

# 《固体物理基础》(2022 年春) 期末考试试题 (A 卷)

班级\_\_\_\_\_ 姓名\_\_\_\_\_ 学号\_\_\_\_\_

注意: 1、填空题的答案直接写在试卷上。

2、计算题的答案写在答题纸上, 注意在答案前标明题目序号。

物理常数:  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$      $\hbar = 1.054 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$      $e = 1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$      $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

$m_e = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$  (电子质量)     $N_A = 6.02 \times 10^{23} / \text{mol}$  (阿伏伽德罗常数)

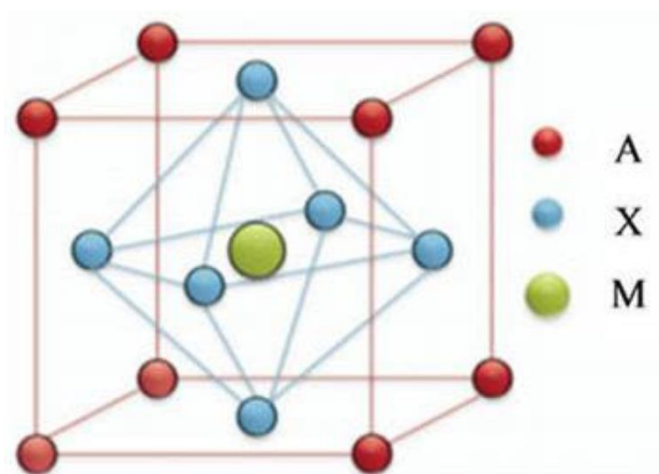
## 1. 填空题 (每空 1 分, 共 37 分)

- (1) Si 的晶体结构为\_\_\_\_\_结构, 其中的 Si 原子之间以\_\_\_\_\_ (填原子间相互作用的类型) 结合, 这种结构是由两套\_\_\_\_\_ (填布拉菲格子的类型) 嵌套而成的, 其中一套格子沿着另一套格子的晶胞体对角线平移\_\_\_\_\_ (填最小的正数数值) 距离得到的, 它的倒格子为\_\_\_\_\_ (填布拉菲格子的类型)。
- (2) Si 是\_\_\_\_\_ (填“直接”或“间接”) 带隙半导体材料, GaAs 是\_\_\_\_\_ (填“直接”或“间接”) 带隙半导体。其中\_\_\_\_\_ (填“Si”或“GaAs”) 更适合做发光器件。
- (3) 晶格结构的观测常用 X 射线衍射的方法, 若入射波长为  $\lambda$ , 晶面间距为  $d$ , 衍射角为  $2\theta$ , 衍射的级数为  $n$ , 则布拉格定律可以表述为\_\_\_\_\_, 对于同一波长的射线和同一晶体, 衍射角越大说明衍射级数越\_\_\_\_\_ (填“高”或“低”)。已知单个“光子”能量为 35keV 对应的 X 射线在“真空”中的波长为\_\_\_\_\_。若用波长为  $\lambda$  的光对简单立方晶体进行衍射, 前两个一级衍射峰的半衍射角  $\theta_1$  和  $\theta_2$  分别为\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_。(简单立方晶体的晶胞边长为  $a$ )
- (4) 可以利用霍尔效应测量半导体的掺杂类型、载流子浓度和迁移率。霍尔电压为正时, 表明半导体是\_\_\_\_\_ (填“p”或“n”) 型半导体。若已知垂直于导体的磁场强度为  $B$ , 通过导体的电流密度为  $j$ , 由于电荷积累产生的横向稳定电场(霍尔电场) 大小为  $E$ , 霍尔系数  $R$  的表达式为\_\_\_\_\_。
- (5) 索末菲模型中, 假设电子与其他电子之间\_\_\_\_\_ (填“有”或“无”) 相互作用, 并假设电子的能量统计分布为\_\_\_\_\_分布。若某三维晶体的体积为  $V$ , 电子浓度为  $n$ , 则按照索末菲模型计算其费米波矢为\_\_\_\_\_, 若知道电子质量为  $m$ , 能量用  $E$  表示, 则此晶体中的能态密度为\_\_\_\_\_。
- (6) 考虑近自由电子近似模型, 设一维晶格的晶格常数为  $a$ , 周期性势场  $V(x) = V_0 \left( 2 \cos \left( \frac{2\pi}{a} x \right) + \cos \left( \frac{4\pi}{a} x \right) \right)$ , 其中  $V_0 > 0$ 。则其能带的第一个禁带宽度为\_\_\_\_\_, 第二个禁带宽度为\_\_\_\_\_。
- (7) 在  $T=0 \text{ K}$  的时候, 半导体的最外层能带\_\_\_\_\_ (填“有”或者“没有”) 被电子填满, 金属的最外层能带\_\_\_\_\_ (填“有”或者“没有”) 被电子填满。固体的电导率主要

