



21 世纪高等院校经典教材同步辅导
ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAOCAITONGBUFUDAO

固体物理学

全程导学及习题全解

段 辰 苗明川 编 沈 嵘 主审



中国时代经济出版社



21 世纪高等院校经典教材同步辅导
ERSHIYISHIJIGAODENGYUANXIAOJINGDIANJIAOCAITONGBUFUDAO

固体物理学

全程导学及习题全解

段 辰 苗明川 编 沈 嵘 主审

图书在版编目(CIP)数据

固体物理学全程导学及习题全解 / 段辰, 苗明川编.

—北京: 中国时代经济出版社, 2011.9

(21 世纪高等院校经典教材同步辅导)

ISBN 978-7-5119-0951-0

I. ①固… II. ①段… ②苗… III. ①固体物理学—
高等学校—教学参考资料 IV. ①048

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 149244 号

书 名: 固体物理学全程导学及习题全解

出 版 人: 王鸿津

作 者: 段 辰 苗明川

出版发行: 中国时代经济出版社

社 址: 北京市丰台区玉林里 25 号楼

邮政编码: 100078

发行热线: (010)83910219

传 真: (010)68320584

邮购热线: (010)88361317

网 址: www.cmepub.com.cn

电子邮箱: zgsgdj@hotmail.com

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市昌平百善印刷厂

开 本: 880×1230 1/32

字 数: 100 千字

印 张: 5.625

版 次: 2011 年 9 月第 1 版

印 次: 2011 年 9 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-5119-0951-0

定 价: 10.00 元

本书如有破损、缺页、装订错误,请与本社发行部联系更换
版权所有 侵权必究

内容简介

本书是根据高等教育出版社出版、黄昆教授原著《固体物理学》(韩汝琦教授改编版)编写的配套参考书。《习题全解》按照《固体物理学》各章节顺序对教材中的习题进行了详细的解答。较好的方便了读者掌握各章知识要点和基本解题方法。每章均分为知识要点、习题全解、补充题和小结等部分。知识要点和小结部分将《固体物理学》中主要概念、理论、公式加以归纳总结。习题和补充题则是对习题的详解、补充和提高。习题部分是本书的重点,按原教科书中习题进行详细求解和证明。对部分习题给出了不同的解题思路,为复习固体物理学提供参考,以便读者更好地学习。

本书可作为广大理工科院校或是相关从业人员的参考书,亦可帮助报考研究生进行复习备考,或作为相关教学人员的教学参考书。

前 言

固体物理学是物理学中一门重要的基础理论课程。它是研究固体的性质、微观结构、其各种内部运动以及这种微观结构和内部运动同固体的宏观性质的关系的学科。固体的内部结构和运动形式很复杂,研究从晶体开始,晶体的内部结构简单,且具有明显的规律性。进一步研究处于凝聚状态的物体的内部结构、内部运动以及它们和宏观物理性质的关系。鉴于该学科的重要性,国内高校的物理类专业及某些工科类专业均开设了固体物理学课程。随着近年来专业范围的拓宽,原有基础理论课程学时逐渐减少,习题的数量及难度也相应的降低。为此我们希望编写这本《固体物理学解题指导》来帮助同学更好地掌握、理解基本理论并掌握相关问题的分析和处理方法,以解决同学们在解题过程中所碰到的问题。

本书与黄昆教授编著的《固体物理学》(韩汝琦教授改编版)相配套。全书由晶体结构、固体的结合、晶格振动与晶体的热学性质、能带理论、晶体中电子在电场和磁场中的运动、金属电子论、半导体电子论、固体的磁性、固体的光吸收、超导电的基本现象和基本规律、固体中的元激发、晶体的缺陷和扩散、相图等组成。

