



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

中外物理学精品书系

前沿系列 · 5

# 固体物理基础

(第三版)

阎守胜 编著



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

前沿系列 · 5

# 固体物理基础

(第三版)



阎守胜 编著



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

固体物理基础(第三版)/阎守胜编著.—3版.—北京:北京大学出版社,2011.6  
(中外物理学精品书系)

ISBN 978-7-301-18863-7

I. ①固… II. ①阎… III. ①固体物理学-高等学校-教材 IV. ①048

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 081625 号

书 名: 固体物理基础(第三版)

著作责任者: 阎守胜 编著

责任编辑: 周月梅

标准书号: ISBN 978-7-301-18863-7/O·0844

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>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021 出版部 62754962

电子邮箱: [zpup@pup.pku.edu.cn](mailto:zpup@pup.pku.edu.cn)

印刷者: 北京中科印刷有限公司

经 销 者: 新华书店

787mm×960mm 16 开本 26.25 印张 497 千字

2000 年 11 月第 1 版 2003 年 8 月第 2 版

2011 年 6 月第 3 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 0001—3000 册

定 价: 58.00 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 电子邮箱:[fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

# 《中外物理学精品书系》 编委会

主任：王恩哥

副主任：夏建白

编委：（按姓氏笔画排序，标\*号者为执行编委）

王力军	王孝群	王 牧	王鼎盛	石 兢
田光善	冯世平	邢定钰	朱邦芬	朱 星
向 涛	刘 川*	许宁生	许京军	张 酣*
张富春	陈志坚*	林海青	欧阳钟灿	周月梅*
郑春开*	赵光达	聂玉昕	徐仁新*	郭 卫*
资 剑	龚旗煌	崔 田	阎守胜	谢心澄
解士杰	解思深	潘建伟		

秘书：陈小红

# 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亲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。

中国科学院院士,北京大学教授

王恩哥

2010年5月于燕园

## 内 容 简 介

本书分两部分. 第一部分为理想晶体, 采用从有关固体最简单的模型——金属自由电子气体模型出发, 逐渐加以丰富完善的体系, 系统讲述了固体晶格结构、电子能带论、晶格振动、输运现象、原子间的键合和固体中的缺陷等方面的内容. 固体物理学的新发展, 除在第一部分中有所反映外, 集中在第二部分的无序、尺寸、维度和关联四章中, 内容包括无序体系中电子的局域化, 弱局域化, 介观体系的物理, 纳米微粒, 团簇, 库仑阻塞, 半导体低维体系, 拓扑缺陷, 二维体系中的相变, 准一维导体, 密度泛函理论, 强关联初步, 高温超导电性和分数量子霍尔效应等.

本书特别注意物理图像的清晰, 并着重于固体中基本的、共性的问题. 本书可作为各类大学物理系固体物理学及现代固体物理课程的教科书或参考书, 也可供有关研究人员参考.

## 第三版前言

本书初版面世至今已有十年,第二版的发行也已七年,非常感谢北京大学出版社《中外物理学精品书系》编委会将本书列入计划,使笔者能有机会做一次认真的修改和补充.

第三版改动部分大约涉及原书 70% 的页面,少到几个字,或一个标点,多到如金属光学性质(1.5 节)和作为强关联体系的高温超导体(原 12.4 节,现 12.3 节),其中大部分内容都重写了.在章节的调整方面,除将原 12.3 节费米液体理论因同属单电子近似的理论基础而归并到 12.1 节外,其余基本不动.此外,对插图也做了部分的更换和改动,使它更贴近文字讲述的要求,更有表现力.

新版在内容方面也做了一些必要的补充.书的第一部分为理想晶体,新版增加了亦属理想晶体的准晶一节;在点缺陷的部分,添加了对色心简略的讲述;有关碳原子单层,即石墨烯的小节则加在第二部分关于维度的一章中.

2008 年北大出版社出版了作者的《现代固体物理学导论》一书,其中第一章“电子系统和晶格系统的退耦”有助于对本书第一部分章节结构的了解;本书第二部分的未尽内容则写在该书的其他章节中,可供参考,这也是新版对第二部分内容改动较少的原因.

在近一年的修改过程中,常常翻阅 Neil Ashcroft 和 David Mermin 合著的固体物理学教科书,多次读到 1988 年 7 月 Ashcroft 和他的夫人访问北京大学时,在这本书的扉页上写给我的题词: Hoping that the subject of Solid State Physics gives you as much pleasure, inspiration and challenge, as it has given me. 这些日子,确实再次感受到了他所说的愉悦,灵感和挑战,但也常因原书有些地方写得不够好,甚至有误而感到歉疚.

