

高等学校教学参考书

# 固体物理基础

蔡伯壖 编

高等教育出版社

高等学校教学参考书

# 固体物理基础

蔡伯璜 编

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书内容体系与传统分科阐述的不同，而是按固体中原子和电子两种主要运动发展形式，把固体物理的基本内容和金属、半导体、固体磁性、固体的热学性质等主要内容编排在一起的。这样可使读者获得固体物理的整体概念，同时还可节省学时。

本书内容主要包括：固体的结构；固体中原子运动电极化；固体中电子运动模型；电子迁移现象；界面电子行为；电子自旋运动。

本书可供高等学校固体物理课程教材，也可供有关科技人员参考。

高等学校教学参考书

### 固体物理基础

蔡伯燧 编

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

四川省金堂新华印刷厂印装

开本 850×1168 1/32 印张 18 字数 431,000

1990年9月第1版 1990年9月第1次印刷

印数 0001—1,910

ISBN 7-04-003075-6/O·956

定价 4.45 元

## 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。

CP1354101

## 序

本书系作者在四川大学物理系为固体物理专业学生讲授固体电子物理所写讲义修改扩展而成的。

教材内容系按固体中原子和电子两个主要运动发展形式来编写的。比如，第一单元在原子运动方面：首先从固体的几何结构、物理结合形式以及验证上述结果的衍射技术开始，而后进入固体中各类缺陷(点，线，面等包括色心在内)的形成和结构的阐述。第二单元从固体中原子的弹性运动开始，引入声子概念，讨论固体的各种热性质；从点缺陷的无序运动出发，考虑金属中原子的扩散运动及固体滞弹性等问题；然后涉及与固体范性相关的位错运动和缺陷间互作用等方面。在电子运动方面：首先用三种极化机制及三种极化过程来概述电介质由于电位移而导致的介电、压电、热释电和铁电等现象的性质；通过电子运动模型的引进，进入固体的另一个中心问题，即输运现象，将金属和半导体的导电行为，电热效应和电流磁效应等利用玻耳兹曼输运方程统为一体，然后对金属超导现象进行理解和讨论。随即在界面电子行为的专题中，概述固体表面电性质，功函数，金属表面热发射，光电子发射以及金属-半导体接触等等与固体器件有关的基本问题。最后以电子自旋运动形式介绍固体的顺磁，抗磁，铁磁，反铁磁及亚铁磁等现象以及磁弛豫，磁共振等磁过程的物理根源。教材体系这样的选择，旨在避免传统的分科阐述，节约学时又能容纳较多内容，更重要的也许是使学生对固体物理能够获得整体的概念。作者水平有限，能否达到此目的，尚望采用此教材的老师们共同努力来完善它。

全书共分七章容纳上述全部内容, 足供 72 学时讲授之用, 如果可用学时较少, 或学生的需求有所不同, 可在保证 1, 2, 4, 5 四章外选用 3 或 6 和 7 章。

## 符 号 表

$a$  晶格常数

$a_i$  固体物理学惯用单胞基矢,  $a_i^*$  相应倒格基矢

$a, b, c$  结晶学惯用晶胞基矢

$B$  ( $B$  磁感应强度,  $B_s$  饱和磁感应强度,  $B_r$  剩余磁化强度)

$b$  伯格矢量

$C$  任意常数、居里常数、热容 ( $C_p$  定压热容,  $C_V$  定容热容,  $C$  超导电子热容,  $C_n$  正常电子热容)

$D$  电位移矢量

$D$  扩散系数 ( $D_e$  电子扩散系数,  $D_h$  空穴扩散系数)

$d$  晶面间距

$E$  电场强度 ( $E_L$  洛伦兹场强,  $E_d$  退极化场强)

$\varepsilon$  能量 ( $\varepsilon_e$  电子能量,  $\varepsilon_h$  空穴能量)

