

电子科技大学 2020-2021 学年第二学期 期中考试

# 电子科技大学 2020-2021 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: 2021 年 5 月 11 日

本试卷由 四 部分构成, 共 6 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					

(可能用到的物理常量: 玻尔兹曼常数  $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ; 基本电荷量:  $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

得分

一、选择题 (共 30 分。每空仅有唯一答案; 每空 1 分)

1. 现有两种不同的半导体材料甲和乙, 在导带底极值点处, 若甲材料的曲率半径更大, 则两种材料的电子有效质量为: 甲( )乙; 若甲的空穴有效质量比乙的大, 则低电场下两种材料的空穴漂移速度关系为: 甲( )乙。

A. >      B. =      C. <

答案 AC

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 BC

3. 本征半导体与非本征半导体的最主要区别在于( )的位置。对于相同掺杂浓度、不同杂质类型的  $p$  型杂质半导体, 若在相同温度下空穴越多, 则其受主杂质电离能越( )。

A.  $E_F$  的位置      B.  $E_i$  的位置      C. 大      D. 小

答案 AD

4. 关于室温下非简并  $p$  型硅样品, 下列描述正确的是 ( )

考试科目: 半导体物理 A 考试形式: 闭卷 考试日期: 2021 年 5 月 11 日

本试卷由 四 部分构成, 共 6 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					

(可能用到的物理常量: 玻尔兹曼常数  $k = 8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ; 基本电荷量:  $q = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$ )

得分

一、选择题 (共 30 分。每空仅有唯一答案; 每空 1 分)

1. 现有两种不同的半导体材料甲和乙, 在导带底极值点处, 若甲材料的曲率半径更大, 则两种材料的电子有效质量为: 甲( A )乙; 若甲的空穴有效质量比乙的大, 则低电场下两种材料的空穴漂移速度关系为: 甲( C )乙。  $\mu = \frac{q\tau}{m}$   $V = \mu E$
- A. >      B. =      C. <

答案 AC

2. 由两种( B )原子的( C )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 BC

3. 本征半导体与非本征半导体的最主要区别在于( A )的位置。对于相同掺杂浓度、不同杂质类型的  $p$  型杂质半导体, 若在相同温度下空穴越多, 则其受主杂质电离能越( D )。
- A.  $E_F$  的位置      B.  $E_i$  的位置      C. 大      D. 小

答案 AD

4. 关于室温下非简并  $p$  型硅样品, 下列描述正确的是 ( C )

- A. 温度增加，其费米能级将远离本征费米能级  
 B. 光照产生的电子空穴对增多时，其电子准费米能级更远离价带顶能级  
 C. 掺杂浓度越高，其费米能级越远离导带底能级  
 D. 与室温下相同掺杂浓度的  $n$  型硅样品相比，其费米能级离本征费米能级更近

答案 C

5. 在相同温度下，宽禁带半导体比硅具有更( A )的本征载流子浓度，更( B )的本征温度。  
 A. 低 B. 高

答案 AB

6. 室温下，本征半导体中电子占据费米能级  $E_F$  的概率为( B )；电子占据杂质能级  $E_D$  的概率为( D )。  
 A. 0 B. 1/2 C. 1/3 D. 2/3

答案 BD

8. 一般高速开关器件中采用的载流子为( B )。  
 A. 平衡多子空穴 B. 平衡多子电子 C. 非平衡空穴 D. 平衡电子

答案 B

10. 若温度从 250 K 升高至 300 K,  $n$  型硅中的电离杂质散射概率及其对应的迁移率将分别( A )；其晶格振动散射概率和对应的迁移率将分别是( B )。  
 A. 变小、变大 B. 变大、变小  
 C. 变小、变小 D. 变大、变大

答案: AB

11. 在一定的温度下，掺杂浓度高的半导体通常具有较( A )的迁移率，这主要是由( C )导致的。  
 A. 低 B. 高 C. 电离杂质散射 D. 晶格振动散射

答案: AC

12. Si 材料载流子迁移率随电场增加而( B )，是因为载流子与晶格发生了( E )，进一步增强电场，载流子平均漂移速度先( 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

答案: BEACD

13. GaAs 材料而言，负微分电导是由于电子发生( C )，迁移率( E )。  
 A. 光学波散射 B. 电离杂质散射 C. 谷间散射 D. 变大 E. 变小 F. 不变

答案: CE

14. 对于  $p$  型半导体，在小注入的情况下，多子准费米能级在少子费米能级之( B )；多子准费米能级比少子准费米能级更( C )平衡费米能级。

A. 上 B. 下 C. 靠近 D. 远离

答案: B C

15. 导带中的电子直接落入价带与空穴复合的过程称(~~A~~ B), 而通过复合中心的进行的复合称为(~~A~~); 涉及到三粒子效应的复合是(~~A~~), 它是一种非辐射复合过程。

