

高等学校教材

互体物理学

黄昆 原著

韩汝琦 改编

高等教育出版社

内 容 提 要

本书是在黄昆教授原著《固体物理学》的基础上改编而成的。原书在改写过程中力图保持原书的特点,对固体物理学中的一些基础知识,如晶格振动、固体能带论、半导体电子论和固体磁性等部分在内容上都更加丰富;本书反映了固体物理学领域的新进展,增加了超导体表面物理、固体中的元激发和低维系统物理等固体物理新兴领域中的内容。

本书总结了黄昆教授和韩汝琦教授长期的教学经验,本书可作为物理课程的教材,也可供有关专业的科技人员参考。

高等学校教材

固 体 物 理 学

黄 昆 原著 韩汝琦 改编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张19.125 字数480 000

1988年10月 第1版 1988年10月第1次印刷

印数 0 001—3 900

ISBN7-04-001025-9/O·656

定价 5.00

出版者前言

为适应高等学校固体物理学及其各分支学科课程教学的需要,高等学校理科物理学教材编审委员会固体物理编审小组和高等教育出版社组织编写了一套固体物理学学科的教学参考书,其中包括固体物理学及其各分支学科的基础课程和实验课程用的教学参考书和一部《固体物理学大辞典》。这些书将由高等教育出版社陆续出版。

本书是这套书中的一本。

序

在五十年代末,固体物理被采纳成为我国物理专业的一门基础课,那是当时为了赶上当代科学技术发展的步伐,是在物理专业课程设置上最显著的一项改革.但是,固体物理本身在广度、深度上都仍在迅速发展,为了能恰当地反映固体物理的新进展,在教学和教材编写中就必须作持续的努力,而这绝不是轻而易举能做到的.

这本书的前身是我所著《固体物理学》,该书虽在1979年才正式印刷出版,与读者见面,但它在“文化大革命”以前就已编写好.所以,这本书在反映固体物理学的发展上有明显不足.当时人民教育出版社*和我商量出版该书,完全是为了暂时解决一时的急需.

韩汝琦同志,在“文化大革命”以前,在我那本书的形成过程中,就一直协助我进行固体物理教学.近年来又使用该书为教材讲授了这门课程.这次他全面重新改写了这本书.在改写中,他编写了大量新内容,以反映固体物理学近年来在各个领域的新进展.

我一向认为,对于科学著作,特别是具有教材性质的书籍,一项起码的要求是问题的讲解必须明确具体,基本概念和理论的阐述必须准确.韩汝琦同志在写书过程中对这方面的问题也很注意,曾多次与我讨论.

我那本书的出版时间和原稿写成时间相隔近20年,为此,该书出版后,我始终深有余心不安之感;现在该书经韩汝琦同志全面改写,面目一新,我诚恳地祝愿它能为我国固体物理的教学作出积极的贡献.

黄 昆 1985.3.

* 现为高等教育出版社

序 言

黄昆先生所著《固体物理学》尽管成书于1965年，但自1979年正式出版以来，一直深受读者的欢迎，黄昆先生是国际知名的固体物理学家，有很高的理论造诣，又极善于讲授。黄昆先生写的书，讲解透彻、概念准确。这次，安排由我改编这本书，虽力图保持原书的风貌，但总是感到力所不能及，恐怕辜负了黄昆先生和广大读者的期望。

在改编以后的版本中，有大约三分之一的内容与原书完全相同，还有不少部分只是在原书基础上做了局部的改动，在增加的新内容中，有一些是取材于黄昆先生近年来编写的讲义，撰写的文章，宣读的报告。在改编过程中，黄昆先生给予了具体的指导，加上我长期在黄昆先生身边工作所受到的教益，应该说，如果改编之后还有些可取之处的话，它首先是属于黄昆先生。

这是一本固体物理课的教材，主要对象是综合性大学、高等师范院校物理专业的学生。为了照顾到固体物理学发展的各个领域，内容份量是过重了，对于一个学期的课程大约只能选用其中的三分之二。在编写过程中，考虑到学生具有的物理专业的数学、物理基础，尽量避免使用较高深的理论方法，因此，虽然书中增加了有关表面物理、非晶态物理、超导物理、低维系统和无序系统的理论，但大都是定性的描述，还有一些很重要的领域，如多体效应、相变和临界现象等，甚至还很少涉及到。正如黄昆先生所说：“为了能恰当地反映固体物理的新进展，在教学和教材编写中就必须做持续的努力，而这绝不是轻而易举的。”

本书采用SI单位，但有些实验图表中的单位没有改动。本书的全部初稿经杨顺华、王以铭、韩汝珊和戴道生同志校阅过，他们

都提出了宝贵的意见。在改编过程中,与国内同行专家,特别是北京大学的有关教师,进行过广泛的讨论,吸取了他们的经验,由于人数很多,恕我不能在这里一一列举姓名。黄敏同志为本书做了大量的具体工作。在这里,一併向他们表示诚执的谢意!

