姓名：

学号：

专业：

学院：理工学院

装 订 线

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 ___变化或顷斜___ 。

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 》kT 或 E_F-E_V 》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）

(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

费米能级位于何处 $F_F=E_C+kT$ ？

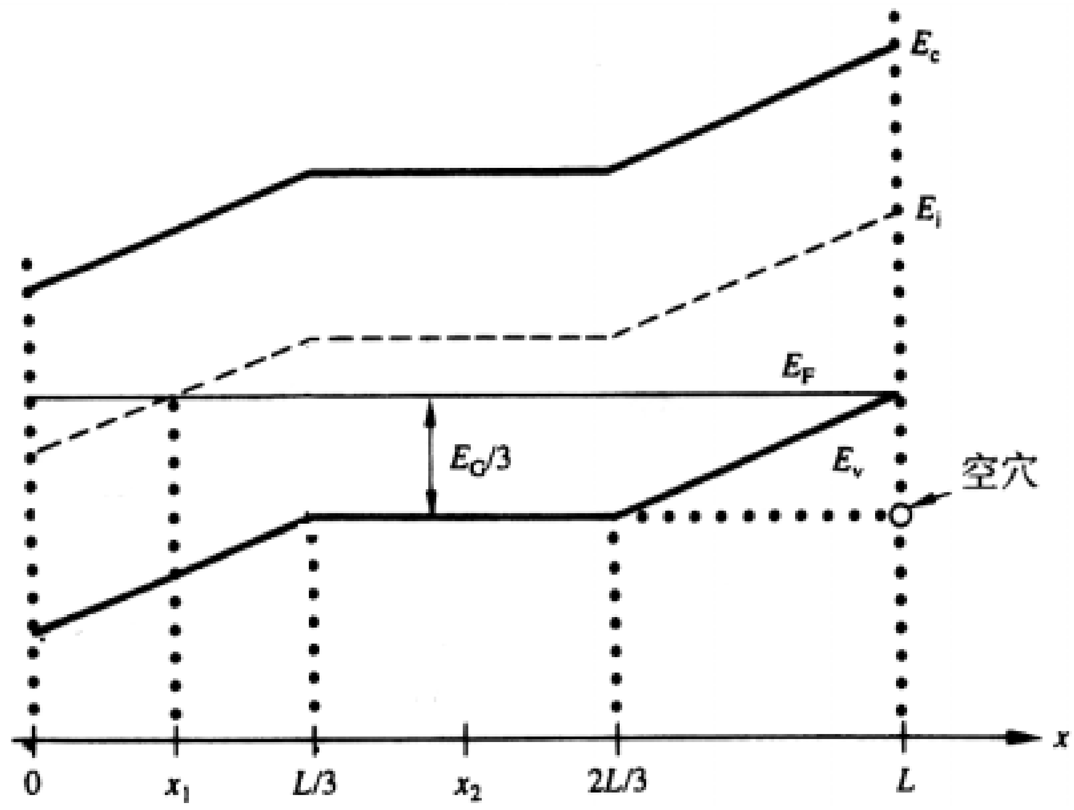
7．导出能量在 E_c 和 $E_c+\gamma kT$ 之间时，γ是任意常数，导带上的有效状态总数（状态数 /cm^3）的表达式为 $(8\pi V/3)\times[(2m^*_n\gamma kT/h^3)]^{3/2}$ 。

8．在半导体导带底之上能量为 $E=E_C+k_0T$ 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）$E_C-E_F=9k_0T$，(C) $E_C-E_F=10k_0T$ (D)$E_F=E_C+k_0T$

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, $k_0T=0.0259$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 $\frac{L}{3}\le x\le\frac{2L}{3}$

（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 $\times10^6$/cm^3 (B)1.35 $\times10^{13}$/cm^3 (C)10 ^{10}/cm^3 (D)1.72 $\times10^{16}$/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） $q\mu_p N_D\frac{k_0T}{q}L$

二、论述题：(30 分，每题 15 分)

