

电子科技大学 2018-2019 学年第二学期 期中考试

考试科目: 半导体物理 A 考试形式: 闭卷 考试日期: 2019 年 5 月 日

成绩构成比例: 平时 35 %, 期末 65 %

本试卷由 四 部分构成, 共 8 页。考试时长: 95 分钟 注: _____

题号	一	二	三	四	合计
得分					

得 分

一、选择题 (共 30 分。每空仅有唯一答案; 每空 1 分)

- 能带中电子有效质量 m_n^* 表达式为 (A), 在能带顶附近 m_n^* (C)。

A. $m_n^* = \hbar^2 / (d^2 E / dk^2)$ B. $m_n^* = \hbar k / m_n^*$ C. < 0 D. > 0
- 对于掺杂浓度为 10^{14} cm^{-3} 的 n 型硅半导体, 温度从 300 K 升高至 400 K 时, 禁带宽度 (B), 本征载流子浓度 (A), 少数载流子浓度 (A), 晶格振动散射 (A)。

A. 变大 B. 变小 C. 不变
- N 型非简并半导体导带能级电子分布满足 (B) 分布函数, 简并半导体导带能级电子分布满足 (A) 分布函数, 与非简并半导体相比, 简并半导体禁带宽度更 (D)。

A. 费米 B. 玻尔兹曼 C. 宽 D. 窄
- N 型半导体发生非简并的条件为 (D)。

A. $E_c - E_F > k_0 T$ B. $E_c - E_F < k_0 T$ C. $E_c - E_F < 2k_0 T$ D. $E_c - E_F > 2k_0 T$
- 热平衡下中等掺杂导体中载流子浓度的乘积 $n_0 p_0$ 与 (A)、(B)、(D) 有关。

A. E_g B. 温度
C. 所含杂质类型 (n 或 p 型) D. 半导体种类
E. n_0 大小 F. p_0 大小
- 金是一种很典型的 (A), 在高速器件中通过掺金可显著地降低 (C)。

A. 复合中心 B. 浅能级杂质电离能 C. 载流子寿命 D. 平均自由时间
- 把硅原子掺入砷化镓样品中, 掺杂浓度为 10^{15} cm^{-3} , 其中 10% 硅原子取代砷, 90% 硅原子取代镓, 若杂质完全电离, 忽略本征激发, 则半导体为 (A) 型半导体, 取代砷的相当于 (D) 杂质。

A. n B. p C. 施主 D. 受主
- 已知室温下某半导体的禁带宽度为 1.44 eV, $N_c = 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_v = 8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 则其本

征载流子浓度约为 (B)。

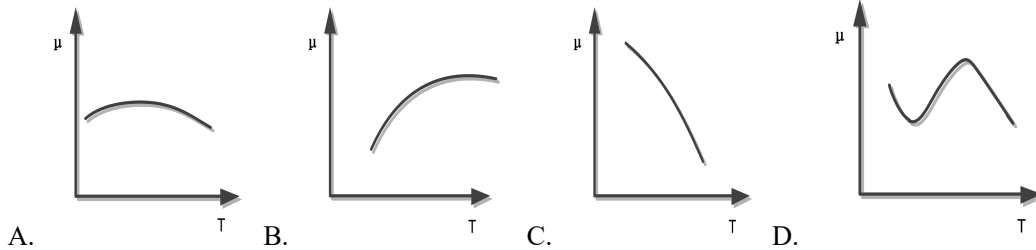
A. $2 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$

B. $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

C. $2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$

D. $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

9. 掺杂浓度在 10^{14} cm^{-3} 时载流子迁移率随温度的变化规律为 (C)



10. 对于本征硅, 温度从 300 K 升高到 600 K, 则电子迁移率变为原来的 (D) 倍, 电子扩散系数变为原来的 (G) 倍。

A. 5.6

B. 2.8

C. 2

D. 0.35

E. 1.4

F. 0.5

G. 0.71

11. 对于 n 型半导体, 在小注入的情况下, 电子准费米能级 (B) E_F , E_{Fn} 与 E_{Fp} 偏离的大小反映出半导体偏离 (C) 的程度。

A. 远离

B. 靠近

C. 热平衡

D. 稳态

E. 简并态

F. 非简并态

12. 假定外加电场从零逐渐增大, Si 材料载流子迁移率随电场增加而 (B), 载流子平均漂移速度随电场增加先 (A) 后 (C), 这是由于载流子与晶格发生了 (D)。

