



吴代鸣

固体物理学

吉林大学出版社

048 10

00' 192797

固体物理学

吴代鸣

吉林大学出版社

内 容 提 要

本书重点介绍固体物理学的基础知识,内容包括:晶体结构,晶体的结合,晶格振动与晶体的热学性质,晶体缺陷,金属电子理论,能带,晶体中电子的运动,半导体,固体的磁性,超导电性,固体的相变,非晶体,低维体系等。

本书可以作为高等院校物理及有关专业固体物理课程的教科书,也可供有关的科技人员参考。

固 体 物 理 学

吴代鸣

责任编辑、责任校对:唐万新

封面设计:漱 尘

吉林大学出版社出版
(长春市东中华路 37 号)

吉林大学出版社发行
长春市第四印刷厂印刷

开本:787×1092 毫米 1/32
印张:12.625
字数:281 千字

1996 年 7 月第 1 版
1996 年 7 月第 1 次印刷
印数:1—1 200 册

ISBN 7-5601-1940-9/O · 211

定价:13.00 元

前 言

本书的第一版是根据作者在吉林大学物理系所讲授的内容编写的,1986年由吉林大学出版社出版。现在出第二版是基于以下原因:

1. 经过十年来的教学实践,听取了有关师生的意见,发现书中的许多不足,急需改进才能更好地满足教学的需要。

2. 近年来固体物理学无论基础研究和应用研究都有了迅速的发展,不仅研究领域日益扩大,在研究内容和研究手段上也逐步深入和完善,正如冯端教授在《凝聚态物理学新论》中所指出的,固体物理学已发展为凝聚态物理学并形成了新的范式。这就为固体物理的教学改革和教材建设指明了新的方向。

3. 新近出版的由冯端教授主编、我国固体物理领域的许多专家集体编写的《固体物理学大辞典》,是一部高水平的工具书,对固体物理学各分支学科中的基本概念、理论模型给出简洁、准确的说明,使本书的编写有了可靠的依据。

本书第二版基本保留原来的体系,内容上作了调整和充实,试图适度地反映本学科的新进展,在内容的阐述上力求准确、简练。全书共分十三章,内容包括:晶体结构,晶体的结合,晶格振动与晶体的热学性质,晶体缺陷,金属电子理论,能带,晶体中电子的运动,半导体,固体的磁性,超导电性,固体的相变,非晶体,低维体系等。前七章介绍固体物理的共同基础,后六章介绍几个重要分支学科的基础知识和一些新的进展,总

的目的是为进一步学习凝聚态物理提供必要的基础知识。由于作者水平所限,不可能对所涉及的内容都有深入的了解与掌握,所以书中的错误实属难免,希望读者批评、指正。

本书的编写与出版得到吉林大学教务处、出版社和物理系的关心与支持,特此致谢!

吴代鸣

1996年1月于长春

主要符号表

A	矢势
a	晶格常数
a_1, a_2, a_3	基矢
B	磁感应强度
b	伯格斯矢量
b_1, b_2, b_3	倒格子基矢
C	常数, 居里常数
c_V, c_p	定容比热容, 定压比热容
c_e	电子比热容
c	光速
D	电位移矢量
D	扩散系数
d	面间距离
E	能量, 电场强度
E_g	禁带宽度
$\mathcal{E}$	能量, 电场强度
E_F	费密能
e	电子电荷
F	力, 自由能
f	费密分布函数
G	吉布斯自由能
G	倒格矢

g	自由能密度,朗德因子
$g(\omega)$	模密度
$g(E)$	能态密度
H	磁场强度
H	哈密顿量
H_c	超导临界磁场
h	普朗克常数, $h = 2\pi\hbar$
I	电流
i, j, k	x, y, z 轴单位矢量
J	交换积分
j	电流密度
K	体弹模量
k	电子波矢, k 空间矢量
k_B	玻尔兹曼常数
k_F	费密波矢
L, l	电子轨道角动量
l	长度, 自由程
M	磁化强度
M_s, M_r	自发磁化强度, 剩余磁化强度
M	原子、离子质量
m	电子质量
m^*	有效质量
N	原子、电子总数, 原胞总数
n	电子密度
P	动量, 极化强度
p	空穴浓度
Q	简正坐标, 热量

q	声子波矢
q	电荷
R	晶格平移矢量
R_H	霍尔系数
r	位置矢量
S	熵, 电子自旋量子数
T	温度, 周期
T_c	临界温度
t	时间
U, u	相互作用能
u	原子位移矢量
V	体积, 电压, 势
v	速度
W	功函数
Z	状态数目, 配分函数
α	极化率, 马德隆常数, 膨胀系数
β	力常数
γ	格临爱森常数, 电子比热系数
Δ	超导能隙
δ	趋肤深度, δ 函数
ϵ	介电常数
μ	化学势, 迁移率, 磁导率
μ_B	玻尔磁子
Θ_D	德拜温度
θ	角度
χ	热导率, 压缩系数
λ	波长, 穿透深度

