

电子科技大学 2021-2022 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：2022 年 4 月 27 日

本试卷由四部分构成，共 9 页。考试时长：95 分钟 注：可使用非存储功能的计算器

成绩构成比例：平时成绩 35%，期末 65%

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）

1. 硅的晶格结构是（ ），能带结构是（ ）。

- A. 金刚石型 B. 闪锌矿型
C. 间接禁带型 D. 直接禁带型。

答案：A C

2. 由两种（ ）原子的（ ）立方，沿立方的体对角线错开其长度的 1/4 套构而成的晶体结构称为闪锌矿型结构。

- A. 相同 B. 不同 C. 面心 D. 体心

答案 B C

3. 在 N 型半导体中，随着温度的升高，本征载流子浓度 n_i （ ）；室温下，在 N 型半导体中，当掺杂浓度从 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 增加为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，忽略禁带宽度的变化，本征载流子浓度 n_i （ ）；平衡空穴浓度 p_0 （ ）。

- A. 增加 B. 减小 C. 不变

答案：A C B

4. 室温条件下硅材料杂质全电离浓度上限数量级为（ ） cm^{-3} 。

- A. 10^{10} B. 10^{15} C. 10^{17} D. 10^{19}

答案：C

5. 有 3 个锗样品，其掺杂情况分别是：甲含硼和磷各 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ；乙含砷 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ；丙含磷 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。室温下，这些样品的电导率由高到低的顺序是（ ），多子迁移率由低到高的顺序是（ ），平衡少子浓度由高到低的顺序是（ ）。

- A. 甲乙丙 B. 甲丙乙 C. 乙丙甲 D. 丙乙甲

答案: C A B

6. 对 Si 材料而言, 在足够强电场下载流子迁移率显著降低, 是因为载流子与晶格发生了 ()。对 GaAs 材料而言, 负微分电导是由于电子发生 (), 迁移率 ()。

- A. 光学波散射; B. 声学波散射; C. 电离杂质散射; D. 谷间散射
E. 变大 F. 变小 G. 不变

答案: A D F

7. $N_D > N_A$ 的补偿半导体因以 () 导电为主而成为 () 半导体。

- A. 空穴 B. 电子 C. p 型 D. n 型 E. 本征

答案: B D

8. 对掺磷浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的硅材料而言, 其散射主要由 () 决定, 迁移率随温度升高而 (); 对掺磷浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的样品, 当温度升高时, 电离杂质的散射概率 (), 晶格振动的散射概率 (), 载流子迁移率 ()。

