

Mc
Graw
Hill Education



国外名校最新教材精选

电子材料与器件原理

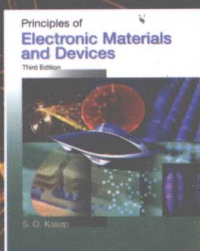
Principles of Electronic Materials and Devices

(第3版)
Third Edition

上册：理论篇

[加] 萨法·卡萨普 著
(S. O. Kasap)


汪宏 等 译



Mc
Graw
Hill



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

 国外名校最新教材精选

Principles of Electronic Materials and Devices

(Third Edition)

电子材料与器件原理

(第3版)

上册:理论篇

[加] 萨法·卡萨普 著

S. O. Kasap

*Professor of University of Saskatchewan, Canada
Canada Research Chair*

汪宏等译



西安交通大学出版社
Xi'an Jiaotong University Press

S. O. Kasap

Principles of Electronic Materials and Devices, Third Edition

ISBN: 0-07-295791-3

Copyright © 2006 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original edition published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Xi'an Jiaotong University Press.

本书中文简体字翻译版由西安交通大学出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有麦格劳-希尔(McGraw-Hill)公司防伪标签,无标签者不得销售。

陕西省版权局著作权合同登记号 25-2008-091号

图书在版编目(CIP)数据

电子材料与器件原理:第3版·上册/(加)卡萨普(Kasap, S. O.);

汪宏等译.—西安:西安交通大学出版社,2009.6

(国外名校最新教材精选)

书名原文:Principles of Electronic Materials and Devices/Third Edition

ISBN 978-7-5605-3122-9

I. 电… II. ①卡… ②汪… III. ①电子材料-高等学校-教材②电子器件-高等学校-教材 IV. TN04 TN103

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 075789 号

书 名 电子材料与器件原理(第3版)/上册:理论篇
著 者 (加)萨法·卡萨普(S. O. Kasap)
译 者 汪 宏 等
策划编辑 赵丽平 贺峰涛
责任编辑 贺峰涛
文字编辑 宗立文

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路10号 邮政编码 710049)

网 址 <http://www.xjtpress.com>

电 话 (029)82668357 82667874(发行部)
(029)82668315 82669096(总编办)

传 真 (029)82668280

印 刷 西安交通大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 **印张** 20.25 **字数** 479千字

版次印次 2009年6月第1版 2009年6月第1次印刷

印 数 0001~3000册

书 号 ISBN 978-7-5605-3122-9/TN·113

定 价 40.00元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82665380

读者信箱:banquan1809@126.com

版权所有 侵权必究

译者序

近年来,随着电子信息技术的飞速发展,电子器件正向小型化、集成化和多功能化方向发展,新型电子材料与器件的研究因而十分活跃。电子材料与器件主要包括半导体材料与器件、功能电介质材料与器件、磁性材料与器件、光电子材料与器件等,在电子信息产业中占据着主导地位,对社会、经济和国防建设发展产生着巨大的影响。

以硅材料和硅技术为代表的半导体材料与器件自1947年第一只晶体管发明以来,取得了令人瞩目的飞速进展,为计算机和网络技术的革命与进步奠定了重要基础。目前集成电路90nm和65nm工艺已趋成熟,随着高 k 栅介质材料与技术的研究开发与应用,45nm工艺时代也已来临,采用45nm高 k 金属栅极晶体管技术生产的高端处理器芯片最大集成了8.2亿个晶体管,相比65nm工艺实现了更快的晶体管切换速度、更高的内核速度、更低的功耗和更高的集成度,未来集成电路的特征尺寸预计将达到10nm的极限。功能电介质材料具有电、磁、光、热及其耦合的机电、磁电、电光等丰富多样的功能,基于功能电介质材料的电子元器件的发展极大地促进了现代信息和电子技术的进步,例如上世纪20年代中叶,Ni-Zn、Mn-Zn铁氧体的发现,引导了电感线圈器件的变革,使电话和无线电技术进入了新的阶段;"二战"期间发明的高介电BaTiO₃基陶瓷,使得电容器及相关技术产生了变革,形成了规模庞大的电子元件产业;压电陶瓷材料的发展深刻地改变了包括传感器技术、超声技术、表面波通信技术、精密定位技术等一系列工业技术;小型化的氧化物陶瓷微波元器件的出现使当今无线移动通信得以飞速增长。磁性材料与器件的发展同样深深地影响到我们的日常生活,磁记录材料仍然是当今最为广泛使用的存储器材料之一,上世纪90年代巨磁阻效应的发现和计算机硬盘上的应用使得计算机硬盘小型化和高容量成为现实;超导性的发现使得高速磁悬浮列车成为可能,科学家们研究和演示了高温超导材料在新型电力输送系统中的应用;光电子材料发展也与信息电子技术息息相关,光存储介质(如光盘)、光通信材料(如光纤)、光显示材料(如电致发光材料和液晶显示材料)、激光材料(如激光器)等已得到广泛应用,科学家正在致力于开发新型发光材料、光电转换材料和光电集成材料,从而有望使太阳能这一绿色能源利用成为能源主流、使光