由于本人水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请大家批评、指正。

韩汝琦

1985年3月

主要符号表

A	矢量势
$\alpha_i (i=1,2,3)$	晶格基矢
a_0	玻尔半径
B	磁感应强度
B	磁感应强度
b	伯格矢量
$b_i (i=1,2,3)$	倒格子基矢
C	热容
c	真空中的光速、弹性波波速、比热容
c_n	n 度旋转轴
D	电位移矢量
D	扩散系数
d	晶面间距
E	电场强度
E	电子能量、电场强度
e	电子电荷
e	振动方向的单位矢量
E_A	受主能级
E_c, E_-	导带底能量
E_D	施主能级
E_F	费米能
E_g	带隙
E_i	本征费米能级、杂质电离能
E_v, E_+	价带顶能量

E_0	0K 费米能
F	力
F	自由能
f	费米分布
f_i	电离度
G	吉布斯函数
g	朗德因子
$g(\omega)$	晶格振动模式密度
H	磁场强度
H	哈密顿量
h	普朗克常数
\hbar	$\hbar = h/2\pi$
H_c	临界磁场、矫顽力
H_{c1}	下临界磁场
H_{c2}	上临界磁场
J	角动量
J	角动量量子数、交换积分
j	电流密度
k	电子波数矢量
k	消光系数、电子波数
k_B	玻耳兹曼常数
k_F	费米波数
G_n	倒格矢
L	扩散长度、轨道角动量量子数
l	轨道角动量
M	磁化强度
M	原子(离子)质量、磁量子数
m	反映面

m_0	自由电子质量
m^*	有效质量
m_l	纵向有效质量
m_t	横向有效质量
N	原胞数、原子数, 阿伏伽德罗数
n	电子浓度、杂质原子浓度、折射率
N_A	受主杂质浓度
N_C	导带有效态密度
N_D	施主杂质浓度
n_i	本征载流子浓度
n_g	波矢为 q 的声子数
N_V	价带有效态密度
P	电极化强度
P	正则动量
p	动量
p	电偶极矩、压强、空穴浓度
Q	简正坐标
q	声子波数矢量
q	声子波数、电子电荷
q^*	有效电荷
R_n	晶格矢量
R	霍耳系数
r	反射系数
S	熵、自旋量子数
s	自旋
T	温度、动能
t	时间
T_c	临界温度

T_F	费米温度
U	内能
V	体积、势能
v	速度
v_0	原胞体积
W	热力学几率、跃迁几率、功函数, 结合能
α	马德隆常数、吸收系数、极化率
β	恢复力常数
γ	格临爱森参数
Δ	超导能隙
ϵ	介电常数
ϵ_0	真空介电常数
θ	角度
θ_J	铁磁居里温度
Θ_D	德拜温度
κ	压缩系数、热导率
λ	波长、声子平均自由程
λ_L	穿透深度
μ	迁移率
μ_B	玻尔磁子
μ_n	偏离格点的位移矢量
μ_0	真空磁导率、元磁矩
μ_r	相对磁导率
μ_J	原子磁矩
μ_L	轨道磁矩
ν	频率
ξ	相干长度

ρ	电阻率
ρ_B	剩余电阻率
σ	电导率
τ	弛豫时间、寿命
φ	波函数
Φ_0	磁通量子
ψ	波函数
ω	频率
ω_D	德拜频率
ω_{LO}	长光学纵波频率
ω_{TO}	长光学横波频率