ρ	密度, 电阻率
σ	电导率, 表面能
ζ	相干长度
τ	弛豫时间
ν	频率
φ	原子间相互作用势, 波函数
Φ_0	磁通量子
Ψ, ψ	波函数
ω	圆频率
ω_D	德拜频率

目 录

主要符号表	(1)
第一章 晶体结构	(1)
§ 1-1 晶体结构的周期性	(1)
§ 1-2 几种典型的晶体结构	(7)
§ 1-3 晶面与密勒指数	(12)
§ 1-4 晶体的对称性	(14)
§ 1-5 倒格子	(19)
§ 1-6 布里渊区	(22)
§ 1-7 晶体 X 射线衍射	(26)
第二章 晶体的结合	(33)
§ 2-1 晶体结合的基本类型	(33)
§ 2-2 晶体的结合能	(42)
第三章 晶格振动与晶体的热学性质	(52)
§ 3-1 一维单原子晶格的振动	(53)
§ 3-2 一维双原子晶格的振动	(58)
§ 3-3 三维晶格的振动	(62)
§ 3-4 声子	(65)
§ 3-5 离子晶体中光学模与电磁波的耦合	(68)
§ 3-6 测定声子谱的实验原理	(74)
§ 3-7 晶体的热力学函数	(76)
§ 3-8 晶格比热容	(80)
§ 3-9 晶体的状态方程	(84)

§ 3-10 晶格热传导	(86)
第四章 晶体缺陷	(91)
§ 4-1 点缺陷	(91)
§ 4-2 晶体中的扩散	(95)
§ 4-3 晶体的离子导电性	(99)
§ 4-4 色心	(103)
§ 4-5 位错	(106)
§ 4-6 面缺陷	(111)
第五章 金属电子理论	(113)
§ 5-1 金属自由电子气的经典理论	(114)
§ 5-2 金属自由电子气的量子理论	(117)
§ 5-3 金属的电导率	(126)
§ 5-4 霍尔效应	(129)
§ 5-5 等离激元与准电子	(131)
§ 5-6 维格纳晶格	(139)
第六章 能带	(141)
§ 6-1 单电子近似	(141)
§ 6-2 布洛赫定理	(143)
§ 6-3 能带及其表示图式	(147)
§ 6-4 近自由电子近似	(152)
§ 6-5 紧束缚近似	(157)
§ 6-6 能态密度	(162)
§ 6-7 费密面	(165)
第七章 晶体中电子的运动	(171)
§ 7-1 布洛赫电子的平均速度	(171)
§ 7-2 布洛赫电子在外场作用下的运动	(173)
§ 7-3 导体、绝缘体与半导体	(176)

§ 7-4	回旋共振	(183)
§ 7-5	德哈斯-范阿尔芬效应	(188)
第八章	半导体	(197)
§ 8-1	典型半导体的能带结构	(197)
§ 8-2	杂质能级	(200)
§ 8-3	电子与空穴的统计分布	(204)
§ 8-4	电导率与霍尔系数	(208)
§ 8-5	半导体的光吸收	(210)
§ 8-6	PN 结	(215)
§ 8-7	半导体的界面	(218)
§ 8-8	半导体超晶格	(223)
第九章	固体的磁性	(225)
§ 9-1	原子的磁矩	(226)
§ 9-2	抗磁性	(228)
§ 9-3	顺磁性	(230)
§ 9-4	铁磁性	(236)
§ 9-5	反铁磁性与亚铁磁性	(244)
§ 9-6	交换作用	(248)
§ 9-7	超交换作用	(256)
§ 9-8	自旋波	(259)
第十章	超导电性	(262)
§ 10-1	超导体的基本电磁学性质	(262)
§ 10-2	超导态的热力学性质	(266)
§ 10-3	伦敦方程	(270)
§ 10-4	宏观量子现象	(272)
§ 10-5	金兹堡-朗道方程	(274)
§ 10-6	第二类超导体	(277)

