层三个电子与 Si 的最外层四个电子配对成为共价电子，而 B 倾向于接受一个由价带热激发的电子。这个过程就是受主电离。

p 型半导体的能带图如图所示：其费米能级位于禁带下方



2-4、解：在纯净的半导体中掺入杂质后，可以控制半导体的导电特性。掺杂半导体又分为 n 型半导体和 p 型半导体。

例如，在常温情况下，本征 Si 中的电子浓度和空穴浓度均为 $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。当在 Si 中掺入 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 后，半导体中的电子浓度将变为 $1.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，而空穴浓度将近似为 $2.25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 。半导体中的多数载流子是电子，而少数载流子是空穴。

2-5、解：两性杂质是指在半导体中既可作施主又可作受主的杂质。如 III - V 族 GaAs 中掺 IV 族 Si。如果 Si 替位 III 族 As，则 Si 为施主；如果 Si 替位 V 族 Ga，则 Si 为受主。所掺入的杂质具体是起施主还是受主与工艺有关。

2-6、解：深能级杂质在半导体中起复合中心或陷阱的作用。

浅能级杂质在半导体中起施主或受主的作用。

2-7、当半导体中既有施主又有受主时，施主和受主将先互相抵消，剩余的杂质最后电离，这就是杂质补偿。

利用杂质补偿效应，可以根据需要改变半导体中某个区域的导电类型，制造各种器件

第三篇 习题 半导体中载流子的统计分布

刘诺 编

3-1、对于某 n 型半导体，试证明其费米能级在其本征半导体的费米能级之上。

即 $E_{Fn} > E_{Fi}$ 。

3-2、试分别定性定量说明：

- ①) 在一定的温度下，对本征材料而言，材料的禁带宽度越窄，载流子浓度越高；
- ②) 对一定的材料，当掺杂浓度一定时，温度越高，载流子浓度越高。

3-3、若两块 Si 样品中的电子浓度分别为 $2.25 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 和 $6.8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，试分别求出其中的空穴的浓度和费米能级的相对位置，并判断样品的导电类型。假如再在其中都掺入浓度为 $2.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的受主杂质，这两块样品的导电类型又将怎样？

3-4、含受主浓度为 $8.0 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ 和施主浓度为 $7.25 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 的 Si 材料，试求温度分别为 300K 和 400K 时此材料的载流子浓度和费米能级的相对位置。

3-5、试分别计算本征 Si 在 77K、300K 和 500K 下的载流子浓度。

3-6、Si 样品中的施主浓度为 $4.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，试计算 300K 时的电子浓度和空穴浓度各为多少？

3-7、某掺施主杂质的非简并 Si 样品，试求 $E_F = (E_C + E_D) / 2$ 时施主的浓度。

三 篇 题解 半导体中载流子的统计分布

刘诺 编

3-1、证明：设 n_n 为 n 型半导体的电子浓度， n_i 为本征半导体的电子浓度。显然

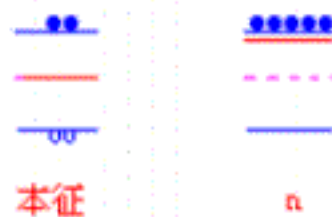
$$n_n > n_i$$

原创力文档
www.doc118.com
预览与源文档一致 下载高清无水印

$$\text{即 } N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_{F_n}}{k_0 T}\right) > N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_{F_i}}{k_0 T}\right)$$

$$\text{则 } E_{F_n} > E_{F_i}$$

即



得

证。

3-2、解：

(1) 在一定的温度下，对本征材料而言，材料的禁带宽度越窄，则跃迁所需的能量越小，所以受激发的载流子浓度随着禁带宽度的变窄而增加。

由公式

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2 k_0 T}}$$

也可知道，温度不变而减少本征材料的禁带宽度，上式中的指数项将因此而增加，从而使得载流子浓度因此而增加。

(2) 对一定的材料，当掺杂浓度一定时，温度越高，受激发的载流子将因此而

$$n_0 = N_c \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}\right) \text{ 和 } p_0 = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{k_0 T}\right)$$

增加。由公式

可知，这时两式中的指数项将因此而增加，从而导致载流子浓度增加。

3-3、解：

$$n_0 p_0 = n_i^2$$

由得

$$\begin{cases} p_{01} = \frac{n_i^2}{n_{01}} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{2.25 \times 10^{10}} = 1.0 \times 10^{10} (\text{cm}^{-3}) \\ p_{02} = \frac{n_i^2}{n_{02}} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{6.8 \times 10^{16}} \approx 3.3 \times 10^3 (\text{cm}^{-3}) \end{cases}$$

可见,

$$n_{01} \approx p_{01} \rightarrow \text{本征半导体}$$

$$n_{02} > p_{02} \rightarrow \text{n型半导体}$$

又因为 $p_0 = N_v e^{\frac{E_F - E_v}{k_0 T}}$, 则

$$\begin{cases} E_{F1} = E_v + k_0 T \ln \left(\frac{N_v}{p_{01}} \right) = E_v + 0.026 \ln \left(\frac{1.1 \times 10^{19}}{1.0 \times 10^{10}} \right) \approx E_v + 0.234 \text{eV} \\ E_{F2} = E_v + k_0 T \ln \left(\frac{N_v}{p_{02}} \right) = E_v + 0.026 \ln \left(\frac{1.1 \times 10^{19}}{3.3 \times 10^3} \right) = E_v + 0.331 \text{eV} \end{cases}$$

假如再在其中都掺入浓度为 $2.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的受主杂质, 那么将出现杂质补偿, 第一种半导体补偿后将变为 p 型半导体, 第二种半导体补偿后将近似为本征半导体。