目 录

主要符号表	1
第一章 晶体结构	1
§ 1-1 一些晶格的实例	1
§ 1-2 晶格的周期性	6
§ 1-3 晶向、晶面和它们的标志	11
§ 1-4 倒格子	16
§ 1-5 晶体的宏观对称性	18
§ 1-6 点群	29
§ 1-7 晶格的对称性	33
§ 1-8 晶体表面的几何结构	38
§ 1-9 非晶态材料的结构	41
§ 1-10 准晶态	44
第二章 固体的结合	49
§ 2-1 离子性结合	49
§ 2-2 共价结合	55
§ 2-3 金属性结合	66
§ 2-4 范德耳尔斯结合	68
§ 2-5 元素和化合物晶体结合的规律性	71
第三章 晶格振动与晶体的热学性质	78
§ 3-1 简谐近似和简正坐标	79
§ 3-2 一维单原子链	82
§ 3-3 一维双原子链 <u>声学波和光学波</u>	92
§ 3-4 三维晶格的振动	97
§ 3-5 离子晶体的长光学波	103
§ 3-6 确定晶格振动谱的实验方法	115
§ 3-7 局域振动	119
§ 3-8 晶格热容的量子理论	122

§ 3-9	晶格振动模式密度	132
§ 3-10	晶格的状态方程和热膨胀	137
§ 3-11	晶格的热传导	142
§ 3-12	非晶固体中的原子振动	149
√ 第四章	能带理论	153
§ 4-1	布洛赫定理	154
§ 4-2	一维周期场中电子运动的近自由电子近似	157
§ 4-3	三维周期场中电子运动的近自由电子近似	172
§ 4-4	赝势	184
§ 4-5	紧束缚近似——原子轨道线性组合法	189
§ 4-6	晶体能带的对称性	202
§ 4-7	能态密度和费米面	213
§ 4-8	表面电子态	224
§ 4-9	无序系统中的电子态	228
第五章	晶体中电子在电场和磁场中的运动	236
§ 5-1	准经典运动	237
§ 5-2	恒定电场作用下电子的运动	245
§ 5-3	导体、绝缘体和半导体的能带论解释	250
§ 5-4	在恒定磁场中电子的运动	255
§ 5-5	回旋共振	260
§ 5-6	德·哈斯-范·阿尔芬效应	263
√ 第六章	金属电子论	275
§ 6-1	费米统计和电子热容量	276
§ 6-2	功函数和接触电势	286
§ 6-3	分布函数和玻耳兹曼方程	290
§ 6-4	弛豫时间近似和电导率公式	296
§ 6-5	各向同性弹性散射和弛豫时间	300
§ 6-6	晶格散射和电导	305
§ 6-7	玻耳兹曼方程的局限性 Kubo-Greenwood 公式	315
§ 6-8	非晶态金属的电阻率及其温度关系	318

§ 6-9 金属-绝缘体转变	319
第七章 半导体电子论	325
§ 7-1 半导体的基本能带结构	325
§ 7-2 半导体中的杂质	333
§ 7-3 半导体中电子的费米统计分布	338
§ 7-4 电导和霍尔效应	344
§ 7-5 非平衡载流子	347
§ 7-6 PN 结	351
§ 7-7 金属-绝缘体-半导体系统和 MOS 反型层	357
§ 7-8 异质结	363
§ 7-9 非晶态半导体	368
第八章 固体的磁性	378
§ 8-1 原子的磁性	379
§ 8-2 固体磁性概述	390
§ 8-3 电子的泡利自旋顺磁性与朗道抗磁性	395
§ 8-4 顺磁性的统计理论和顺磁离子盐	399
§ 8-5 铁磁性和分子场理论	406
§ 8-6 自发磁化的局域电子模型	413
§ 8-7 自旋波	417
§ 8-8 自发磁化的能带模型	421
§ 8-9 磁畴和技术磁化	427
§ 8-10 反铁磁性和亚铁磁性	432
第九章 固体中的光吸收	437
§ 9-1 固体光学常数间的基本关系	437
§ 9-2 固体中的光吸收过程	441
§ 9-3 半导体的带间光吸收	442
§ 9-4 激子光吸收	447
§ 9-5 自由载流子光吸收	451
§ 9-6 晶格弛豫及其对电子跃迁的影响	452
第十章 超导电的基本现象和基本规律	463