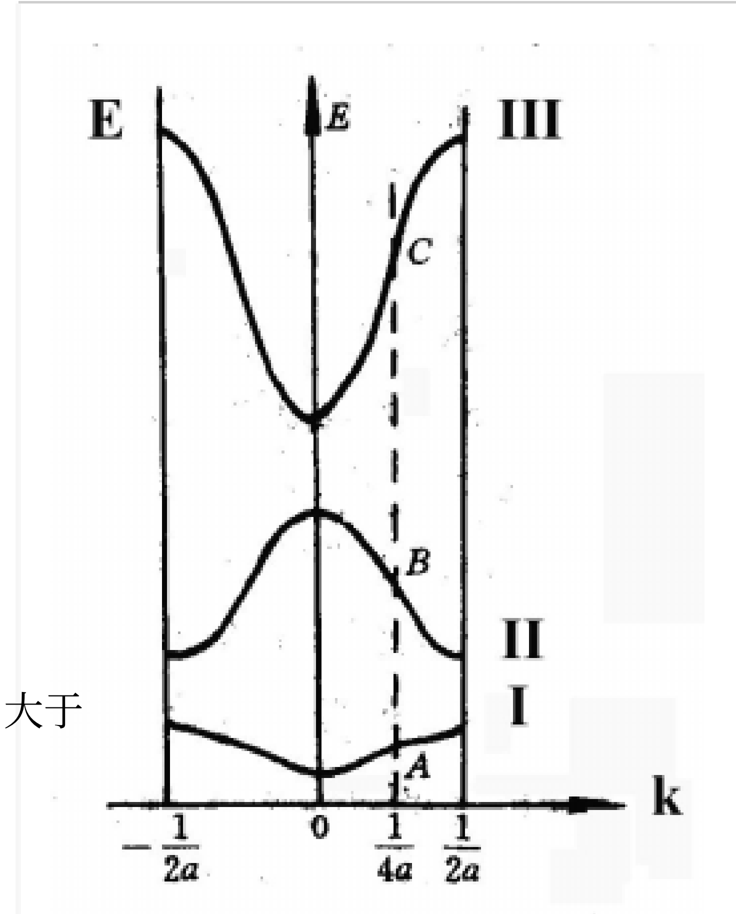
1. 一维晶格能量 E 与波矢 k 的关系如图所示。分别讨论下列问题：

（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 |mp*| 比第 III 能带上的电子有效质量 |mn*| 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）$=E(0)+h^2k^2/2m^*=E(0)+h^2/32m^*$

$E_A(k)=E(0)+h^2k^2/2m^*=E_I(0)+h^2/32m_I^*$

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

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

(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_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.

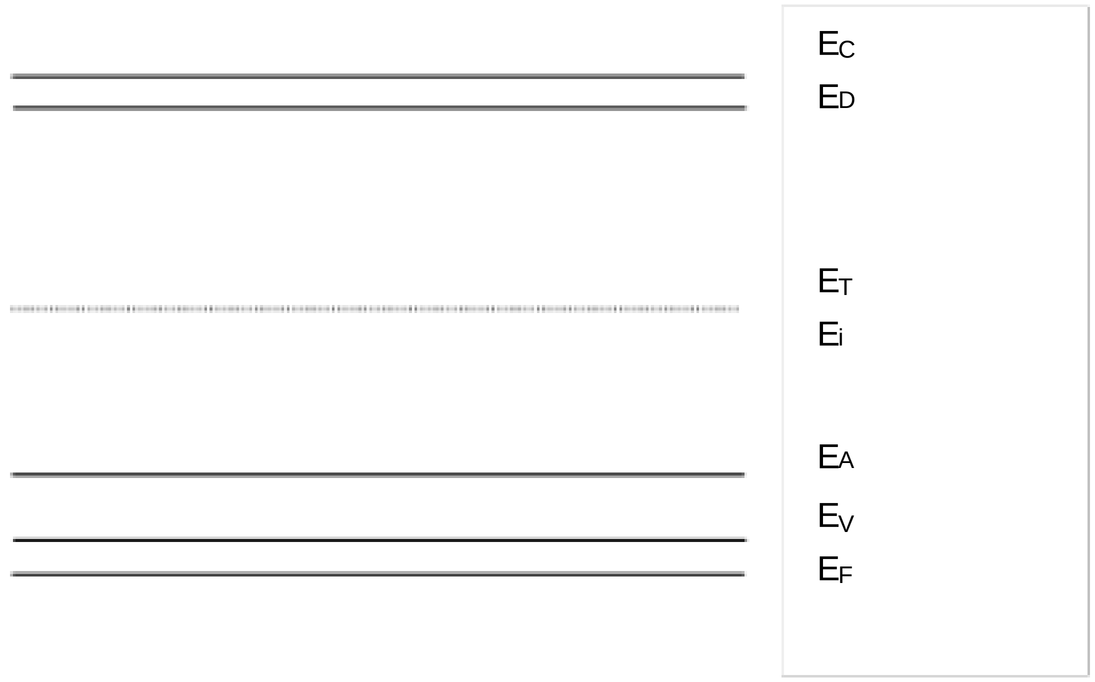
(3) 使用价键模型，画出施主的物理图像.