答: 第一种半导体中的空穴的浓度为 $1.1 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$, 费米能级在价带上方 0.234eV 处; 第二种半导体中的空穴的浓度为 $3.3 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$, 费米能级在价带上方 0.331eV 处。掺入浓度为 $2.25 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的受主杂质后, 第一种半导体补偿后将变为 p 型半导体, 第二种半导体补偿后将近似为本征半导体。

3-4、解: 由于杂质基本全电离, 杂质补偿之后, 有效施主浓度

$$N_D' = N_D - N_A \approx 7.25 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$$

则 300K 时,

电子浓度 $n_0(300\text{K}) \approx N_D' = 7.25 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

空穴浓度 $p_0(300\text{K}) = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{7.25 \times 10^{17}} \approx 3.11 \times 10^2 (\text{cm}^{-3})$

费米能级

$$\begin{aligned}
 E_F &= E_v + k_0 T \cdot \ln \left(\frac{N_v}{p_0} \right) \\
 &= E_v + 0.026 \cdot \ln \left[\frac{(1.0 \times 10^{19})}{3.11 \times 10^2} \right] \\
 &= E_v + 0.3896 \text{eV}
 \end{aligned}$$

在 400K 时，根据电中性条件 $n_0 = p_0 + N_D$

和 $n_0 p_p = n_i^2$

得到

$$\begin{cases} p_0 = \frac{-N_D + \sqrt{(N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} = \frac{-7.25 \times 10^{17} + \sqrt{(7.25 \times 10^{17})^2 + 4(1.0 \times 10^{13})^2}}{2} \approx 1.3795 \times 10^8 (\text{cm}^{-3}) \\ n_0 = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{(1.0 \times 10^{13})^2}{1.3795 \times 10^8} = 7.249 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3}) \end{cases}$$

费米能级

$$\begin{aligned}
 E_F &= E_v + k_0 T \cdot \ln \left[\frac{N_v 300\text{K} \times \left(\frac{400\text{K}}{300\text{K}} \right)^2}{p_p} \right] \\
 &= E_v + 0.026 \cdot \ln \left[\frac{(1.1 \times 10^{19}) \times \left(\frac{400}{300} \right)^2}{7.25 \times 10^{17}} \right] \\
 &= E_v + 0.0819 \text{eV}
 \end{aligned}$$

答：300K 时此材料的电子浓度和空穴浓度分别为 $7.25 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 和 $3.11 \times 10^2 \text{cm}^{-3}$ ，

费米能级在价带上方 0.3896eV 处；400 K 时此材料的电子浓度和空穴浓度分别近

似为 $7.248 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 和 $1.3795 \times 10^8 \text{cm}^{-3}$ ，费米能级在价带上方 0.08196eV 处。

3-5、解： 假设载流子的有效质量近似不变，则

$$\text{由 } N_c(T) = N_c(300\text{K}) \cdot \left(\frac{T}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{则 } N_c(77\text{K}) = N_c(300\text{K}) \cdot \left(\frac{77\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = (2.8 \times 10^{19}) \cdot \left(\frac{77\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = 3.758 \times 10^{18} (\text{cm}^{-3})$$

$$N_c(500\text{K}) = N_c(300\text{K}) \cdot \left(\frac{500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = (2.8 \times 10^{19}) \cdot \left(\frac{500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = 6.025 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$$

$$\text{由 } N_v(T) = N_v(300\text{K}) \cdot \left(\frac{T}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\text{则 } N_v(77\text{K}) = N_v(300\text{K}) \cdot \left(\frac{77\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = (1.1 \times 10^{19}) \cdot \left(\frac{77\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = 1.4304 \times 10^{18} (\text{cm}^{-3})$$

$$N_v(500\text{K}) = N_v(300\text{K}) \cdot \left(\frac{500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = (1.1 \times 10^{19}) \cdot \left(\frac{500\text{K}}{300\text{K}}\right)^{\frac{3}{2}} = 2.367 \times 10^{19} (\text{cm}^{-3})$$

$$\text{而 } E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad \text{且 } \alpha = 4.73 \times 10^{-4}, \quad \beta = 636$$

$$\text{所以 } E_g(77\text{K}) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} = 1.21 - \frac{(4.73 \times 10^{-4}) \times 77^2}{77 + 636} = 1.2061 (\text{eV})$$

$$E_g(300\text{K}) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} = 1.21 - \frac{(4.73 \times 10^{-4}) \times 300^2}{300 + 636} = 1.1615 (\text{eV})$$

$$E_g(500\text{K}) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} = 0.7437 - \frac{(4.73 \times 10^{-4}) \times 500^2}{500 + 636} = 1.1059 (\text{eV})$$

$$\text{所以, 由 } n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}}, \text{ 有}$$

$$\begin{cases} n_i(77\text{K}) = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}} = \sqrt{(3.758 \times 10^{18}) \times (1.4304 \times 10^{18})} \cdot e^{-\frac{1.2061 \times (1.602 \times 10^{-19})}{2 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times 77}} \approx 1.159 \times 10^{20} (\text{cm}^{-3}) \\ n_i(300\text{K}) = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}} = \sqrt{(2.8 \times 10^{19}) \times (1.1 \times 10^{19})} \cdot e^{-\frac{1.1615 \times (1.602 \times 10^{-19})}{2 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times 300}} \approx 3.5 \times 10^9 (\text{cm}^{-3}) \\ n_i(500\text{K}) = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2k_0 T}} = \sqrt{(6.025 \times 10^{19}) \times (2.367 \times 10^{19})} \cdot e^{-\frac{1.1059 \times (1.602 \times 10^{-19})}{2 \times (1.38 \times 10^{-23}) \times 500}} \approx 1.669 \times 10^{14} (\text{cm}^{-3}) \end{cases}$$