子计算机等新型光子信息系统成为现实。

本书是目前市场上少有的一本比较全面介绍电子材料与器件的优秀教材,本书的内容全面广泛,第1章到第4章阐述了材料科学基础概念、固体的电导和热导、量子物理基础和现代固体理论等基础理论知识,第5章到第9章重点介绍了半导体、半导体器件、电介质材料与绝缘、磁性与超导性、材料的光学特性等几大部分内容,本书的特点在于既形象生动地介绍了电子材料与器件的原理性知识,又紧密结合现代电子材料与器件的最新发展给出了很多实际例子。全书逻辑清楚,深入浅出,重点突出,知识面广,易于阅读。作为一本专业教材它还具有以下的突出优点:(1)理论知识以强调物理概念为主,尽量减少繁琐的数学推导;(2)全书有170个例题和250个习题,每一个简单的概念都有例题以便于学生理解和学习;(3)全书有530张制作精美的插图来帮助理解和解释相关概念;(4)每一章后面的习题从易到难分级,较难的问题以星号表示出来,并有重点概念提示;(5)每一章后面都有专业术语及其解释,还有附加主题(Additional topics)给出一些重要理论和概念的深入知识以加深理解。

总之,本书是一本关于电子材料与器件的非常优秀的教材,已被国外很多著名高校用作电气与电子类专业的教材。本书的内容涉及电子科学、电气科学和材料科学等相关学科,体现了新型电子材料与器件的发展是学科交叉和融合的必然趋势。系统地学习和阅读本书可以得到创新性思维的启迪。因此,本书适于作为高等院校电子科学、电气科学和材料科学等相关学科的高年级本科生或研究生的专业课程教材,也适用于相关领域的科学家、工程师和高校师生参考。

本书由汪宏组织翻译和审核。参加本书翻译的有:汪宏、李振荣、陈晓峰、汪敏强、屈马林、冯玉军、陈贵灿、贺永宁、任巍、魏晓勇、陈烽、李少康、李可钺等。全书翻译分工如下:

- 第1章 材料科学基础概念(汪宏、李振荣译)
- 第2章 固体中的电导和热导(陈晓峰译)
- 第3章 量子物理基础(屈马林、汪敏强译)
- 第4章 现代固体理论(冯玉军译)
- 第5章 半导体(陈贵灿译)
- 第6章 半导体器件(贺永宁译)
- 第7章 电介质材料与绝缘(任巍、魏晓勇、李少康译)
- 第8章 磁性和超导性(汪宏、李可钺译)
- 第9章 材料的光学特性(陈烽译)

西安交通大学出版社的贺峰涛编辑和赵丽萍编审在组织出版和编辑工作中给予了极大的支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。感谢所有为本书出版付出辛勤劳动的人们。