取决于载流子浓度和迁移率，迁移率由载流子的\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_共同决定。随着温度的升高，本征半导体的导电性将\_\_\_\_\_（填“升高”或“降低”），金属的导电性将\_\_\_\_\_（填“升高”或“降低”）。

- (8) 固体热容主要包含\_\_\_\_\_和\_\_\_\_\_两部分。一般情况下，\_\_\_\_\_要小很多，可忽略不计，仅在极低温时金属材料中比较显著，不可忽略。
- (9) PN 结两侧的空间电荷区宽度与掺杂浓度成\_\_\_\_\_（正比/反比），外加正向偏压下的空间电荷区将变\_\_\_\_\_（宽/窄）。相比同质结，异质结的注入比之所以高，主要得益于其与\_\_\_\_\_成正比。
- (10) 已知半导体材料 GaAs 的电子亲和能为 4.07eV，禁带宽度为 1.424eV。请问下列金属中（功函数：Pt 为 5.65eV，Cr 为 4.5eV，Mg 为 3.66eV，Li 为 2.9eV），n+-GaAs 与\_\_\_\_\_接触后形成肖特基接触，p+-GaAs 与\_\_\_\_\_接触后形成欧姆接触。
- (11) 原子的磁性主要来自于电子磁矩的贡献，其磁矩包含自旋磁矩、\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_。

2. (15 分) 下图展示的是一种晶体  $A_xM_yX_z$  的立方晶胞。



- (1) 计算 A 原子、M 原子与 X 原子的比例  $x:y:z$ 。
- (2) 这种晶格振动谱中存在几个声学支？几个光学支？
- (3) 常温 ( $T = 300\text{ K}$ ) 下，根据杜隆-珀替定律近似计算 1 mol  $A_xM_yX_z$  原胞的比热容（单位：J/K）。

3. (17 分) 室温下 (300 K)，有一片 n 型掺杂的硅晶圆，施主杂质浓度  $N_D = 0.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，在其表面一层继续添加部分受主杂质，浓度  $N_A = 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，形成硅 pn 结。假设杂质原子全部被热激发，本征载流子浓度  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，带隙  $E_g = 1.12 \text{ eV}$ ，电子亲和能

$E_{Fi} = 4.05\text{eV}$ 。我们近似认为本征硅中费米能级  $E_{Fi}$  位于带隙中央。 $T = 300\text{ K}$  时， Si 材料中电子、空穴的迁移率与杂质浓度的关系如下表所示：

杂质浓度 $\text{cm}^{-3}$	$0.5\times10^{17}$	$1\times10^{17}$	$1.5\times10^{17}$	$2\times10^{17}$
电子迁移率 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	1400	900	780	700
空穴迁移率 $\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$	400	310	290	280

- (1) 计算 n-Si 和 p-Si 两个区域的电导率（单位： S/cm）。
- (2) 画出平衡状态时 pn 结附近的能带图，并在图中计算和标记出在 p-Si 以及 n-Si 区域费米能级  $E_F$  相对于导带底  $E_c$  和价带顶  $E_v$  的位置（单位： eV ）。
- (3) 计算内建电势  $qV_{bi}$  （单位： eV ）。

