

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)

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. 根据费米能级的位置填写下面空白 (大于、等于或小于)

E_C _____

E_F _____

E_F^* _____

E_V _____

E_C _____

E_F _____

E_F^* _____

E_V _____

E_C _____

E_F _____

E_F^* _____

E_V _____

(a) $np > n_i^2$

(b) $np = n_i^2$

(c) $np < n_i^2$

6. 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

姓名线

学号

订

业

装

院学工理

学院学工

费米能级位于何处 $F_F = E_C + kT$?

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

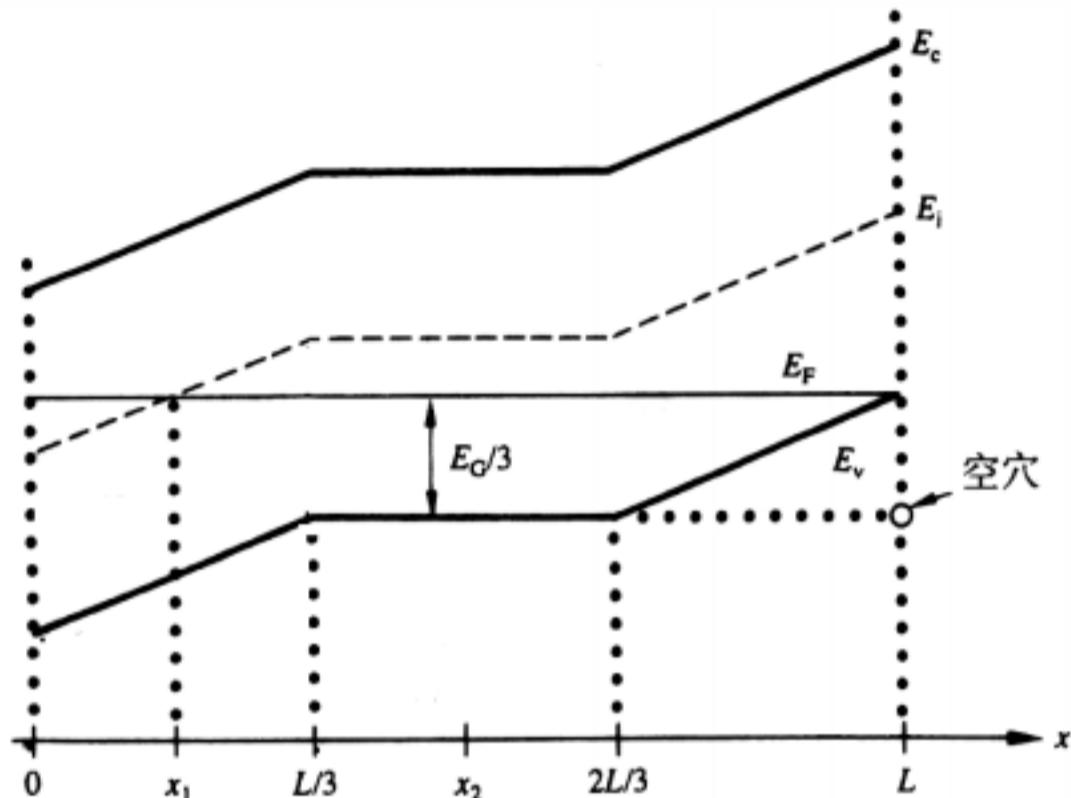
$$(8) \pi V/3 \times [(2m_n \gamma kT/h^3)]^{3/2}$$

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 $n_i = 10^{10}/cm^3$, $k_0 T = 0.0259eV$) (6 分)