本辅导教材根据《固体物理学》中的内容,每章分为本章内容、知识要点,习题全解、补充题解答和小结等几部分。知识要点:精练各章中的主要知识点,理清各知识点之间的脉络联系。习题全解:依据教材各章节的习题,进行详尽的解答。考虑到不同层次读者的需求,在解答过程中,对于重点和难点习题进行了分析和讲解,归纳解题技巧,习题部分按每章习题进行详细求解和证明,对其中部分习题还给出了多种解法或是不同的解题思路。在解题中既注重物理上的分析,也注意数学的演算过程,使书中每道题都得到了详细的解答。为

了给读者拓展视野,本书每章后增加了补充题,这些题选自不同参考资料,精选具有代表性的重点题型进行讲解,指引解决问题的思路。补充题是对原书中习题的补充和深化。小结部分:囊括主要定理及相关推论和重要公式等,对主要概念、理论、公式加以归纳总结。帮助读者迅速了解本章重要知识点,系统理解各章的体系结构,奠定扎实的理论基础。

本书由段辰、苗明川等编写。全书由沈嵘老师主审。沈嵘老师的高超的学术造诣,严谨的治学态度,认真负责、一丝不苟的工作精神,使编者受益匪浅,在此深表感谢。本书编写过程中得到消志松、张浩、黄江、王天磊等给予大力支持和帮助,同时还得到中国时代经济出版社的领导和有关编辑的大力支持,编者深表谢意。

对《固体物理学》教材的作者黄昆教授,编者在此表示崇高的敬意,对韩汝琦教授,表示衷心的感谢!

由于编者水平有限,加之时间仓促,本书难免有缺点和疏漏,存在不妥之处,敬请各位专家及广大读者批评指正。

编 者

2011年8月

目 录

第一章 晶体结构	(1)
本章重点内容	(1)
本章知识要点	(1)
习题全解	(5)
补充题解答	(14)
本章小结	(19)
第二章 固体的结合	(27)
本章重点内容	(27)
本章知识要点	(27)
习题全解	(28)
补充题解答	(33)
本章小结	(39)
第三章 晶格振动与晶体的热学性质	(42)
本章重点内容	(42)
本章知识要点	(42)
习题全解	(44)
补充题解答	(55)
本章小结	(74)
第四章 能带理论	(78)
本章重点内容	(78)
本章知识要点	(78)
习题全解	(79)
补充题解答	(92)

本章小结	(96)
第五章 晶体中电子在电场和磁场中的运动	(100)
本章重点内容	(100)
本章知识要点	(100)
习题全解	(101)
补充题解答	(107)
本章小结	(113)
第六章 金属电子论	(116)
本章重点内容	(116)
本章知识要点	(116)
习题全解	(117)
补充题解答	(123)
本章小结	(134)
第七章 半导体电子论	(136)
本章重点内容	(136)
本章知识要点	(136)
习题全解	(137)
补充题解答	(140)
本章小结	(143)
第八章 固体的磁性	(147)
本章知识要点	(147)
补充题解答	(148)
第九章 固体中的光吸收	(153)
本章知识要点	(153)
第十章 超导电的基本现象和基本规律	(154)
本章知识要点	(154)
补充题解答	(155)
第十一章 固体中的元激发	(160)
本章知识要点	(160)

第十二章 晶体中的缺陷和扩散	(161)
本章知识要点	(161)
补充题解答	(161)
第十三章 相图	(167)
本章知识要点	(167)

第一章 晶体结构

本章重点内容

- 典型晶体结构
- 晶格的周期性
- 晶向与晶面
- 倒格子
- 晶体的宏观对称性
- 7 大晶系, 14 种布拉伐格子, 32 种点群, 230 种空间群.

本章知识要点

1. 晶体、准晶和非晶

(1) 三者区别

晶体: 排列长程有序, 具有周期性.

准晶: 排列短程有序, 长程具有取向序, 即准周期性.

非晶: 排列短程有序, 长程无序.

(2) 常见晶体结构的特点

从晶格类型、点群、空间群、原子排列成键方式、配位数等方面了解以下晶体结构的特点.