在本书第三版付印之际,除去家人和朋友一贯的关心和支持外,笔者还特别感谢出版社的责任编辑周月梅女士,以及顾卫宇女士和其他有关人员为本书付出的辛劳.

阎守胜

2011 年 4 月于北京大学承泽园



## 作 者 序

我从 1984~1996 年,隔年在北京大学物理系为三年级大学生讲授“固体物理学”课程,其间曾有写一本教材的想法,但是由于科研工作太忙,又觉得难于写出新意,一直未能实现.这次因教材建设需要,在多方鼓励和支持下,终于提笔,历时两年多,交出了这部书稿.

固体物理是凝聚态物理的主干,近二三十年研究工作有了很大的发展.首先,我希望这些新的进展、认识和概念能在本书中有所反映.这主要概括在本书第二部分的无序、尺寸、维度和关联四章中.同时,对于传统固体物理教科书中的章节,除去不可避免地要添加一些新的内容外,我觉得新的发展往往在某种程度上也改变了讲述的角度.以能带论为例,在理论上本书添加了作为近代能带计算基础的密度泛函理论和局域密度近似方法,实验方面添加了用以确定能量色散关系的角分辨光电子谱技术等新的内容.由于理论的进步,特别是高性能计算机的应用,目前,固体的能带计算已发展成卓有成效、十分专业化的领域.因此,除侧重于基本概念和原理外,本书更多地讲述能带计算结果的表述方法.对从事固体物理研究和应用的人,也许能看懂别人计算的结果更重要一些.

其次,固体是包含  $10^{23}$  个粒子的复杂的多体系统,种类繁多,内容丰富.学生在学习固体物理课程时,和刚刚学过的理论线索明晰的四大力学相比,常常摸不着头绪,并有乱的感觉.因此,我希望能有一个好的理论框架和体系,使学生易于吸纳新的内容,不致迷失.我在 1980~1981 年访问美国 Cornell 大学期间,曾旁听 Ashcroft 教授为研究生开设的固体物理课程,深为他从最简单的金属自由电子气体模型开始,逐渐加以丰富和完善的体系所吸引.回来后我也尝试着在教学中采用,感到学生确实易于从中了解各个模型的限度,以及在最简单的模型基础之上添加的每一因素所带来的物理后果.本书第一部分对大块理想晶体的讲述中沿用这一体系,主要想法和脉络陈述于 1.8 节对金属自由电子气体模型局限性及其改进的讨论中.其后,每章前言对这一章要讨论的问题及在这一体系中所处的地位均有概括的说明.本书第二部分章节的组织是这一体系的自然延伸,以大块理想晶体为参照,讨论有序程度、尺寸、维度的改变,以及电子之间相互作用带来的变化.

第三,我希望在讲述中有尽可能清晰的物理图像,不要让学生迷失在冗长的计算之中.学生学过理论物理基础课程后,容易欣赏从几个基本定理出发进行数学演绎的做法.实际上这并不是物理的主要部分.实际的物理更多的是和现象有关的,

理论上则要面对具体的体系和问题,抓住物理过程的主要方面,构造简化模型来处理.在这一点上,清晰的物理图像以及直觉和想象力是至关重要的.

本书取名为《固体物理基础》是希望主要讲述一些基本的、共性的问题.第一部分的内容中,相当部分在其他教科书中也有论述,本书采用的公式和符号尽可能和这些书中的一致,内容相近的段落也会写得比较简单.本书第二部分的写作是一个尝试.很多问题的深入讨论,超出了学生已有的数理基础,同时也会使篇幅过长.反过来,如不做数学推演,内容又容易等同于一般的科普读物.这里采取了一种在大体给定的篇幅下,尽可能把基本概念和物理图像讲清楚,同时也给出主要参考文献和书籍的办法,希望这些物理图像式的、半定量的说明,能加深学生对物理学的理解,也希望这些章节能对学生进一步了解固体物理的前沿发展有所帮助.教师在讲课中,也可根据当前的发展补充一些内容.有关半导体、磁性、超导电性、表面、电介质、非晶态、液晶和准晶等领域,本书仅涉及某些共性的问题,没有专门的章节讲述,这些内容可在其他书籍中找到.

