凝聚态物理学丛书

金属物理学

第二卷 相变

冯 端 等著



科学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

凝聚态物理学丛书

金属物理学

第二卷 相变

冯 端等著

KG3.1/26



科学出版社

1998

内 容 简 介

本书为《金属物理学》的第二卷，主题为相变，涉及的材料既有金属与合金，也包括一些非金属材料．本书致力于沟通凝聚态物理学与材料科学，论述中以基本物理问题为主要线索，而将各种材料的相变行为作为实例，穿插于各章之中，将基本理论与实际问题有机地联系起来．全书共分四编：第六编为相变导论，在从热力学、结构变化及动力学观点讨论相变的主要类型之后，论述了朗道的唯象理论及其应用．第七编为相变动力学，首先讨论了有成核、生长与粗化等阶段的非匀相转变，然后讨论了失稳分解及连续相变的动力学问题．第八编为界面的稳定性与形态的演变，从溶质分凝、组分过冷等概念出发，一直到细致的分析线性动力学的界面失稳的判据；进一步用来分析枝晶生长、定向凝固、共晶凝固和分形生长过程中形态演变问题．第九编为相变的微观理论，首先讨论了统计模型的准确解与近似解，然后扼要地介绍临界现象的近代理论，标度律与重正化群；进而阐述软模理论及其多种结构相变中的应用；最后论述了电子-声子相互作用所引起的相变及金属-非金属转变的理论．

本书可作为大学高年级学生的教学参考书；也可作为固体物体、金属物理与材料科学等专业的研究生用的教材，或供有关领域的科技工作者参考．

凝聚态物理学丛书
金属物理学
第二卷 相变
冯 端等著
责任编辑 李义发
科学出版社出版
北京东黄城根北街16号
邮政编码：100717
中国科学院印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
*
1990年1月第 一 版 开本：850×1168 1/32
1998年5月第二次印刷 印张：17 1/2
印数：811—2 300 字数：456 000
ISBN 7-03-001231-3/O・273
定 价：35.00元

53.719
5:2

《凝聚态物理学丛书》出版说明

以固体物理学为主干的凝聚态物理学，通过半个世纪以来的迅速发展，已经成为当今物理学中内容最丰富、应用最广泛、集中人力最多的分支学科.从历史的发展来看，凝聚态物理学无非是固体物理学的向外延拓，由于近年来固体物理学的基本概念和实验技术在许多非固体材料中的应用也卓有成效，所以人们乐于采用范围更加广泛的"凝聚态物理学"这一名称.

凝聚物理学是研究凝聚态物质的微观结构、运动状态、物理性质及其相互关系的科学. 诸如晶体学、金属物理学、半导体物理学、磁学、电介质物理学、低温物理学、高压物理学、发光学以及近期发展起来的表面物理学、非晶态物理学、液晶物理学、高分子物理学及低维固体物理学等都是属于它的分支学科，而且新的分支尚在不断迸发. 还有，凝聚态物理学的概念、方法和技术还在向相邻的学科渗透，有力地促进了材料科学、化学物理学 、生物物理学和地球物理学等广义学科的发展.

研究凝聚态物质本身的性质和它在各种外界条件(如力、热、光、气、电、磁、各种微观粒子束的辐照乃至各种极端条件)下发生的变化，常常可以发现多种多样的物理现象和效应，揭示出新的规律，形成新的概念，彼此层出不穷，内容丰富多彩，这些既体现了多粒子体系的复杂性，又反映了物质结构概念上的统一性. 所有这一切不仅对人们的智力提出了强有力的挑战，更重要的是，这些规律往往和生产实践有着密切的联系，在应用、开发上富有潜力，有可能开辟出新的技术领域，为新材料、元件、器件的研制和发展，提供牢固的物理基础. 凝聚态物理学的发展，导致了一系列重要的技术突破和变革，对社会和科学技术的发展将发生深远的影响.

为了适应世界正在兴起的新技术革命的需要，促进凝聚态物

理学的发展，并为这一领域的科技人员提供必要的参考书，我们特组织了这套《凝聚态物理学丛书》，希望它的出版将有助于推动我国凝聚态物理学的发展，为我国的四化建设做出贡献。

