

：名  
姓  
：号  
学  
：业  
专  
院学工理  
：院  
学

# 中山大学考试试卷（期中卷 A）

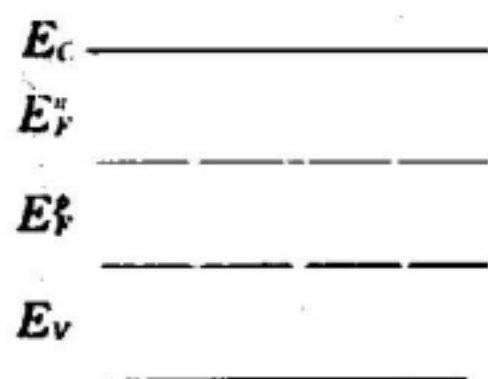
课程名称： 半导体物理 教师： 陈弟虎

考试时间：第 13 周星期（ 11 月 30 日）

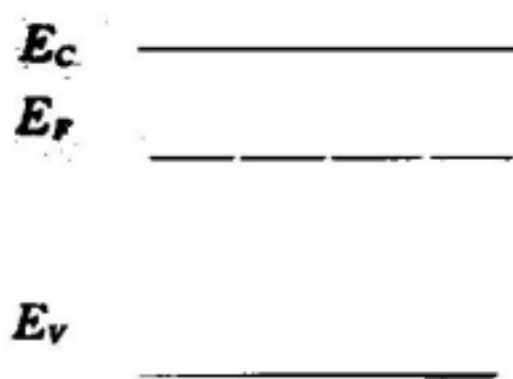
题号	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	总分
得分											
评分人											

## 一、填空题（每题 3 分、共 30 分）

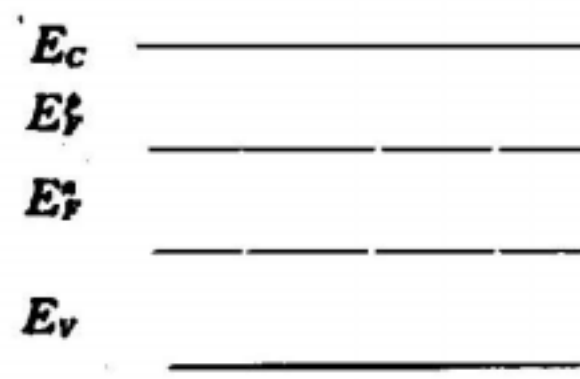
- 在能带顶电子的有效质量是 负 的，而空穴的有效质量是 正 的。
- 在半导体中，杂质所形成的电子态一般都是位于 禁 带中；当半导体在电场的作用下，其能带必然发生 变化或倾斜 。
- 在掺杂半导体中，载流子浓度主要取决于 杂质浓度 和 温度 两种因素。在强电离区，载流子浓度为 有效杂质浓度。杂质浓度 ，而在高温本征区，载流子浓度为 本征载流子浓度 。
- 在半导体中，导带电子和价带空穴遵从玻尔兹曼分布或费米分布。其简并化条件为：当  $E_F$  非常接近或进入导带（价带）时，称为 简并 半导体，载流子浓度服从 费米 分布；而当  $E_C - E_F \gg kT$  或  $E_F - E_V \gg kT$  时，称为 非简并 半导体，载流子浓度服从 玻尔兹曼 分布。
- 根据费米能级的位置填写下面空白（大于、等于或小于）



(a)  $np > n_i^2$



(b)  $np = n_i^2$



(c)  $np < n_i^2$

- 在热平衡条件下，温度  $T$  大于  $0K$ ，电子能量位于费米能级时，电子态的占有几率是  $1/2$  。若  $E_F$  位于  $E_C$ ，试计算状态在  $E_C + kT$  时发现电子的几率为  $(1 + e)^{-1}$  。在  $E_C + kT$  时，若状态被占据的几率等于状态未被占据的几率。此时

费米能级位于何处  $E_F = E_C + kT$  ?

