

凝聚态物理学丛书

金属物理学

第一卷 结构与缺陷

冯 端 等著



科学出版社

凝聚态物理学丛书

金属物理学

第一卷 结构与缺陷

冯 端 等 著

科学出版社

1998

内 容 简 介

《金属物理学》共分四卷出版:第一卷,结构与缺陷;第二卷,相变;第三卷,金属力学性质;第四卷,超导电性和磁性。本书为第一卷,共分五编:前两编论述金属与合金的结构及其理论,除扼要介绍金属电子论及以经验规律为基础的金属理论之外,对不同层次的合金理论作了较全面的总结,并对液态金属、非晶态合金、准晶态合金等新的发展也作了适当的介绍;第三编论述晶体的缺陷,除论述点缺陷和辐照效应外,还较全面细致地阐述了位错理论的各个侧面,如几何理论、弹性理论、点阵理论等;第四编对表面与界面物理学这一新领域进行了阐述,其中还涉及超微粒与调制结构等前沿课题;第五编论述扩散以及一些与扩散密切相关的过程,如氧化和烧结。

本书可作为高等院校本科生和研究生《金属物理学》一课的教学参考书,也可供从事固体物理学、物理冶金学或材料科学等有关的科技工作者参考。

凝聚态物理学丛书

金 属 物 理 学

第一卷 结构与缺陷

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

新 世 纪 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1987年11月第一版 开本:850×1168 1/32

1998年5月第二次印刷 印张:19

印数:2 101-3 600 字数:495 000

ISBN 7-03-006431-3/O · 986

定 价: 38.00 元

53.219
5:1

《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。

凝聚态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进发。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: 葛庭璠

副主编: 冯 端

序 言

冯端、王业宁、丘第荣编著的《金属物理》(上册, 1964 年; 下册, 1975 年, 科学出版社)问世以来谬承各方关注、厚爱, 或予以引证、评论, 或采用为教材, 或订正其中的错误, 这是对于编著者的鼓励和鞭策, 对此, 编著者深为感激。现该书脱销已久, 各方需求甚切, 而科学技术的进展, 又使凝聚态物理学的各个分支学科面目日新月异, 迫切需要对这一学科领域进行一次新的全面总结。兹受科学出版社的委托, 在原来《金属物理》的基础上, 重新编写一部能适应 80 年代科技发展需要的《金属物理学》, 以充《凝聚态物理学丛书》之列。

金属物理学是固体物理学(或凝聚态物理学)的一个分支学科。为避免和现行的固体物理教科书的过多重复, 我们将论述的重点放在成分、缺陷和非平衡态结构所产生的效应, 突出合金、缺陷、相变和结构敏感性质等方面的问题。金属物理学与物理金属学(或物理冶金学)之间虽无明确的分界线, 但在体系和重点上还是略有差异的。本书的体系突出了物理学的主干, 而将有关金属学的具体内容, 只是作为普遍规律的例证而纳入本书之中。为了避免内容过于庞杂, 本书就不去详细讨论研究金属的各种物理方法。我们假定读者在阅读本书之前, 已经掌握了金属学与晶体学的必要基础; 并在理论物理方面具有一定的素养(相当于大学物理专业的水平); 但为了照顾一般读者, 对于某些理解本书所必备的基础知识(如弹性力学等)也扼要地编成附录, 以资参考。在金属物理学的基础理论的阐述中, 我们突出了问题的物理模型, 尽可能将其中各个环节交代清楚, 而将部分比较繁琐的数学推导写在附录之中。我们力求做到, 读者无需查阅许多其他文献就能够基本上读懂本书的主要内容。

我们计划将全书分为四卷:第一卷为结构与缺陷,论述金属与合金的结构及其理论,并阐述晶体缺陷、表面与界面的基本规律、以及有关扩散、氧化、烧结等问题。书中包括了一些反映近期发展的新章节,如非晶态、准晶态、表面、超微粒、调制结构等。第二卷为相变,鉴于这是 60 年代以后取得明显进展的一个领域,拟采用物理学的观点对它进行新的整理和总结。第三卷为金属力学性质。第四卷为超导电性和磁性。