$\varepsilon_F$  费密能 (级),  $\varepsilon_{F_0}$  绝对零度费密能

$e_i$  计算体系单位矢量

$F$  力、自由能、几何结构因子

$f$  分布函数,  $f_0$  基态分布函数

$f_e, f_a, f_c, f_l$  电子、原子、晶胞、晶格散射因子

$G$  切变模量, 吉布斯自由能

$g$  朗德因子

$H$  哈密顿,

磁场强度 ( $H_c$  矫顽强度、临界磁场,  $H_m$  分子场)

$H_P$  帕耳帖热

( $h, k, l$ ) 结晶学用密勒指数

- $(h_1, h_2, h_3)$  固体物理学用晶面指数  
**I** 电流强度  
**J** 粒子流强度, 交换积分, 总角动量量子数  
**K**  $k$ -空间格矢  
**K** 体弹性模量  
**k**  $k$ -空间位矢, 电子波矢  
 $k_B$  玻耳兹曼常数  
**L** 长度 ( $L_D$  德拜长度,  $L_e$  电子扩散长度,  $L_h$  空穴扩散长度)  
**L** 罗伦兹数,  $L_0, L_1, L_2 \dots$  输运系数  
**L** 电子轨道总角动量  
**l** 长度, 电子轨道角动量量子数  
**M** 磁化强度, 马德隆常数  
**M<sup>-1</sup>** 倒数有效质量张量  
 $m^*$  有效质量 ( $m_e^*$  电子有效质量,  $m_h^*$  空穴有效质量)  
**N** 粒子总数, 晶胞总数 ( $N_d$  施主浓度,  $N_a$  受主浓度)  
**n** 电子浓度  
**p** 动量, 极化强度矢量  
**p** 极化强度矢量 ( $p_e$  电子极化强度,  $p_a$  原子极化强度,  $p_s$  取向极化强度)  
**p** 空穴浓度  
**Q** 热量  
**q** 声子波矢  
**R** 晶体空间格矢  
**r** 晶体空间位矢  
 $R_H$  霍耳系数  
**S** 电子总自旋角动量,  $S$  绝对热电动势  
**S** 熵, 电子自旋量子数



$T$  温度,  $T_F$  费密温度

$U, u$  内能, 结合能

$[u, v, w]$  晶向指数

$V$  晶体体积  $v_0$  晶胞体积

$V$  电压, 电势(差) ( $V_a$  势垒高度,  $V_s$  表面势)

$v$  速度 ( $v_p$  相速度,  $v_q$  群速度,  $v_s$  声速,  $v_D$  漂移速度)

$W$  热流密度

$Z$  电子态密度函数

$\alpha$  电介质极化率 ( $\alpha_e$  电子极化率,  $\alpha_0$  原子极化率,  $\alpha_d$  取向极化率)

$\beta$  原子力常数

$\gamma$  回磁比 ( $\gamma_s$  电子自旋回磁比,  $\gamma_l$  电子轨道回磁比)

$\delta$  趋肤深度,  $\delta$  函数

$\epsilon$  应变

介电常数 ( $\epsilon_s$  静态介电常数,  $\epsilon^*$  复数介电常数(动态))

$\mu$  化学势 ( $\mu_0$  绝对零度化学势)

$\theta$  特征温度 ( $\theta_D$  德拜温度,  $\theta_E$  爱因斯坦温度)

$\theta_{12}$  温差电动势

$\kappa$  导热率

$\lambda$  波长, 平均自由程, 穿透深度

$\mu$  迁移率, 磁导率

$\mu_B$  玻尔磁子,  $\mu_l$  电子轨道磁矩,  $\mu_s$  电子自旋磁矩)

$\pi_{12}$  帕耳帖系数

$\rho$  密度, 电阻率

$\sigma$  应力, 导电率, 汤姆逊系数, 电子占据态函数

$\tau$  切应力, 弛豫时间

$\nu$  频率

$\phi$  功函数, 原子间作用势能

$\chi$  磁化率, 电子亲和势

$\Psi, \psi$  波函数

$\omega$  圆频率 ( $\omega_L$  拉摩耳频率,  $\omega_c$  回旋频率)