我在北京大学物理系就读时,固体物理课程有幸由黄昆教授执教,得到启蒙.此后,在科研和教学中逐渐加深了理解.特别感谢物理学界的许多年长的、同辈的和年轻的同事和朋友们,以及我的一些学生们,从他们的文章、学术报告以及和他们的交往讨论中我学到很多东西.在酝酿本书的写作时,很多同事和朋友提出过很好的建议,张殿琳、韩汝珊、吴思诚和邹英华等教授还阅读了本书的部分章节,提出了重要的修改意见,这里都一并致谢.

在本书写作中,我常常想到我的父亲.抗战期间,作为热血青年,他毅然回国,投身于祖国的教育事业.记得他在广西乡下,晚上就着昏暗的油灯,一面应付我们这些在他身上爬来爬去的小孩,一面用毛笔写他的讲义;也常常想到他对教育事业和教师职业的献身和热爱,以及他的许多颇富哲理的见解.父亲在潜移默化中对我人生的指引是不可估量的.在本书完稿时,我想我是尽力了,但也深感学识的浅薄和时间的仓促.本书定有许多不妥或错误之处,诚恳希望读者提出宝贵的意见,以便再版时修正.

最后,作者感谢教育部高等教育司对本书出版的支持,感谢北京大学出版社周月梅女士和其他有关人员为本书出版所做的努力,感谢我的家人和朋友们始终的关心、支持和帮助.

阎守胜

2000年2月于北京大学承泽园

# 目 录

## 第一部分 理想晶体

<b>第一章 金属自由电子气体模型</b> .....	(3)
1.1 模型及基态性质 .....	(4)
1.1.1 单电子本征态和本征能量 .....	(5)
1.1.2 基态和基态的能量 .....	(7)
1.2 自由电子气体的热性质 .....	(9)
1.2.1 化学势随温度的变化 .....	(10)
1.2.2 电子比热 .....	(12)
1.3 泡利顺磁性 .....	(13)
1.4 电场中的自由电子 .....	(14)
1.4.1 准经典模型 .....	(14)
1.4.2 电子的动力学方程 .....	(15)
1.4.3 金属的电导率 .....	(16)
1.5 光学性质 .....	(18)
1.6 霍尔效应和磁阻 .....	(22)
1.7 金属的热导率 .....	(24)
1.8 自由电子气体模型的局限性 .....	(25)
<b>第二章 晶体的结构</b> .....	(27)
2.1 晶格 .....	(28)
2.1.1 布拉维格子 .....	(28)
2.1.2 原胞 .....	(29)
2.1.3 配位数 .....	(29)
2.1.4 几个常见的布拉维格子 .....	(30)
2.1.5 晶向、晶面和基元的坐标 .....	(31)
2.2 对称性和布拉维格子的分类 .....	(32)
2.2.1 点群 .....	(33)
2.2.2 7个晶系 .....	(36)
2.2.3 空间群和14个布拉维格子 .....	(37)

2.2.4	单胞或惯用单胞 .....	(40)
2.2.5	二维情形 .....	(41)
2.2.6	点群对称性和晶体的物理性质 .....	(42)
2.3	几种常见的晶体结构 .....	(43)
2.3.1	CsCl 结构和立方钙钛矿结构 .....	(43)
2.3.2	NaCl 和 $\text{CaF}_2$ 结构 .....	(44)
2.3.3	金刚石和闪锌矿结构 .....	(44)
2.3.4	六角密堆积结构 .....	(45)
2.3.5	实例, 正交相 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ .....	(46)
2.3.6	简单晶格和复式晶格 .....	(47)
2.4	倒格子 .....	(48)
2.4.1	概念的引入 .....	(48)
2.4.2	倒格子是倒易空间中的布拉维格子 .....	(49)
2.4.3	倒格矢与晶面 .....	(50)
2.4.4	倒格子的点群对称性 .....	(51)
2.5	晶体结构的实验确定 .....	(51)
2.5.1	X 射线衍射 .....	(52)
2.5.2	电子衍射和中子衍射 .....	(56)
2.5.3	扫描隧穿显微镜 .....	(58)
2.6	准晶 .....	(60)
<b>第三章</b>	<b>能带论</b> .....	<b>(65)</b>
3.1	布洛赫定理及能带 .....	(67)
3.1.1	布洛赫定理及证明 .....	(67)
3.1.2	波矢 $k$ 的取值与物理意义 .....	(68)
3.1.3	能带及其图示 .....	(70)
3.2	弱周期势近似 .....	(71)
3.2.1	一维情形 .....	(71)
3.2.2	能隙和布拉格反射 .....	(72)
3.2.3	复式晶格 .....	(74)
3.3	紧束缚近似 .....	(75)
3.3.1	模型及计算 .....	(75)
3.3.2	万尼尔函数 .....	(78)
3.4	能带结构的计算 .....	(79)
3.4.1	近似方法 .....	(80)

