



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

引 进 系 列 · 1 7

固体缺陷

Defects in Solids

[英] 理查德·J. D. 蒂利 著
(Richard J. D. Tilley)
刘培生 田民波 朱永法 译
田民波 校



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中 外 物 理 学 精 品 书 系

引 进 系 列 · 17

固体缺陷

Defects in Solids

〔英〕 理查德·J. D. 蒂利 著
(Richard J. D. Tilley)
刘培生 田民波 朱永法 译
田民波 校



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

著作权合同登记号:图字 01-2011-1983 号

图书在版编目(CIP)数据

固体缺陷/(英)蒂利(Tilley, R. J. D.)著;刘培生等译. —北京:北京大学出版社, 2013. 6

(中外物理学精品书系·引进系列)

ISBN 978-7-301-22659-9

I. ①固… II. ①蒂… ②刘… III. ①固体-缺陷-高等学校-教材 IV. ①O483

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 129305 号

Copyright © 2008 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Published simultaneously in Canada.

This translation published under license.

To Professor F. S. Stone

Who engendered a unique research group spirit and my contemporaries in the University of Bristol, who augmented it.

书 名: 固体缺陷(Defects in Solids)

著作责任者: [英] Richard J. D. Tilley 著

刘培生 田民波 朱永法 译 田民波 校

责任编辑: 郑月娥

标准书号: ISBN 978-7-301-22659-9/O · 0926

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn>

新浪微博: @北京大学出版社

电子信箱: zpup@pup.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62767347 出版部 62754962

印刷者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

730 毫米×980 毫米 16 开本 32 印张 600 千字

2013 年 6 月第 1 版 2013 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 89.00 元



未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

序 言

物理学是研究物质、能量以及它们之间相互作用的科学。她不仅是化学、生命、材料、信息、能源和环境等相关学科的基础,同时还是许多新兴学科和交叉学科的前沿。在科技发展日新月异和国际竞争日趋激烈的今天,物理学不仅囿于基础科学和技术应用研究的范畴,而且在社会发展与人类进步的历史进程中发挥着越来越关键的作用。

我们欣喜地看到,改革开放三十多年来,随着中国政治、经济、教育、文化等领域各项事业的持续稳定发展,我国物理学取得了跨越式的进步,做出了很多为世界瞩目的研究成果。今日的中国物理正在经历一个历史上少有的黄金时代。

在我国物理学科快速发展的背景下,近年来物理学相关书籍也呈现百花齐放的良好态势,在知识传承、学术交流、人才培养等方面发挥着无可替代的作用。从另一方面看,尽管国内各出版社相继推出了一些质量很高的物理教材和图书,但系统总结物理学各门类知识和发展,深入浅出地介绍其与现代科学技术之间的渊源,并针对不同层次的读者提供有价值的教材和研究参考,仍是我国科学传播与出版界面临的一个极富挑战性的课题。

为有力推动我国物理学研究、加快相关学科的建设与发展,特别是展现近年来中国物理学者的研究水平和成果,北京大学出版社在国家出版基金的支持下推出了“中外物理学精品书系”,试图对以上难题进行大胆的尝试和探索。该书系编委会集结了数十位来自内地和香港顶尖高校及科研院所的知名专家学者。他们都是目前该领域十分活跃的专家,确保了整套丛书的权威性和前瞻性。

这套书系内容丰富,涵盖面广,可读性强,其中既有对我国传统物理学发展的梳理和总结,也有对正在蓬勃发展的物理学前沿的全面展示;既引进和介绍了世界物理学研究的发展动态,也面向国际主流领域传播中国物理的优秀专著。可以说,“中外物理学精品书系”力图完整呈现近现代世界和中国物理

科学发展的全貌,是一部目前国内为数不多的兼具学术价值和阅读乐趣的经典物理丛书。

“中外物理学精品书系”另一个突出特点是,在把西方物理的精华要义“请进来”的同时,也将我国近现代物理的优秀成果“送出去”。物理学科在世界范围内的重要性不言而喻,引进和翻译世界物理的经典著作和前沿动态,可以满足当前国内物理教学和科研工作的迫切需求。另一方面,改革开放几十年来,我国的物理学研究取得了长足发展,一大批具有较高学术价值的著作相继问世。这套丛书首次将一些中国物理学者的优秀论著以英文版的形式直接推向国际相关研究的主流领域,使世界对中国物理学的过去和现状有更多的深入了解,不仅充分展示出中国物理学研究 and 积累的“硬实力”,也向世界主动传播我国科技文化领域不断创新的“软实力”,对全面提升中国科学、教育和文化领域的国际形象起到重要的促进作用。