7. 导出能量在  $E_c$  和  $E_c + kT$  之间时,  $\gamma$  是任意常数, 导带上的有效状态总数 (状态数  $/\text{cm}^3$ ) 的表达式为

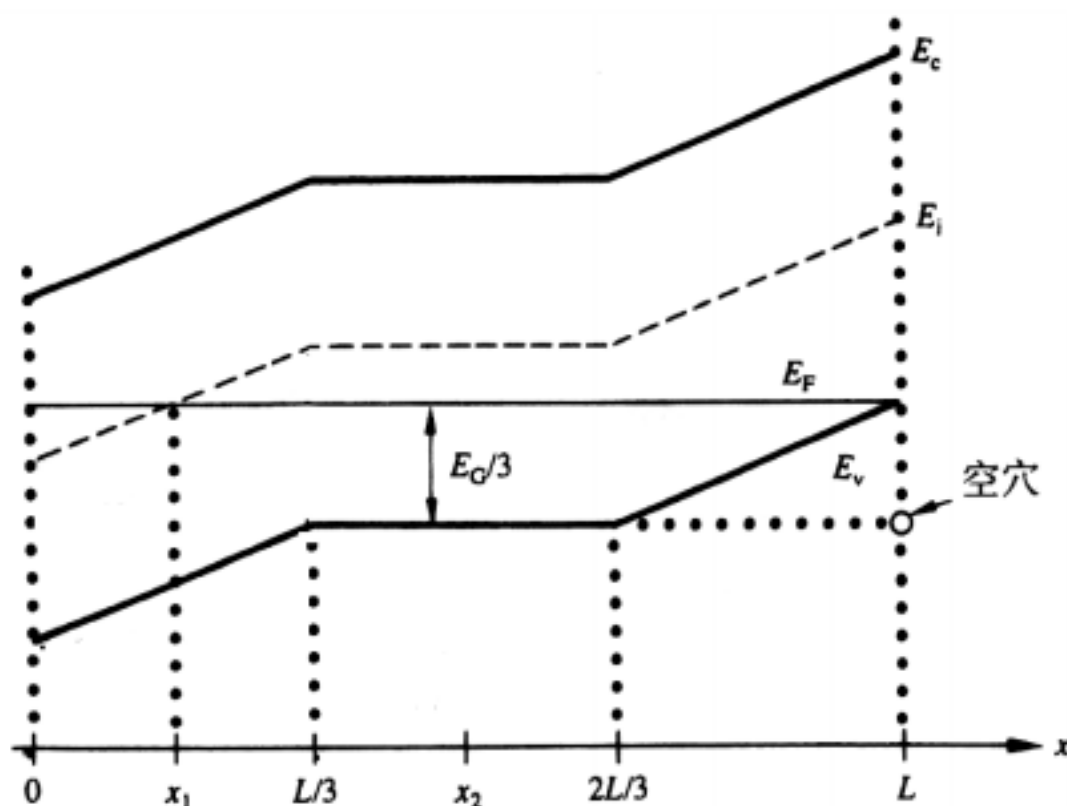
$(8\pi V/3) \times [(2m_n^* kT/h^3)]^{3/2}$ 。

8. 在半导体导带底之上能量为  $E = E_C + k_0 T$  的电子状态被电子占据的几率为  $e^{-10}$ , 则该半导体材料内费米能级的位置为 B :

(A)  $E_F = E_C$ , (B)  $E_C - E_F = 9k_0 T$ , (C)  $E_C - E_F = 10k_0 T$  (D)  $E_F = E_C + k_0 T$

9. 在保持 300K 温度时, 硅器件显示出如下能带图, 使用该能带图回答下列问题:

(数值计算取  $n_i = 10^{10}/\text{cm}^3$ ,  $k_0 T = 0.0259\text{eV}$ ) (6 分)



(1) 半导体处于平衡态吗? (A)