主　编：葛庭燧

副主编：冯　端

需要全本请访问 www.ertongbook.com

第二卷 序 言

在相变这一领域中，60年代以后进展迅速，某些方面已经发生了根本性的变革．如若仅将原来的"金属物理" 下册（1975年，科学出版社出版，但主要部分成稿于1965年）中的相变章节予以改写和补充，显然已不能适应当前的需要，因而有必要改弦易辙，另立体系，进行彻底改写，从而成为面目全新的一本书．由于相变为跨越各种学科的学术领域，不同专业的学者往往强调其不同的侧面，例如，对于凝聚态理论物理学家而言，相变问题意味着朗道理论，伊辛模型的准确解与近似解、标度律、重正化群、软模、电子-声子相互作用、局域化与渗流等；而对于材料科学家而言，则意味着成核、生长、脱溶沉淀、胞区分解、马氏体相变、T-T-T 曲线、溶质分凝、组分过冷与共晶凝固等．虽然偶尔也有一些物理冶金学的课题，如失稳分解与沉淀相的粗化（奥斯瓦尔德熟化），得到理论物理学家的关注；而近年来，朗道理论与软模理论也开始受到材料科学家的重视；但是一般而言，双方的共同语言仍然不多，存在一条理解上的鸿沟，这显然不利于本领域的进一步发展．本书致力于沟通这两种不同的观点，填塞理解上的鸿沟，因此在论述中即以基本物理问题为主要线索，而将各种材料的具体相变行为作为实例，穿插于各章之中，将基础理论与实际问题有机地联系起来．以马氏体型相变为例，虽未列专章进行论述，但有§12.6，§12.10，§13.14，§14.5、§19.10及§19.11 等节讨论了有关问题，某些方面反而可能讲得更深透一些．由于突出了物理问题，涉及材料的面相应地有所拓宽，除了金属与合金外，也包含某些非金属材料，特别是某些复杂氧化物，这是阐述朗道理论和软模相变的典型材料．这一拓宽，既和著者近年来的研究方向有关，也和学科发展的新形势相

呼应.严格说来,本书已超出传统的金属物理学的范围,称之为"材料物理学"的"相变"卷,似乎更为恰当.除了由于书名早已确定,中途更改会有困难外;又鉴于金属的含义也正在拓宽,合成金属(synthetic metal)已被用来描述一些具有金属导电性的链状或层状的无机或有机化合物及高分子材料;而新近发现的高临界温度超导体正好是具有畸变钙钛矿结构的复杂氧化物,显然也属于金属的范畴.为此,我们在书末增加了论述金属-非金属转变的一大节,用以说明金属-非金属之间并不存在绝对不可逾越的界限.在这一新形势下,"金属物理学"中用一定的篇幅来论述钙钛矿型氧化物的相变问题,也就显得顺理成章了.这样,材料范围的拓宽也在学科的新近发展中找到了依据.

由于我们在写作中兼顾凝聚态物理学和材料科学这两方面的问题:既要重点论述一些已经确立的基础理论,又要适当介绍新近的进展,还要顾及在材料科学发展中所起的作用,这一任务显然是相当艰巨的,也缺乏先例可循.因此,不论在体系的建立,素材的取舍与处理的方式上,都是屡经斟酌,反复推敲的.要取得成功,也许是奢望,但总不失为一次有意义的尝试.

在本书的写作过程中,获得了多方面的支持和协助.首先应该感谢南京大学物理系和固体物理研究所对我们工作长期一贯的支持,而本书中的许多学术见解也和我们所处的研究集体中的科究工作分不开.徐祖耀教授,法尔克(F.Falk)博士、奈维脱(M.Y.Nevitt)博士与朱劲松同志都提供了有用的参考资料,对本书的写作都产生了影响;郭可信教授、闵乃本教授、古斯脱(W.Gust)博士、冯国光博士、张泽博士、陈峻博士、潘晓晴与邹晓冬同志提供图片,使本书生色不少;陈廉方同志抄写了部分文稿,并在文字上作了润色;冯步云同志协助编纂了索引;陶冶、陈峻等同志校改了部分文稿;王业宁教授及闵乃本教授于百忙之中审阅了全稿,并提出了宝贵的意见;钱临照教授对于本书的写作一贯给予鼓励和关怀.谨此致谢.当然,由于我们的学识疏陋,水平不高,书中必然存在不少错误和欠妥之处.这些完全由著者负责.