值得一提的是,“中外物理学精品书系”还对中国近现代物理学科的经典著作进行了全面收录。20世纪以来,中国物理界诞生了很多经典作品,但当时大都分散出版,如今很多代表性的作品已经淹没在浩瀚的图书海洋中,读者们对这些论著也都是“只闻其声,未见其真”。该书系的编者们在这方面下了很大工夫,对中国物理学科不同时期、不同分支的经典著作进行了系统的整理和收录。这项工作具有非常重要的学术意义和社会价值,不仅可以很好地保护和传承我国物理学的经典文献,充分发挥其应有的传世育人的作用,更能使广大物理学人和青年学子切身体会我国物理学研究的发展脉络和优良传统,真正领悟到老一辈科学家严谨求实、追求卓越、博大精深的治学之美。

温家宝总理在2006年中国科学技术大会上指出,“加强基础研究是提升国家创新能力、积累智力资本的重要途径,是我国跻身世界科技强国的必要条件”。中国的发展在于创新,而基础研究正是一切创新的根本和源泉。我相信,这套“中外物理学精品书系”的出版,不仅可以使所有热爱和研究物理学的人们从中获取思维的启迪、智力的挑战和阅读的乐趣,也将进一步推动其他相关基础科学更好更快地发展,为我国今后的科技创新和社会进步做出应有的贡献。

“中外物理学精品书系”编委会 主任
中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

内 容 提 要

缺陷对于材料的物理性能和化学性能均具有重要的作用。事实上,通过对缺陷的调控和利用,推动了基于硅材料的现代计算机工业、固态激光、电池科学、固体氧化物燃料电池、储氢以及显示技术等诸多方面的发展。本书共9章,系统地阐述了固体中的缺陷、缺陷的形成和缺陷对材料物理性能的影响方式,以帮助各领域的科学家在研制新材料或改进材料的过程中对缺陷进行有效的控制和利用。本书内容主要包括:(1)缺陷物理和缺陷化学的基本概念;(2)理论原理与实际应用的联系;(3)缺陷在固体电池、快离子导体、燃料电池、传感器以及铜氧超导体中的关键应用;(4)点缺陷化学、线缺陷和面缺陷、非化学计量和晶体结构、固体扩散、离子传导、本征电子传导和非本征电子传导,以及磁性缺陷和光学缺陷。此外,每章都在其开篇处就提出引导性的特定问题以提醒读者关注,并在章末附加了讨论题和练习题等。

本书重点反映了近年来具有代表性的振奋人心的前沿研究成果,这对于材料工程、半导体、信息存储和传输、液晶显示(LCD)技术以及相关领域的学术研究和工业研究都是巨大的鼓舞。同时,本书也是适用于材料科学与工程、固体物理、固体化学和无机化学等专业高年级本科生和研究生的高水准教材。

译者序

固体的许多性质都是由其组成和其内部原子间的结合方式所决定的,而固体中的缺陷往往对固体物质的电性能、热性能、光学性能等许多物理性质起着关键的作用,并对强度、刚度等力学指标产生重要的影响。可见,物质的性能与其内部结构具有重大的直接联系。实际固体物质内部都会不可避免地存在着偏离理想结构的缺陷,因此材料的性质与其缺陷密切相关。所以,对存在于固体中的缺陷进行研究,具有重要的理论价值和实际意义。

固体缺陷知识属于固体科学的基本组成部分,是材料科学和凝聚态物理等学科的基础内容。本书不但全面而系统地阐述了固体缺陷的基本概念、基本原理及相关的缺陷基础知识,同时总结了近 20 年来对固体缺陷的研究成果。通过本书的阅读,读者可以全面和系统地认识和理解固体中的缺陷。