A. 增加

B. 降低

C. 饱和

D. 光学波散射

E. 声学波散射

F. 电离杂质散射;

13. 导带中的电子直接落入价带与空穴复合的过程称 (B), 而通过复合中心的进行的复合称为 (A)。

A. 间接复合;

B. 直接复合;

C. 俄歇复合;

D. 辐射复合

14. 一块半导体寿命 $\tau = 10 \mu\text{s}$, 光照在材料中会产生非平衡载流子, 光照突然停止 $20 \mu\text{s}$ 后, 其中非平衡载流子将衰减到原来的 (C)。

A. e

B. $1/e$

C. $1/e^2$

D. $1/2$

二、简答题 (共 30 分)

得 分

16. (8 分) 简述间接复合的四个过程, 在能带图上画出示意图并画出上述过程后的电子状态, 结合分析强 N 型和高阻 N 型半导体寿命与哪些因素有关, 给出物理解释 (假设复合中心能级 E_t 在禁带中线以上)。

答:

间接复合分为四个过程

a. 甲: 电子俘获过程

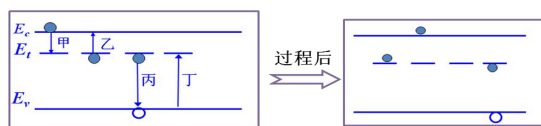
1 分; b. 乙: 电子发射过程

1 分

c. 丙: 空穴俘获过程,

1 分; d. 丁: 空穴发射过程

1 分



甲—俘获电子

乙—发射电子

丙—俘获空穴

丁—发射空穴

强 N 型少子寿命: $\tau \approx 1/(r_p N_t) \approx \tau_p$, 寿命由 N_t 个复合中心对少子空穴的俘获决定, 原

因是强 N 型区复合中心能级基本上填满了电子, 相当于俘获电子过程已完成。 **2 分**

高阻区少子寿命: $\tau \approx (1/N_t r_p)(n_1 / n_0) > \tau_p$, 寿命与多子浓度 n_0 成反比, 原因是高阻区

n_0 较少, 俘获的空穴有更大几率进行再激发过程, 只有部分复合, 因此寿命增加。 **2 分**

得分

17. (10 分) 请列举半导体中的散射机制并对机理进行简要说明 (共 10 分)

答案: (任意答对 5 个得满分, 每个 2 分)

答:

(1) 电离杂质散射: 电离杂质附近库伦势场作用导致的散射; **2 分**

(2) 晶格振动散射: 声学波散射, 晶格振动导致原子疏密变化, 产生形变势, 导致的散射; **2 分**

(3) 光学波散射: 离子晶体中晶格振动导致正负离子疏密变化形成附加电势场导致的散射; **2 分**

(4) 等同能谷间散射: 电子在等同能谷间从一个极值附近散射到另一个极值附近导致的散射; **2 分**

(5) 中性杂质散射: 中性杂质对周期性势场的微扰作用导致的散射; **2 分**

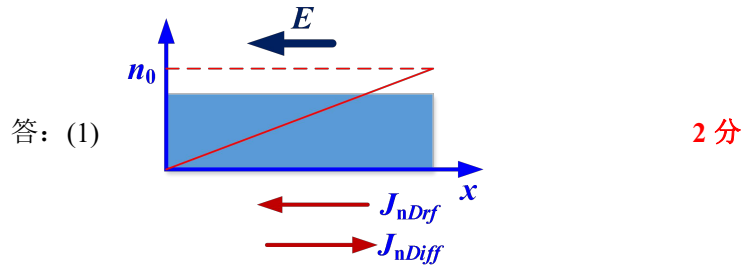
(6) 位错散射: 由位错形成空间电荷区附加势场导致的散射; **2 分**

(7) 合金散射: 多元化合物半导体中由于不同原子随机排列产生微扰导致的散射; **2 分**

(8) 载流子间散射: 强简并条件下载流子之间发生的散射。 **2 分**

得 分

18. (12 分) 在 n 型半导体棒中，电子浓度从左到右增大，同时棒内还存在电场，方向向左。画图说明电子漂移电流和电子扩散电流的方向，并解释原因。若将各处的电子浓度翻倍，那么电子的漂移电流和扩散电流将如何变化？如果各处增加的电子浓度都相同，则电子的漂移和扩散电流又会怎样变化？请使用适当的方程或表达式加以解释。



原因：电子漂移电流的方向与外加电场方向一致 1 分

电子扩散电流方向指向浓度增大的方向 1 分

(2) 将半导体各处电子浓度翻倍时：

$$(J_n)_{Drf} = qn\mu_n = q(2n_0)\mu_n = 2(J_{n0})_{Drf} \quad \text{漂移电流翻倍} \quad 2 \text{ 分}$$

$$(J_n)_{Diff} = qD_n \frac{d\Delta n}{dx} = qD_n \frac{d(2\Delta n_0)}{dx} = 2(J_{n0})_{Diff} \quad \text{扩散电流翻倍} \quad 2 \text{ 分}$$