由于本书涉及的内容范围宽广,撰稿人将有所增加。为保持连贯性与可读性,故本书由本人负责对全书进行全面筹划协调,以统一的观点和线索贯穿全书,并注意到前后文相互呼应等问题,力图避免众多作者合作写书之庞杂失调的弊病。由于我们学识疏陋,水平不高,在内容的取舍和问题的处理上,一定存在不少毛病,尚祈读者不吝予以指正。

在计划和编写本书的过程中,始终得到钱临照教授的关怀、鼓励和指点,并承蒙审阅文稿,特此致谢。

本书为第一卷,其撰写分工如下:第一编至第四编,冯端;第五编,丘第荣。

冯 端

一九八六年元月

主要参考书目(附有按语)

- (1) N. F. Mott and H. Jones, *The Theory of the Properties of Metals and Alloys*, Oxford University Press (1936); 中译本, 金属与合金性质的理论, 傅正元、马元德译, 科学出版社 (1958)。

此书是金属物理学的第一本专著。本书作者之一莫特在固体物理学广泛的领域内作出了重要贡献, 并且与其合作者撰述了一系列的专著(本书以外, 还有离子晶体的电子过程, 非晶材料的电子过程, 金属-绝缘体转变等), 在学术界产生深远的影响。在布里斯托尔(Bristol)大学与剑桥大学任教时期, 在他的周围形成了固体电子论与位错研究的强有力的学派; 他是金属物理学的奠基人之一。另一作者琼斯亦以金属电子论和合金理论的工作著称于世。写作本书时, 莫特刚三十出头(他是年过七十方始获得诺贝尔奖金的), 处于科学生涯的初期, 但已经是一位成熟的科学家了。作者以流畅的文笔综述了基础理论, 并且广泛地联系金属材料的实验数据来进行解释。这种理论与实践相结合的作风, 为随后的金属物理学专著树立了楷模。本书虽然已出版了半个世纪, 但仍然保持其可读性。作者明智地有意将内容限于当时物理学已经征服的领域, 如金属电子论, 晶格动力学与合金理论。至于其余的部分呢? 作者在导言末提到“在本书中我们还未提及强度性质这一个对工程极关重要的金属性质。到目前还未能将原子物理的方法用于这个问题。虽则泰勒(G. I. Taylor)最近的工作已使人有希望不久即可作到这一点”, 这充分显示了作者的远见卓识。

- (2) F. Seitz, *The Physics of Metals*, McGraw-Hill (1943)。

此书是第一本以金属物理学命名的著作。作者也是固体物理学与金属物理学的奠基人之一。本书涉及的内容比上一本书广泛得多, 范性形变、合金强化、蠕变、断裂、疲劳、内耗、扩散等, 几乎无所不包, 显示出一位物理学家在原来不熟悉的金属学的领域内进行多方面的探索。本书虽然涉及众多的课题, 但处理不够深入。与作者同时期的另一著作“近代固体理论”的风格迥异。后者作为固体物理学奠基性的专著, 时至今日, 仍然保留其价值; 而本书则由于时过境迁, 参考价值已经不大了。

- (3) C. S. Barrett, *Structure of Metals*, McGraw-Hill (1943, 1953, 1966); C. S. Barrett and T. B. Massalski, Pergamon Press (1980).