(a) sc 结构

(b) bcc 结构

(c) fcc 结构

(d) hcp 结构

(e) NaCl 结构

(f) CsCl 结构

(g) 金刚石结构

(h) 闪锌矿结构

(i) 钙钛矿结构

(j) 石墨结构

2. 晶格一些基本概念

(1) 原胞和单胞

原胞: 晶格中最小的重复单元.

单胞: 根据对称性选取原胞的若干倍.

(2) 基矢

指原胞的边矢量

常见的 bcc, fcc 结构基矢如下:

bcc 结构

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = \frac{a}{2}(\mathbf{i} + \mathbf{j} - \mathbf{k}) \\ \mathbf{a}_2 = \frac{a}{2}(\mathbf{j} + \mathbf{k} - \mathbf{i}) \\ \mathbf{a}_3 = \frac{a}{2}(\mathbf{k} + \mathbf{i} - \mathbf{j}) \end{cases}$$

fcc 结构

$$\begin{cases} \mathbf{a}_1 = \frac{a}{2}(\mathbf{i} + \mathbf{j}) \\ \mathbf{a}_2 = \frac{a}{2}(\mathbf{j} + \mathbf{k}) \\ \mathbf{a}_3 = \frac{a}{2}(\mathbf{k} + \mathbf{i}) \end{cases}$$

(3) 晶面族、晶向和 Miller 指数

晶面族是一组平行等距晶面, 包含了所有格点.

晶向标定了晶列的方向, 用一组数 $[l_1, l_2, l_3]$ 表示.

用一组互质整数表征晶面取向称 Miller 指数(l_1, l_2, l_3).

对于一组等效晶向或等效晶面族我们用 $\langle \quad \rangle$ 和 $\{ \quad \}$ 表示.

3. 倒格子

由晶格的傅里叶表示我们引入了倒格子及倒格矢.

倒格子矢量与正格子矢量关系如下:

$$\begin{cases} \mathbf{b}_1 = \frac{2\pi(\mathbf{a}_2 \times \mathbf{a}_3)}{v_c} \\ \mathbf{b}_2 = \frac{2\pi(\mathbf{a}_3 \times \mathbf{a}_1)}{v_c} \\ \mathbf{b}_3 = \frac{2\pi(\mathbf{a}_1 \times \mathbf{a}_2)}{v_c} \end{cases}$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \mathbf{b}_j = 2\pi\delta_{ij}$$

其中 v_c 是正格子体积.

$$\text{倒格子体积 } V = \frac{(2\pi)^3}{V_c}$$

用倒格矢 $\mathbf{G}_{h_1 h_2 h_3} = h_1 \mathbf{b}_1 + h_2 \mathbf{b}_2 + h_3 \mathbf{b}_3$ 可以标定晶族族

因为 $\mathbf{G}_{h_1 h_2 h_3} \perp (h_1 h_2 h_3)$

$$\text{而且晶面间距 } d_{h_1 h_2 h_3} = \frac{2\pi}{|\mathbf{G}_{h_1 h_2 h_3}|}$$

4. 晶体的宏观对称性

晶体的宏观对称性可用 3×3 的矩阵表达的正交变换表示点对称操作分为中心反演、镜面、转轴及由此衍生的反轴存在 8 种独立的对称元素 $1, 2, 3, 4, 6, \bar{1}, \bar{2}, \bar{4}$.

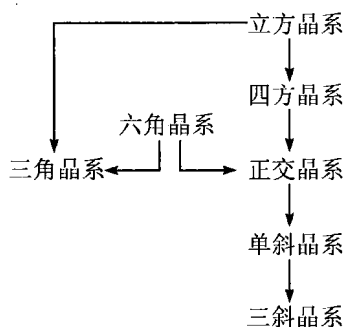
5. 晶体的分类

晶体的分类可以从晶系布拉伐格子, 点群和空间群出发.