本书的第七编由刘治国撰写；第九编中的第十八、十九两章由杨正举撰写；第二十章由金国钧撰写；其余部分由冯端撰写。

冯　端

1987年10月4日

目　　录

第　二　卷

第六编　相变导论

冯　　端

引言 …… 1

第十二章　相变的基本类型 …… 6

I　按热力学分类 …… 6

§12.1　热力学函数 …… 6

§12.2　一级相变与高级相变 …… 8

§12.3　相变的热力学关系式 …… 11

II　按结构变化分类 …… 14

§12.4　重构型相变与位移型相变 …… 14

§12.5　位移型相变的一些实例 …… 16

§12.6　马氏体型相变 …… 19

§12.7　有序-无序型相变 …… 25

§12.8　相变的调制波表述 …… 27

III　按动力学机制分类 …… 31

§12.9　对于非局域涨落的稳定性 …… 31

§12.10　应变失稳 …… 36

§12.11　不同的生长模式 …… 39

第十三章　朗道理论及其应用 …… 42

I　朗道的唯象理论及其变型 …… 42

§13.1　序参量 …… 42

§13.2　朗道的二级相变理论 …… 44

§13.3　外场对于相变的影响 …… 47

§13.4　朗道理论的推广 …… 50

§13.5 二级相变的对称性变化(朗道条件) …… 56
§13.6 涉及宏观不均匀性的相变与栗夫雪兹判据 …… 59
§13.7 朗道理论与相图 …… 63
§13.8 序参量的涨落及其空间相关性 …… 67
II 朗道理论的若干应用 …… 70
§13.9 铁性相变 …… 70
§13.10 有序-无序相变 …… 73
§13.11 结构相变 …… 81
§13.12 相变引起的畴结构 …… 84
§13.13 无公度相及其相变 …… 89
§13.14 马氏体型相变 …… 93
§13.15 液固相变 …… 99
第六编 参考文献 …… 107

第七编 相变动力学

刘 治 国

引言 …… 111
第十四章 非匀相转变动力学 …… 114
I 成核 …… 114
§14.1 相变驱动力 …… 114
§14.2 均匀成核 …… 116
§14.3 关于成核理论的讨论 …… 119
§14.4 非均匀成核 …… 128
§14.5 马氏体型相变成核问题 …… 134
§14.6 经典成核理论的修正 …… 136
II 生长 …… 144
§14.7 界面控制型生长 …… 144
§14.8 吉布斯-汤姆逊定理 …… 150
§14.9 原子长程扩散控制型生长 …… 152
§14.10 长程扩散控制的台阶机制生长 …… 157
§14.11 胞区分解中新相的长大 …… 161

III 粗化…… 166
§14.12 弥散沉淀相的粗化(奥斯瓦尔德熟化)…… 167
§14.13 片状和纤维状组织的粗化…… 172
§14.14 晶粒的粗化…… 177
IV 非匀相转变动力学的形式理论…… 180
§14.15 约翰逊-迈尔-阿弗拉密（JMA）方程 …… 180
§14.16 时间-温度-转变图…… 183
第十五章 匀相转变动力学…… 188
I 失稳分解…… 188
§15.1 逆扩散与经典扩散方程 …… 189
§15.2 非均匀连续介质的自由能表式 …… 191
§15.3 卡恩-希利阿德方程及其解…… 194
§15.4 失稳分解的实验研究 …… 200
II 失稳有序化 …… 203
§15.5 非均匀介质的离散格点模型 …… 204
§15.6 离散格点模型中扩散方程解的讨论 …… 208
III 连续相变的动力学…… 213
§15.7 均匀系统序参量的弛豫 …… 213
§15.8 非均匀系统序参量的弛豫 …… 215
第七编 参考文献…… 216

第八编 界面稳定性与形态的演变

冯 端

引言…… 221
第十六章 界面形态的稳定性…… 224
I 溶质分凝与组分过冷…… 224
§16.1 二元合金固液界面条件的宏观描述 …… 224
§16.2 定向凝固中的溶质分布 …… 226
§16.3 组分过冷 …… 230
§16.4 快速凝固中的溶质分凝 …… 234

需要全本请访问 www.ertongbook.com

II 界面形态失稳的动力学分析 …… 237
§16.5 传输理论的统一表述 …… 237
§16.6 平界面的失稳条件(单一传输模式) …… 239
§16.7 球形界面的失稳条件(单一传输模式) …… 244
§16.8 平界面的失稳条件(混合传输模式) …… 248
第十七章 界面形态的演变 …… 254
I 枝晶的自由生长 …… 254
§17.1 枝晶概述 …… 254
§17.2 枝晶主干的稳态生长 …… 258
§17.3 边缘稳定性判据 …… 262
§17.4 多面体生长的稳定性 …… 265
§17.5 固态相变中形成的枝晶 …… 267
II 合金定向凝固的界面形态 …… 271
§17.6 失稳后界面形态演变的经验规律 …… 271
§17.7 基于边缘稳定性的理论解释 …… 274
§17.8 枝晶生长的柱状区与等轴区 …… 278
III 复相合金的界面形态 …… 282
§17.9 共晶凝固概述 …… 283
§17.10 耦合生长的理论 …… 285
IV 分形生长过程及有关问题 …… 291
§17.11 扩散限制的聚集模型 …… 291
§17.12 分形与维数 …… 293
§17.13 分形生长的判据 …… 296
§17.14 分形生长过程与界面形态的演变 …… 297
第八编 参考文献 …… 299