此书作为强调金属物理学的结构方面问题的入门书,曾哺育了好几代的科学工作者。本书既介绍晶体学和X射线衍射方法的基础,也扼要介绍金属物理的基本知识,但其重点却放在讨论X射线衍射技术在金属研究中的应用方面。作者是X射线金属学的创始者之一,具有丰富的实践经验。书中的极射赤平投影这一章就写得很精采,至今仍然有参考价值。在金属物理学发展的初期,这种兼容并蓄的风格是颇受读者欢迎的,本书曾广为流传,就是明证。但是随着学科的发展,像这样既要讲实验方法,又要讲实验结果,还要介绍研究对象本身的规律性,这样的处理就显得过于庞杂,难于面面兼顾。相比之下,纪尼埃(A. Guinier)同时期的著作 *Radiocristallographie*, (Dunod (1945); 中译本,施士元译, X射线晶体学,科学出版社(1959)) 明智地将内容限制于X射线晶体学及其应用,就显得条理清楚,目标明确。(纪尼埃书(1956)的第二版后半部补充了许多新内容,实际上成了有关不完整晶体衍射问题的专著)。1966年以后马萨斯基对巴瑞德原书进行了改编,补充了许多新的内容,但没有改变原书的格局。

- (4) Я. И. Френкель, *Введение в теорию металлов*, ГИТТЛ (1947, 1950).
中译本,金属物理概要,何寿安译,科学出版社(1957)。

夫仑克耳也是一位对金属物理学有贡献的理论物理学家,具有鲜明的科学风格,擅长以简洁的数学来处理复杂的物理问题。在本书中突出地体现了他的个人见解和个人风格。内容中包括了一些不常见的课题,如金属的熔化与液体的分子动力论等。本书中有一些很精采的章节,如固体的分解、动态位错性质、外应力对原子迁移的影响等。但本书中流露的一些非正统的科学见解,如对能带论的否定态度和对静态位错理论的轻视,却没有经得住时间的考验。

- (5) A. H. Cottrell, *Theoretical Structural Metallurgy*, Arnold (1948, 1955);
新版改名为 *An Introduction to Metallurgy*, Arnold (1967)。

本书作者以位错理论的研究著称于世,他是深受莫特影响的新一代金属物理学家的代表人物。此人毕业于冶金系,所以对金属学的基本内容是熟悉的。本书是采用近代物理观点来重新整理金属学相当成功的一次尝试。作者擅长以深入浅出的笔调来阐述物理问题,有些相当复杂的问题,经他一解释就显得好懂。这一特点也反映在他的另外几本著作(如“晶体的位错与范性流变”、“物质的力学性质”、“晶体位错的理论”)之中。本书是一本深受金属

学界欢迎的教科书。但由于原来是为冶金系开课用的,书中前几章扼要地介绍了有关量子力学、统计物理学和热力学乃至固体物理学的基本知识。由于起脚点过低,使本书中有关物理金属学本身的篇幅太简短,有些问题就很难讲得透彻。

(6) G. Masing, *Lehrbuch der Allgemeinen Metallkunde*, Springer (1955).

作者继承了有名的金属学家塔曼(G. Tammann)的衣钵,领导哥庭根大学金属学教学、科研工作多年。他自己的研究工作侧重相图和结晶等方面的问题。本书反映了哥庭根学派的优良传统,强调了物理化学方法的重要性,倾向于表述具有普遍性的规律,也认识到深入微观领域的重要性。视界宽广,论述均衡严谨,是从传统的金属学中演变出来的一本优秀的物理金属学著作。书中有关位错等章节乃出自吕克(K. Lücke)之手。遗憾的是,本书未译成汉语或英语,使其流传受到限制;更令人惋惜的是,本书的修订版始终没有问世。

(7) U. Dehlinger, *Theoretische Metallkunde*, Springer (1955).

作者也是一位金属物理学界的元老。本书也是一本个人见解甚强的著作。论述很不均衡。对于作者本人参予的一些工作,如马氏体相变成核的位错模型,叙述特详。

(8) Я. С. Уманский и др. *Физические основы металловедения*, Металлургиздат (1955)。中译本:金属学物理基础,中科院金属研究所译,科学出版社(1958)。

这是一本苏联出版的物理金属学的教科书,国内曾广为流传。由于它是由许多作者协同起来合写的一本书,因而缺乏鲜明的特色,书中引证苏联学者的工作较多。

(9) B. Chalmers, *Physical Metallurgy*, Wiley (1959).