答: 77K 下载流子浓度约为 $1.159 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$, 300 K 下载流子浓度约为 $3.5 \times 10^9 \text{cm}^{-3}$, 500K 下载流子浓度约为 $1.669 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 。

3-6、解：在 300K 时，因为 $N_D > 10n_i$ ，因此杂质全电离

$$n_0 = N_D \approx 4.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{4.5 \times 10^{16}} = 5.0 \times 10^3 (\text{cm}^{-3})$$

答： 300K 时样品中的的电子浓度和空穴浓度分别是 $4.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 和 $5.0 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ 。

3-7、解：由于半导体是非简并半导体，所以有电中性条件

$$n_0 = N_D^+$$

$$N_c e^{\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} = \frac{N_D}{1 + 2e^{\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}}$$

施主电离很弱时，等式 右边分母中的 “ 1 ” 可以略去，

$$\text{即 } N_c e^{\frac{E_c - E_F}{k_0 T}} = \frac{N_D}{2} e^{\frac{E_D - E_F}{k_0 T}}$$

$$\therefore E_F = \frac{E_c + E_D}{2} + \frac{1}{2} k_0 T \ln \left(\frac{N_D}{2N_c} \right)$$

$$\text{而 } E_F = \frac{1}{2} (E_c + E_D)$$

$$\text{则 } N_D = 2N_c$$

答： N_D 为二倍 N_c 。

第四篇 习题 - 半导体的导电性

刘诺 编

4-1、对于重掺杂半导体和一般掺杂半导体，为何前者的迁移率随温度的变化趋势不同？试加以定性分析。

4-2、何谓迁移率？影响迁移率的主要因素有哪些？

4-3、试定性分析 Si 的电阻率与温度的变化关系。

4-4、证明当 $\mu_n \neq \mu_p$ ，且电子浓度 $n_0 = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}$ ，空穴浓度 $p_0 = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}$ 时半导体的电导率有最小值，并推导 σ_{\min} 的表达式。

4-5、0.12kg 的 Si 单晶掺有 $3.0 \times 10^{-9}\text{kg}$ 的 Sb，设杂质全部电离，试求出此材料的电导率。（Si 单晶的密度为 2.33g/cm^3 ，Sb 的原子量为 121.8）

第四篇 题解-半导体的导电性

刘诺 编

4-1、解：对于重掺杂半导体，在低温时，杂质散射起主体作用，而晶格振动散射与一般掺杂半导体的相比较，影响并不大，所以这时候随着温度的升高，重掺杂半导体的迁移率反而增加；温度继续增加后，晶格振动散射起主导作用，导致迁移率下降。对一般掺杂半导体，由于杂质浓度较低，电离杂质散射基本可以忽略，起主要作用的是晶格振动散射，所以温度越高，迁移率越低。

4-2、解：迁移率是单位电场强度下载流子所获得的漂移速率。影响迁移率的主要因素有能带结构（载流子有效质量）、温度和各种散射机构。

4-3、解：Si 的电阻率与温度的变化关系可以分为三个阶段：

- ① 温度很低时，电阻率随温度升高而降低。因为这时本征激发极弱，可以忽略；载流子主要来源于杂质电离，随着温度升高，载流子浓度逐步增加，相应地电离杂质散射也随之增加，从而使得迁移率随温度升高而增大，导致电阻率随温度升高而降低。
- ② 温度进一步增加（含室温），电阻率随温度升高而升高。在这一温度范围内，杂质已经全部电离，同时本征激发尚不明显，故载流子浓度基本没有变化。对散射起主要作用的是晶格散射，迁移率随温度升高而降低，导致电阻率随温度升高而升高。
- ③ 温度再进一步增加，电阻率随温度升高而降低。这时本征激发越来越多，虽然迁移率随温度升高而降低，但是本征载流子增加很快，其影响大大超

原创力文档

max.book118.com

预览与源文档一致 下载高清无水印

过了迁移率降低对电阻率的影响，导致电阻率随温度升高而降低。当然，温度超过器件的最高工作温度时，器件已经不能正常工作了。

4-4、证明：

$\frac{d\sigma}{dn} = 0$ 时 σ 有极值

而 $\frac{d^2\sigma}{dn^2} = \frac{2n_i^2}{n^3} q \mu_p > 0$, 故 σ 有极小值

即 $\frac{d\sigma}{dn} = q \mu_n - \frac{n_i^2}{n^2} q \mu_p = 0$

所以 $n = n_i \sqrt{\mu_p / \mu_n}$

$p = \frac{n_i^2}{n} = n_i \sqrt{\mu_n / \mu_p}$

有 $\sigma = \sigma_{\min} = 2n_i q \sqrt{\mu_p \mu_n}$

得证。

4-5、解：

Si 的体积 $V = \frac{0.12 \times 1000}{2.33} = 51.502 (\text{cm}^3)$

$(3.0 \times 10^{-9} \times 1000 \times (6.025 \times 10^{23}))$

$\therefore N_D = \frac{121.8}{22.556} \approx 2.881 \times 10^{17} (\text{cm}^{-3})$

故材料的电导率为

$\sigma = nq\mu_n = (6.579 \times 10^{17}) \times (1.602 \times 10^{-19}) \times 520 = 24.04 (\Omega^{-1} \text{cm}^{-1})$

