

# 信息科学技术学院 2005-2006 学年第二学期

## 本科生期末考试试卷及参考答案

装  
订  
线  
内  
请  
勿  
答  
题

考试科目： 半导体物理

考试时间： 2007 年 6 月

\_\_\_\_\_专业\_\_\_\_\_级\_\_\_\_\_班 主讲教师-----

姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

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

一、(每小题 6 分，共 30 分) 名词解释：

1、迁移率

**参考答案：**

单位电场作用下，载流子获得的平均定向运动速度，反映了载流子在电场作用下的运输能力，是半导体物理中重要的概念和参数之一。迁移率的表达式为： $\mu = \frac{q\tau}{m^*}$ 。可见，有效质量和弛豫时间（散射）是影响迁移率的因素。

2、过剩载流子

**参考答案：**

在非平衡状态下，载流子的分布函数和浓度将与热平衡时的情形不同。非平衡状态下的载流子称为非平衡载流子。将非平衡载流子浓度超过热平衡时浓度的部分，称为过剩载流子。

非平衡过剩载流子浓度： $\Delta n = n - n_0$ ， $\Delta p = p - p_0$ ，且满足电中性条件： $\Delta n = \Delta p$ 。可以产生过剩载流子的外界影响包括光照（光注入）、外加电压（电注入）等。

对于注入情形，通过光照或外加电压（如碰撞电离）产生过剩载流子： $np > n_i^2$ ，对于抽取情形，通过外加电压使得载流子浓度减小： $np < n_i^2$ 。

3、简并半导体

**参考答案：**

对于重掺杂半导体，费米能级接近或进入导带或价带，导带/价带中的载流子浓度很高，泡利不相容原理起作用，电子和空穴分布不再满足玻耳兹曼分布，需要采用费米分布函数描述。称此类半导体为简并半导体。简并半导体满足的条件是：

$$|E_C - E_F| \leq 3kT \text{ 或 } |E_V - E_F| \leq 3kT$$

#### 4、俄歇复合

##### 参考答案:

电子与空穴复合的方式之一，属非辐射复合，其中没有光子的发射。

载流子从高能级向低能级跃迁，发生导带电子与价带空穴复合时，不是通过辐射光子或声子的方式释放能量，而是通过碰撞将多余的能量传递给另一个载流子，使这个载流子被激发到能量更高的能级上去。然后，获得高能的载流子通过与晶格的连续散射方式（不断放出声子）逐渐释放其较高动能的过程。

带间俄歇复合在窄禁带半导体中及高温情况下起着重要作用，而与杂质和缺陷有关的俄歇复合过程，则常常是影响半导体发光器件发光效率的重要原因。

#### 5、PN 结电容

##### 参考答案:

描述 PN 结中存储电荷量随外加电压发生变化的物理量，定义为： $C_T = \frac{dQ}{dV}$ 。PN 结中具有电荷存储效应的因素包括：空间电荷耗尽区的耗尽电荷和外加偏压后的过剩少数子注入，分别对应于空间电荷区势垒电容和过剩少子的扩散电容。

##### (1) 势垒电容 $C_T$

PN 结上外加电压的变化，导致势垒区的空间电荷数量随外加电压变化，这种电容效应称为势垒电容。在耗尽层近似下，PN 结反向偏压下的势垒电容可以等效为一个平行板电容器的电容。

##### (2) 扩散电容 $C_D$

PN 结加正向偏压时，由于少子的注入，在扩散区内，都有一定数量的少子和等量的多子的积累，而且它们的浓度随正向偏压的变化而变化，从而形成了扩散电容： $C_D = C_{Dp} + C_{Dn}$ 。

由于扩散电容随正向偏压按指数关系增加，所以在大的正向偏压时，扩散电容起主要作用。

#### 二、(每题 10 分，共 30 分)

1. 假设 Si 半导体中 N 型杂质的掺杂浓度为  $N_d$ ，P 型杂质的掺杂浓度为  $N_a$ ，请写出该半导体的电中性条件表达式；如果  $N_d > N_a$ ，写出在热平衡和完全电离条件下，载流子 ( $n$  和  $p$ ) 浓度的表达式。

##### 参考答案:

##### (1) 电中性条件表达式

$$n + N_a - p_a = p + N_d - n_d$$

其中， $N_d$  和  $N_a$  分别是没有电离的施主和受主浓度。

##### (2) 在热平衡和完全电离条件下，有

$$np = n_i^2 \quad \text{和} \quad n + N_a = p + N_d \quad (n_i \text{ 为本征载流子浓度})。$$