(A) 平衡 (B) 不平衡 (C) 不能确定

(2) 半导体在何处是简并的? (C)

(A) 在靠近  $x=0$  处

(B) 在  $\frac{L}{3} \leq x \leq \frac{2L}{3}$

(C) 在靠近  $x=L$  处

(D) 任何地方都不是

(3) 在  $x=x_2$  处,  $p = ?$  (B)

(A)  $7.63 \times 10^6/\text{cm}^3$  (B)  $1.35 \times 10^{13}/\text{cm}^3$  (C)  $10^{10}/\text{cm}^3$  (D)  $1.72 \times 10^{16}/\text{cm}^3$

(4) 流过  $x=x_1$  处, 电子的电流密度  $J_n$  为 (A)

(A) 0 (B)  $\frac{\mu_n n_i E_g}{L}$  (C)  $-\frac{\mu_n n_i E_g}{L}$  (D)  $D_n \frac{[n(x_2) - n(0)]}{L}$

(5) 流过  $x=x_1$  处, 空穴的漂移电流密度  $J_{Ep}$  为: (B)

(A) 0 (B)  $\frac{\mu_p n_i E_g}{L}$  (C)  $-\frac{\mu_p n_i E_g}{L}$  (D)  $q \mu_p N_D \frac{k_0 T}{q} L$

## 二、论述题：(30 分，每题 15 分)

1. 一维晶格能量  $E$  与波矢  $k$  的关系如图所示。分别讨论下列问题：

- (1) 假设电子能谱和自由电子一样，写出与简约波矢  $k=1/4a$  对应的 A (第 I 能带), B (第 II 能带) 和 C (第 III 能带) 三点处的能量  $E$ 。
- (2) 在  $k=0$  处，图中哪个能带上的电子有效质量最小？
- (3) 在  $k=0$  处，第 II 能带上空穴的有效质量  $m_p^*$  比第 III 能带上的电子有效质量  $m_n^*$  大还是小？
- (4) 当  $k$  为何值时，能带 I 和能带 II 之间，能带 II 和能带 III 之间发生跃迁需要的能量最小？

[解]：(1)  $E(k) = E(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = E(0) + \frac{\hbar^2}{32m^*}$

$$E_A(k) = E(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = E_I(0) + \frac{\hbar^2}{32m_I^*}$$

$$E_B(k) = E(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = E_{II}(0) + \frac{\hbar^2}{32m_{II}^*}$$

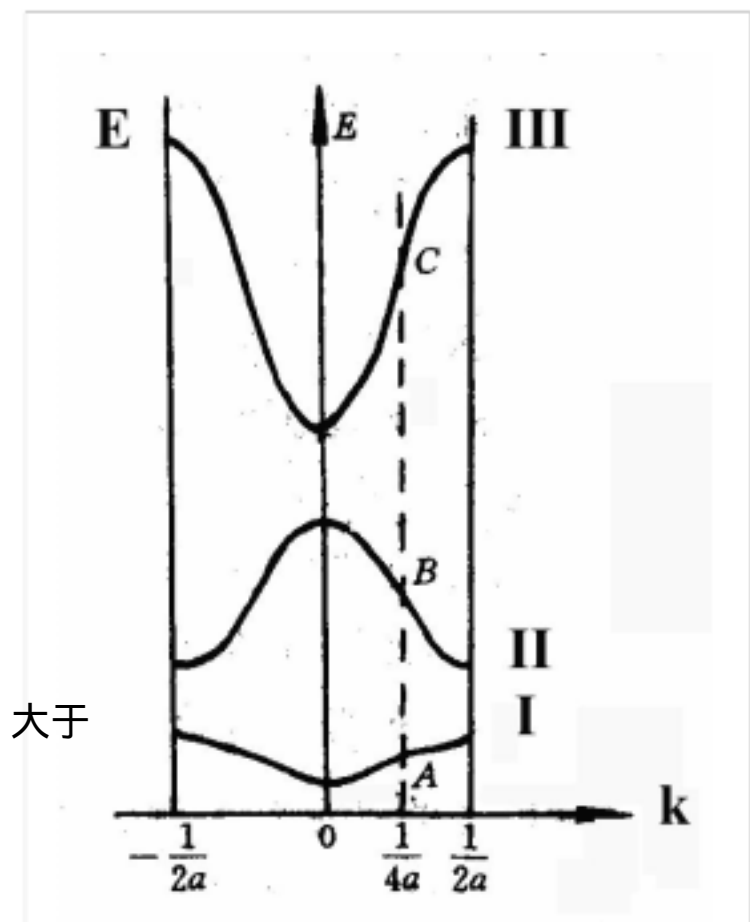
$$E_C(k) = E(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} = E_{III}(0) + \frac{\hbar^2}{32m_{III}^*}$$