本书的翻译由刘培生教授统筹,全书由田民波教授统校。具体分工如下:内容提要、序言、第 1 章至第 3 章、补充材料等部分由刘培生教授翻译,第 4 章至第 6 章由田民波教授翻译,第 7 章至第 9 章由朱永法教授翻译。目录、问题和练习答案以及索引由 3 人共同完成。译稿全部完成后,荆西平教授进行了精心的通篇审阅,提出了许多中肯的宝贵意见和建议,在此表示衷心的感谢。

本书的读者对象可以是广大涉及固体科学的科研工作者和工程技术人员,也可以是高等院校相关专业(如物理、化学、地质、材料、机械、冶金、建筑等专业)的师生。本书内容安排得当,深度适中,每章都配有适量的问题和练习,非常适合于用作上述各专业以及相关学科的专业课教材。

由于译者知识面和学术水平的限制,本书译文中难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

译者

Liu996@263.net

2012 年 10 月

作 者 序

在 20 世纪人们就已经认识到,固体的许多性能受其化学组成以及晶体中连接组分原子的化学键所制约,但制约程度并不是那么大,性能更多地受控于结构中的缺陷。随着时间的推移,这个问题变得越来越重要。确确实实,固体物理和固体化学的方方面面都受到了来自研究对象材料中所出现的缺陷的重大影响。整个基于硅材料的现代计算机工业,其创建的基础是高纯晶体中的精密掺杂技术。固态激光利用了杂质原子的活性。电池科学、固体氧化物燃料电池、储氢材料和显示技术等,都需要依赖于基体材料的缺陷知识。

随着对缺陷改进固体性能的方式的逐步认识,缺陷的概念也经历了一个重大的发展过程。最早的或许也是最简单的固体缺陷概念就是处于晶体中正常原子位置的错置原子或说杂质,即所谓的点缺陷。认识点缺陷后不久,又提出了线缺陷、位错等概念来解释金属和晶体生长中所出现的一系列物质特性变化,包括力学性能等。近年来,缺陷之间的交互作用或缺陷反应、缺陷聚集或缺陷簇等已显然成为十分重要的概念。

对缺陷理解的提升与尖端实验技术的大力发展密不可分。最初的突破是在 X 射线衍射分析方面实现的,这一技术至今仍为大多数研究工作提供基础支持。透射电子显微镜(TEM)带来了进一步的改观,通过该技术第一次获得了分辨率在原子尺度的缺陷图像。其后,计算技术的进展,与强大的绘图功能结合在一起,为研究材料缺陷结构迎来了全新的景象。

除了各种各样的缺陷之外,还有许多存在这些缺陷的固相组织。合金、金属硫化物、结晶氟化物、硅酸盐玻璃或非晶态聚合物之间的差别是巨大的。此外,晶体生长和纳米粒子制备技术的发展已经改变了早期研究的观念,这些早期的观念一般基于多晶固体,有时是杂质含量不确定的多晶固体。

所有这些变化都意味着过去 20 年来对固体缺陷认识的变化。本书的目的就是总体描述这种发展状况。然而,这一主题涵盖了众多的学科领域,因此必然要进行内容的选择。另外,关于固体缺陷的课程,无论是对于物理、化学、地质、材料科学、工程学等专业的本科生还是研究生,通常都是限制在整个学习计划中一个相对较小的部分。本书内容的选择则不但覆盖了固体缺陷的基础知识,同时还包含了

近年来研究前沿的诸多方面。遗憾的是,关于缺陷影响力学性能的内容基本没有写进本书,表面和表面缺陷的重要内容也只是一笔带过。同样地,本书也绕开了纳米科学方面的研究内容。这是因为相关文献正在飞速增长,没有足够的时间来筛选这些海量的信息。虽然略去这些内容是一件可惜的事情,但这些内容有望撰写成本系列的新作。最后必须提及的是,本书的重点主要是基本原理,而对重要的实验研究很少触笔。这是一个遗憾,但由于时间和篇幅的限制,这又是不得已的。希望将来出版的新作可以弥补这一不足。

本书的前4章系统地介绍有关的基本概念,以此建立起理解缺陷物理和缺陷化学的知识构架。后面的章节则更多地着笔于与应用有关的性能。其中第5章描述固体中的扩散;第6章介绍离子电导;第7章和第8章阐述电子电导这一重要主题,包括本征电导(第7章)和非本征电导(第8章)两部分。最后一章(第9章)则选择性地描写了磁性缺陷和光学缺陷。