§ 10-7	BCS 理论的物理图象	(282)
§ 10-8	约瑟夫森效应	(286)
§ 10-9	高 T_c 氧化物超导体	(291)
第十一章	固体的相变	(295)
§ 11-1	相变的热力学分类	(295)
§ 11-2	一些特定类型的相变	(296)
§ 11-3	朗道二级相变理论	(303)
§ 11-4	临界现象	(306)
§ 11-5	软模与结构相变	(313)
第十二章	非晶体	(318)
§ 12-1	非晶体的结构	(318)
§ 12-2	非晶态的形成	(327)
§ 12-3	非晶体的原子振动与低温热学性质	(330)
§ 12-4	非晶体中的电子状态	(335)
§ 12-5	准晶体	(341)
第十三章	低维体系	(344)
§ 13-1	维数及分维	(344)
§ 13-2	准一维和准二维体系的实例	(350)
§ 13-3	量子霍尔效应	(354)
§ 13-4	佩尔斯相变	(359)
§ 13-5	聚合物中的孤子与极化子	(364)
§ 13-6	介观体系	(369)
§ 13-7	团簇	(371)
习题		(373)
参考书目		(379)
索引		(381)
基本物理常数		(390)

第一章 晶体结构

固体是由大量原子(或离子)所构成的凝聚态物质。原子在空间中的排列方式称为固体的结构。按原子的排列方式固体可以分为晶体、非晶体和准晶体三大类,原子排列具有周期性的称为晶体,非晶体不具有周期性,介于两者之间具有准周期结构的称为准晶体。了解各类固体的结构是研究其物理性质的基础,本章首先介绍晶体结构的基础知识,非晶体和准晶体的结构将在第十二章中介绍。

§ 1-1 晶体结构的周期性

人们很早就发现,各种天然矿物晶体具有很规则的几何外形,在大量观测研究的基础上,对晶体宏观对称性的规律有了深入的认识,建立了比较完善的几何晶体学。根据晶体外形上的对称性,人们早已断定它是晶体中原子有规则排列的结果。1912年劳厄等发现X射线通过晶体的衍射现象,使得从实验上测定晶体结构成为可能,从此固体物理的发展进入了一个新的阶段。人们利用X射线衍射对各种晶体进行了结构分析,弄清了大量天然和人工合成晶体的结构,证实晶体中原子的周期性排列是晶体最基本的特征。

一、布喇菲晶格

为了便于掌握晶体中原子排列的几何规律性,我们不按

历史的发展顺序,先从已知的比较简单的晶体结构入手. Na 和 Cu 是两种晶体结构比较简单的金属,由于原子在晶体中的排列具有周期性,我们总可以选取适当的结构单元,如图 1-1 和图 1-2 所示,晶体的结构是由结构单元在空间三个不共面的方向上作周期性排列而成,互相间既无空隙又不交叠. 在 Na 的结构单元中,Na 原子处在立方体的八个顶角及立方体的中心位置上,这种形式称为体心立方(bcc). 同样,在 Cu 的结构单元中,Cu 原子处在立方体的八个顶角及立方体六个面的中心位置上,这种形式称为面心立方(fcc).

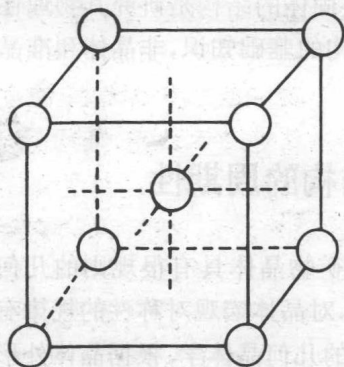


图 1-1 Na 的结构,体心立方

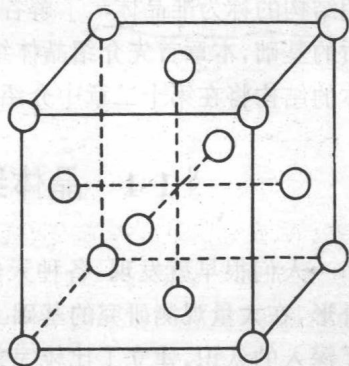


图 1-2 Cu 的结构,面心立方

为反映原子排列的周期性,我们可以把原子看成一个点,它们在空间中周期性排列,这些点的无限集合称为点阵,每个点称为阵点,也可以看成是一个空间格子,称为晶格,每个格点(或阵点)表示原子的位置. 这是一种数学上的抽象,只有把具体的原子放回到格点上才是晶体结构.

