南大学

二00六年攻读硕士学位研究生入学考试试卷

请考生注意：试题解答务请考生做在专用“答题纸”上！

做在其它答题纸上或试卷上的解答将被视为无效解答，不予评分。

课程编号：429　　　　　　　　　　课程名称：半导体物理

一、基本概念（简单解释或说明，每题6分，共60分）

（1）有效质量的物理意义；　　（2）空穴的特征

（3）浅能级杂质；　　（4）迁移率定义 单位场强下电子的平均漂移速度

（5）准费米能级　　（6）简并半导体

（7）热载流子　　（8）复合率：单位时间单位体积内复合掉的电子空穴对数

（9）爱因斯坦关系式及意义；　　（10）电子牵引长度 $L_n = \mu_n E \tau$

在电场作用下，在寿命τ时间内电子所漂移的距离

$D = \mu \frac{kT}{q}$ 表示载流子在电场作用下漂移难易程度的迁移率与表示存在浓度梯度时扩散难易程度的扩散系数的关系

二、定性解释或说明（每题15分，共30分）

（1）以硅为例，解释导带底电子状态密度有效质量（m_{dn}）和导带的有效状态密度（N_c）的意义和区别。

（2）图1(a)给出了GaAs的能带结构，请根据GaAs的能带结构定性解释图1（b）给出的GaAs电子平均漂移速度与电场强度的关系。由GaAs的能带结构可知：导带最低能谷1和价带极值均位于布里渊区中心，在[1,1,1]方向布里渊区边界L处还有一个极值约高出0.29eV的能谷2，称为卫星谷。能谷2中电子的有效质量较大，迁移率较低。

在低电场下，电子均位于能谷1中 $\mu_1 = \frac{v_d}{E} = \frac{q\tau}{m_1^*}$

当电场增大时，有部分电子可跃迁至卫星谷中，又∵ $\mu_2 < \mu_1$ ∴ 迁移率变小，v_d 随 E 增大不断降低。

电场增大到一定程度时，电子全部跃迁到卫星谷中 $\mu = \mu_2$

三、计算与推导（共60分）

（1）（20分）试证明在小注入条件下（$\Delta p << n_0 + p_0$），N型半导体材料由直接复合决定的少子寿命为：

$$\tau \approx \frac{1}{r n_0}$$

式中 r 是电子-空穴复合几率，n_0是热平衡时的电子浓度。

证明：直接复合时，复合率为 rnp

又产生率恒定为 $G=rn_0p_0=rn_i^2$（平衡态时）

净复合率为 $rnp-rn_i^2=\frac{\Delta p}{\tau}$

$\tau=\frac{\Delta p}{r[(n_0+\Delta p)(p_0+\Delta p)-n_i^2]}=\frac{\Delta p}{r\Delta p(n_0+p_0+\Delta p)}=\frac{1}{r(n_0+p_0+\Delta p)}$（$\Delta p<<$，$p_0<<n_0$）$\approx\frac{1}{r(n_0)}$

（2）（20分）硅导带极值有6个，等能面为旋转椭球面，椭球长轴方向沿<100>，有效质量分别为m_l和m_t，试证明电子的电导有效质量m_c为：

$$\frac{1}{m_c}=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_l}+\frac{2}{m_t}\right)$$

证明：由题意知，设长轴方向为x方向，则沿x方向的迁移率 $\mu_1=\frac{q\tau}{m_l}$

单能谷中沿x向的迁移率为 $\mu_2=\mu_3=\frac{q\tau}{m_t}$

导带的电子浓度为n，则每个能谷电子浓度为$\frac{n}{6}$

沿x方向的电子扩散电流为

$J_x=\frac{1}{3}nq\mu_1E_x+\frac{1}{3}nq\mu_2E_x+\frac{1}{3}nq\mu_3E_x$

$=\frac{1}{3}nq\mu_1E_x+\frac{2}{3}nq\mu_2E_x$

$=(\frac{1}{3}\mu_1+\frac{2}{3}\mu_2)nqE_x$

与 $J=nq\mu_cE$ 相比 $\mu_c=\frac{1}{3}\mu_1+\frac{2}{3}\mu_2=\frac{1}{3}\frac{q\tau}{m_l}+\frac{2q}{3m_t}$

又 $\mu_c=\frac{q\tau}{m_c}$ ∴ $\frac{1}{m_c}=\frac{1}{3}(\frac{1}{m_l}+\dots)$

（3）（10分）已知硅导带底电子状态密度有效质量$m_n^*=1.08m_0$、带顶空穴状态密度有效质量$m_p^*=0.59m_0$、室温下$k_0T=0.026\text{eV}$，计算本征硅在室温（300°C）时的费米能级位置。假定它在禁带中线处合理吗？