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

(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？

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

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

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

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

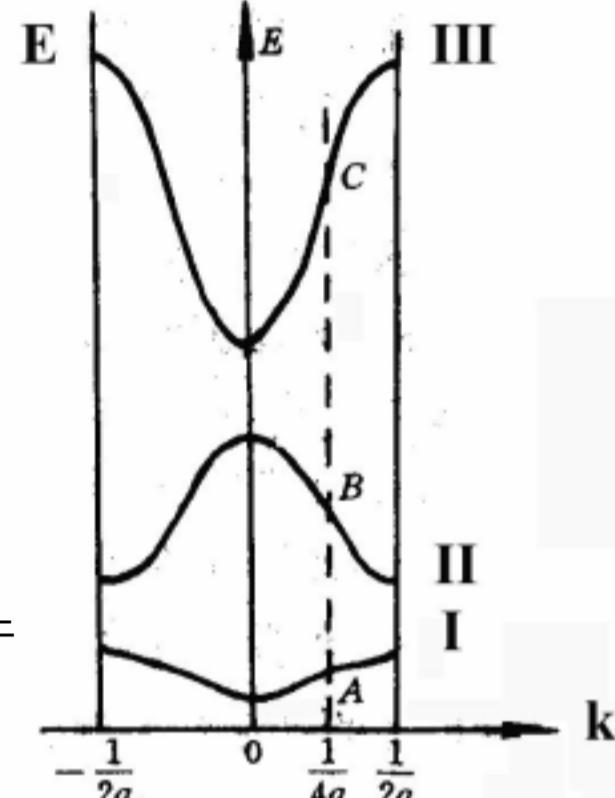
$$(2) m_I^* > 0, m_{III}^* > 0, m_{II}^* < 0$$

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_F -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

(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

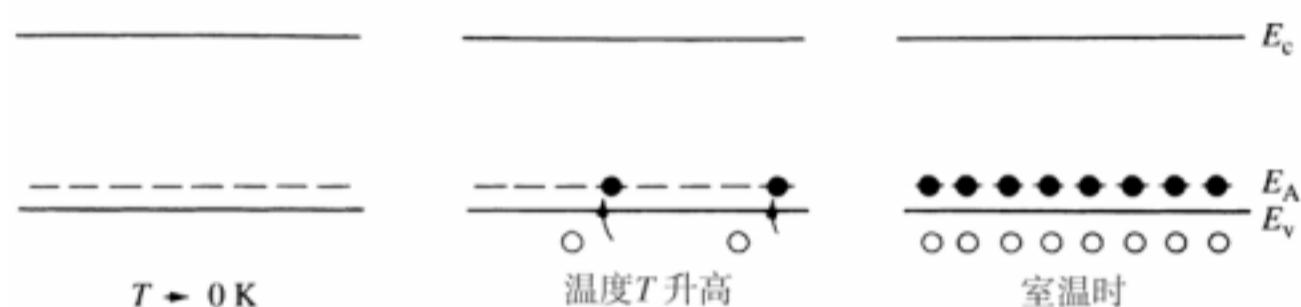
(5) 画出表面电势为正时，在 N 型半导体内的费米能级，并说明该表面是电子势阱还是电子势垒

[解] :

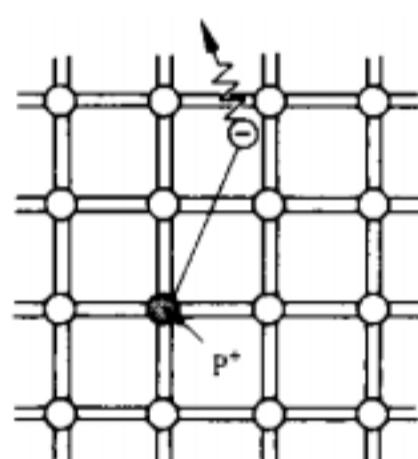
(1)