# 目 录

序 .....	1
符号表 .....	1
第一章 固体结构 .....	1
§ 1.1 晶体模型 .....	1
§ 1.1.1 布喇菲格子 .....	1
§ 1.1.2 晶格对称性 .....	13
§ 1.1.3 晶胞和晶体结构 .....	24
§ 1.1.4 倒格子和布里渊区 .....	33
§ 1.2 晶体结合 .....	46
§ 1.2.1 原子间力和晶体类型 .....	46
§ 1.2.2 固体结合能 .....	57
§ 1.3 晶体衍射 .....	66
§ 1.3.1 布喇菲晶格对 X射线的衍射 .....	67
§ 1.3.2 非布喇菲晶格对 X射线的衍射 .....	71
§ 1.3.3 X射线衍射的实测方法 .....	78
§ 1.3.4 电子衍射和中子衍射 .....	85
§ 1.4 固体中缺陷 .....	89
§ 1.4.1 点缺陷 .....	90
§ 1.4.2 线缺陷——位错 .....	101
§ 1.4.3 面缺陷 .....	111
第二章 固体中原子运动 .....	114
§ 2.1 晶格振动和固体热性质 .....	114
§ 2.1.1 一维晶链振动 .....	114
§ 2.1.2 声子 .....	125
§ 2.1.3 晶格热容 .....	124

§ 2.1.4	晶格导热	146
§ 2.2	原子跳跃运动	150
§ 2.2.1	原子在固体中的运动	150
§ 2.2.2	固体滞弹性	157
§ 2.3	位错运动	168
§ 2.3.1	位错运动的两种基本形式	168
§ 2.3.2	位错交割几何	172
§ 2.3.3	位错间的相互作用	175
§ 2.3.4	位错的来源和增殖	182
<b>第三章</b>	<b>电极化</b>	<b>187</b>
§ 3.1	电致极化	188
§ 3.1.1	介电常数 $\epsilon$	188
§ 3.1.2	作用于原子(离子)上的局域场	191
§ 3.1.3	三种微观极化原因	194
§ 3.1.4	固体静态介电常数 $\epsilon_s$	199
§ 3.2	极化弛豫及介质损耗	202
§ 3.2.1	极化弛豫	202
§ 3.2.2	动态介电常数 $\epsilon^*$	206
§ 3.2.3	介质损耗	209
§ 3.2.4	介电常数的色散关系	211
§ 3.3	应变极化	215
§ 3.3.1	电致伸缩和压电效应	215
§ 3.3.2	压电系数	218
§ 3.3.3	压电方程	223
§ 3.4	自发极化	226
§ 3.4.1	热释电效应	226
§ 3.4.2	电畴	227
§ 3.4.3	铁电性	230
§ 3.4.4	典型的铁电晶体	233
<b>第四章</b>	<b>固体中电子运动模型</b>	<b>240</b>

§ 4.1 金属中自由电子经典模型 .....	240
§ 4.1.1 特鲁德-洛仑兹电子 .....	240
§ 4.1.2 维德曼-夫兰兹定律 .....	241
§ 4.1.3 特鲁德-洛仑兹电子的失败 .....	245
§ 4.2 金属中自由电子的量子力学模型 .....	247
§ 4.2.1 索末菲电子 .....	247
§ 4.2.2 索末菲电子的能量和动量 .....	250
§ 4.2.3 电子态分布——态密度函数 $Z(\varepsilon)$ .....	252
§ 4.2.4 电子分布密度——费密分布 .....	256
§ 4.2.5 电子气热容 .....	262
§ 4.3 周期场中电子运动模型 .....	266
§ 4.3.1 布洛赫电子 .....	266
§ 4.3.2 一维克朗尼格-朋奈模型 .....	268
§ 4.3.3 能带和能隙 .....	273
§ 4.3.4 三维布洛赫函数 .....	281
§ 4.3.5 能量不连续面 .....	284
§ 4.3.6 紧束缚近似 .....	290
§ 4.3.7 等能面 .....	294
§ 4.3.8 能态密度曲线 .....	296
§ 4.3.9 金属、半金属、非导体、半导体 .....	301
§ 4.3.10 金属费密面 .....	304
<b>第五章 电子迁移现象 .....</b>	<b>310</b>
§ 5.1 布洛赫电子的运动 .....	310
§ 5.1.1 布洛赫电子的动力性质 .....	310
§ 5.1.2 布洛赫电子运动的加速度, 有效质量 .....	313
§ 5.1.3 玻耳兹曼输运方程 .....	316
§ 5.2 金属导电及导热 .....	319
§ 5.2.1 金属导电 .....	319
§ 5.2.2 杂质电阻 .....	325
§ 5.2.3 金属导热 .....	333
§ 5.2.4 热电现象 .....	333