- A. 电离杂质散射 B. 晶格振动散射 C. 增大 D. 减小
E. 先增大再减小 F. 先减小再增大

答案 B, D, D, C, E

9. 较高掺杂的 Si 在 GaAs 中是 ()。

- A. 施主 B. 受主 C. 两性杂质

答案: C

10. 单位能量间隔内的量子态数称为 ()。

- A. 能量密度 B. 量子密度 C. 状态密度 D. 电流密度

答案: C

11. 电子的漂移电流的方向, 与 () 相同。

- A. 电子流密度的方向 B. 电子扩散方向 C. 电子浓度梯度方向 D. 电场方向

答案: D

12. 若某材料电阻率随温度升高而单调下降, 该材料是 ()。

- A. 本征半导体 B. 杂质半导体 C. 金属导体 D. 简并半导体

答案: A

13. p 型半导体的电阻率由 () 电导率决定, () 对电阻率的贡献可以忽略。

- A. 多子 B. 少子

答案: A B

14. 直接复合中，小注入的半导体当温度和掺杂一定的时候，() 越高，寿命就越短。

- A. 电导率 B. 禁带宽度 C. 费米能级 D. 复合中心能级

答案 A

15. 电子陷阱存在于() 型半导体中，其主要导电载流子为()。

- A. N B. P C. 电子 D. 空穴

答案： B D

得 分

二、简答题（每小题 12 分，共 24 分）

16.（12 分）试比较半导体中浅能级杂质和深能级杂质对其电学参数的影响，并说明它们在不同应用。

答：

（1） 在常温下浅能级杂质全电离，可显著地改变载流子的浓度，从而影响半导体材料的电导率。（3 分）

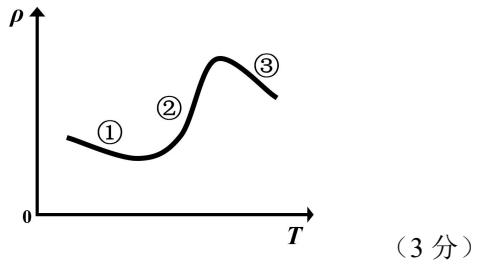
（2） 深能级杂质在常温下较难电离，和浅能级杂质相比掺杂也较低，不显著载流子的浓度，但在半导体中可以起有效的复合中心或陷阱作用，对载流子的复合作用很强。（3 分）

（3） 在实际的应用中，通过浅能级杂质调节载流子的浓度、电阻率，改变材料的导电类型。（3 分）

（4） 而通过深能级杂质提供有效的复合中心，提高器件的开关速度。（3 分）

17. (12 分) 画出平衡状态下中等掺杂硅的电阻率随温度的变化情况, 并解释原因。

答: 电阻率随温度变化图像如下:



解释原因

- ① 低温弱电离区: 杂质电离使 n_i 增加; 电离杂质为主, $T \uparrow, \mu \uparrow$, 电阻率 \downarrow . (3 分)
- ② 全电离区: n 不变化; 晶格散射为主, $T \uparrow, \mu \downarrow$, 电阻率 \uparrow . (3 分)
- ③ 本征区: 本征载流子导电为主, n_i 随温度迅速升高, μ 缓慢降低, 电阻率单调下降. (3 分)

得 分

三、证明题 (共 10 分)

18. (10 分) 假定室温下某半导体掺杂施主杂质全电离, 施主杂质浓度分布从表面到体内随深度 x 呈指数分布: $N_D(x) = N_0 \exp(-ax)$ 。证明热平衡该样品的内部电场大小与掺杂浓度 N_D 及深度 x 无关。

证明:

当杂质完全电离时, 电子浓度分布 $n(x) = N_D(x) = N_0 \exp(-ax)$ 。(2 分)

漂移电流 $J_{\text{drf}} = q n(x) \mu_n E(x)$ (2 分)

扩散电流 $J_{\text{dif}} = q D_n [dn(x)/dx] = q D_n \cdot n(x)(-a)$ (2 分)

热平衡时上述电流之和应为零, $J_{\text{drf}} + J_{\text{dif}} = 0$, 即 $q n(x) \mu_n E(x) + q D_n \cdot n(x)(-a) = 0$ (2 分)

故内建电场 $E(x) = D_n / \mu_n a = k_0 T / q \cdot a$, 即与掺杂浓度 N_D 和深度 x 无关。(2 分)

得 分

四、计算题与综合题(共 36 分)

19. (10 分) 室温条件下对一均匀 n 型硅样品的表面注入少数载流子空穴, 同时在样品上施加一个 50 V/cm 的电场, 若电场力的作用下这些少数载流子在 $100 \mu\text{s}$ 的时间内移动了 1 cm , 求少数载流子的漂移速度、迁移率和扩散系数, 请根据计算结果判断该半导体是杂质半导体还是本征半导体, 说明原因。

室温下 $k_0 T = 0.026 \text{ eV}$ 。

解: 在电场作用下, 少子漂移速度为: $v = \frac{1 \text{ cm}}{100 \mu\text{s}} = 10^4 \text{ cm/s}$ (2 分)

迁移率为: $\mu = \frac{v}{E} = \frac{10^4 \text{ cm/s}}{50 \text{ V/cm}} = 200 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$ (3 分)

扩散系数为: $D_p = \frac{k_0 T}{q} \mu = 0.026 \times 200 \text{ cm}^2/\text{s} = 5.2 \text{ cm}^2/\text{s}$ (3 分)

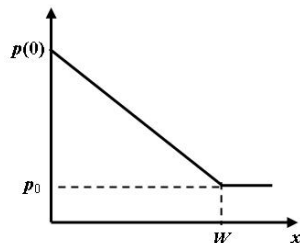
计算迁移率小于本征半导体空穴迁移率 $500 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, 因此为杂质半导体, 电离杂质散射使得空穴迁移率降低。 (2 分)

21. (10 分) 半导体样品室温下空穴浓度 $p(x)$ 为下图分段函数, 已知空穴迁移率为 μ_p 。求:

(1) 无外加电场时空穴电流密度 $J_p(x)$ 的表达式;

(2) 若使净空穴电流为零, 求所需电场的大小, 方向如何?