(3) 将半导体各处电子增加相同浓度时：

$$(J_n)_{Drf} = qn\mu_n = q(n_0 + \Delta n)\mu_n = (J_{n0})_{Drf} + q\Delta n\mu_n \quad \text{漂移电流增大} \quad 2 \text{ 分}$$

$$\begin{aligned} (J_n)_{Diff} &= qD_n \frac{d\Delta n}{dx} = qD_n \frac{(n_{x_2 0} + \Delta n) - (n_{x_1 0} + \Delta n)}{dx} \\ &= qD_n \frac{n_{x_2 0} - n_{x_1 0}}{dx} = qD_n \frac{d\Delta n_0}{dx} = (J_{n0})_{Diff} \end{aligned} \quad \text{扩散电流不变} \quad 2 \text{ 分}$$

三、证明题（共 8 分）

得分

19. (8 分) 证明题：含有受主浓度和施主浓度分别为 N_A 和 N_D 的 p 型半导体样品，此时为室温下，两种杂质完全电离，如果两种载流子对电导的贡献都不可忽略，证明其电导率公式为：

$$\sigma = \frac{1}{2} q \mu_p (N_A - N_D) (1 + b) \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} + \frac{1 - b}{1 + b} \right], \text{ 其中 } n_i \text{ 为本征载流子浓度,}$$

$b = \mu_n / \mu_p$ 为电子空穴迁移率之比。如果样品进入本征激发区，上式如何化简？

证明：由于两种载流子对电导贡献不可忽略，

$$p = (N_A - N_D) + n$$

$$np = n_i^2$$

3 分

联立求解：

$$p = \frac{(N_A - N_D)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} + 1 \right]$$

$$n = \frac{(N_A - N_D)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} - 1 \right]$$

2 分

从而

$$\sigma = q \mu_p (p + nb)$$

$$= q \mu_p \left\{ \frac{(N_A - N_D)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} + 1 \right] + \frac{(N_A - N_D)}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} - 1 \right] b \right\}$$

1 分

$$= q \mu_p \left\{ \frac{(N_A - N_D)(1 + b)}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} + \frac{(N_A - N_D)(1 - b)}{2} \right\}$$

$$= \frac{1}{2} q \mu_p (N_A - N_D) (1 + b) \left[\sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_A - N_D)^2}} + \frac{1 - b}{1 + b} \right]$$

如果样品进入本征激发区， $N_A - N_D \ll n_i$ ，上式化简为：

$$\sigma = \frac{1}{2} q \mu_p (N_A - N_D) (1 + b) \frac{2n_i}{N_A - N_D} = q n_i \mu_p (1 + b) \quad 2 \text{ 分}$$

注：上式亦可直接从本征半导体电导率直接获得。

四、计算题与综合题（共 32 分）

得 分

20. (10 分) 一块硅材料中掺磷浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，假设杂质全电离且电子迁移率 $1200 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ，Si 的电导有效质量 $m_c = 0.26 m_0$ ($m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)。

(1) 求该半导体材料的电阻率；

(2) 加以强度为 10^4 V/m 的电场，求平均自由时间和平均自由程。

解：

$$(1) \quad \rho = \frac{1}{qn\mu_n} = \frac{1}{1.602 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{16} \times 1200} \quad 3 \text{ 分}$$

$$= 0.52 \, \Omega \cdot \text{cm} \quad 1 \text{ 分}$$

(2) 由 $\mu_N = \frac{q\tau_n}{m_c}$ 知平均自由时间为：

$$\tau_n = m_c \mu_N / q = 0.12 \times 0.26 \times 9.1 \times 10^{-31} / (1.602 \times 10^{-19}) = 1.77 \times 10^{-13} \text{ s} \quad 2 \text{ 分}$$

平均漂移速度为：

$$\bar{v} = \mu_N E = 0.12 \times 10^4 = 1.2 \times 10^3 \text{ m/s} \quad 2 \text{ 分}$$

平均自由程为：

$$\bar{l} = \bar{v} \tau_n = 1.2 \times 10^3 \times 1.77 \times 10^{-13} = 2.12 \times 10^{-10} \text{ m} \quad 2 \text{ 分}$$