(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.

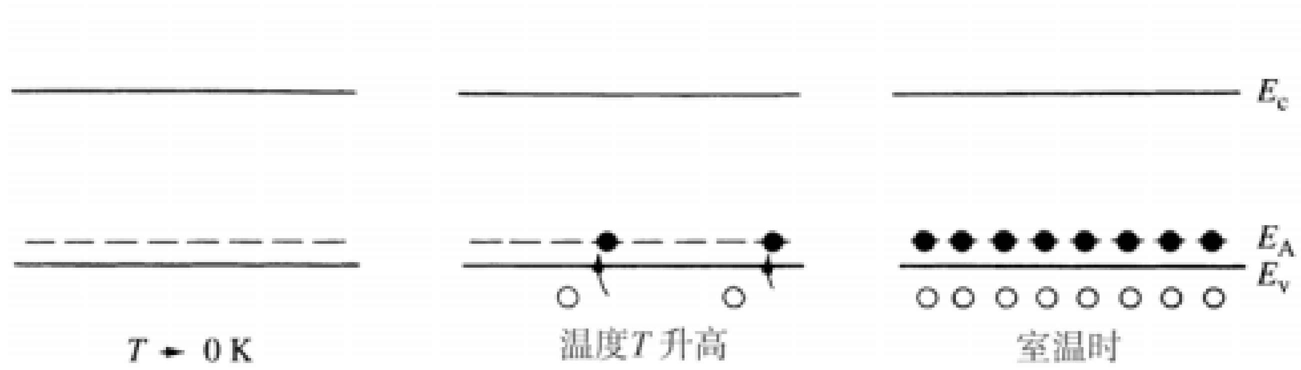
(5) 画出表面电势为正时，在 N 型半导体内的费米能级，并说明该表面是电子势阱还是电子势垒.