上面的例子中,晶体由一种原子构成而且晶体中每个原子周围的情况都相同,即每个原子均处在几何等价的位置上,这是非常简单的情况. 绝大多数晶体是由两种或多种原子所

组成,组成原子的性质不同当然是互不等价的,即使只含一种原子的元素晶体,原子在晶格中的几何位置也可以是不等价的(见§1-2),这时不能简单地用一个格点代表一个原子。例如,NaCl晶体是由 Na^+ 和 Cl^- 离子所组成,其结构单元如图1-3所示,每个 Na^+ 离子被六个 Cl^- 离子包围,每个 Cl^- 离子

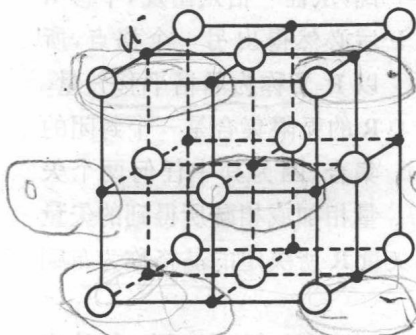


图 1-3 NaCl 结构

也被六个 Na^+ 离子包围, Na^+ 和 Cl^- 离子本身性质不同,因而是不等价的,两种离子各自构成面心立方晶格,互相套在一起。如果把相邻的一对 Na^+ 和 Cl^- 离子看成是组成NaCl晶体的基本单元,简称为基元

元,则NaCl晶体的结构可以用基元在空间中作周期性排列来表示,从图1-3不难看出,基元的代表点仍构成面心立方格子。于是,Cu和NaCl的晶格都是面心立方,只是格点的距离以及所代表的基元不同。一般来说,基元可以是单个原子,也可以是含多个原子的原子团,用一个点来表示它,这些点在空间中周期性排列构成晶格,每个格点在几何上是等价的,这种晶格称为布喇菲晶格,只有将基元以同样的方式放置在每个格点上才能得到晶体结构,格点、基元与晶体结构三者的逻辑关系为:

布喇菲晶格 + 基元 = 晶体结构

对布喇菲晶格可以给出严格的数学定义。以任一格点为原点,选取三个不共面的矢量 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$,矢量的长度表示该方向的周期(图1-4),则任一格点的位置矢量 $\mathbf{R}$ 都可以表示为

$$\mathbf{R} = n_1 \mathbf{a}_1 + n_2 \mathbf{a}_2 + n_3 \mathbf{a}_3 \quad (1-1)$$

式中 n_1, n_2, n_3 为整数, 当它们取不同的整数值时就得到所有的格点. $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$, 称为初基平移矢量, 简称基矢. 显然,

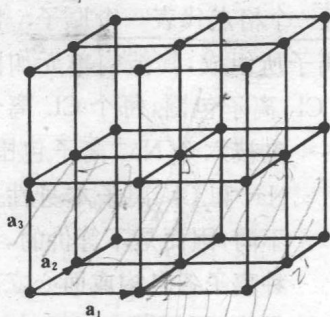


图 1-4 晶格基矢

连结任何两个格点的矢量也有公式(1-1)的形式, 也就是说, 从任一格点出发, 平移 $\mathbf{R}$ 后必然得出另一个格点, 所以 $\mathbf{R}$ 又称为晶格平移矢量.

$\mathbf{R}$ 的无限集合是一个封闭的集合, 因为其中任何两个矢量相加或相减所得到的矢量

必定属于该集合. 由晶格平移矢量 $\mathbf{R}$ 所决定的晶格称为布喇菲晶格.

应当指出, 基矢 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ 的选择不是唯一的, 图 1-5 给出二维布喇菲晶格基矢的几种不同选法, 都可以得到完全相同的晶格.

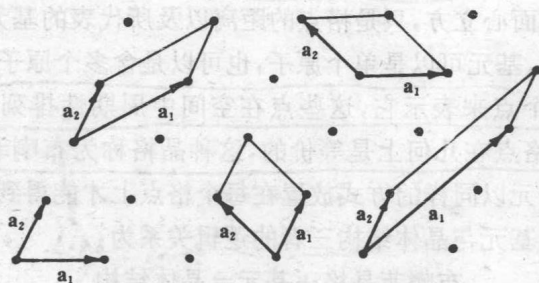


图 1-5 基矢的不同选法

二、原胞与晶胞

由于晶格的周期性, 可以用基矢 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$ 为三个棱边组