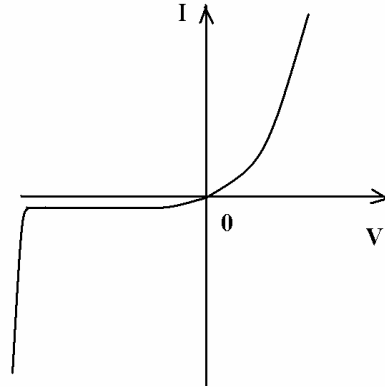
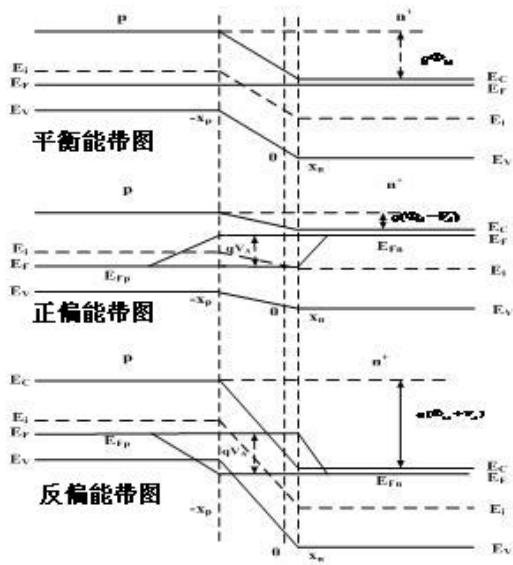
由于  $N_d > N_a$ ，所以杂质补偿作用使导带中电子浓度取决于两种杂质浓度之差，有

$$n = N_d - N_a, \quad p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_d - N_a}$$

2. 画出  $n^+ - p$  单边突变结的平衡、正向和反向偏置情形的能带图；示意画出该  $n^+ - p$  单边突变结在正反偏压作用下的 I-V 特性曲线，并解释之。

##### 参考答案:

对于  $n^+ - p$  单边突变结:  $n^+$  区域的  $E_f$  非常靠近  $E_c$ ,  $x_n \ll x_p$ , 并且准费米能级的变化在  $n^+$  区域更剧烈。



(2) 在正向偏压下,  $J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \approx J_s \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ , 正向电流随正向偏压呈

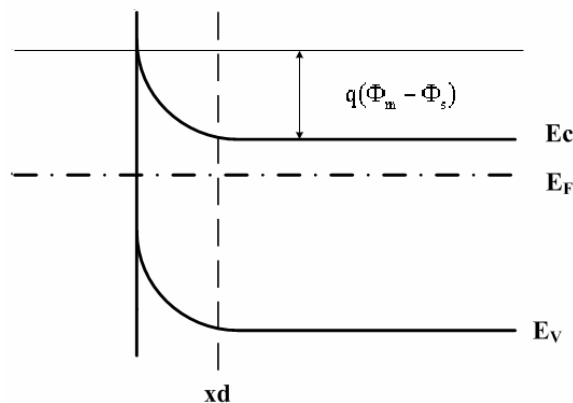
指数关系迅速增大; 在反向偏压下, 势垒增高, 势垒区电场增强, 增强了漂移运动, 使漂移流大于扩散流, 由于是少子的抽取形成的电流, 所以浓度梯度小, 并且当反向电压很大时, 浓度梯度不再随电压变化。所以反向电流较小并且趋于不变; 当反向偏压增大到一定程度,  $n^+ - p$  结会发生击穿(如雪崩击穿, 齐纳击穿), 使反向电流随电压急剧增大。

3. 假设金属的功函数为  $\phi_M$ , N 型半导体的掺杂浓度为  $N_d$ , 相应的功函数为  $\phi_S$ , 其中,  $\phi_M > \phi_S$ 。

1) 求解热平衡时理想 M/S 结构中半导体中的电势分布表达式(假设坐标  $x$  的原点在 M/S 界面, 半导体体内中性区为电势参考点); 2) 写出半导体表面 ( $x=0$ ) 处的载流子浓度表达式。

**参考答案:**

由于  $\phi_M > \phi_S$ , 在热平衡时, N 型半导体将发生电子载流子的耗尽, 形成电子势垒, 如下图所示:



采用耗尽近似, 则有泊松方程如下:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{Si}} = \begin{cases} -\frac{qN_d}{\epsilon_{Si}} & (0 \leq x \leq x_d) \\ 0 & (x > x_d) \end{cases}$$

半导体内电场为零，有  $\varepsilon(x_d) = -\frac{d\Psi}{dx}\Big|_{x=x_d} = 0$ 。

$$\therefore \varepsilon(x) = \frac{qN_d}{\varepsilon_{Si}}(x - x_d) \quad (0 \leq x \leq x_d)$$

再由边界条件  $\Psi(x_d) = 0, \Psi(0) = -(\Phi_m - \Phi_s)$ ，可得电势分布

$$\Psi(x) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon_{Si}}(x - x_d)^2 \quad (0 \leq x \leq x_d), \text{ 并且 } x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{qN_d}(\Phi_m - \Phi_s)}$$