(1) 晶系

7 个晶系从对称性最高的立方晶系到对称性最低的三斜晶系, 其归类的依据是基矢间的长度和角度关系, 7 大晶系相互间的关系如下:

(2) 布拉伐格子



7 大晶系中又衍生出 14 种拉伐格子,各晶系的布拉伐格子如下:

立方晶系:简单立方、体心立方、面心立方

四方晶系:简四方、体心四方

正交晶系:简单正交、体心正交、面心正交、底心正交

单斜晶系:简单单斜、底心单斜

三斜晶系:简单三斜

六角晶系:六角

三角晶系:三角

(3) 点群

每种布拉伐格子都有相应的宏观对称性,用点群来分别表示:转轴、转轴+镜面轴、转轴+镜面、反轴、双面轴、双面轴+镜面轴、双面轴+镜面。表示点群的符号有 C_n 、 C_m 、 C_{nh} 、 S_n 、 D_n 、 D_{nh} 、 D_{nd}

(4) 空间群

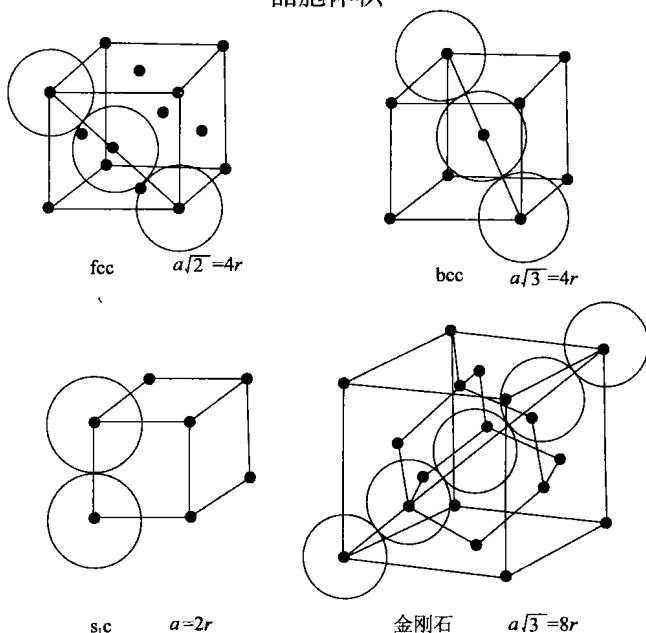
点群加上平移群(布拉伐格子)构成空间群,并由此附加上两种微观对称操作:螺旋轴和滑移反映面。230 种空间群常用熊氏符号和国际符号表示。具体含义请读者参见晶体学相关书籍。

习题全解

1.1 如果将等体积球分别排成下列结构, 设 x 表示刚球所占体积与总体积之比, 证明

结构	x
简单立方	$\pi/6 \approx 0.52$
体心立方	$\sqrt{3}\pi/8 \approx 0.68$
面心立方	$\sqrt{2}\pi/6 \approx 0.74$
六方密排	$\sqrt{2}\pi/6 \approx 0.74$
金刚石	$\sqrt{3}\pi/16 \approx 0.34$

【证明】 $x = \frac{\text{晶胞中原子数} \times \text{一个刚球的体积}}{\text{晶胞体积}}$



题 1-1 图(a)

(1) sc 结构

每个晶胞内有 1 个原子, 设晶胞边长 a

则刚球半径为 $r = \frac{a}{2}$

$$x = \frac{\frac{4}{3}\pi\left(\frac{a}{2}\right)^3}{a^3} = \frac{\pi}{6} \approx 0.52$$

(2) bcc 结构

每个晶胞图中有 2 个原子

设晶体胞边长 a

则刚球半径为 $r = \frac{\sqrt{3}a}{4}$

$$x = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{3}a}{4}\right)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{8}\pi \approx 0.68$$