答：此材料的电导率约为 $24.04 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 。

第五篇 习题 非平衡载流子

刘诺 编

5-1、何谓非平衡载流子？非平衡状态与平衡状态的差异何在？

5-2、漂移运动和扩散运动有什么不同？

5-3、漂移运动与扩散运动之间有什么联系？非简并半导体的迁移率与扩散系数之间有什么联系？

5-4、平均自由程与扩散长度有何不同？平均自由时间与非平衡载流子的寿命又有何不同？

5-5、证明非平衡载流子的寿命满足 $\Delta p(t) = \Delta p_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，并说明式中各项的物理意义。

5-6、导出非简并载流子满足的爱因斯坦关系。

5-7、间接复合效应与陷阱效应有何异同？

5-8、光均匀照射在 $6\Omega \cdot \text{cm}$ 的 n 型 Si 样品上，电子-空穴对的产生率为 $4 \times 10^{21} \text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}$ ，样品寿命为 $8\mu\text{s}$ 。试计算光照前后样品的电导率。

5-9、证明非简并的非均匀半导体中的电子电流形式为 $j = n\mu_n \frac{dE_F^n}{dx}$ 。

5-10、假设 Si 中空穴浓度是线性分布，在 $4\mu\text{m}$ 内的浓度差为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，试计算空穴的扩散电流密度。

5-11、试证明在小信号条件下，本征半导体的非平衡载流子的寿命最长。

第五篇 题解-非平衡载流子

刘诺 编

5-1、解：半导体处于非平衡态时，附加的产生率使载流子浓度超过热平衡载流子浓度，额外产生的这部分载流子就是非平衡载流子。通常所指的非平衡载流子是指非平衡少子。

热平衡状态下半导体的载流子浓度是一定的，产生与复合处于动态平衡状态，跃迁引起的产生、复合不会产生宏观效应。在非平衡状态下，额外的产生、复合效应会在宏观现象中体现出来。

5-2、解：漂移运动是载流子在外电场的作用下发生的定向运动，而扩散运动是由于浓度分布不均匀导致载流子从浓度高的地方向浓度低的方向的定向运动。前者的推动力是外电场，后者的推动力则是载流子的分布引起的。

5-3、解：漂移运动与扩散运动之间通过迁移率与扩散系数相联系。而非简并半导体的迁移率与扩散系数则通过爱因斯坦关系相联系，二者的比值与温度成反比关系。即

$$\frac{\mu}{D} = \frac{q}{k_B T}$$

5-4、答：平均自由程是在连续两次散射之间载流子自由运动的平均路程。而扩散长度则是非平衡载流子深入样品的平均距离。它们的不同之处在于平均自由程由散射决定，而扩散长度由扩散系数和材料的寿命来决定。

平均自由时间是载流子连续两次散射平均所需的自由时间，非平衡载流子的寿命是指非平衡载流子的平均生存时间。前者与散射有关，散射越弱，平均自由时间越长；后者由复合几率决定，它与复合几率成反比关系。

5-5、证明：

$$\begin{aligned} \text{单位时间内非平衡载流子的减少数} &= -\frac{d[\Delta p(t)]}{dt} \\ \text{而在单位时间内复合的非平衡载流子数} &= \frac{\Delta p}{\tau_p} \end{aligned}$$

如果在 $t = 0$ 时刻撤除光照

则在单位时间内减少的非平衡载流子数 = 在单位时间内复合的非平衡载流子数，
即

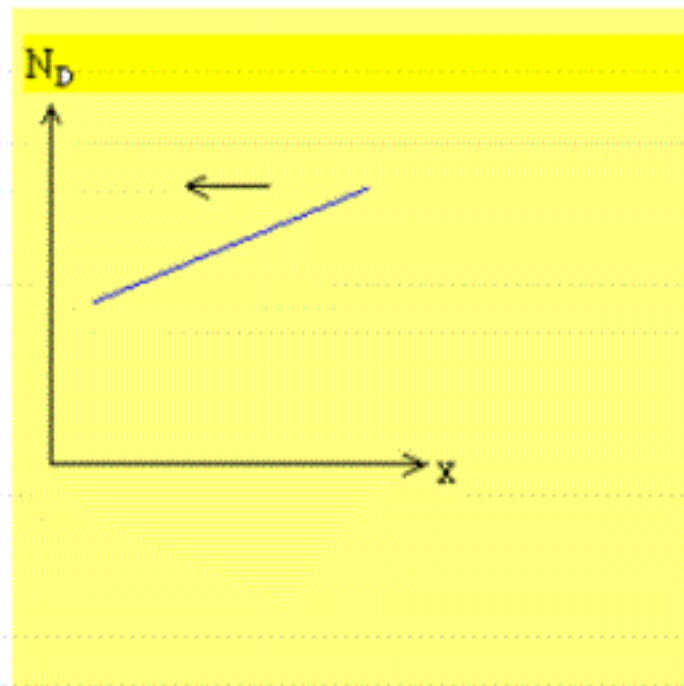
$$-\frac{d[\Delta p(t)]}{dt} = \frac{\Delta p}{\tau_p} \rightarrow (1)$$