所以热平衡时 M/S 的半导体中电势分布的表达式为：

$$\Psi(x) = \begin{cases} -\frac{qN_d}{2\varepsilon_{Si}}(x - x_d)^2 & (0 \leq x \leq x_d) \\ 0 & (x > x_d) \end{cases}$$

$$\text{其中势垒宽度 } x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{qN_d}(\Phi_m - \Phi_s)}$$

$$(2) \text{ 半导体内电子浓度 } n(x_d) = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{kT}\right) = N_d$$

$$\text{表面处的电子浓度 } n(0) = N_c \exp\left(-\frac{(E_c(0)) - E_f}{kT}\right)$$

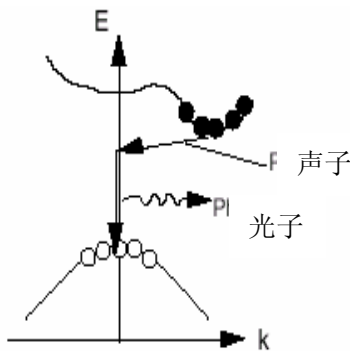
$$\therefore n(0) \approx N_d \exp\left(\frac{-q(\Phi_m - \Phi_s)}{kT}\right)$$

$$p(0) = \frac{n_i^2}{n(0)} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \exp\left(\frac{q(\Phi_m - \Phi_s)}{kT}\right)$$

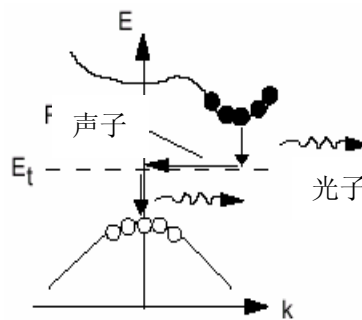
三、(20分) 已知某半导体为间接禁带半导体，其价带顶 ( $E_v$ ) 和导带底 ( $E_c$ ) 对应的波矢  $k$  分别为 0 和  $k_1$  ( $k_1 > 0$ )，同时在禁带中本征费米能级附近存在复合中心能级  $E_t$ 。1) 简述该半导体中可能发生的复合机制，并图示指出各机制的物理过程；2) 如果该半导体可发生直接复合和间接复合，那么在利用能谱分析手段直接观测光子和声子能谱时，可观察到的光子和声子的能谱分别有几条？为什么？

**参考答案：**

(1) 可能发生的复合机制有：直接复合，间接复合，表面复合和俄歇复合。复合过程满足能量守恒和动量守恒。

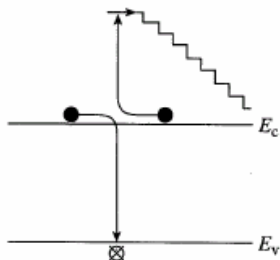


直接复合示意图



间接复合示意图

- a. 直接复合：导带电子直接跃迁到价带，与价带中空穴发生复合的过程。发射的光子能量为电子跃迁损失的能量以满足能量守恒， $h\nu = E_c - E_v$ 。由于光子的动量很小，间接禁带半导体发生直接复合时，还需要有声子的参与，以满足动量守恒，声子的动量为  $p = \hbar k_1$ 。
- b. 间接复合：导带电子和价带空穴间的复合是通过禁带中复合中心能级的辅助而发生的，复合过程为电子首先从导带跃迁到禁带中的复合中心能级，然后再跃迁到价带与空穴发生复合。辐射的光子能量为  $h\nu_1 = E_c - E_t, h\nu_2 = E_t - E_v$ 。放出的声子的动量为  $p = \hbar k_1$ 。
- c. 表面复合：如果在半导体表面存在大量的复合中心，则在半导体表面发生显著的间接复合，复合中心来源于表面缺陷和杂质，如表面的悬挂键等。
- d. 俄歇复合：过程见一.4 题，属非辐射复合，其中没有光子的发射。示意图如下图所示。



(2) 可观察到的光子能谱有三条：

其中一条对应于直接复合， $h\nu_1 = E_c - E_v$ ，

两条对应于间接复合， $h\nu_2 = E_c - E_t, h\nu_3 = E_t - E_v$ 。

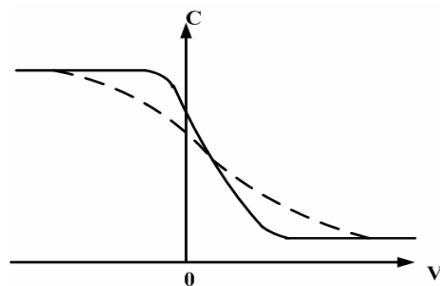
可观察到的声子能谱有一条：直接复合，还是间接复合，动量守恒决定声子的动量变化都为  $p = \hbar k_1$ ，能量为  $E = \frac{\hbar^2 K^2}{2m^*}$ 。