§ 5.3 半导体电输运 .....	350
§ 5.3.1 半导体能带图样 .....	350
§ 5.3.2 半导体中载流子统计分布 .....	354
§ 5.3.3 半导体导电率 .....	365
§ 5.3.4 非平衡载流子的寿命和扩散 .....	369
§ 5.4 布洛赫电子在磁场中的运动 .....	374
§ 5.4.1 布洛赫电子回旋频率 .....	374
§ 5.4.2 电流磁效应 .....	377
§ 5.4.3 回旋共振 .....	386
§ 5.5 金属超导电性 .....	193
§ 5.5.1 金属超导现象 .....	393
§ 5.5.2 迈斯纳效应 .....	396
§ 5.5.3 超导体热力学性质 .....	406
§ 5.5.4 同位素效应和电子隧道效应 .....	410
§ 5.5.5 超导器件——冷致管 .....	417
<b>第六章 界面电子行为 .....</b>	<b>420</b>
§ 6.1 固体表面性质 .....	420
§ 6.1.1 功函数 .....	420
§ 6.1.2 金属-金属接触电势差及其测定 .....	424
§ 6.1.3 半导体表面势垒 .....	429
§ 6.1.4 表面电子态 .....	433
§ 6.2 表面电子发射 .....	435
§ 6.2.1 电子热发射——里查逊公式 .....	435
§ 6.2.2 肖脱基场效应 .....	439
§ 6.2.3 场发射 .....	441
§ 6.2.4 光电子发射 .....	444
§ 6.3 界面接触 .....	446
§ 6.3.1 金属-半导体接触 .....	446
§ 6.3.2 肖脱基势垒的整流作用 .....	450
§ 6.3.3 P-N 结 .....	460

§ 6.4 趋肤效应 .....	473
§ 6.4.1 趋肤深度 .....	473
§ 6.4.2 表面电阻 .....	474
§ 6.4.3 皮帕德实验 .....	475
§ 6.4.4 反常趋肤效应 .....	477
<b>第七章 电子自旋运动 .....</b>	<b>480</b>
§ 7.1 顺磁性和抗磁性 .....	480
§ 7.1.1 物质磁性 .....	480
§ 7.1.2 原子磁性 .....	482
§ 7.1.3 轨道电子的磁响应——磁化率 .....	487
§ 7.1.4 导体中自由电子的磁贡献 .....	494
§ 7.2 自发磁化 .....	507
§ 7.2.1 分子场 .....	507
§ 7.2.2 分子场的量子力学解释 .....	510
§ 7.2.3 有效磁子数 .....	512
§ 7.2.4 磁畴 .....	514
§ 7.2.5 反铁磁性 .....	520
§ 7.2.6 铁氧体-亚铁磁性 .....	524
§ 7.3 磁弛豫和磁共振 .....	525
§ 7.3.1 顺磁弛豫 .....	525
§ 7.3.2 顺磁共振 .....	528
§ 7.3.3 量子放大器 .....	533
<b>习题 .....</b>	<b>535</b>
<b>索引 .....</b>	<b>543</b>
<b>基本物理常数 .....</b>	<b>558</b>

# 第一章 固体结构

## § 1.1 晶体模型

### § 1.1.1 布喇菲格子

#### (一) 晶格和晶胞

如果将无限大晶体的每个组成粒子或粒子集团抽象为一个代表点(它可以是粒子集团的质心或某特定粒子的质心或任意其他等效的点),那么晶体便可以抽象为这些代表点的无穷集合,称之为点阵,而代表点称为阵点。这样的点阵模型可用来描述晶体结构的几何对称性。

