

主管  
领导  
审核  
签字

姓名

学号

班号

学院

.....密.....封.....线.....

固体物理试题（A）

题 号	一	二	三	四	五	六	七	八	九	十	总分
得 分											
阅卷人											

考生须知：本次考试为闭卷考试，考试时间为 120 分钟，总分 100 分。

There are a total of 4 pages on this exam, including the cover page.

Problem 1 24

Problem 2 26

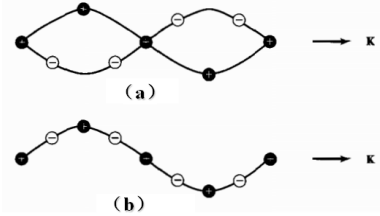
Problem 3 20

Problem 4 30

Total 100

一、 选择题（24 pts）（每题 2 分）

- 1、晶体的倒空间中体积最小的结构单元是 c 。
- A.原胞 B. 晶胞 C. 布里渊区 D. 基元
- 2、晶体结构的基本特性是？ c
- A 各向同性 B 旋转对称性 C 周期性 D 同一性
- 3、共价键的基本特点不具有 D 。
- A. 饱和性 B. 方向性 C. 键强大 D. 各向同性
- 4、在一维单原子链的晶格振动中，有 D 支声学波、D 支光学波。
- A. 1, 1 B. 3, 3 C. 3, 6 D. 1, 0
- 5、低温下三维晶格热容与温度的关系是正比于 D 。
- A.  $T^0$  B.  $T^1$  C.  $T^2$  D.  $T^3$
- 6、在 A 晶体的晶格振动谱中，只有声学波而没有光学波。
- A. Cu B. GaAs C. Si D. 金刚石
- 7、由 N 个原胞组成的简单晶体，不考虑能带交叠，则每个 s 能带可容纳的电子数为 C。
- A. N/2 B. N C. 2N D. 4N
- 8、下图所示的一维双原子链两种不同振动模式，关于他们的表述，哪个是正确？ A



A. 振动模式(a)是光学模，振动模式(b)是声学模；

- B. 振动模式(a)是声学模, 振动模式(b)是光学模;  
C. 两个振动模式都是光学模;  
D. 两个振动模式都是声学模。

9、量子自由电子论是建立在 B 的基本假设基础上的。

- A. 周期性势场      B. 恒定势场      C. 无势场      D. 不确定, 由具体的能级决定

10、根据能带理论, 电子能态密度随能量变化的趋势是? D

- A. 单调增加      B. 不变  
C. 单调减小      D. 复杂变化

11、金属晶体的热传导主要是通过D传输来实现的。

- A. 质子      B. 声子      C. 光子      D. 电子

12、在外力作用下, 晶体里的电子可以用有效质量  $m$  的准经典运动来描述, 在以下什么情况下, 电子从外场中获得的能量全部交给晶格? C

- A、有效质量大于零      B、有效质量小于零      C、有效质量趋于无穷      D、与能带具体结构有关

二、 填空题: (26 pts) (每空 1 分)

1、讨论由  $N$  个原胞组成的一维双原子晶体, 波矢  $q$  可以取  $N$  个不同的值, 每个  $q$  值对应 2 个解, 因此有  $2N$  个不同的格波。在长波极限下, 光学波原子振动的特点是 相邻原子的相对运动, 振动方向相反, 声学波原子振动的 原胞内两种原子的运动完全一致, 振幅和位相均相同。

2、金刚石晶体是复式格子, 由 2 个 面心立方 的子晶格沿 四分之一对角线 套构而成; 其固体物理学原胞包含 2 个原子。

3、两种不同半导体接触后, 费米能级较高的半导体界面一侧带 正 电, 达到热平衡后两者的费米能级 相等。

4、粒子(原子、分子或离子)从自由状态结合成晶体的过程中要 释放 能量; 反之, 稳定的晶体分离为各个自由粒子必须 吸收 能量。

5、用近自由电子解释一维晶体的能带结构, 在  $k = n\pi/a$  处, 电子的能量出现了 禁带, (填“能带”或“禁带”), 能带底的电子能量与波矢的关系是向 上 (填“上”或者“下”) 弯曲的抛物线, 能带顶是向 下 (填“上”或者“下”) 弯曲的抛物线, 在  $k$  远离  $k = n\pi/a$  处, 电子能量与 自由电子 的能量 相近 (填“相近”或者“相远”), 在  $k$  接近  $k = n\pi/a$  处, 电子能量与 自由电子 的能量 相远 (填“相近”或者“相远”)。