四、(20 分) 设 nMOS (p-Si 衬底) 结构的栅氧化层厚度为  $t_{ox}$ ，氧化层的介电常数为  $\epsilon_{ox}$ ，金属栅和半导体功函数相同，即  $\phi_M = \phi_S$ ，Si 的费米势  $\phi_F = (E_i - E_F)/q$ ，其中， $E_F$  和  $E_i$  分别为 Si 的费米能级和本征费米能级。如果 Si 与氧化层界面存在界面态，并假设界面态呈均匀分布 (态密度为  $N_{it}$ )，其中在本征费米能级  $E_i$  以上为类受主界面态， $E_i$  以下为类施主界面态。

- 1) 画出该 MOS 结构的高频 C-V 特性曲线并与理想 C-V 曲线比较；
- 2) 给出平带电压  $V_{FB}$  的表达式，示意画出平带时的能带图；
- 3) 如果在氧化层中部即  $t_{ox}/2$  处同时还存在负的固定电荷  $Q_f$ ，给出相应的平带电压  $V_{FB}$  的表达式，并示意画出此种情形在平带时的能带图。

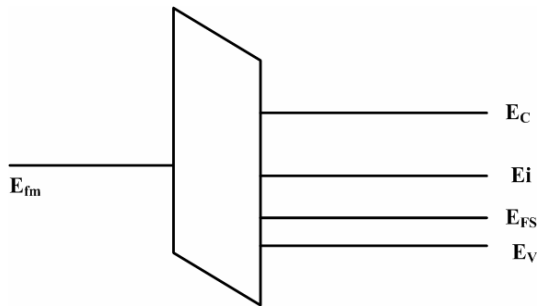
参考答案：

(1) 由于在本征费米能级  $E_i$  以上为类受主界面态， $E_i$  以下为类施主界面态，因此在表面处费米势在高于或低于本征费米势时，界面陷阱电荷分别呈负电或正电性，考虑界面陷阱电荷影响的高频 C-V 特性曲线与理想高频 C-V 特性曲线特征如下图所示。



- a. 当外加很大的负向电压,  $E_f$  在  $E_i$  之下, 类施主界面态带正电, 类受主界面态不带电, 总的界面态正电荷使 C-V 曲线左移;
- b. 当负向电压逐渐减小时, 类施主界面态被占据数目减小, 使得界面正电荷不断减小, 使 C-V 曲线的左移逐渐减弱;
- c. 当外加电压继续上升,  $E_f$  上升到  $E_i$  时, 类施主能级均在  $E_f$  以下, 不带电; 同理, 类受主能级均在  $E_f$  之上, 不带电。等效界面态电荷为 0, 此点两条 C-V 曲线重合。
- d. 当外加正向电压继续增大, 在  $E_f$  之下的类受主界面态逐渐增多, 电离类受主带的负电荷使 C-V 曲线的右移增强。当正向电压大到使  $E_f$  在  $E_c$  之上时, 所有的类受主界面态都电离, 界面负电荷最大, C-V 曲线的右移也达到最大。

(2)



平带时, 类受主能级均在  $E_f$  之上, 类施主能级有部分在  $E_f$  之下。此时的界面态正电荷为

$$Q = qN_{it}(E_i - E_f) = q^2 N_{it} \Phi_F,$$

栅氧化层电容  $C = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}},$

从而, 平带电压为  $V_{FB} = -\frac{q^2 N_{it} \Phi_F t_{ox}}{\epsilon_{ox}}$

(3)

负固定电荷  $-Q_f$  等效到 Si-SiO<sub>2</sub> 界面, 则有  $Q_f' = \frac{1}{t_{ox}} \int_0^{t_{ox}} x \rho(x) dx = -\frac{t_{ox}}{2t_{ox}} Q_f = -\frac{1}{2} Q_f$

固定电荷和界面态电荷引起的总的平带电压为:

$$V_{FB} = V_{FB1} + V_{FB2} = -\frac{q^2 N_{it} \Phi_F t_{ox}}{\epsilon_{ox}} + \frac{Q_f t_{ox}}{2\epsilon_{ox}}$$

- (1) 若  $Q_f$  较大时, 则总的平带电压为正, 使能带向下弯曲, 半导体能带平直, 如左图所示。氧化层左半部分的能带向下弯曲增强, 氧化层右半部分的能带向上的弯曲减缓, 甚至可能平直或向下弯曲。
- (2) 若  $Q_f$  较小时, 则总的平带电压为负, 使能带向上弯曲, 半导体能带平直, 如右图所示。氧化层左半部分的能级向下的弯曲程度减缓, 甚至可能平直甚至向上弯曲, 右半部分能带向上弯曲增强。