$N_c=2\frac{(2\pi m_n^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$

$n_i^2=N_cN_v\exp(-\frac{E_g}{k_0T})$

$n_0=N_c\exp(-\frac{E_c-E_F}{k_0T})$

$p_0=N_v\exp(-\frac{E_F-E_V}{k_0T})$

式中 r 是电子-空穴复合几率，n_0 是热平衡时的电子浓度。

（2）（20 分）硅导带极值有 6 个，等能面为旋转椭球面，椭球长轴方向沿<100>，有效质量分别为 m_l 和 m_t，试证明电子的电导有效质量 m_c 为：

$$\frac{1}{m_c}=\frac{1}{3}\left(\frac{1}{m_l}+\frac{2}{m_t}\right)$$

证明：由题意知：设长轴方向为 x 正向，则 x 方向的迁移率 $\mu_1=\frac{q\tau}{m_l}$，垂直的方向的迁移率 $\mu_2=\mu_3=\frac{q\tau}{m_t}$。设总的电子浓度为 n，则每个极值电子浓度为 $\frac{n}{6}$。

沿 x 方向的电子扩散电流 $J_x=\frac{1}{3}nq\mu_1E_x+\frac{1}{3}nq\mu_2E_x+\frac{1}{3}nq\mu_3E_x$
$=\frac{1}{3}nq\mu_1E_x+\frac{2}{3}nq\mu_2E_x$
$=(\frac{1}{3}\mu_1+\frac{2}{3}\mu_2)nqE_x$

与 $J=nq\mu_cE$ 相比，$\mu_c=\frac{1}{3}\mu_1+\frac{2}{3}\mu_2=\frac{1}{3}\frac{q\tau}{m_l}+\frac{2}{3}\frac{q\tau}{m_t}$，

又 $\mu_c=\frac{q\tau}{m_c}$，$\frac{1}{m_c}=\frac{1}{3}(\frac{1}{m_l}+\frac{2}{m_t})$

（3）（10 分）已知硅导带底电子状态密度有效质量 $m_n^*=1.08m_0$、价带顶空穴状态密度有效质量 $m_p^*=0.59m_0$、室温下 $k_0T=0.026\text{eV}$，计算本征硅在室温（300°C）时的费米能级位置。假定它在禁带中线处合理吗？

$N_c=2\frac{(2\pi m_n^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$

$n_i^2=N_cN_v\exp(-\frac{E_g}{k_0T})$　　$n_0=N_c\exp(-\frac{E_c-E_F}{k_0T})$　　$p_0=N_v\exp(-\frac{E_F-E_v}{k_0T})$

$N_v=2\frac{(2\pi m_p^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$　　$N_c=2\frac{(2\pi m_n^* k_0T)^{3/2}}{h^3}$

$\because n_0=p_0$　$N_c\exp(-\frac{E_c-E_F}{k_0T})=N_v\exp(-\frac{E_F-E_v}{k_0T})$

又 $\frac{N_c}{N_v}=\frac{(m_n^*)^{3/2}}{(m_p^*)^{3/2}}=(\frac{1.08}{0.59})^{3/2}$

$E_F=\frac{E_v+E_c}{2}+\frac{3}{4}k_0T\ln(\frac{1.08}{0.59})^{-1}$

$=\frac{E_v+E_c}{2}+\frac{3}{4}\times0.026\text{eV}\ln\frac{0.59}{1.08}$

而 Si 中禁带宽度一般为 1eV 左右

$\therefore E_F\approx\frac{E_v+E_c}{2}$

（4）（10 分）设晶格常数为 a 的一维晶格，导带极小值附近的能量 $E_c(k)$ 为

$$E_c(k)=\frac{h^2k^2}{3m_0}+\frac{h^2(k-k_1)^2}{m_0}$$

价带极大值附近的能量 $E_v(k)$ 为

$$E_v(k)=\frac{h^2k_1^2}{6m_0}-\frac{3h^2k^2}{m_0}$$

其中 m_0 为电子质量，h 是普朗克常数，$k_1=a/2$。试求：

（1）禁带宽度；$E_g=E_c-E_v=\frac{h^2k^2}{3m_0}+\frac{h^2(k-k_1)^2}{m_0}-\frac{h^2k_1^2}{6m_0}-\frac{3h^2k^2}{m_0}$　$E_g=\frac{h^2k_1^2}{24m_0}=\frac{h^2a^2}{48m_0}$

要不要？将 $k=\frac{3}{8}a$ 代入 $E_c(k)$，$k=0$ 代入 $E_v(k)$？

（2）价带顶电子跃迁到导带底时准动量的变化。

令 $\frac{\partial E_c(k)}{\partial k}=\frac{2h^2k}{3m_0}+\frac{2h^2(k-k_1)}{m_0}=0$　$\therefore k+3(k-k_1)=0$　$\therefore 4k=3k_1$　$k=\frac{3}{4}k_1=\frac{3}{8}a$

令 $\frac{\partial E_v(k)}{\partial k}=0$　$\therefore k=0$　$\therefore$ 准动量变化为 $h\cdot\frac{3}{8}a-h\cdot0=\frac{3}{8}ha$　$\Delta p=\frac{3}{4}k_1\hbar=\frac{3}{8}\hbar a$