(2)  $m_I^* > 0, m_{III}^* > 0, m_{II}^* < 0$

在  $k=0$  处，II 带上的有效质量最小

(3) 在  $k=0$  处 第二能级上空穴的有效质量的大小  $m_p^*$  大于  
第三能级上电子的有效质量的大小  $m_n^*$

(4)  $k=1/2a$  和  $k=0$  时，能级 I 与 II 和能级 II 与 III  
之间发生的跃迁需要能量最小。



2. 画图描述下列问题 (15 分)

(1) 能带图中，标出下列能级的通常位置 (为避免出现错误可填加必要的说明)

- (a)  $E_i$ -本征费米能级 (b)  $E_D$ -施主能级 (c)  $E_A$ -受主能级
- (d)  $E_T$ -产生-复合能级 (e)  $E_F$ -对应于简并掺杂的 p 型材料

(2) 用能带图，画出温度分别为 300K、40K 和 0K 时，位于施主能级上电子冻结过程的示意图像。

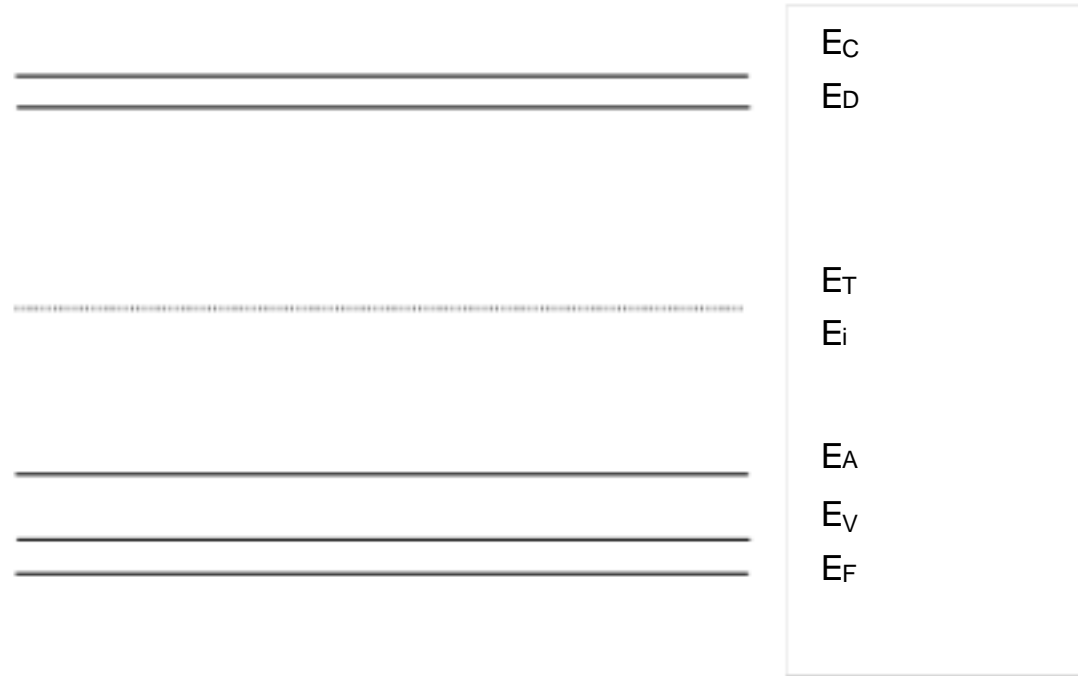
(3) 使用价键模型，画出施主的物理图像。

(4) 画出 p 型掺杂的硅半导体中，载流子浓度和费米能级的位置随温度的变化曲线。

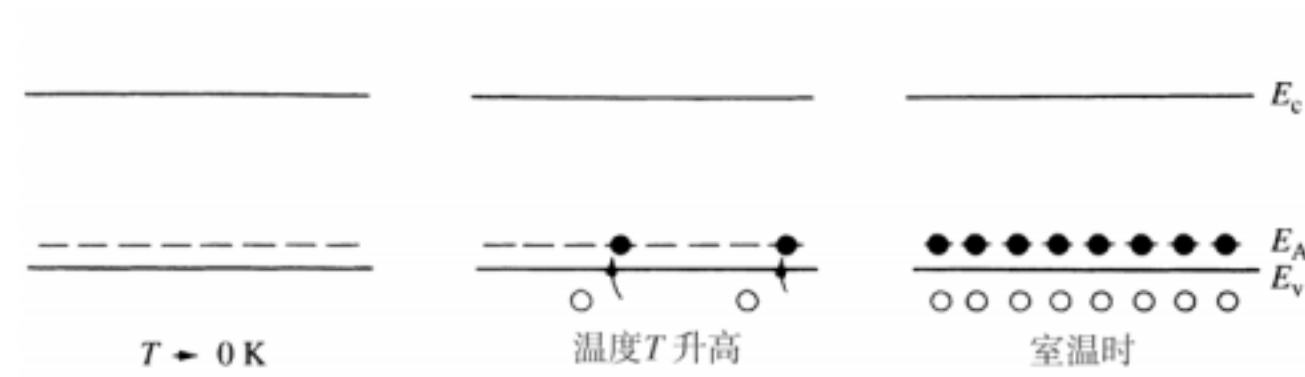
(5) 画出表面电势为正时，在 N 型半导体内的费米能级，并说明该表面是电子势阱还是电子势垒。

[解]：

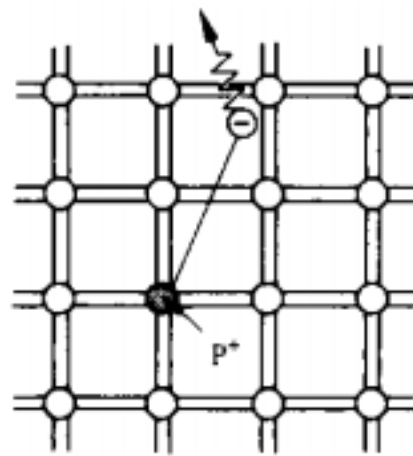
(1)