§ 10-1	超导体的基本电磁学性质	463
§ 10-2	超导转变和热力学	470
§ 10-3	伦敦电磁学方程	475
§ 10-4	金兹堡-朗道方程	481
§ 10-5	超导态微观图象	486
§ 10-6	第二类超导体	492
§ 10-7	单粒子隧道效应	496
§ 10-8	约瑟夫森效应	501
第十一章	固体中的元激发	513
§ 11-1	元激发	513
§ 11-2	声子	516
§ 11-3	准电子和等离激元	522
第十二章	晶体中的缺陷和扩散	529
§ 12-1	多晶体和晶粒间界	529
§ 12-2	位错	530
§ 12-3	空位、间隙原子的运动和统计平衡	541
§ 12-4	扩散和原子布朗运动	545
§ 12-5	离子晶体中的点缺陷和离子性导电	552
第十三章	相图	556
§ 13-1	固体相	557
§ 13-2	两相平衡并存的准静态相变	562
§ 13-3	三相平衡并存与共晶和包晶转变	565
§ 13-4	相转变过程的实例	569
§ 13-5	固溶体的混合焓和自由能	570
§ 13-6	有限和连续固溶体	573
§ 13-7	高温熔化和共晶相图	576
习题	578
主要参考书目	587
索引	588
基本物理常数	596

第一章 晶体结构

固体材料是由大量的原子(或离子)组成的,每 1cm^3 体积中大约有 10^{23} 个原子。如此巨大数目的原子以一定方式排列,原子排列的方式称为固体的结构。长期以来,人们认为固体材料分为两大类:晶体和非晶体。理想晶体中原子排列是十分有规则的,主要体现是原子排列具有周期性,或者称为是长程有序的。而非晶体则不然,它不具有长程的周期性。1984年从实验上发现了一类既区别与晶体又区别于非晶体的固体材料,称为准晶体,准晶体的发现开辟了固体结构研究的新领域。

固体中原子排列的形式是研究固体材料的宏观性质和各种微观过程的基础。早在两个世纪以前,就开始了晶体结构的研究。阿羽依(Haüy)从理论上推断,晶体具有规则的几何外形,是晶体中原子、分子规则排列的结果。本世纪由劳埃(Laue)等提出的X射线衍射方法,从实验上验证了这一结论。通过几十年的工作,已经测定了大量晶体原子排列的具体形式。对非晶体材料的结构也进行了大量的研究工作,对其主要特征有了一定的了解,但还有不少问题有待研究解决。而对准晶体材料结构的研究还仅仅是开始。本章的主要内容将是阐明晶体中原子排列的几何规则性。

§ 1-1 一些晶格的实例

晶体中原子排列的具体形式一般称为晶体格子,或简称为晶格。不同晶体原子规则排列的具体形式可能是不同的,我们就说它们具有不同的晶格结构;有些晶体之间(例如,Cu和Ag、Ge和Si等)原子规则排列形式相同,只是原子间的距离不同,我们就说它

们具有相同的晶格结构。这一节先介绍几个最常遇到的典型的晶格结构的实例。

把晶格设想成为原子球的规则堆积，有助于比较直观地理解晶格的组成。

图1-1示意画出在一个平面内，原子球规则排列的一种最简单的形式，可以形象地称为正方排列。如果把这样的原子层叠起来，各层的球完全对应，就形成所谓简单立方晶格。没有实际的晶体具有简单立方晶格的结构，但是一些更复杂的晶格可以在简单立方晶格基础上加以分析。简单立方晶格的原子球心显然形成一个三维的立方格子的结构，往往用图1-2的形式表示这种晶格结构，它表示出这个格子的一个典型单元，用黑圆点表示原子球，黑圆点

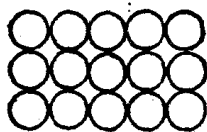


图 1-1 原子球的正方排列

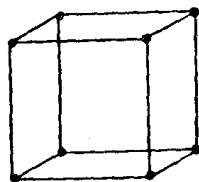


图 1-2 简单立方晶格的典型单元

所在的位置就是原子球心的位置，整个晶格可以看做是这样一个典型单元沿着三个方向重复排列构成的结果。

图1-3中画出了体心立方晶格的典型单元，可以看出除了在立方体的顶角位置有原子以外，在体心位置还有一个原子。在每一层内原子球仍然是正方排列，与简单立方晶格的区别在于层与层堆积的方式不同。体心立方晶格的堆积方式是上面一层原子球心对准下面一层的球隙，如图1-4中所示意。如果我们把某一层原子球心的排列位置用A标记；其球隙的排列位置，也就是上面一层原子球心的排列位置，用B标记，体心立方晶格中正方排列原子层之间的堆积方式可以表示为