6、布洛赫定理的物理理解可以理解为: 若电子只有 共有化运动, 电子的能量是连续取值, 若电子只有 原子内运动, 电子的能量取分立的能级, 在晶体里面的电子 既有公有化运动又原子内运动, 因此, 电子的能量取值表示为能量的允带和禁带相间组成的能带结构。

7、从能带角度来看, 锗、硅属于 间接 带隙半导体, 而砷化镓属于 直接 带隙半导体, 后者有利于光子的吸收和发射。

三、 简答题: (20 pts)

1、 (10 pts. total)

i. 什么是空穴？ 如何理解导带、价带、满带、空带等概念？

当半导体中少数电子从满带跃迁到导带中去后，在满带中留出了一些空的状态，通常称为空穴。（2 分）

具有最高能量且被完全填满的电子轨道就形成了价带。（2 分）

由于价带被电子充满，因而也称“满带”； （2 分）

而没有被电子填满的轨道则被称为导带；（2 分）

没有电子的轨道则被称为空带（2 分）

2、 (10 pts)

i. 简要阐述固体物理中的 Born-Oppenheimer 近似(或绝热近似)，并定性说明该近似的物理依据。

绝热近似：分子系统中核的运动与电子的运动可以分离，由于电子和原子核运动的速度具有高度的差别，研究电子运动的时候可以近似的认为原子核是静止不动的，而研究原子核的运动时则不需要考虑空间中电子的分布。（5 分）

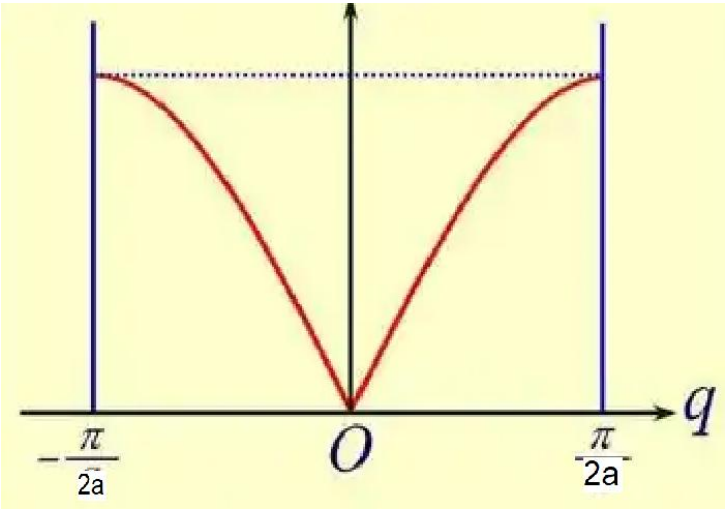
物理依据：由于电子与核的质量相差极大，因此，当核的分布发生微小变化时，电子能够迅速调整其运动状态以适应原子核的变化。而电子处于高速的运动中，并能绝热于核的运动，原子核只是在它们的平衡位置附近振动，缓慢地跟上电子分布的变化。（5 分）

二、 计算题：(30 pts)

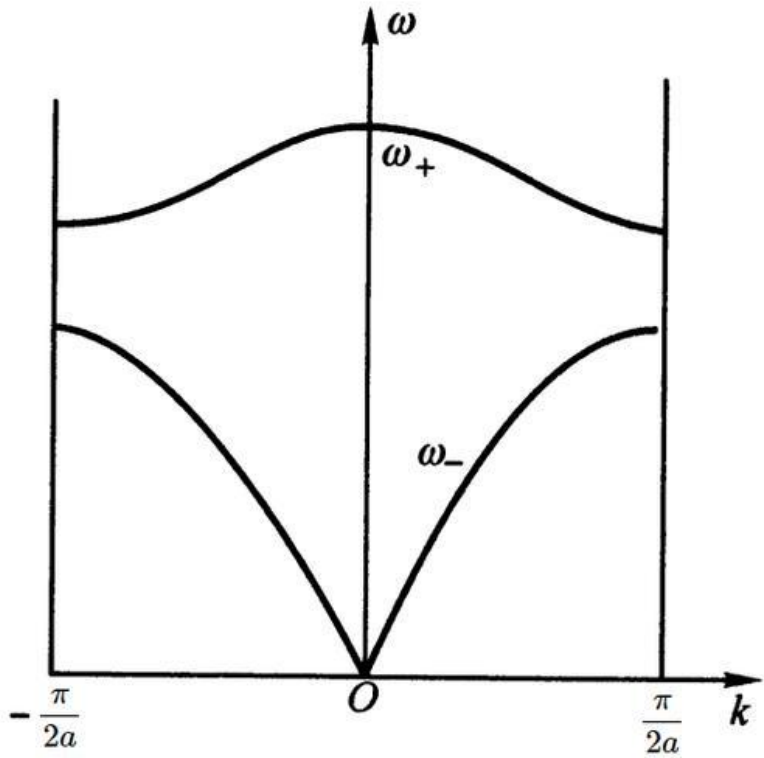
1、(15 pts) 针对一维单原子链模型（原子间距为 2a），请画出该色散关系图形，并在此基础上进一步定性画出一维双原子链模型的色散关系，请分析双原子链模型中不同声子支对应的具体振动形式？