在点阵中任取一点为原点。从这原点引向三个不共面的最邻近阵点作三矢量(如图 1-1 中的  $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$  和  $\mathbf{a}_3$ )。这三个矢量确定三个轴向,称为基矢,又称平移矢量,因为利用它们平行移动可构成整个点阵。阵点可沿这三个方向用平行直线族联结起来构成一个网格,称为格子,网格的结点(阵点)称为格点。通常我们想像格点小上有象征粒子或粒子集团的小球体,并将这样的格子称为晶格。在后面将把它作为描述晶体的模型。

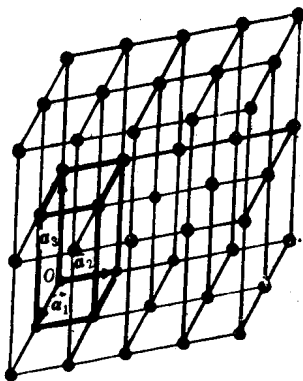


图 1-1 格子和原胞

整个格子系由无限多相同的平行六面体所构成。由基矢  $\mathbf{a}_1$ 、 $\mathbf{a}_2$  及  $\mathbf{a}_3$  平移构成的平行六面体连带六个在顶点上的结点构成一个原胞(见图 1-1 中的粗线格)。原胞是格子的重复单位,将这原



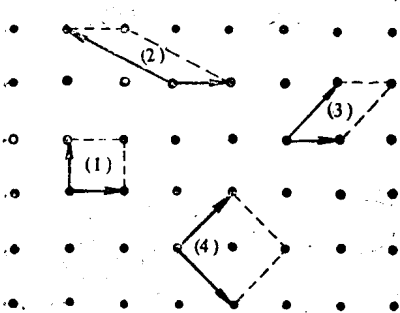
胞沿三个轴向按平移矢量  $\mathbf{a}_1$ ,  $\mathbf{a}_2$  及  $\mathbf{a}_3$  逐步平移可以构成整个格子。这正显示了格子自身的平移对称性, 同时也表明晶格结构的周期性。根据这一平移性质, 任意格点的位置矢量  $\mathbf{R}$ , 简称格矢, 可用下式来表示:

$$\mathbf{R} = R_1\mathbf{a}_1 + R_2\mathbf{a}_2 + R_3\mathbf{a}_3 \quad (1-1)$$

其中  $R_1$ ,  $R_2$  和  $R_3$  可取任意正负整数(包括零在内)。同时, 格矢的坐标用  $(R_1, R_2, R_3)$  表示。

这样定义的  $\mathbf{R}$  矢量(或格点)的无穷集合称为布喇菲点阵, 由它构成的格子称为布喇菲格子。

对于一定格子, 原胞的选择是任意的, 比如在图 1-2 中表示



的二维正方点阵, 原胞可以有(1), (2), (3), (4)等的不同选择。但通常尽量选择反映晶格的对称性比较明显而体积又是最小的。所谓最小是指每个原胞平均只包含单个格点。比如图 1-2 中的(1), 每个原胞的角顶格点为相邻四个原胞所共有, 四个

图 1-2 示意原胞可以有多种的选择如(1), (2), (3), (4)等

角顶格点只能作一个格点计算, 这样的原胞属于初基原胞。为了更好地反映格子的对称性或是由于某种方便也可选用较大的原胞, 如图 1-2 中的(4)。对于三维情况, 可以有如图 1-3 所示的体心立方原胞(bcc)和面心立方原胞(fcc)。前者每个原胞平均包含两个格点, 后者平均包含四个格点(每个面心格点为相邻两原胞所共有, 只算半个)。包含两个以上格点的原胞属于复式原胞。

(二) 14 种布喇菲格子和 7 个晶系

可将 20000 种以上的晶体按宏观对称划分为 32 种晶族, 各具