得分

21. (12 分) 一块长度为 0.05 cm, 截面积为 10^{-5} cm^2 的硅半导体, 室温下均匀掺杂 $N_D = 8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_A = 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。半导体被光均匀照射, 假定过剩载流子产生率为 $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$, 少子寿命为 $\tau = 5 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。($\mu_n = 1300 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, $\mu_p = 400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, 假定电子、空穴饱和速度 $v_s = 10^7 \text{ cm/s}$, $E_g(600 \text{ K}) = 1.04 \text{ eV}$, $N_c(300 \text{ K}) = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_v(300 \text{ K}) = 1.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $k_0 T(300 \text{ K}) = 0.026 \text{ eV}$)。

(1) 在半导体长度方向上施加 10 V 的电压, 求半导体中流过电流大小。

(2) 如果温度升高到 600 K, 且施加电压为 1000 V, 求半导体中流过的电流大小。

解:

(1) 稳态条件下, 半导体中产生非平衡载流子为:

$$\Delta p = g\tau = 8 \times 10^{20} \times 5 \times 10^{-7} = 4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \quad 2 \text{ 分}$$

电导率:

$$\begin{aligned} \sigma &= q\mu_n n + q\mu_p p = q\mu_n (n_0 + \Delta n) + q\mu_p (p_0 + \Delta p) \\ &\approx q\mu_n n_0 + q\Delta p (\mu_n + \mu_p) \end{aligned} \quad 2 \text{ 分}$$

$$\begin{aligned} \sigma &\approx q\mu_n n_0 + q\Delta p (\mu_n + \mu_p) \\ &= 1.602 \times 10^{-19} \times 1300 \times (8 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}) + 1.602 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^{14} \times (1300 + 400) \quad 1 \text{ 分} \\ &= 1.249 + 0.109 \\ &= 1.358 \text{ S/cm} \end{aligned}$$

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\frac{\rho L}{S}} = \frac{\sigma \cdot S \cdot V}{L} \quad 2 \text{ 分}$$

$$\begin{aligned} I &= \frac{\sigma \cdot S \cdot V}{L} = \frac{[1.249 + 0.109] \times 10^{-5} \times 10}{0.05} \\ &= 2.496 \times 10^{-3} + 2.18 \times 10^{-4} \text{ A} \quad 1 \text{ 分} \\ &= 2.714 \times 10^{-3} \text{ A} \end{aligned}$$

(2) 600K 时,

当施加电压为 10000V, 时本征载流子浓度为:

$$\begin{aligned} n_i &= (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2k_0 T}\right) \\ &= (N_c(300\text{K}) N_v(300\text{K}))^{1/2} \left(\frac{600}{300}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{1.04}{2 \times 0.026 \times (\frac{600}{300})}\right) = 2.25 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad 2 \text{ 分} \end{aligned}$$

半导体中电场达到 $2 \times 10^4 \text{ V/cm}$, 速度饱和。 1 分

$$\begin{aligned} I &= qS(n_0 + \Delta n + \Delta p + 2n_i)v_s \\ &= 1.602 \times 10^{-19} \times 10^{-5} \times [(8 \times 10^{15} - 2 \times 10^{15}) + 4 \times 10^{14} + 4 \times 10^{14} + 2 \times 2.25 \times 10^{15}] \times 10^7 \quad 1 \text{ 分} \\ &= 0.181 \text{ A} \end{aligned}$$

得 分

22. (10 分) 综合分析题

假设你负责开发一种可工作于 100℃ 以上的新型高速、低阻半导体器件，用以检测光子能量为 3.5eV 的高频脉冲光照信号，试结合《半导体物理 A》课程知识，论述如何选择半导体材料？列举可能涉及的知识点（概念/能带图/公式），并给出设计方案。
答题提示：

知识点（概念/公式/能带图等）	简 要 说 明
高温：禁带宽度、掺杂等 2 分	采用禁带宽度更宽，掺杂浓度更大的半导体材料增加器件最高工作温度，同时禁带宽度最大不超过 2eV。
高速：电子导电，迁移率、载流子寿命等 2 分	要提高器件速度，需要采用电子导电，也就是采用具有更高迁移率的半导体材料，同时高频脉冲信号检测需减少载流子寿命以提高反应精度。
低阻：掺杂、注入非平衡载流子、电流路径长度和截面积等 2 分	为实现低阻，可增加掺杂浓度，或者通过注入等形式引入非平衡载流子导电，器件结构上可采用更短以及结面积更大的材料降低电阻。
技术：宽禁带、应变硅、高掺杂、掺金等 2 分	以及某些宽禁带半导体材料，硅材料可采用应变硅技术增加迁移率，通过深能级杂质引入减少载流子寿命

设计方案：略

2 分