作者以对凝固问题的基础研究著称于世。本书也是采用现代的观点来整理金属学较早的尝试之一,提纲挈领,条理明晰,但是只停留于定性的描述,缺乏定量的论证,就不易使读者透彻掌握。

(10) Б. Я. Пинес, *Очерки по металлофизике*, ИХГУ (1961).

这是哈科夫大学皮涅斯教授的著作,面比较窄,但很有特色,反映了他所领导的学派的工作。有些内容,如根据自由能曲线对多元合金相图的讨论,相界内吸附的理论等,是其他书中所罕见的。

(11) R. E. Smallman, *Modern Physical Metallurgy* Butterworths (1962); 3rd ed., (1970).

这又是一本用新的观点来对冶金系学生讲授物理金属学的教科书。1956年至1961年是应用透射电镜研究金属薄膜的高潮,使位错理论得到确证,也使物理金属学的面目一新。作者参与这方面的工作,本书也及时反映了薄膜透射电镜技术对金属学的冲击。本书各部分内容深浅不很均衡。例如本书初版中关于加工硬化问题就过于细致深入,甚至包含当时尚未发表的割阶硬化理论的一些细节。

(12) J. N. Christian, *The Theory of Transformations in Metals and Alloys*, Pergamon Press (1965); 2nd. ed., Part 1, (1975).

作者以相变研究著称于世。这本书虽以相变理论命名,但实际内容却要广泛得多,是一部当之无愧的物理金属学的高级教科书(这也是本书的副标题)。这是一本精心撰述的巨著(篇幅近千页)。作者融汇贯通了众多的素材,组织在一个整体之中。从字里行间可以体会到作者的气魄和功夫。本书基本上是自足的,无需查阅其他参考文献就可将书中的主要内容读懂。令人诧异而且高兴的是,不仅作者专攻的领域(如合金中的固态相变)写得很精采;其他如固溶体理论、位错理论、晶界理论、晶体生长理论等方面的问题也讲得很透彻,富有启发性,耐得住认真的阅读。有些内容(如点阵均匀形变的几何学、表面形貌、界面位错等)是理解许多金属学基本过程的关键问题,其他的书,往往语焉不详,一带而过;只有本书才提供较详尽的论述,使读者有门径可循。

(13) R. W. Cahn (ed.) *Physical Metallurgy*, North Holland (1965); 2nd. ed., 1970; R. W. Cahn and P. Haasen, (eds.) 3rd. ed. (1983); 中译本,北京钢铁学院金属物理教研室,物理金属学(上、中、下),科学出版社(1984, 1985)。

主编约请了几十位专家对物理金属学的各个领域,进行了全面的评述,汇编起来作为一本高级教科书。这类由众多作者分章撰述的书的共同毛病是水平高低不一,深浅参差不齐,难免有脱节重复之处。本书在编辑协调上花了工夫,撰稿人也经过精选,结果比较令人满意。从内容上来看,覆盖得相当全,大部分章节具有可读性。这是一本篇幅浩瀚,内容充实的参考书。新版进一步增加了篇幅,刷新了内容。

(14) A. Seeger (ed.), *Moderne Probleme der Metallphysik*, Vol. 1, 2, Springer (1965)。

此书是为德林格祝寿的文集,总结了以塞格为首的斯图加特(Stuttgart)学派的工作。上册包括缺陷、范性、辐照损伤和电子理论,下册论述了有关铁

磁性的一些具有结构敏感性的问题。缺陷与范性部分和塞格为“物理大全”所写的专论相比,虽然材料稍新,却不那么精练;倒是有关铁磁性的章节,有一些其他书未讲到的内容。

(15) J. M. Ziman and P. B. Hirsch (eds.), *The Physics of Metals*, Cambridge University Press. vol. 1 Electrons (1971); vol. 2, Defects (1975).