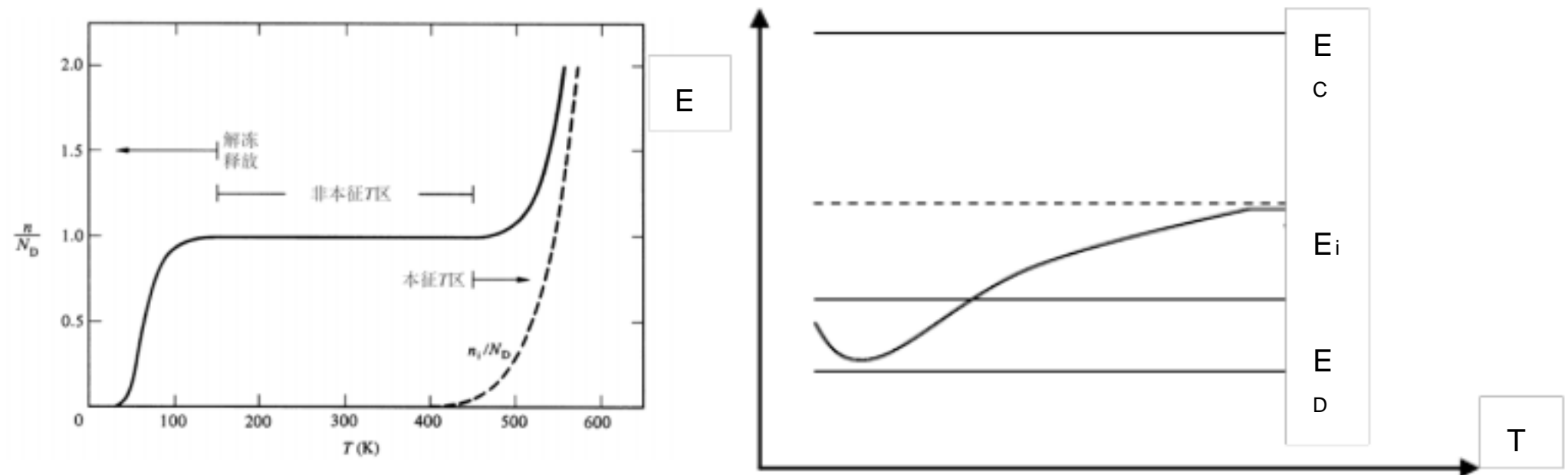
(2)



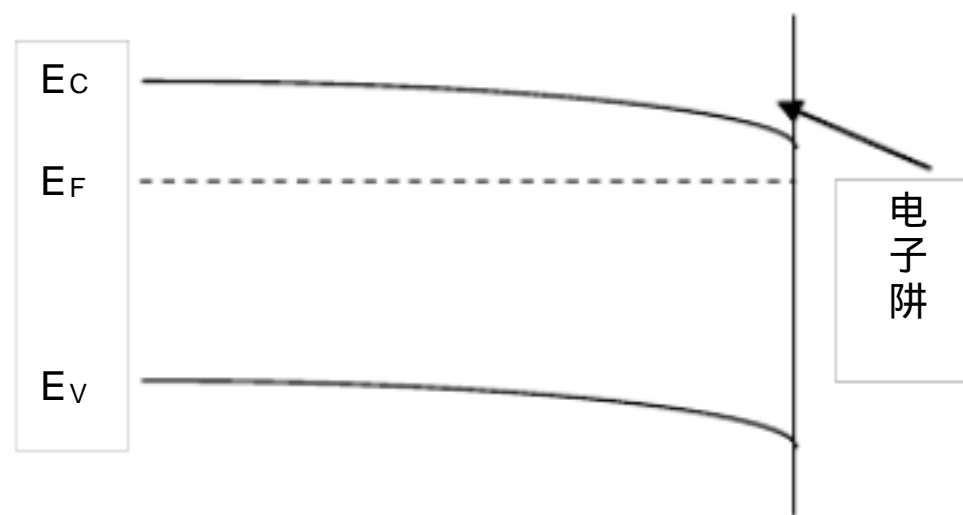
(3)



(4)



(5)



### 三、计算题

- 1、466 克的 Si 单晶，掺有  $4.5 \times 10^{-5}$  克的硼 B，设杂质全部电离，求该材料的电阻率。（设迁移率  $\mu_p = 500 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$  硅单晶的密度为  $2.33 \text{ g/cm}^3$ ，B 的原子量为 10.8，阿伏伽德罗常数为  $N = 6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ 。(10 分)

[解]  $466/2.33 = 200 \text{ cm}^3$

$$N_A = (4.5 \times 10^{-5} / 10.8) (6 \times 10^{23} / 200) = 1.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$P_0 = N_A = 1.25 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$\rho = 1 / (q \mu_p P_0) = 1 \Omega \text{ cm}$$