第九编 相变的微观理论

杨正举 金国钧

引言 …… 302
第十八章 统计模型与临界现象 …… 307

I 统计模型 …… 307
§18.1 一维伊辛模型 …… 307
§18.2 二维伊辛模型 …… 313
§18.3 三维伊辛模型的近似解 …… 328
§18.4 伊辛模型的推广与变型 …… 336
II 临界指数与标度律 …… 342
§18.5 临界指数 …… 342
§18.6 标度律与普适性 …… 351
§18.7 重正化群理论大意 …… 358
第十九章 软模理论与结构相变 …… 368
I 软模导论 …… 368
§19.1 软模的基本概念 …… 368
§19.2 软模相变的简单理论 …… 371
§19.3 软声子模的本征矢与相变序参量 …… 376
II 结构相变的软模理论 …… 380
§19.4 位移型结构相变的理论——软声子描述 …… 380
§19.5 有序-无序型结构相变的理论——赝自旋模型描述… 389
§19.6 关于结构相变的统一理论 …… 402
III 中心峰 …… 408
§19.7 中心峰的唯象处理 …… 408
§19.8 运动畴壁理论 …… 413
§19.9 缺陷与软模耦合理论 …… 424
IV 声频支软模相变的理论 …… 427
§19.10 马氏体型相变与弹性模量的软化 …… 428
§19.11 马氏体型相变的软模理论 …… 430
第二十章 电子-晶格耦合系统 …… 437
I 电子-晶格相互作用 …… 437
§20.1 多粒子系统薛定谔方程与绝热近似 …… 437
§20.2 电子-晶格相互作用的各种表示 …… 440
§20.3 密度响应和科恩反常 …… 447
II 杨-特勒效应 …… 452
§20.4 杨-特勒定理以及对绝热近似的修正 …… 452

§20.5 基本理论模型和平均场结果 …… 457
§20.6 主要材料和实验结果 …… 467
III 佩尔斯相变和电荷密度波 …… 472
§20.7 佩尔斯失稳的物理内容 …… 472
§20.8 佩尔斯相变的定量理论 …… 479
§20.9 电荷密度波 …… 487
§20.10 佩尔斯相变的产生条件 …… 492
IV 金属-非金属转变 …… 497
§20.11 金属-非金属转变的几种类型 …… 497
§20.12 狭能带强关联下的电子态：莫特转变 …… 501
§20.13 无序系统的电子态：安德森转变 …… 509
§20.14 金属氧化物中的金属和非金属态 …… 519
第九编 参考文献 …… 526
人名索引 …… 533
内容索引 …… 537

第　一　卷

主要参考书目(附有按语)…… xii
绪论…… 1

第一编　金属的结构及其理论

第一章　金属的结构…… 5
第二章　金属结构的理论…… 31

第二编　合金的结构及其理论

第三章　合金的热力学…… 80
第四章　合金的结构…… 107
第五章　微观的合金理论…… 155

第三编　晶体的缺陷

第六章　点缺陷…… 215
第七章　位错…… 248

第四编　表面与界面

第八章　表面…… 376
第九章　界面…… 416

第五编　原子的迁移

第十章　金属中的扩散…… 475
第十一章　几个和扩散有关的实际问题…… 547

第六编　相变导论

冯　端

引　言

相变指的是当外界约束(温度或压强)作连续变化时，在特定条件(温度或压强达到某定值)下，物相却发生突变。突变可以体现为：(1)从一种结构变化为另一种结构，例如气相凝结成液相或固相，液相凝固为固相，或在固相中不同晶体结构之间的转变；(2)化学成分的不连续变化，例如固溶体的脱溶分解或溶液的脱溶沉淀；(3) 某种物理性质的跃变：例如顺磁体-铁磁体转变，顺电体-铁电体转变，正常导体-超导体转变等，反映了某一种长程序的出现或消失；又如金属-非金属转变，液态-玻璃态转变等，则对应于构成物相的某一种粒子（如电子或原子）在两种明显不同的状态（如扩展态与局域态）之间的转变。上述三种变化可以单独地出现，也可以两种或三种变化兼而有之。如脱溶沉淀往往是结构与成份的变化同时发生，铁电相变则总是和结构相变耦合在一起的，而铁磁相的沉淀析出则兼备三种变化。

相变理论要解决的问题无非是：(1)相变为何会发生？(2)相变是如何进行的？前一个问题的热力学答案是明确的，但尚不足以解决具体问题，还有待于微观理论将一些参量计算出来。简化的统计模型，尽管和实际情况还有差距，对于说明某些相变为什么会发生则是相当重要的，虽在本书第一卷第五章中已经作了一些介绍，在本卷中还将作一些补充和引伸。至于从固体电子论的观点来说明相变问题，更是困难重重，它牵涉到电子与晶格相互作用

1107035

需要全本请访问 www.ertongbook.com