在小注入条件下， τ 为常数，解方程 (1)，得到

$$\Delta p(t) = \Delta p(0) e^{-\frac{t}{\tau_p}} \rightarrow (2)$$

式中， $\Delta p(0)$ 为 $t=0$ 时刻的非平衡载流子浓度。此式表达了非平衡载流子随时间呈指数衰减的规律。

得证。



5-6、证明：假设这是 n 型半导体，杂质浓度和内建电场分布入图所示

$E_{内}$

稳态时，半导体内部是电中性的，

$$J_n = 0$$

即

$$-D_n q \frac{dn}{dx} - n q \mu_n E_x = 0 \rightarrow (1)$$

对于非简并半导体

$$E_c(x) = E_c(0) + (-q)V(x) \rightarrow (2)$$

$$\text{所以 } n(x) = N_c \cdot e^{\frac{-E_c(x) - E_F}{k_0 T}} = n(0) \cdot e^{\frac{-qV(x)}{k_0 T}} \rightarrow (3)$$

$$\text{由(3)} \Rightarrow \frac{dn(x)}{dx} = \frac{q}{k_0 T} \cdot \frac{dV(x)}{dx} \cdot n(x) \rightarrow (4)$$

$$\text{由(1)} \Rightarrow \frac{dn(x)}{dx} = -\frac{\mu_n}{D_n} \cdot E_x \cdot n(x) = \left(-\frac{\mu_n}{D_n} \right) \cdot \left(-\frac{dV(x)}{dx} \right) \cdot n(x) = \frac{\mu_n}{D_n} \cdot \frac{dV(x)}{dx} \cdot n(x) \rightarrow (5)$$

$$(4) \text{式} = (5) \text{式} \Rightarrow \frac{\mu_n}{D_n} = \frac{q}{k_0 T}$$

这就是非简并半导体满足的爱因斯坦关系。

得证。

5-7、答：间接复合效应是指非平衡载流子通过位于禁带中特别是位于禁带中央的杂质或缺陷能级 E_t 而逐渐消失的效应， E_t 的存在可能大大促进载流子的复合；陷阱效应是指非平衡载流子落入位于禁带中的杂质或缺陷能级 E_t 中，使在 E_t 上的电子或空穴的填充情况比热平衡时有较大的变化，从引起 $\Delta n \neq \Delta p$ ，这种效应对瞬态过程的影响很重要。此外，最有效的复合中心在禁带中央，而最有效的陷阱能级在费米能级附近。一般来说，所有的杂质或缺陷能级都有某种程度的陷阱效应，而且陷阱效应是否成立还与一定的外界条件有关。

5-8、解：光照前

$$\sigma_0 = \frac{1}{\rho_0} = \frac{1}{6} \approx 1.167 (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$$

光照后 $\Delta p = G \tau = (4 \times 10^{21}) (8 \times 10^{-6}) = 3.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

则

$$\sigma = \sigma_0 + \Delta \sigma = \sigma_0 + \Delta p \cdot q \cdot \mu_p = 1.167 + (3.2 \times 10^{16}) (1.6 \times 10^{-19}) (490) = 3.51 (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1})$$

答：光照前后样品的电导率分别为 $1.167 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 和 $3.51 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ 。

5-9、证明：对于非简并的非均匀半导体

$$j = (j_n)_{\text{扩}} + (j_n)_{\text{漂}} = nq \mu_n E + q D_n \frac{dn}{dx}$$

由于

$$n = N_c \cdot e^{\frac{[E_c(0) - qV(x)] - E_F}{k_0 T}}$$

则

$$\frac{dn}{dx} = n \cdot \frac{q \frac{dV}{dx} + \frac{dE_F}{dx}}{k_0 T}$$

同时利用非简并半导体的爱因斯坦关系，所以

$$\begin{aligned} j &= nq\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= nq\mu_n \left(-\frac{dV}{dx} \right) + q \left(\mu_n \cdot \frac{k_0 T}{q} \right) \left(n \cdot \frac{q \frac{dV}{dx} + \frac{dE_F}{dx}}{k_0 T} \right) \\ &= n\mu_n \cdot \frac{dE_F}{dx} \end{aligned}$$

得证。

5-10、解：

$$\begin{aligned} (j_p)_{\text{扩散}} &= -qD_p \frac{dp}{dx} \\ &= -q \left(\mu_n \frac{k_0 T}{q} \right) \frac{dp}{dx} \\ &= -(1.6 \times 10^{-19}) \left(0.055 \times \frac{0.026 \times (1.602 \times 10^{-19})}{1.6 \times 10^{-19}} \right) \frac{2 \times 10^{16} \times 10^8}{4 \times 10^{-6}} \\ &= -7.15 \times 10^{-5} (\text{A/m}^2) \end{aligned}$$

答：空穴的扩散电流密度为 $7.15 \times 10^{-5} \text{A/m}^2$ 。

5-11、证明：在小信号条件下，本征半导体的非平衡载流子的寿命

$$\tau \approx \frac{1}{r(n_0 + p_0)} = \frac{1}{2rn_i}$$

而 $n_0 + p_0 \geq 2\sqrt{n_0 p_0} = 2n_i$

所以

原创力文档
max.book118.com
预览与源文档一致 下载高清无水印

$$\tau \leq \frac{1}{2m_i}$$

本征半导体的非平衡载流子的寿命最长。

得证。

第六篇习题 -金属和半导体接触

刘诺 编

6-1、什么是功函数？哪些因数影响了半导体的功函数？什么是接触势差？

6-2、什么是 Schottky 势垒？影响其势垒高度的因数有哪些？

6-3、什么是欧姆接触？形成欧姆接触的方法有几种？试根据能带图分别加以分析。

6-4、什么是镜像力？什么是隧道效应？它们对接触势垒的影响怎样的？

6-5、施主浓度为 $7.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的 n 型 Si 与 Al 形成金属与半导体接触，Al 的功函数为 4.20eV，Si 的电子亲和能为 4.05eV，试画出理想情况下金属 - 半导体接触的能带图并标明半导体表面势的数值。