3.4.2	$\epsilon_n(\mathbf{k})$ 的对称性 .....	(82)
3.4.3	$\epsilon_n(\mathbf{k})$ 和 $n(\mathbf{r})$ 的图示 .....	(83)
3.5	费米面和态密度 .....	(86)
3.5.1	高布里渊区 .....	(87)
3.5.2	费米面的构造 .....	(87)
3.5.3	态密度 .....	(89)
<b>第四章</b>	<b>布洛赫电子的动力学及能带结构的测量</b> .....	(92)
4.1	电子运动的半经典模型 .....	(92)
4.1.1	模型的表述 .....	(93)
4.1.2	模型合理性的说明 .....	(94)
4.1.3	有效质量 .....	(95)
4.1.4	半经典模型的适用范围 .....	(97)
4.2	恒定电场、磁场作用下电子的运动 .....	(98)
4.2.1	恒定电场作用下的电子 .....	(98)
4.2.2	满带不导电 .....	(99)
4.2.3	近满带中的空穴 .....	(99)
4.2.4	导体、半导体和绝缘体的能带论解释 .....	(100)
4.2.5	恒定磁场作用下电子的准经典运动 .....	(102)
4.3	费米面的测量 .....	(104)
4.3.1	均匀磁场中的自由电子 .....	(104)
4.3.2	布洛赫电子的轨道量子化 .....	(105)
4.3.3	德哈斯-范阿尔芬效应 .....	(106)
4.3.4	回旋共振方法 .....	(108)
4.4	用光电子谱术研究能带结构 .....	(108)
4.4.1	态密度分布曲线 .....	(109)
4.4.2	角分辨光电子谱测定 $\epsilon_n(\mathbf{k})$ .....	(111)
4.5	一些金属元素的能带结构 .....	(114)
4.5.1	简单金属 .....	(114)
4.5.2	一价贵金属 .....	(115)
4.5.3	四价金属和半金属 .....	(116)
4.5.4	过渡族金属和稀土金属 .....	(116)
<b>第五章</b>	<b>晶格振动</b> .....	(120)
5.1	简谐晶体的经典运动 .....	(121)
5.1.1	简谐近似 .....	(122)

5.1.2	一维单原子链,声学支	(122)
5.1.3	一维双原子链,光学支	(124)
5.1.4	三维情形	(126)
5.2	简谐晶体的量子理论	(127)
5.2.1	简正坐标	(127)
5.2.2	声子	(129)
5.2.3	晶格比热	(130)
5.2.4	声子态密度	(134)
5.3	晶格振动谱的实验测定	(135)
5.3.1	中子的非弹性散射	(136)
5.3.2	可见光的非弹性散射	(137)
5.4	非简谐效应	(138)
5.4.1	热膨胀	(139)
5.4.2	晶格热导率	(140)
<b>第六章</b>	<b>输运现象</b>	(144)
6.1	玻尔兹曼方程	(145)
6.2	电导率	(147)
6.2.1	金属的直流电导率	(148)
6.2.2	电子和声子的相互作用	(149)
6.2.3	电阻率随温度的变化	(151)
6.2.4	剩余电阻率	(153)
6.2.5	近藤效应	(154)
6.2.6	半导体的电导率	(156)
6.3	热导率和热电势	(156)
6.3.1	热导率	(158)
6.3.2	热电势	(159)
6.4	霍尔系数和磁阻	(162)
<b>第七章</b>	<b>固体中的原子键合</b>	(166)
7.1	概述	(166)
7.1.1	化学键	(166)
7.1.2	晶体的分类	(169)
7.1.3	晶体的结合能	(170)
7.2	共价晶体	(171)