- 2、求在下列条件下，均匀掺杂硅样品中平衡状态的电子和空穴浓度及  $E_F - E_i$  的值

(1)  $T = 300\text{K}$ ,  $N_A = 9 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ ,  $N_D = 10^{16} / \text{cm}^3$  (10 分)

(2)  $T = 450\text{K}$ ,  $N_A = 0$ ,  $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$

(3)  $T = 650\text{K}$ ,  $N_A = 0$ ,  $N_D = 10^{14} / \text{cm}^3$

(注： $T = 300\text{K}$ :  $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$ ,  $E_g = 1.12\text{eV}$ ;

$T = 450\text{K}$ :  $n_i = 4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$ ,  $E_g = 1.08\text{eV}$ ;

$T = 650\text{K}$ :  $n_i = 10^{16} / \text{cm}^3$ ,  $E_g = 1.015\text{eV}$ )

[解]：(1)  $n = N_D - N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$$p = n_i / n = 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$E_F - E_C = kT \ln(n / N_C) = -0.262 \text{ eV}$$

$$E_F - E_i = E_F - (E_C - E_g / 2) = 0.298 \text{ eV}$$

(2) 过渡区：

$$n=[N_D+(N_D^2+4n_i^2)^{1/2}]/2=1.14\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$$

$$p=n_i^2/n=1.4\times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$$

$$E_F-E_C=kT\ln(n/N_C)=-0.508\text{ eV}$$

$$E_F-E_i=E_F-(E_C-E_g/2)=0.032\text{ eV}$$

(3) 高温本征区

$$n=N_D+n_i=1.01\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$$

$$p=n_i^2/n=1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$$

$$E_F-E_i=0$$

- 3、T=300K 时的硅材料，其掺杂浓度为  $N_A=10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 。求使半导体变成 n 型且费米能级位于导带底下 0.2eV 处，要掺施主杂质的浓度  $N_D$ ？（T=300K 时， $N_C=2.8\times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ， $n_i=1.5\times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ ， $E_g=1.12\text{ eV}$ ，不同计算方法用到的常数不同）（10 分）

[解：

$$E_C-E_F=kT\ln\left(\frac{N_C}{N_D-N_A}\right)$$

$$N_D-N_A=N_C\exp\left[\frac{-(E_C-E_F)}{kT}\right]$$

$$N_D-N_A=2.8\times 10^{19}\exp\left[\frac{-0.20}{0.0259}\right]=1.24\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$$

$$N_D=N_A+1.24\times 10^{16}=2.24\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$$

- 4、有一 n 型半导体，除施主浓度  $N_D$  外，还有少量的受主，其浓度为  $N_A$ ，求弱电离情况电子浓度的表达式。（ $N_C$ ， $E_D$  为已知，且电子分布为费米分布）（10 分）

[解]：

当有受主存在时，从施主激发出来的电子，有一部分要填充受主能级  $E_A$ ，

电中性条件为：

$$N_A + n_0 = N_D^+$$

其中  $N_D^+$  为电离施主浓度

$$N_D^+ = N_D [1 - f(E_D)] = \frac{N_D}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_D}{k_0 T}\right)}$$

$n_0$  为导带中电子浓度

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

$$\text{所以： } N_A + N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right) = \frac{N_D}{1 + \exp\left(\frac{E_F - E_D}{k_0 T}\right)}$$

在弱电离范围内，上式右端分母中的 1 可以忽略不计，则

$$N_A + N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{k_0 T}\right) = N_D \exp\left(-\frac{E_F - E_D}{k_0 T}\right)$$

在极弱电离的情况下，激发到导带的电子数远小于受主  $N_A$ ，故可忽略上式左端的第二项  
这样，由上式得到费米能级

$$E_F = E_D + k_0 T \ln \frac{N_D}{N_A}$$

$$n_0 = \frac{N_C N_D}{N_A} \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{k_0 T}\right)$$