6-6、分别分析 n 型和 p 型半导体形成阻挡层和反阻挡层的条件。

6-7、试分别画出 n 型和 p 型半导体分别形成阻挡层和反阻挡层的能带图。

6-8、什么是少数载流子注入效应？

6-9、某 Schottky 二极管，其中半导体中施主浓度为 $2.5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，势垒高度为 0.64eV，加上 4V 的正向电压时，试求势垒的宽度为多少？

6-10、试根据能带图定性分析金属 - n 型半导体形成良好欧姆接触的原因。

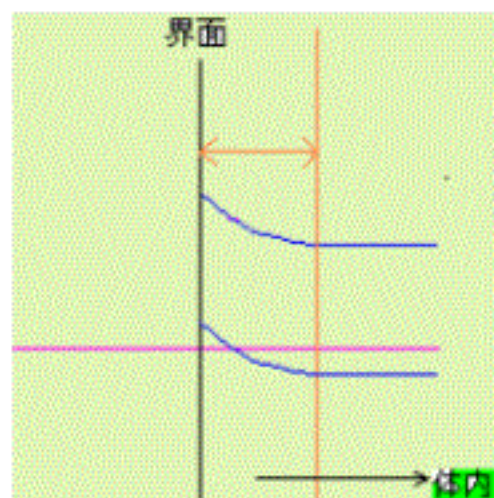
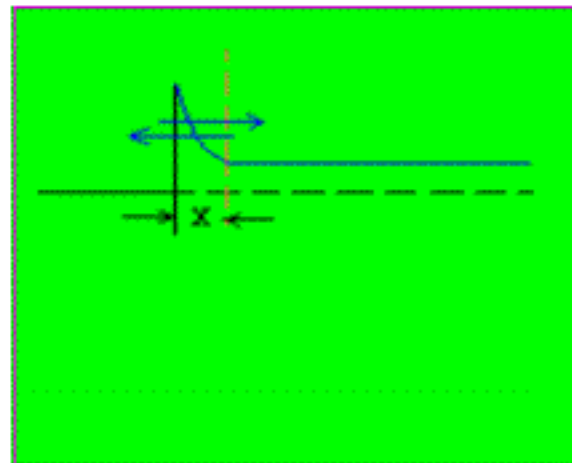
第六篇 题解-金属和半导体接触

6-1、答：功函数是指真空电子能级 E_0 与半导体的费米能级 E_F 之差。影响功函数的因素是掺杂浓度、温度和半导体的电子亲和势。

接触势则是指两种不同的材料由于接触而产生的接触电势差。

6-2、答：金属与 n 型半导体接触形成阻挡层，其势垒厚度随着外加电压的变化而变化，这就是 Schottky 势垒。影响其势垒高度的因素是两种材料的功函数，影响其势垒厚度的因素则是材料（杂质浓度等）和外加电压。

6-3、答：欧姆接触是指其电流-电压特性满足欧姆定律的金属与半导体接触。形成欧姆接触的常用方法有两种，其一是金属与重掺杂 n 型半导体形成能产生隧道效应的薄势垒层，其二是金属与 p 型半导体接触构成反阻挡层。其能带图分别如下：

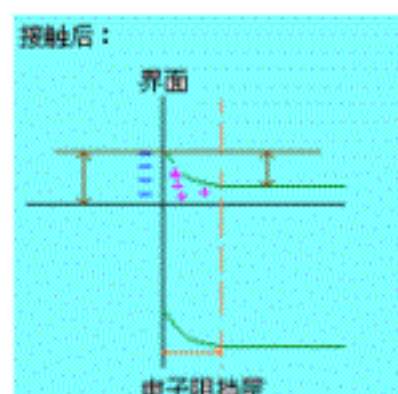
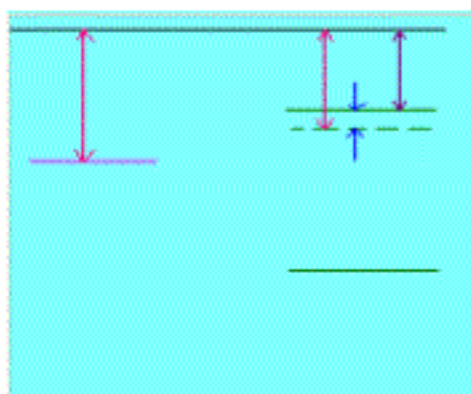


6-4、答：金属与半导体接触时，半导体中的电荷在金属表面感应出带电符号相反的电荷，同时半导体中的电荷要受到金属中的感应电荷的库仑吸引力，这个吸引力就称为镜像力。

能量低于势垒顶的电子有一定几率穿过势垒， 这种效应就是隧道效应。 隧道穿透的几率与电子的能量和势垒厚度有关。

在加上反向电压时， 上述两种效应将使得金属一边的势垒降低， 而且反向电压越大势垒降得越低， 从而导致反向电流不饱和。

6-5、解：金属与半导体接触前、后能带图如图所示



$$\begin{aligned} \therefore n_0 &= N_c \cdot e^{\frac{E_n}{k_0 T}} \\ \therefore E_n &= k_0 T \cdot \ln \left(\frac{N_c}{n_0} \right) \\ &= 0.026 \cdot \ln \left(\frac{2.8 \times 10^{19}}{7 \times 10^{16}} \right) \\ &= 0.1558(\text{eV}) \end{aligned}$$