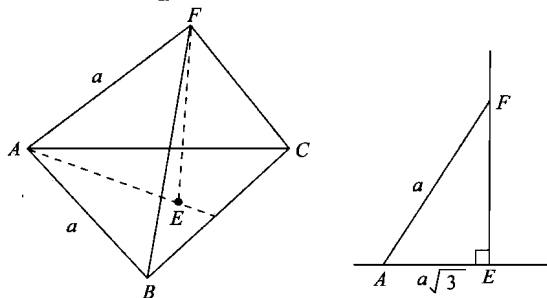
(3) fcc 结构

每个晶胞内有 4 个原子

设晶胞边长 a

则刚球半径 $r = \frac{\sqrt{2}a}{4}$

$$x = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi\left(\frac{\sqrt{2}a}{4}\right)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{2}}{6}\pi \approx 0.74$$



题 1-1 图(b)

(4) hcp 结构

第二层球球心 F 正对底面 ABC 构成正三角形中心, 因此

$$FABC \text{ 构成正四面体 } \frac{c}{2} = \text{正四面体高} = FE = \sqrt{\frac{2}{3}} a$$

$$\text{因此 } \frac{c}{a} = \sqrt{\frac{8}{3}}$$

$$\text{hcp 原胞体积 } v = a^2 c \sin 60^\circ$$

每个原胞中有 2 个原子

$$\text{刚球半径 } r = \frac{a}{2}$$

$$\text{因此 } x = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3}{a^2 c \sin 60^\circ} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi \approx 0.74$$

(5) 金刚石结构

每个晶胞内有 8 个原子

设晶胞边长 a

$$\text{则刚球半径 } r = \frac{\sqrt{3}a}{8}$$

$$x = \frac{8 \times \frac{4}{3} \pi \left(\frac{\sqrt{3}}{8} a\right)^3}{a^3} = \frac{\sqrt{3}}{16} \pi \approx 0.34$$

$$1.2 \quad \text{试证六方密排密堆积结构中 } \frac{c}{a} = \left(\frac{8}{3}\right)^{1/2} \approx 1.633.$$

【证明】 此题证明过程请见习题 1.1 中(5)的解答过程.

1.3 证明: 体心立方晶格的倒格子是面心立方; 面心立方晶格的倒格子是体心立方.

【证明】 设与晶轴 a, b, c 平行的单位矢量分别为 i, j, k , 面心立方正格子的原胞基矢可取为

$$a_1 = \frac{a}{2}(j + k),$$

$$a_2 = \frac{a}{2}(k + i),$$

$$a_3 = \frac{a}{2}(i+j).$$

由倒格矢公式

$$b_1 = \frac{2\pi[a_2 \times a_3]}{\Omega}, b_2 = \frac{2\pi[a_3 \times a_1]}{\Omega}, b_3 = \frac{2\pi[a_1 \times a_2]}{\Omega},$$

可得其倒格矢为

$$b_1 = \frac{2\pi}{a}(-i+j+k),$$

$$b_2 = \frac{2\pi}{a}(i-j+k),$$

$$b_3 = \frac{2\pi}{a}(i+j-k).$$

设与晶轴 a, b, c 平行的单位矢量分别为 i, j, k , 体心立方正格子的原胞基矢可取为

$$a_1 = \frac{a}{2}(-i+j+k),$$

$$a_2 = \frac{a}{2}(i-j+k),$$

$$a_3 = \frac{a}{2}(i+j-k),$$

以上三式与面心立方的倒格基矢相比较, 两者只相差一常数公因子, 这说明面心立方的倒格子是体心立方。

将体心立方正格子原胞基矢代入倒格矢公式

$$b_1 = \frac{2\pi[a_2 \times a_3]}{\Omega}, b_2 = \frac{2\pi[a_3 \times a_1]}{\Omega}, b_3 = \frac{2\pi[a_1 \times a_2]}{\Omega},$$

则得其倒格子基矢为

$$b_1 = \frac{2\pi}{a}(j+k),$$

$$b_2 = \frac{2\pi}{a}(k+i),$$

$$b_3 = \frac{2\pi}{a}(i+j).$$