此书是莫特六十寿辰的纪念文集,由他的学生和同事分别就本人专长的领域撰写评述性论文,分为电子和缺陷两卷。这也正是莫特自己做工作、并大力倡导的两个领域,从中可以窥见莫特对金属物理学影响的深远。第一卷显得不很整齐;第二卷协调得较好,可读性更强一些。

(16) P. Haasen, *Physikalische Metallkunde*, Springer (1974); 2nd. ed., (1984)

英译本, *Physical Metallurgy*, Cambridge University Press (1978); 中译本, *物理金属学*, 肖纪美等译, 科学出版社 (1984)。

这是一部为物理系大学生所写的教科书,由于假定读者已经学过理论物理和固体物理,虽则篇幅上和科特雷耳的“理论结构金属学”相近,内容就深透一些。本书取材精练,论述恰当,很得要领,是一本入门的好书。虽则哈森继承了玛辛在哥庭根的教席,但转入了物理系。因而本书在风格上并未继承玛辛的传统,倒是更接近于科特雷耳的书,新版更动不大。

目 录

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

冯 端

引言.....	4
---------	---

第一章 金属的结构.....	5
----------------	---

§1.1 刚球密堆积与几种典型的金属结构.....	5
---------------------------	---

§1.2 元素的晶体结构.....	11
-------------------	----

§1.3 金属的原子半径.....	14
-------------------	----

§1.4 元素的原子结构.....	17
-------------------	----

§1.5 金属键与结合能.....	21
-------------------	----

§1.6 液态金属与非晶态金属的结构.....	24
-------------------------	----

第二章 金属结构的理论.....	31
------------------	----

I 基于经验规律或半经验规律的金属理论.....	31
--------------------------	----

§2.1 经验的原子相互作用势.....	31
----------------------	----

§2.2 金属的化学键理论.....	35
--------------------	----

II 金属电子论.....	44
---------------	----

§2.3 自由电子模型.....	45
------------------	----

§2.4 电子-电子相互作用.....	48
---------------------	----

§2.5 周期势场中的电子.....	50
--------------------	----

§2.6 赝势理论与简单金属的结构.....	55
------------------------	----

§2.7 过渡金属的电子结构.....	65
---------------------	----

§2.8 稀土金属及铜系金属的电子结构.....	72
--------------------------	----

第一编 参考文献.....	76
---------------	----

第二编 合金的结构及其理论

冯 端

引言.....	78
---------	----

第三章 合金的热力学	80
I 定性理论	80
§ 3.1 相平衡的热力学判据	80
§ 3.2 合金的平衡相	81
§ 3.3 从自由能曲线推导相图	84
§ 3.4 相图的几何规律	87
II 定量理论	90
§ 3.5 均匀相的热力学函数	90
§ 3.6 理想溶体与非理想溶体	92
§ 3.7 合金热力学数据的讨论	94
§ 3.8 相图的计算	99
第四章 合金的结构	107
I 固溶体	107
§ 4.1 固溶体的基本类型	107
§ 4.2 形成替代式固溶体的一些经验规律	109
§ 4.3 固溶体的物理性能	114
§ 4.4 填隙式固溶体的晶体结构	118
§ 4.5 固溶体的微观不均匀性	120
§ 4.6 有序固溶体	122
II 金属化合物	128
§ 4.7 电子化合物	128
§ 4.8 拓扑密集结构的金属化合物	133
§ 4.9 填隙化合物	141
§ 4.10 金属化合物的物理性能	143
III 非周期结构的固相合金	145
§ 4.11 非晶态合金	145
§ 4.12 准晶态合金	152
第五章 微观的合金理论	155
I 统计理论	155
§ 5.1 固溶体的统计理论模型	155
§ 5.2 准化学近似与固溶体中的原子分布	157
§ 5.3 二元合金的溶解限曲线理论	159

§ 5.4 有序-无序转变的理论	163
II 弹性理论	172
§ 5.5 错配球模型	172
§ 5.6 错配球模型的应用	177
§ 5.7 弹性偶极子模型	181
§ 5.8 弹性偶极子模型的应用	185
III 电子理论	191
§ 5.9 稀固溶体的电子屏蔽模型	192
§ 5.10 刚能带模型及其他	200
第二编 参考文献	207