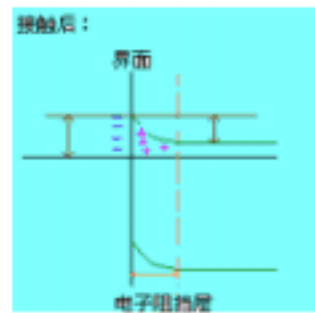
则

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{W_s - W_m}{q} \\ &= \frac{(\chi + E_n) - W_m}{q} \\ &= (4.05 + 0.1558) - 4.3 \\ &= -0.0942(\text{V}) \end{aligned}$$

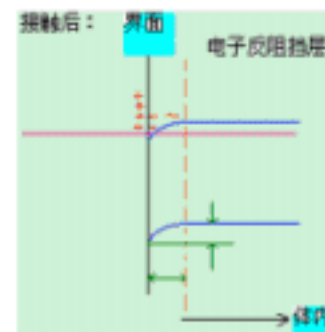
答：半导体的表面势为 -0.0942 V。

6-6、解：

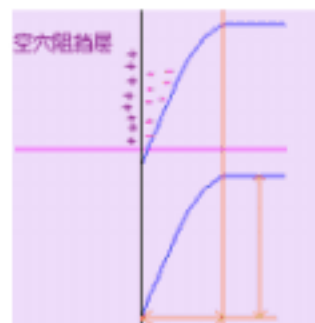
- ①) 金属与 n 半导体接触形成阻挡层的条件是 $W_m > W_s$, 其接触后的能带图如图所示:



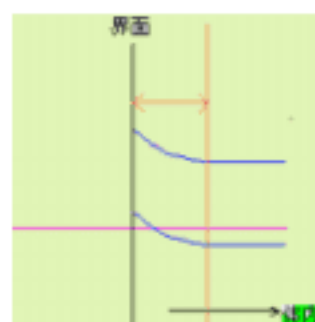
金属与 n 半导体接触形成反阻挡层的条件是 $W_m < W_s$, 其接触后的能带图如图所示:



- ②) 金属与 p 半导体接触形成阻挡层的条件是 $W_m < W_s$, 其接触后的能带图如图所示:



金属与 p 半导体接触形成反阻挡层的条件是 $W_m > W_s$, 其接触后的能带图如图所示:



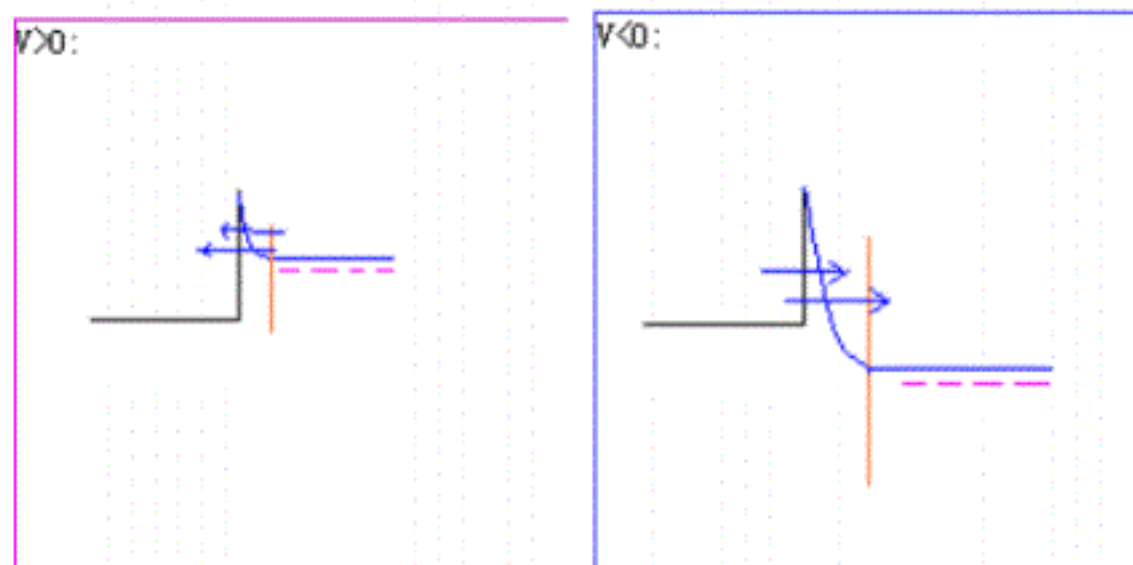
6-8、答: 当金属与 n 型半导体形成整流接触时, 加上正向电压, 空穴从金属流向半导体的现象就是少数载流子注入效应。它本质上是半导体价带顶附近的电子流向金属中金属费米能级以下的空能级, 从而在价带顶附近产生空穴。小注入时, 注入比 (少数载流子电流与总电流直之比) 很小; 在大电流条件下, 注入比随电流密度增加而增大。

6-9、解：

$$\begin{aligned}
 x_D &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_r \varepsilon_0 (V - V_D)}{qN_D}} \\
 &= \sqrt{\frac{2 \times 11.9 (8.854 \times 10^{-12}) (4 - 0.64)}{(1.6 \times 10^{-19}) (2.5 \times 10^{16})}} \\
 &\approx 4.2 \times 10^{-3} \text{ (m)}
 \end{aligned}$$

答：势垒的宽度约为 $4.2 \times 10^{-3} \text{m}$ 。

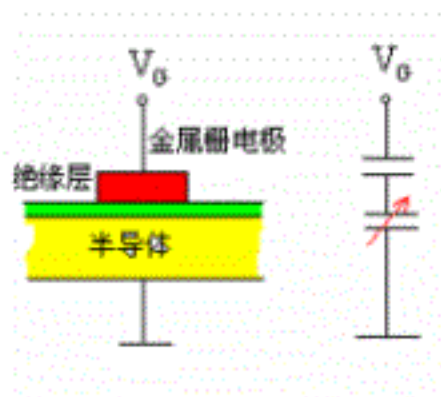
6-10、解：当金属和半导体接触接触时，如果对半导体的掺杂很高，将会使得势垒区的宽度变得很薄，势垒区近似为透明，当隧道电流占主要地位时，其接触电阻很小，金属与半导体接触近似为欧姆接触。加上正、反向电压时的能带图如下图所示：