A. 间接复合; B. 直接复合; C. 俄歇复合; D. 辐射复合

答案: B C A

16. 当样品厚度小于扩散长度时, 在样品一端注入非平衡载流子, 其浓度在样品内呈(~~C~~), 此时, 非平衡载流子在样品中发生的复合效应(~~D~~ D)。

A. 指数衰减分布 B. 线性衰减分布 C. 可忽略 D. 不可忽略

答案: C D

得 分

二、简答题 (每小题 8 分, 共 24 分)

1. 硅样品中的掺杂剂可以是硼原子或砷原子, 也可以是金原子。试问二者对半导体电学特性的影响, 并比较二者的不同应用。

答:

- (1) 硅中掺杂硼原子或砷原子一般形成浅能级杂质。在常温下浅能级杂质可全部电离, 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) 硅中掺杂金原子一般形成深能级杂质。在常温下深能级杂质较难电离, 并且和浅能级杂质相比, 掺杂浓度不高, 故对载流子的浓度影响不大, 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。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。(2 分)

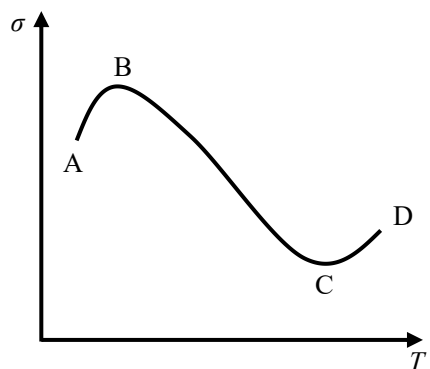
2. 下图给出中等掺杂 p 型硅的电阻率随温度的变化关系曲线, 解释说明 AB 段、BC 段以及 CD 段的变化规律及其原因, 并说明 C 点和 D 点的温度由哪些因素决定。

解释原因 (6分)

AB段: 低温区弱电离区。杂质电离使  $n \uparrow$ ; 电离杂质为主,  $T \uparrow, \mu \uparrow$ , 电导率  $\uparrow$ 。(2分)

BC段: 全电离区。 $n$ 不变化; 晶格散射为主,  $T \uparrow, \mu \downarrow$ , 电导率  $\downarrow$ 。(2分)

CD段: 本征区。本征载流子导电为主,  $n$ 随温度迅速



升高,  $\mu$  缓慢降低, 电导率单调增加. (2分)

C、D 点温度由禁带宽度和掺杂浓度决定, 随着二者的升高而升高。(2分)

3. 请给出非平衡状态下, 半导体中电子总电流和空穴总电流的表达式。

答: 半导体器件中有四种电流成分:

① 电子扩散电流  $(J_n)_{Dif} = -qS_n = qD_n \frac{d\Delta n(x)}{dx}$  (2分)

② 电子漂移电流  $(J_n)_{Drf} = qn\mu_n E = q(n_0 + \Delta n)\mu_n E$  (2分)

或直接写出电子总电流为  $J_n = qD_n d\Delta n(x)/dx + q(n_0 + \Delta n(x))\mu_n E$

③ 空穴扩散电流  $(J_p)_{Dif} = qS_p = -qD_p \frac{d\Delta p(x)}{dx}$  (2分)

④ 空穴漂移电流  $(J_p)_{Drf} = qp\mu_p E = q(p_0 + \Delta p)\mu_p E$  (2分)

或直接写出空穴总电流为  $J_p = -qD_p d\Delta p(x)/dx + q(p_0 + \Delta p(x))\mu_p E$

得 分

三、证明题 (共 10 分)

证明处于热平衡状态下, 半导体中的电子迁移率及其扩散系数满足爱因斯坦关系。

解: 对于非均匀的  $n$  型半导体, 在热平衡状态下其净电流为零, 即

$$J_n = J_{n\text{漂}} + J_{p\text{漂}} = 0$$

$$(-q) \cdot n_0(x) \mu_n (-E) + (-q) \cdot D_n (-dn_0(x)/dx) = 0 \dots\dots\dots(1) \quad (2 \text{ 分})$$