(3) 若 $p(0)/p_0=10^4$, 求 $x=0$ 和 $x=W$ 之间的静电势差。



图空穴浓度分布

解:

(1) 无外加电场时空穴电流密度 $J_p(x)$ 的表达式:

$$J_p = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} = -qD_p \frac{p_0 - p(0)}{W} \quad 0 < x < W, \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_0 T}{q} \Rightarrow D_p = \mu_p \frac{k_0 T}{q} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\begin{cases} J_p = -\mu_p k_0 T \frac{p_0 - p(0)}{W} & 0 < x < W \\ J_p = 0 & x > W \end{cases} \quad (2 \text{ 分})$$

(2) 若使净空穴电流为零, 则:

$$J_p = p(x)q\mu_p |E| - qD_p \frac{dp(x)}{dx} = 0 \Rightarrow |E| = \frac{D_p \frac{dp(x)}{dx}}{p(x)\mu_p} = \frac{1}{p(x)} \frac{D_p}{\mu_p} \frac{dp(x)}{dx} \quad (2 \text{ 分})$$

$$\begin{cases} \frac{dp(x)}{dx} = \frac{p_0 - p(0)}{W} = C & 0 < x < W \\ p(x) = p(0) + Cx & 0 < x < W \end{cases}$$

$$\text{爱因斯坦关系} \quad \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_0 T}{q} = 0.026V$$

$$\begin{cases} |E| = \frac{1}{p(x)} \frac{D_p}{\mu_p} \frac{dp(x)}{dx} = \frac{0.026C}{p(0) + Cx} & 0 < x < W \\ |E| = 0 & x > W \end{cases} \quad (1 \text{ 分})$$

所需电场方向向左 (1 分)

(3) 若 $p(0)/p_0=10^4$, $x=0$ 和 $x=W$ 之间的电位差为:

$$\begin{aligned} V &= -\int_0^W |E| dx = -\int_0^W \frac{0.026C}{p(0) + Cx} dx \\ &= -0.026 \times \left[\ln \frac{p_0}{p(0)} \right] = 0.24V \end{aligned} \quad (2 \text{ 分})$$

22.（6 分）已知硅和 4H-碳化硅材料的重要物理参数如下表所示。

	禁带宽度 (eV)	饱和漂移速度 (10 ⁷ cm/s)	临界击穿电场 (MV/cm)	热导率 (W/cm·K)	受主杂质电离能 (meV)
Si	1.12	1	0.3	1.7	45
4H-SiC	3.26	2	3	4.9	191

综合《半导体物理 A》课程相关知识，试比较并解释 4H-碳化硅材料与硅材料在制作电子器件的潜在优势或劣势。

答题要点：（每个参数 1.5 分，任意答对 4 个给满分）

物理参数	知识点（概念/公式/能带图等）
禁带宽度	禁带宽度越大，相同温度下本征载流子浓度越低，则本征温度越高，更有利于制作高温器件。4H-SiC 的禁带宽度对应的能量为紫外光，可用于制作紫外探测器的材料。此外，宽禁带半导体制成的可制作具有抗辐照更好的器件，适用于航空航天领域所需的器件。
饱和速度	4H-SiC 中的饱和漂移速度是 Si 中的两倍，因此具有更快的漂移速度，有利于制作高频/高速器件。
临界击穿电场	4H-SiC 是 Si 的 10 倍，因此在高耐压器件方面有更好的应用。比如制作大功率电力电子器件。
热导率	4H-SiC 具有更大的热导率，因此其散热更好，有利于制作高温器件。
受主杂质电离能	4H-SiC 受主杂质电离能更大，因此常温下 P 型 4H-SiC 可能存在显著的杂质非完全电离效应，导致载流子浓度远低于掺杂浓度，使得半导体电阻增加。