第六篇 题解-半导体表面与 MIS 结构

刘诺 编

7-1、解：



而 ① 因为 $C_0 = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d_0} \frac{dQ_m}{dV_{G_0}} \rightarrow (1) \rightarrow (2)$

$$C_s = \frac{dQ_m}{dV_s} \rightarrow (3)$$

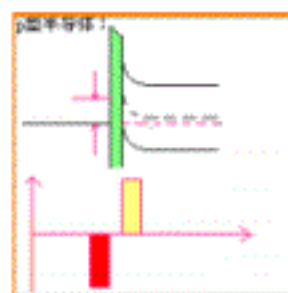
又因为 $V_G = V_s + V_0$

$$\therefore C = \frac{dQ_m}{dV_G} = \frac{dQ_m}{dV_s + dV_0} = \frac{1}{\frac{dV_s}{dQ_m} + \frac{dV_0}{dQ_m}} = \frac{1}{\frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_s}}$$

所以 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{C_s} \rightarrow (4)$

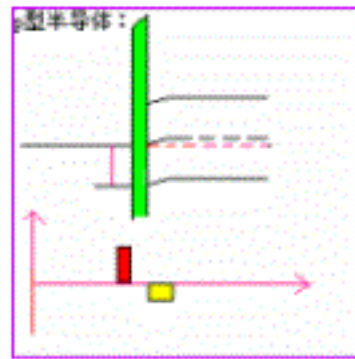
7-3、解：

①) 表面积累：当金属表面所加的电压使得半导体表面出现多子积累时， 这就

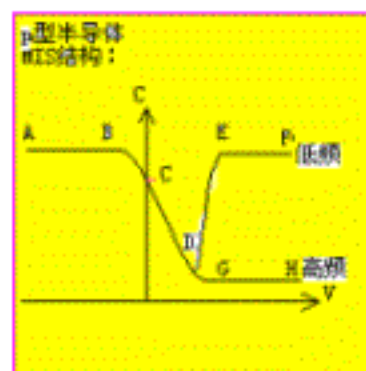
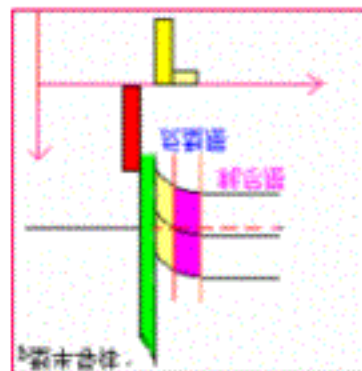


是表面积累，其能带图和电荷分布如图所示：

②) 表面耗尽：当金属表面所加的电压使得半导体表面载流子浓度几乎为零时，这就是表面耗尽，其能带图和电荷分布如图所示：



③) 当金属表面所加的电压使得半导体表面的少子浓度比多子浓度多时，这就是表面反型，其能带图和电荷分布如图所示：



7-3、解：理想 MIS 结构的高频、低频电容 -电压特性曲线如图所示：

其中 AB 段对应表面积累， C 到 D 段为表面耗尽， GH 和 EF 对应表面反型。

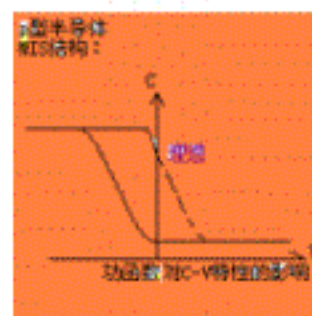
7-4、解：使半导体表面达到强反型时加在金属电极上的栅电压就是开启电压。这时半导体的表面势

$$\begin{aligned}
 \therefore V_T &= V_o + 2V_B \\
 &= -\frac{Q_s}{C_o} + 2V_B \\
 V_s &= 2V_B \\
 &= \left(-\frac{Q_s}{C_o} \right) + \left[\frac{2k_0T}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \right]
 \end{aligned}$$

7-5、答：当 MIS 结构的半导体能带平直时，在金属表面上所加的电压就叫平带电压。平带电压是度量实际 MIS 结构与理想 MIS 结构之间的偏离程度的物理量，据此可以获得材料功函数、界面电荷及分布等材料特性参数。

7-6、解：影响 MIS 结构平带电压的因素分为两种：

① 金属与半导体功函数差。例如，当 $W_m < W_s$ 时，将导致 C-V 特性向负栅压方向

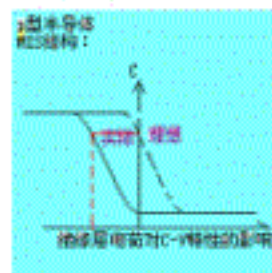


移动。如图

恢复平带在金属上所加的电压就是

$$V_{FB1} = -V_{ms} = \frac{W_m - W_s}{q}$$

② 界面电荷。假设在 SiO_2 中距离金属 - SiO_2 界面 x 处有一层正电荷，将导致 C-V 特性向负栅压方向移动。如图



恢复平带在金属上所加的电压就是

$$\therefore V_{FB2} = -\frac{1}{C_o} \int_0^{d_o} \frac{\rho(x)}{d_o} dx$$

在实际半导体中，这两种因素都同时存在时，所以实际 MIS 结构的平带电压为