因译者水平和经验有限,疏漏和错误在所难免,欢迎读者批评指正。

译者

2009年4月

于西安交通大学

前 言

关于第 3 版

这本教材适用于本科生关于电子材料与器件的基本教程。教材中附加的专题,使得这本教材也可以作为电子工程和材料科学专业研究生关于电子材料的入门教材。第 3 版在第 2 版的基础上根据读者的反馈意见进行了大量修订,增加了很多新的扩展专题、大量的新例题和习题。还有一些改动虽然很小,但是对于教材的改进却是相当重要的。例如,硅的本征浓度 n_i 被订正为 $1 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,而不是如其他教材中常见的 $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$,这个改变使得与器件有关的计算产生了显著的差别。书中增加了大量的习题,也增加了更多的例题以将概念和实际应用联系起来。在好几章中都提到的布喇格衍射定律在附录 A 中进行了解释,供不熟悉这个定律的读者学习。

第 3 版是目前市场上不多见的从更宽的范围介绍电子材料的书籍,可供相关领域的工程师和科学家参考。我相信第 3 版的修订既提高了本书的严谨性又没有损失旧版中受到学生和教师欢迎的半定量的阐述风格。一些新增和扩展的专题如下:

- 第 1 章 热膨胀;原子扩散
- 第 2 章 薄膜的电导;微电子学中的互连;电迁移
- 第 3 章 普朗克和斯特藩定律;原子磁矩;斯特恩-盖拉赫实验
- 第 4 章 碳纳米管的场发射;格林爱森热膨胀
- 第 5 章 压阻性;非晶态半导体
- 第 6 章 发光二极管;太阳能电池;半导体激光器
- 第 7 章 德拜弛豫;介质的局域场;离子极化率;朗之万偶极极化;混合介质
- 第 8 章 泡利自旋顺磁性;铁磁体的能带模型;巨磁阻(GMR);磁存储
- 第 9 章 塞尔迈耶尔和柯西色散关系;剩余射线或晶格吸收;发光和白光 LED
- 附 录 布喇格衍射定律和 X 射线衍射;光通量和辐射亮度

本书的结构和特点

在编写这本教材时,我试图将全面的内容和不同的版本保持在一个半定量阐述的水平而不陷入过深的物理理论中。许多问题只限于满足工程类的需要。一些章节中的附加专题提供了更多的处理细节,通常包括量子力学和数学的处理。尽量避免了重复的引用,使得读者可以根据自身情况跳过不同的章节。这本教材可用于一学期的相关课程并具有很大的灵活性。

一些重要的特点包括:

- 有关原理的介绍着重强调其物理思想而采用最少的数学推导;量子力学为课程的一部分但不采用难懂的数学形式。
- 有 170 多个例子和例题,大多数具有实际意义;学生通过这些例子学习,并有 250 道简单的习题。
- 即使是简单的概念也有例子帮助学习。
- 大多数学生希望通过清晰的示意图来帮助他们理解和解释概念,教材中包括了 530 幅专业制作的示意图来反映和帮助解释概念。
- 每章后的问题和习题进行了难易分级,总是以简单的概念开始过渡到复杂的概念。难题标有星号(*)。很多实际应用用示意图表示出来,只要登录本书在 McGraw-Hill 的网址,就可以得到提供给教师的在线更新的题解手册。
- 书中在每章的最后包括了索引术语解释,解释了正文及习题中遇到的一些概念和术语。
- 每章的最后包括了附加的专题,用以进一步介绍重要的概念、有趣的应用或定理证明。这些专题可以用于一门两学期的课程以及供好学的学生深化学习。
- 本书得到 McGraw-Hill 教材网页的支持,网页上包括供教师和学生参考的题解。

致谢

感谢我过去和现在的所有研究生和从事博士后研究工作的同事们,他们阅读了本书的不同章节并使我永不停顿。我很幸运有 Charbel Tannous 这样的同事和朋友,他总是给出尖锐但有益的评论,尤其是对第 8 章的内容。感谢大量的评阅人,在不同的时间阅读了手稿的不同部分并提出了广泛的评论。也感谢大量的教师写信给我告知他们的意见。我采纳了大多数的建议进行了修订,相信这将使本书更加出色。没有一本教材是十全十美的,我相信还会有更多的建议供下次修订参考。我衷心感谢这些无价的批评和建议,下列是其中的一部分建议者(依字母次序):