为了帮助读者理解,每章都以3个“引导性的问题”开篇,以此来提醒读者关注下面正文中将要出现的重点。这些问题的答案列于章末。另外,每章结尾提出的问题则有助于对前述内容的理解。这些问题中的第一组为多项选择题——组成一个“快速测验”,以此来测试在术语和原理方面的知识。接下来是一些更为传统的“问题和练习”,以此培养读者的专业技巧并加深读者对相关知识的理解。此外,本书还加进了补充材料,这些辅助内容涵盖了结晶学和能带理论等相关主题的基本知识,这样起码可以让读者在需要这些知识信息时无须再阅读其他书籍。

每章都包含一个“扩展阅读”的简短列表,可以拓展本章所介绍的内容,或者展示不同于本章内容的知识面。这些“扩展阅读”大多是书籍或原始性科学文献,而列出的网络资源仅占少数。虽然互联网提供了一个容量巨大的数据库,但它有两个缺点:一是容易使人陷于细节上的困惑(常常是一个简单的搜索就会出现数量巨大或更多的相关记录),二是查获的信息许多都具有暂时性。我们并未罗列大量的网站地址,而是鼓励读者利用搜索引擎以及像“磁性缺陷(magnetic defects)”那样的关键词,以开拓在本书所涉主题方面的其他的视野。

在本书的编写过程中,作者得到了家人、朋友和同事们的巨大帮助。首先是 R. B. King 教授提议了这一写作计划。E. E. M. Tyler 博士、G. J. Tilley 博士和 R. D. Tilley 博士则对本书的内容和范围提出了建议。F. S. Stone 教授给予了鼓励并阅读了本书的初稿,提出了非常宝贵的建议和评述,这些建议和评述的采纳使得本书的阐述更加明晰和得体。A. Coughlin 先生一直都在鼓励作者,并在遇到像多项式或随机行走等主题的不好理解的数学讨论时给予了帮助,而且在结果验证方面提供了宝贵的帮助。Cardiff 大学 Trevithick 图书馆的工作人员一直都在帮助着作者,持续地为作者查找不易确定的参考文献。Wiley 的编辑们也经常提出建议,

提供帮助和鼓励。牛津大学的 John Hutchison 博士为本书提供了高质量的显微照片,对此作者十分感激。最后,作者还应该感谢自己的妻子 Anne,她承受了作者的忽视,并一如既往地鼓励着作者,这使得本书得以最终完成。

作者乐意收到读者对本书的评述和询问,这些内容可以发送到 tilleyrj@cardiff.ac.uk 或 rjdtilley@yahoo.co.uk。

R. J. D. Tilley

目 录

第 1 章 点缺陷	1
1.1 引言	1
1.2 晶体中的点缺陷和电子缺陷	3
1.3 电子特性：以掺杂的硅和掺杂的锗为例	6
1.4 光学性能：以 F 心和红宝石为例	8
1.5 体相性能	11
1.5.1 晶胞尺度	11
1.5.2 密度	12
1.5.3 体积	14
1.5.4 杨氏模量(弹性模量)	15
1.6 热电性能：以 Seebeck(塞贝克)系数为例	16
1.7 点缺陷标记	18
1.8 缺陷所带电荷	19
1.8.1 电子和电子空穴	19
1.8.2 原子缺陷和离子缺陷	19
1.9 点缺陷的平衡：Schottky(肖特基)缺陷和 Frenkel (弗仑克尔)缺陷	22
1.9.1 Schottky 缺陷	22
1.9.2 Frenkel 缺陷	24
1.10 反占位缺陷(错置缺陷)	25
1.11 缺陷形成和反应方程	27
1.11.1 原子的增加和减少	27
1.11.2 方程形式	28
1.11.3 反占位缺陷的形成	29
1.11.4 氧化镍	29
1.11.5 氧化镉	30
1.11.6 氧化钙稳定的氧化锆	31
1.11.7 三元氧化物	32