4. （16 分）已知室温 300K 时，铝镓砷材料（ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ）的禁带宽度  $E_g$  和电子亲和能  $\chi$  如下公式所示，本征载流子浓度如下表所示，其中 x 代表 Al 的组分，取值范围为 0~1。

$$E_g = \begin{cases} 1.424 + 1.247x(\text{eV}), & x < 0.45 \\ 1.9 + 0.125x + 0.143x^2(\text{eV}), & x > 0.45 \end{cases}$$

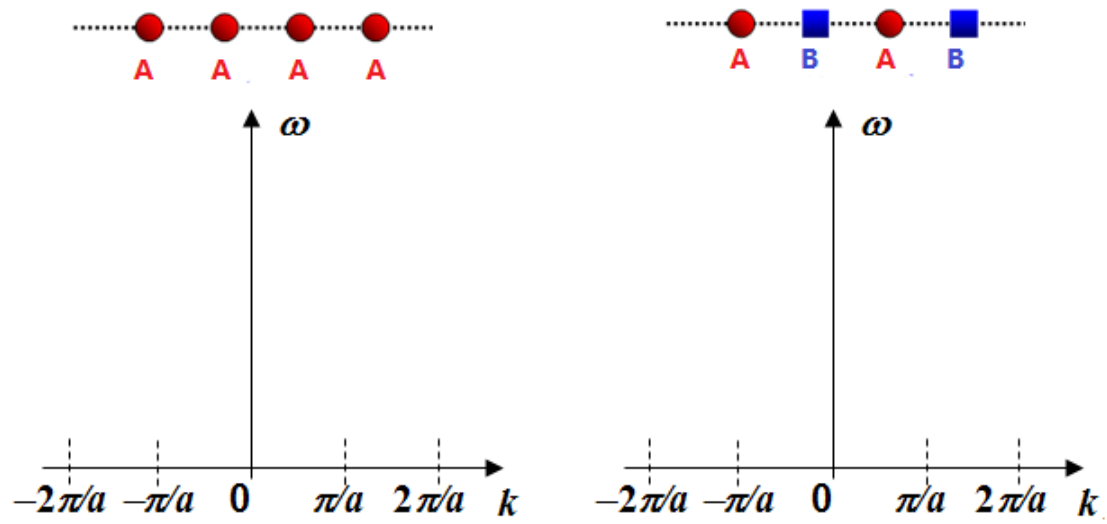
$$\chi = \begin{cases} 4.07 - 1.1x(\text{eV}), & x < 0.45 \\ 3.64 - 0.14x(\text{eV}), & x > 0.45 \end{cases}$$

x	0	0.1	0.3	0.5	0.8
$n_i(\text{cm}^{-3})$	$2.1\times10^6$	$2.1\times10^5$	$2.1\times10^3$	$2.5\times10^2$	$4.3\times10^1$

双异质结在半导体光电器件中有着广泛的应用，例如激光器、LED 等，它可以获得更高的载流子浓度从而提高发光效率。 $\text{AlGaAs/GaAs}$  激光器的工作波长通常在 800nm 左右，以 n- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  / p-GaAs / p- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  为例，各层掺杂浓度依次为  $10^{17}\text{ cm}^{-3}$ 、 $10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 、 $10^{17}\text{ cm}^{-3}$ ，假设各层厚度足够厚。计算 n- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  与 p-GaAs 形成的接触电势差  $V_D$ 。定性画出该结构平衡时的能带图（注：标出真空能级、费米能级、导带底、价带顶，以及禁带宽度  $E_g$ 、电子亲和能  $\chi$ 、导带带阶  $\Delta E_c$ 、价带带阶  $\Delta E_v$ 、接触电势差  $V_D$ ）。

5. （15 分）假设存在两种一维原子链 A-A···以及 A-B-A-B···，二者的原子间距均为  $a$ ，A、B 原子质量分别为  $m$  和  $M$ （ $m<M$ ）。A-A、A-B 间的弹性系数均为  $K$ 。

（1）在下图中分别近似画出两种结构的简约布里渊区内的纵波振动谱（ $\omega-k$  关系曲线），注意标注  $k = 0$  及布里渊边界等关键点上的数值。



(2) 计算  $\omega$  趋于 0 时，两种结构对应的声学波群速度和相速度。