---

7.3 离子晶体 .....	(173)
7.3.1 结合能 .....	(173)
7.3.2 离子半径 .....	(176)
7.3.3 部分离子部分共价的晶体 .....	(177)
7.4 分子晶体、金属及氢键晶体 .....	(180)
7.4.1 分子晶体 .....	(180)
7.4.2 量子晶体 .....	(182)
7.4.3 金属 .....	(183)
7.4.4 氢键晶体 .....	(184)
<b>第八章 缺 陷 .....</b>	<b>(186)</b>
8.1 点缺陷 .....	(187)
8.1.1 点缺陷的种类 .....	(187)
8.1.2 扩散的规律和机制 .....	(188)
8.1.3 离子晶体的电导率 .....	(190)
8.2 局域态 .....	(192)
8.2.1 杂质能级 .....	(192)
8.2.2 非本征半导体 .....	(194)
8.2.3 色心 .....	(197)
8.2.4 局域晶格振动 .....	(197)
8.3 拓扑缺陷 .....	(198)
8.3.1 二维面自旋体系 .....	(199)
8.3.2 涡旋线和磁通线 .....	(201)
8.3.3 晶体中的位错 .....	(203)
8.4 面缺陷, 壁 .....	(206)
8.4.1 扭折, 孤子 .....	(206)
8.4.2 铁磁材料中的畴壁 .....	(207)
8.4.3 晶界 .....	(208)
8.4.4 粗糙转变 .....	(209)
<b>第二部分 无序、尺寸、维度和关联</b>	
<b>第九章 无 序 .....</b>	<b>(213)</b>
9.1 无序导致的局域 .....	(215)
9.1.1 安德森局域 .....	(215)
9.1.2 莫特迁移率边 .....	(218)

9.1.3	态密度	(219)
9.1.4	一维情形	(220)
9.1.5	最小金属电导率	(220)
9.2	局域化的标度理论	(222)
9.2.1	早期的工作	(222)
9.2.2	标度理论	(223)
9.3	弱局域化	(227)
9.3.1	相干背散射	(227)
9.3.2	弱局域化磁阻	(231)
9.3.3	电子-电子相互作用	(233)
9.4	跳跃电导	(234)
9.5	非晶态固体的比热和热导率	(238)
9.5.1	低温比热和热导率	(238)
9.5.2	两能级隧穿模型	(240)
9.5.3	更宽温度范围的行为共性	(242)
<b>第十章</b>	<b>尺 寸</b>	<b>(243)</b>
10.1	介观体系的物理	(244)
10.1.1	介观尺度	(244)
10.1.2	Landauer 类型的电导公式	(244)
10.1.3	正常金属中的 Aharonov-Bohm(AB)效应	(246)
10.1.4	普适电导涨落	(248)
10.1.5	非局域效应	(253)
10.1.6	正常金属环中的持续电流	(255)
10.2	纳米微粒	(258)
10.2.1	电子能级的分立	(259)
10.2.2	比热和磁化率	(260)
10.2.3	实验测量	(263)
10.2.4	表面效应	(264)
10.3	团簇	(265)
10.3.1	团簇的产生和探测	(265)
10.3.2	惰性气体元素团簇	(266)
10.3.3	简单金属团簇	(269)
10.3.4	$C_{60}$ 、固体 $C_{60}$ 和碳纳米管	(272)
10.4	库仑阻塞	(278)



---

10.4.1	电流偏置的单结 .....	(279)
10.4.2	单电子岛 .....	(281)
10.4.3	量子点中的库仑阻塞 .....	(283)
<b>第十一章</b>	<b>维 度</b> .....	<b>(286)</b>
11.1	半导体低维电子系统 .....	(287)
11.1.1	Si 反型层及 GaAs-AlGaAs 异质结 .....	(288)
11.1.2	弹道输运 .....	(290)
11.1.3	量子霍尔效应 .....	(293)
11.1.4	边缘通道 .....	(296)
11.2	二维体系中的相变 .....	(299)
11.2.1	二维体系实例 .....	(300)
11.2.2	维度和长程序 .....	(301)
11.2.3	KT 相变 .....	(306)
11.2.4	二维晶格的熔化 .....	(308)
11.2.5	公度相 .....	(310)
11.2.6	维度的跨接 .....	(312)
11.2.7	碳原子单层——石墨烯 .....	(312)
11.3	准一维导体 .....	(315)
11.3.1	Peierls 相变 .....	(315)
11.3.2	电荷密度波和自旋密度波 .....	(318)
11.3.3	电荷密度波材料和现象 .....	(321)
11.3.4	准一维有机导体 .....	(326)
<b>第十二章</b>	<b>关 联</b> .....	<b>(332)</b>
12.1	单电子近似的理论基础 .....	(334)
12.1.1	哈特里-福克近似 .....	(334)
12.1.2	屏蔽库仑势 .....	(338)
12.1.3	密度泛函理论和局域密度近似 .....	(340)
12.1.4	费米液体理论 .....	(344)
12.2	Hubbard 模型和强关联体系 .....	(349)
12.2.1	Hubbard 模型 .....	(350)
12.2.2	金属-绝缘体转变 .....	(353)
12.2.3	维格纳格子 .....	(354)
12.3	作为强关联体系的高温超导体 .....	(354)
12.3.1	结构和相图 .....	(355)