1.12 纯物质中点缺陷的结合	33
1.13 点缺陷分布的结构状况	34
1.14 引言问题的解答	35
问题和练习	36
参考文献	38
扩展阅读	39
第2章 化学计量化合物中的本征点缺陷	40
2.1 单原子晶体中的空位平衡	40
2.2 单原子晶体中的自间隙原子平衡	44
2.3 晶体中的 Schottky 缺陷平衡	45
2.4 LiI 电池	47
2.5 晶体中的 Frenkel 缺陷平衡	49
2.6 感光膜(照相底片)	51
2.7 光色玻璃(光致变色玻璃)	54
2.8 晶体中的反占位缺陷平衡	55
2.9 本征缺陷: 研究趋势和进一步的考虑	56
2.10 缺陷能的计算	57
2.10.1 缺陷计算	57
2.10.2 点缺陷的相互作用	59
2.10.3 原子模拟	60
2.10.4 壳模型	63
2.10.5 缺陷形成能	65
2.10.6 量子力学计算	66
2.11 引言问题的解答	67
问题和练习	68
参考文献	70
扩展阅读	71
第3章 扩展缺陷	73
3.1 位错	73
3.2 刃型位错	75
3.3 螺型位错	80
3.4 混合位错	83
3.5 单元位错和不全位错(分位错)	84
3.6 位错增殖	87

3.7 位错与点缺陷的交互作用	89
3.7.1 位错环	89
3.7.2 位错攀移	91
3.7.3 位错的缀饰	91
3.8 非金属晶体中的位错	93
3.9 内界面	96
3.10 小角晶界	98
3.11 孪晶界	99
3.12 反相畴界	103
3.13 畴和铁性体材料	105
3.13.1 磁结构	105
3.13.2 铁电结构	106
3.13.3 铁性体结构	107
3.14 外表面和晶界(晶粒边界,晶粒间界)	108
3.14.1 多晶体的光学特性	110
3.14.2 界面电子特性	111
3.14.3 压敏电阻	113
3.14.4 正温度系数热敏电阻	114
3.15 体缺陷和析出相(沉淀相)	116
3.16 引言问题的解答	118
问题和练习	119
扩展阅读	121
第4章 成分变化对结构的各种影响	123
4.1 成分变化以及非化学计量	123
4.1.1 相图和固体共存	123
4.1.2 非化学计量化合物	124
4.1.3 相图和组成	125
4.2 置换式固溶体	127
4.3 点缺陷和偏离化学计量	130
4.3.1 置换式点缺陷:砷化镓(GaAs)	131
4.3.2 空位:氧化钴(CoO)	132
4.3.3 间隙(原)子:La ₂ CuO ₄ 和Sr ₂ CuO ₂ F ₂	132
4.3.4 间隙式杂质:合金和氢化物	134
4.3.5 缺陷变化:氧化锌(ZnO)	134

4.3.6 有缺陷的尖晶石(M_2O_3)	135
4.4 缺陷团簇	135
4.4.1 点缺陷聚集	135
4.4.2 氧化亚铁,浮氏体(Wüstite)	136
4.4.3 超化学计量的二氧化铈	138
4.4.4 负离子过剩的萤石型结构	140
4.4.5 负离子缺位的萤石型结构	144
4.5 缺陷嵌入	147
4.6 插层	149
4.7 线缺陷	152
4.8 模块结构	153
4.8.1 晶体学切变相	155
4.8.2 孪生和组成变化	160
4.8.3 化学孪生	161
4.8.4 钙钛矿相关的结构	163
4.8.5 失配层化合物	168
4.8.6 五氧化二铌块体结构	170
4.9 排序和吸收	172
4.10 调制结构	174
4.10.1 结构调制	174
4.10.2 钇的氟氧化物及相关结构	175
4.10.3 U_3O_8 相关结构	176
4.10.4 Sr_xTiS_3 及相关结构	178
4.11 引言问题的解答	179
问题和练习	180
扩展阅读	183
第5章 缺陷和扩散	186
5.1 扩散	186
5.2 固体中的扩散	188
5.3 晶体中的随机行走扩散	193
5.4 扩散机制	194
5.4.1 空位扩散	194
5.4.2 间隙扩散	196
5.4.3 间隙子扩散	198