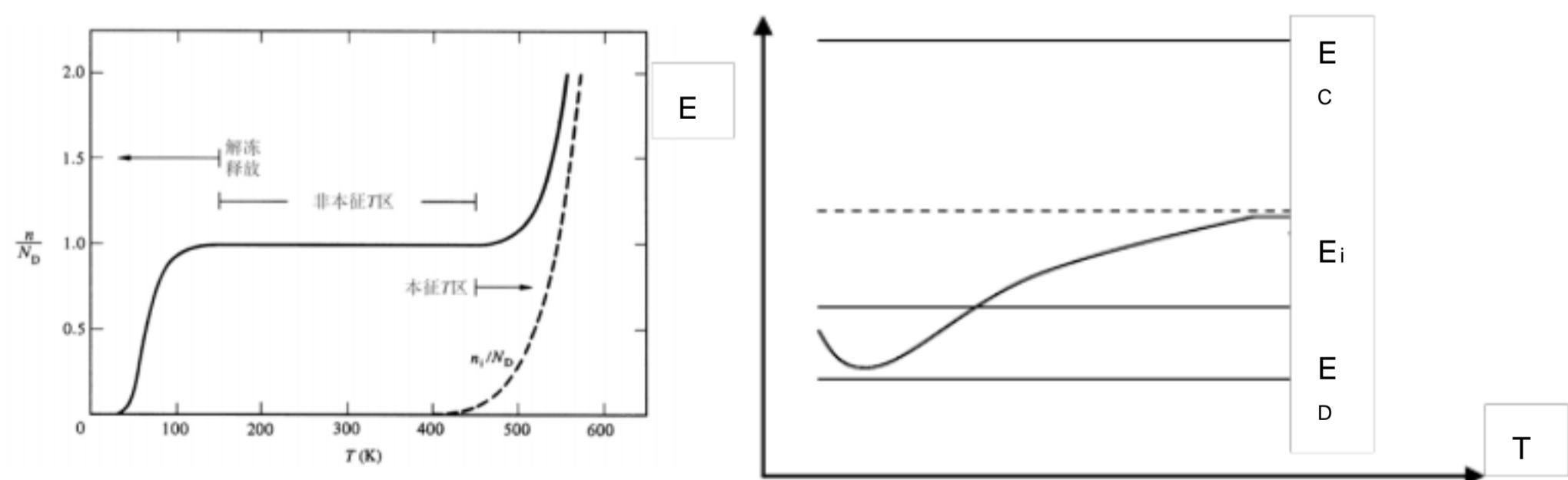
(2)



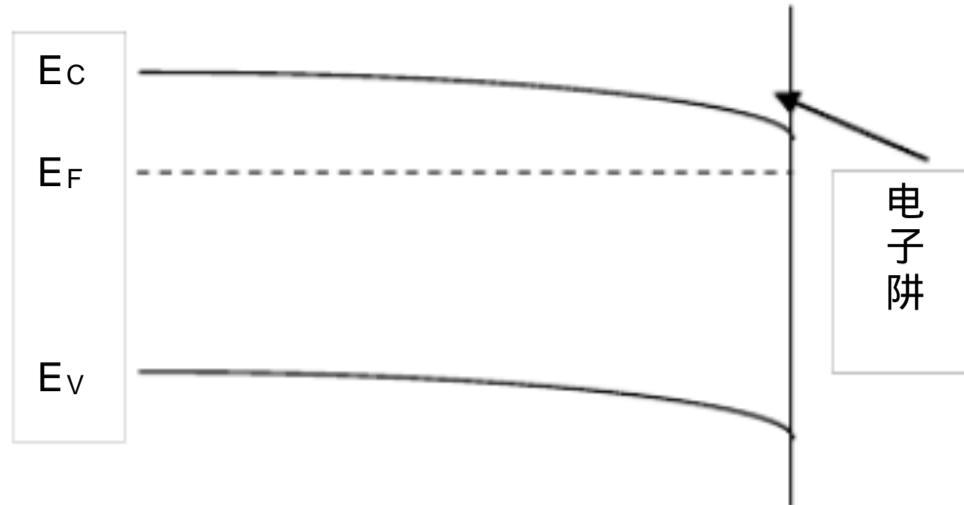
(3)



(4)



(5)



三、计算题

1、466 克的 Si 单晶，掺有 4.5×10^{-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 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）

$$[解] 466/2.33 = 200 \text{ cm}^{-3}$$

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

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

$$\rho = 1/pq\mu_p = 1 \Omega\text{cm}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

(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

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

n_0 为导带中电子浓度

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

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

在弱电离范围内，上式右端分母中的 1 可以忽略不计，则

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

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

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

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