一维单原子链晶格振动的色散关系为  $\omega = 2\sqrt{\frac{\beta}{m}}\left|\sin \frac{qa}{2}\right|$ 。其中: $\beta$  为力常数,q 为波矢,a 为晶格常数。

当原子间隔为 2a 的时候，色散关系为  $\omega = 2\sqrt{\frac{\beta}{m}}\left|\sin qa\right|$  (5 分)



(2.5 分)



(2.5 分)

一维双原子链中，声子色散关系有两条分支：

- 声学支：低频分支，对应原子在相位上同相振动。频率与波矢成正比。
- 光学支：高频分支，对应原子在相位上反相振动。频率不随波矢变化。

(5 分)

2、（15 分）已知钠晶体是体心立方结构，晶格常数  $a=0.43\text{ nm}$  若其电阻率为  $4.3\times10^{-6}\Omega\cdot cm$ ，钠晶体的电子又可看作自由电子，自由电子的费米分布函数

$$f(E)=\frac{1}{e^{(E-E_F)/k_BT}+1}。$$

- （1）试推导 T=0K 时自由电子气费米能表达式为  $E_F=\frac{h^2}{2m}(\frac{3n}{8\pi})^{\frac{2}{3}}$ 。（10 pts）
- （2）试计算钠晶体电子的驰豫时间  $\tau$  以及费米面上电子的平均自由程.(5 pts)

$$\rho(k)dk=\frac{4\pi k^2dk}{V_k}$$

$$g(E)=\frac{V_c}{2\pi^2}(\frac{2m}{\hbar^2})^{\frac{3}{2}}E^{\frac{1}{2}}=CE^{\frac{1}{2}}$$

其中  $C=\frac{V_c}{2\pi^2}(\frac{2m}{\hbar^2})^{\frac{3}{2}}$

$$N=\int_0^\infty g(E)dE=\int_0^{E_F^0} CE^{\frac{1}{2}}dE=\frac{2}{3}C(E_F^0)^{\frac{3}{2}}$$

$$E_F^0=(\frac{3}{2}\frac{N}{C})^{\frac{2}{3}}=\frac{\hbar^2}{2m}\left(\frac{3N\pi^2}{V_c}\right)^{\frac{2}{3}}=\frac{\hbar^2}{2m}(3n\pi^2)^{\frac{2}{3}}$$

（10 分）

解答：依题意，钠晶体是体心立方结构，可得其电子密度

$$n=\frac{2}{a^3}=2.5\times10^{22}/cm^3$$

由电导率公式可计算弛豫时间

$$\sigma=\frac{ne^2\tau}{m}\Rightarrow\tau=\frac{m\sigma}{ne^2}=\frac{m}{ne^2\rho}$$

所以

$$\tau=\frac{m}{ne^2\rho}=\frac{9.1\times10^{-35}}{2.5\times10^{22}\times(16\times10^{-19})^2\times4.3\times10^{-6}}=3\times10^{-14}s$$

又

$$v_F=\frac{\hbar k_F}{m},k_F^3=3\pi^2n$$

所以

$$v_F=\frac{\hbar}{m}\bullet(3\pi^2n)^{\frac{1}{3}}=\frac{1.05\times10^{-34}}{9.1\times10^{-35}}\times(3\times3.14^2\times2.5\times10^{22})^{\frac{1}{3}}=1.05\times10^6m/s$$

费米面上电子的平均自由程：

（5 分）