[解]：

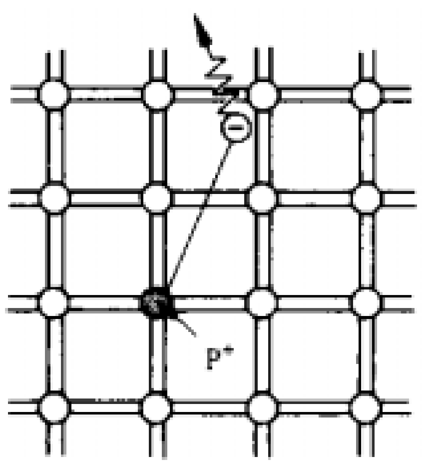
（1）


EC
ED
ET
Ei
EA
EV
EF

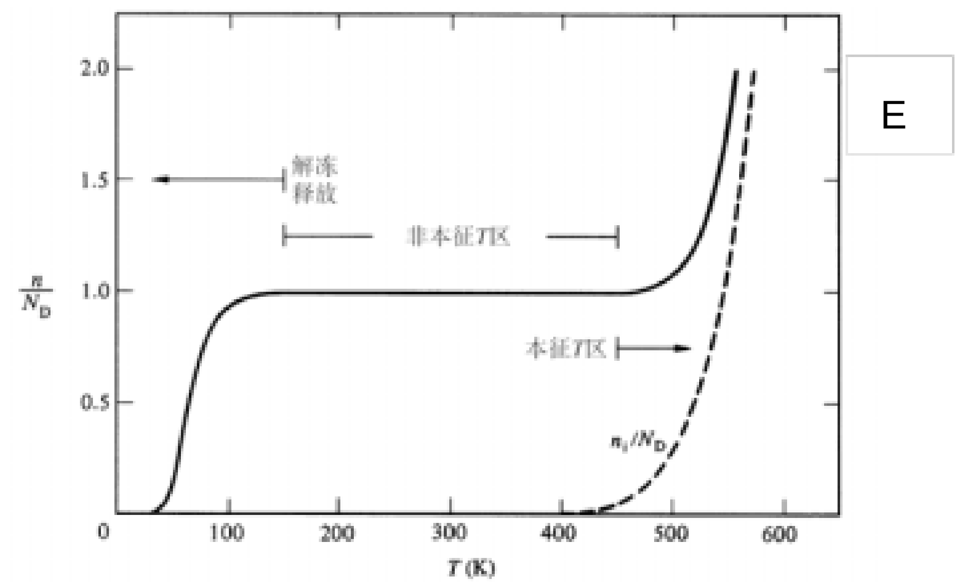
（2）

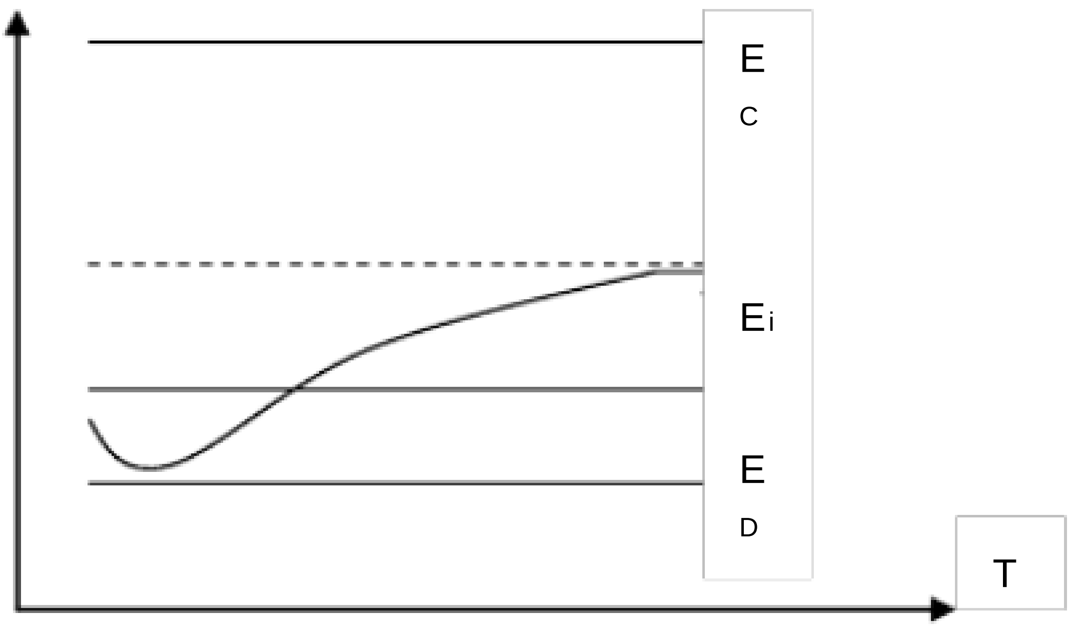

E_c
E_A
E_v
$T \rightarrow 0\,K$
温度T升高
室温时

（3）

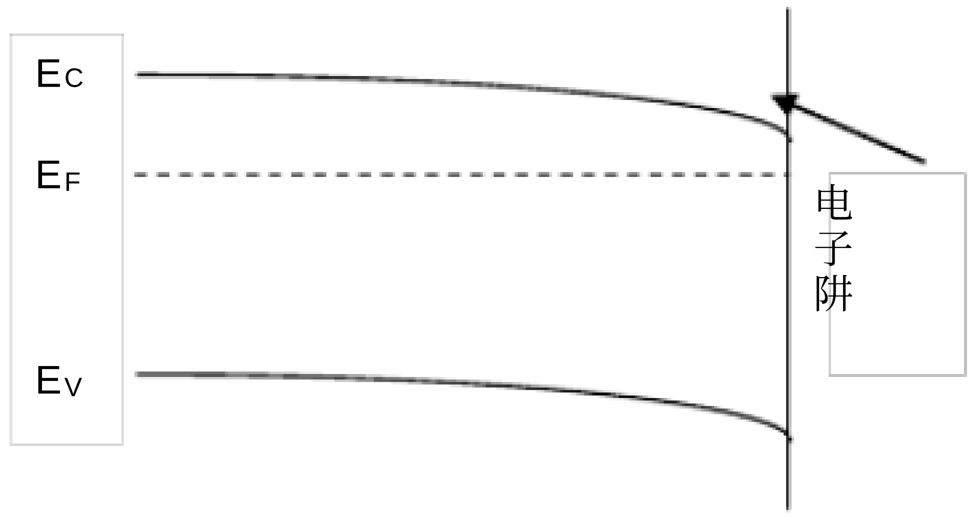

P+

(4)


2.0
1.5
1.0
0.5
0
100
200
300
400
500
600
n/N_D
解冻
释放
非本征T区
本征T区
n_i/N_D
T (K)


E
EC
Ei
ED
T

(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 $\mu_p= 500cm^2/v.s$ 硅单晶的密度为 2.33 克/cm^3，B 的原子量为 10.8，阿伏伽德罗常数为 $N=6\times10^{23}\ mol^{-1}$. (10 分)

[解] $466/2.33 =200\ cm^{-3}$

$N_A=(.5\times10^{-5}/10.8)(6\times10^{23}/200)=1.25\times10^{16}\ cm^{-3}$

$P_0 =N_A =1.25\times10^{16}\ cm^{-3}$

$\rho = 1/pq\mu_p=1\ \Omega cm$

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（10 分）

(1) $T=300K$, $N_A=9\times10^{15}/cm^3$, $N_D=10^{16}/cm^3$

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

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

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

T=450K: $n_i=4\times10^{13}/cm^3$, E_g=1.08eV;

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

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

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

$E_F-E_C=kT\ln(n/Nc)=-0.262$ eV