第三编 晶体的缺陷

冯 端

引言	211
第六章 点缺陷	215
I 点缺陷的基本性质	215
§ 6.1 几何组态	215
§ 6.2 点缺陷的形成能	217
§ 6.3 热平衡态的点缺陷	220
§ 6.4 点缺陷对物理性能的影响	223
§ 6.5 点缺陷的移动	224
II 辐照效应	226
§ 6.6 辐照效应的一般介绍	226
§ 6.7 辐照对金属性能的影响	227
§ 6.8 高能粒子与点阵原子的碰撞	229
§ 6.9 原子碰撞的级联过程	232
§ 6.10 实验结果与理论计算值的比较	238
§ 6.11 辐照后缺陷的回复	241
附录 6-I. 经典的碰撞理论	243
第七章 位错	248
I 位错的几何性质	248
§ 7.1 刃型位错与螺型位错	248

§ 7.2	位错的滑移与攀移	251
§ 7.3	位错的普遍定义与伯格斯矢量	257
§ 7.4	位错的一般运动学特征	262
§ 7.5	位错与晶体的范性形变	263
II	位错的应力场与芯结构	266
§ 7.6	位错的连续介质模型	266
§ 7.7	直刃型位错的应力场	267
§ 7.8	直螺型位错的应力场	270
§ 7.9	直位错的能量	272
§ 7.10	位错与表面的弹性相互作用	274
§ 7.11	任意形状位错圈的应力场	277
§ 7.12	位错的线张力	281
§ 7.13	各向异性的介质和非线性弹性效应	284
§ 7.14	位错的点阵模型	289
III	位错与晶体缺陷的相互作用	295
§ 7.15	应力场对位错的作用力	295
§ 7.16	平行位错间的弹性相互作用力	297
§ 7.17	位错的塞积群	299
§ 7.18	位错的交割	302
§ 7.19	位错与溶质原子的弹性相互作用	305
§ 7.20	过饱和点缺陷对位错的作用力	308
IV	位错的萌生、增殖与运动	310
§ 7.21	位错的萌生	310
§ 7.22	位错的增殖	313
§ 7.23	运动位错的弹性场	318
§ 7.24	位错的弦线模型	321
§ 7.25	滑移动力学的实验观测	327
§ 7.26	攀移动力学	328
V	典型晶体结构中的位错组态	329
§ 7.27	典型晶体结构中的全位错	330
§ 7.28	堆垛层错	331
§ 7.29	面心立方晶体中的不全位错	334
§ 7.30	扩展位错	336

§ 7.31	面心立方晶体中的一些位错反应	339
§ 7.32	面心立方晶体中空位凝聚成位错的过程	343
§ 7.33	其他结构中的堆垛层错与不全位错	346
§ 7.34	合金中的位错组态	349
附录 7-I	弹性力学的基础知识	351
7-II	刃型位错应力场的计算	358
7-III	弹性介质对点力作用的响应	363
7-IV	扩展位错平衡宽度的计算	364
7-V	若干求和问题	365
第三编	参考文献	371

第四编 表面与界面

冯 端

引言	375
第八章 表面	376
§ 8.1 表面能	376
§ 8.2 晶体表面的微观形貌	380
§ 8.3 表面吸附与偏析	385
§ 8.4 表面的统计理论	392
§ 8.5 表面的电子理论	397
§ 8.6 技术材料的表面	406
§ 8.7 超微粒	408
第九章 界面	416
I 晶界	416
§ 9.1 多晶体中晶粒的形态	416
§ 9.2 晶界的位错模型	419
§ 9.3 晶界位错模型的实验证明	426
§ 9.4 孪晶界	432
§ 9.5 晶界结构的一般理论	435
§ 9.6 大角度晶界结构的实验观测	441
§ 9.7 晶界能	443
§ 9.8 晶界偏析	445