5.4.4 杂质和团簇扩散机制	200
5.4.5 扩散路径	201
5.5 点缺陷浓度和扩散	205
5.6 相关因子	206
5.7 扩散系数随温度的变化	210
5.8 温度变化和本征扩散	214
5.9 扩散机制和杂质	217
5.10 化学的和双极性的扩散	218
5.11 位错和晶界扩散	220
5.12 在非晶态和玻璃固体中的扩散	221
5.13 引言问题的解答	222
问题和练习	223
扩展阅读	226
第 6 章 绝缘体中的本征和非本征缺陷：离子电导	228
6.1 离子电导	228
6.1.1 固体中的离子电导	228
6.1.2 基础概念	229
6.2 离子电导的机制	231
6.2.1 随机行走模型	231
6.2.2 离子电导率与扩散系数间的关系	235
6.2.3 离子电导率和缺陷	236
6.3 阻抗测量	237
6.4 电化学电池和电池	239
6.5 无序的正离子化合物	241
6.6 β -氧化铝型氧化物	243
6.6.1 β -氧化铝相关相的理想构造	243
6.6.2 β -氧化铝中的缺陷	246
6.6.3 β' -氧化铝中的缺陷	247
6.6.4 离子导电性	247
6.6.5 使用 β'' -氧化铝的电池	248
6.7 离子导电性的提高	250
6.8 氧化钙稳定的氧化锆和与之相关的快氧离子导体	252
6.8.1 结构和萤石型结构氧化物中氧的扩散	252
6.8.2 自由能和氧化物的化学计量	253

6.8.3 氧传感器	254
6.8.4 氧气泵和库仑滴定	256
6.9 质子(H^+ 离子)导体	257
6.10 固体氧化物燃料电池	258
6.11 引言问题的解答	259
问题和练习	261
扩展阅读	264
第7章 非化学计量和本征导电性	266
7.1 氧化物中的非化学计量和电子缺陷	266
7.1.1 电子的和离子的补偿	266
7.1.2 金属过量相	266
7.1.3 氧过量相	268
7.2 电导率与缺陷	270
7.2.1 电导率和缺陷浓度	270
7.2.2 空穴,电子和价态	270
7.2.3 局域电子和极化子	271
7.2.4 缺陷和跳跃电导率	272
7.2.5 能带与跳跃式电导	273
7.2.6 Seebeck 效应和化学计量学	275
7.3 化学计量,缺陷数量和分压	276
7.3.1 平衡分压	276
7.3.2 相律	277
7.4 缺陷数随分压的变化	281
7.4.1 金属过量氧化物	281
7.4.2 氧过量氧化物	282
7.4.3 $Ba_2In_2O_5$	283
7.5 布劳沃图	285
7.5.1 初始假设	285
7.5.2 缺陷平衡	286
7.5.3 化学计量点: 离子缺陷	286
7.5.4 近化学计量: 离子缺陷	288
7.5.5 高 X_2 分压: 离子缺陷	289
7.5.6 低 X_2 分压: 离子缺陷	291
7.5.7 完全相图: 离子缺陷	292

7.6 布劳沃图: 电子缺陷	293
7.6.1 电子缺陷	293
7.6.2 近化学计量: 电子缺陷	293
7.6.3 高 X_2 分压: 电子缺陷	296
7.6.4 低 X_2 分压: 电子缺陷	297
7.6.5 完整布劳沃图: 电子缺陷	298
7.7 布劳沃图: 更复杂的例子	299
7.7.1 Cr_2O_3	299
7.7.2 $Ba_2In_2O_5$	300
7.8 布劳沃图: 温度的影响	301
7.9 布劳沃图的多项式形式	301
7.9.1 离子缺陷	302
7.9.2 电子缺陷	304
7.10 引言问题的解答	305
问题和练习	306
参考文献	309
扩展阅读	310
第 8 章 非化学计量及非本征导电性	311
8.1 杂质原子的影响	311
8.2 氧化物中的杂质	312
8.2.1 施主杂质	312
8.2.2 Cr_2O_3 的施主掺杂	312
8.2.3 受主掺杂	313
8.2.4 NiO 的受主掺杂	313
8.3 负温度系数 (NTC) 热敏电阻	314
8.4 掺杂体系的布劳沃图	317
8.4.1 构建	317
8.4.2 一般趋势: MX	320
8.5 金属和绝缘体	321
8.5.1 对 La_2CuO_4 的受主掺杂	321
8.5.2 对 Nd_2CuO_4 的施主掺杂	322
8.5.3 尖晶石体系 $Li_{1+x}Ti_{2-x}O_4$	324
8.6 铜酸盐高温超导体	325
8.6.1 钙钛矿相关结构	325