$E_F-E_i=E_F-(E_C-E_g/2)=0.298$ eV

(2) 过渡区：

$n=[N_D+(N_D^2+4n_i^2)^{1/2}]/2=1.14\times10^{14}\ cm^{-3}$

$p=n_i^2/n=1.4\times10^{13}\ cm^{-3}$

$E_F-E_C=kT\ln(n/Nc')=-0.508$ eV

$E_F-E_i=E_F-(E_C-E_g/2)=0.032$eV

(3) 高温本征区

$n=N_D+n_i=1.01\times10^{16}\ cm^{-3}$

$p=n_i^2/n=1\times10^{16}\ cm^{-3}$

$E_F-E_i=0$

3、 T=300K 时的硅材料，其掺杂浓度为 $N_A=10^{16}cm^{-3}$。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，$N_C=2.8\times10^{19}cm^{-3}$, $n_i=1.5\times10^{10}cm^{-3}$, E_g=1.12eV，不同计算方法用到的常数不同）（10 分）

[解：

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

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

$$N_D - N_A = 2.8\times10^{19}\exp[\frac{-0.20}{0.0259}] = 1.24\times10^{16}\,cm^{-3}$$

$$N_D = N_A + 1.24\times10^{16} = 2.24\times10^{16}\,cm^{-3}$$

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

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

n_0 为导带中电子浓度

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

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

在弱电离范围内，上式 右端分母中的 1 可以忽略不计，则

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

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

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

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