电场由扩散引起, 内部存在关系:

$$E_c(x) = E_c - qV(x)$$

$$n_0(x) = N_c \exp[-(E_c - E_F)/k_0T] = N_c \exp[-(E_c - qV(x) - E_F)/k_0T] \dots\dots(2) \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{由(1) } dn_0(x)/dx = -\mu_n / D_n \cdot n_0(x) \mu_n E \dots\dots\dots(3) \quad (2 \text{ 分})$$

$$\text{由(2) } dn_0(x)/dx = n_0(x) q / k_0T \cdot dV(x)/dx \dots\dots\dots(4) \quad (2 \text{ 分})$$

又因为  $E(x) = -dV(x)/dx$

联系(3)和(4)可得爱因斯坦关系式:  $D_n = (k_0T/q)\mu_n$  (2分)

$$nq\mu E + qD_n \frac{dn}{dx} = 0 \quad \frac{dn}{dx} = \frac{q}{k_0T} \cdot n \left( \frac{dV(x)}{dx} \right)$$

$$\frac{dn}{dx} = - \frac{n}{D_n} \mu E$$

$$\frac{q}{k_0T} = \frac{\mu}{D_n}$$

得分

#### 四、计算题与综合题 (每小题 12 分, 共 36 分)

1. 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  $1200 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。已知电导有效质量  $m_c = 0.26m_0$  ( $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )。

(1) 求该半导体材料的电阻率; (2) 加一强度为  $10^4 \text{ V/m}$  的电场, 求平均自由时间和平均自由程。

解:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{nq\mu}$$

$$\rho = \frac{1}{qn\mu_n} = \frac{1}{1.602 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{16} \times 1200}$$

$$(1) = 0.52 \Omega \cdot \text{cm}$$

(4 分: 公式 3 分答案 1 分)

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

$$\mu = \frac{q\tau}{m} \rightarrow \tau = \frac{m\mu}{q}$$

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

平均漂移速度为

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

$$\bar{v} = \mu E$$

平均自由程为

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

$$l = \bar{v} \tau$$

2. 一根长为  $10 \mu\text{m}$  的 p 型掺杂硅棒, 已知其掺杂浓度为  $N_A = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_D = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

现有一光源照射在其表面处 ( $x = 0$ ), 且产生率为  $g = 10^{20} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ , 光生载流子向右扩散 ( $x > 0$ )。

已知载流子寿命  $\tau_n = \tau_p = 10 \mu\text{s}$ , 空穴扩散系数  $D_p = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 电子扩散系数  $D_n = 40 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

假设在 p 型区内载流子的复合可忽略。计算在  $x = 5 \mu\text{m}$  处的扩散电流密度。

$$J_{in} = D_n g \frac{d\Delta n}{dx}$$

解: 由于光照射, 在半导体表面处的非平衡少数浓度为:  $(\Delta n)_0 = g \tau = 10^{20} \times 10 \times 10^{-6} = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  (2 分)

$$0 = -\frac{d\Delta n}{dx} + g$$

由于在 p 型区内载流子的复合可忽略, 则非平衡少数浓度沿 p 型半导体区呈线性分布, 体内的扩散电流处处相等, 且非平衡电子与非平衡空穴的浓度梯度相等: (2 分)

$$d(\Delta n)/dx = d(\Delta p)/dx = (\Delta n)_0/W = 10^{15}/(10 \times 10^{-4}) = 10^{18} \text{ cm}^{-4} \quad (2 \text{ 分})$$

因此, 在  $x = 5 \mu\text{m}$  处的扩散电流密度为:

$$D_p \cdot \tau$$

$$(J_{\text{diff}})_n = qD_n \times d(\Delta n)/dx = 1.6 \times 10^{-19} \times 40 \times 10^{18} = 6.4 \text{ A/cm}^2 \text{ (2 分)}$$

$$(J_{\text{diff}})_p = -qD_p \times d(\Delta p)/dx = -1.6 \times 10^{-19} \times 10 \times 10^{18} = 1.6 \text{ A/cm}^2 \text{ (2 分)}$$

$$J_{\text{diff}} = (J_{\text{diff}})_n + (J_{\text{diff}})_p = 6.4 - 1.6 = 4.8 \text{ A/cm}^2 \text{ (2 分)}$$

3. 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 <sup>7</sup> cm/s)	临界击穿电场 (MV/cm)	热导率 (W/cm·K)
Si	1.12	1	0.3	1.7
4H-SiC	3.26	2	3	4.9

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。

答题提示：

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。(3 分)
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。(3 分)
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。(3 分)
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。(3 分)