Çetin Aktik (University of Sherbrooke)

Emily Allen (San Jose State University)

Vasantha Amarakoon (New York State College of Ceramics at Alfred University)

David Bahr (Washington State University)

David Cahill (University of Illinois)

David Cann (Iowa State University)
Mark De Guire (Case Western Reserve University)
Joel Dubow (University of Utah)
Alwyn Eades (Lehigh University)
Stacy Gleixner (San Jose State University)
Mehmet Günes (Izmir Institute of Technology)
Robert Johanson (University of Saskatchewan)
Karen Kavanagh (Simon Fraser University)
Furrukh Khan (Ohio State University)
Michael Kozicki (Arizona State University)
Eric Kvam (Purdue University)
Hilary Lackritz (Purdue University)
Long C. Lee (San Diego State University)
Allen Meitzler (University of Michigan, Dearborn)
Peter D. Moran (Michigan Technological University)
Pierre Pecheur (University of Nancy, France)
Aaron Peled Holon (Academic Institute of Technology, Israel)
John Sanchez (University of Michigan, Ann Arbor)
Christoph Steinbruchel (Rensselaer Polytechnic Institute)
Charbel Tannous (Brest University, France)
Linda Vanasupa (California Polytechnic State University)
Steven M. Yalisove (University of Michigan, Ann Arbor)

萨法·卡萨普

<http://ElectronicMaterials.Usask.Ca>

“科学的重要之处不只在获得新的事实而更在于发现新的方法来思考这些事实。”

——威廉·劳伦斯·布喇格爵士 (Sir William Lawrence Bragg)

献给 Nicolette

采用本书作教材的教师可向 McGraw-Hill 公司北京代表处联系索取教学课件资料

传真: (010)62790292 电子邮件: instructorchina@mcgraw-hill.com

简要目录

译者序

前言

上册(理论篇)

- 第 1 章 材料科学的基本概念
- 第 2 章 固体中的电导和热导
- 第 3 章 量子物理基础
- 第 4 章 现代固体理论

下册(应用篇)

- 第 5 章 半导体
- 第 6 章 半导体器件
- 第 7 章 电介质材料和绝缘
- 第 8 章 磁性和超导性
- 第 9 章 材料的光学特性
- 附录 A 布喇格衍射定律与 X 射线衍射
- 附录 B 通量、光通量和辐射亮度
- 附录 C 主要符号和缩写
- 附录 D 元素特性(氢至铀)
- 附录 E 一些常数和有用的资料

附:下册(应用篇)目录

第5章 半导体

- 5.1 本征半导体
 - 5.1.1 硅晶体与能带图
 - 5.1.2 电子与空穴
 - 5.1.3 半导体的电导
 - 5.1.4 电子与空穴的浓度
- 5.2 非本征半导体
 - 5.2.1 n型掺杂
 - 5.2.2 p型掺杂
 - 5.2.3 补偿掺杂
- 5.3 电导率与温度的关系
 - 5.3.1 载流子浓度与温度的关系
 - 5.3.2 漂移迁移率及其与温度和杂质的关系
 - 5.3.3 电导率与温度的关系
 - 5.3.4 简并半导体与非简并半导体
- 5.4 复合与少数载流子注入
 - 5.4.1 直接复合与间接复合
 - 5.4.2 少数载流子寿命
- 5.5 扩散方程、电导方程与无规则运动
- 5.6 连续方程
 - 5.6.1 与时间有关的连续方程
 - 5.6.2 稳态连续方程
- 5.7 光吸收
- 5.8 压阻性
- 5.9 肖特基结
 - 5.9.1 肖特基二极管
 - 5.9.2 肖特基太阳能电池
- 5.10 欧姆接触与热电制冷机
- 附加的专题
- 5.11 直接带隙与间接带隙的半导体
- 5.12 间接复合
- 5.13 非晶态半导体

术语解释

习题

第6章 半导体器件

- 6.1 理想pn结
 - 6.1.1 无偏压:开路
 - 6.1.2 正偏:扩散电流

- 6.1.3 正偏:复合和总电流
- 6.1.4 反向偏压
- 6.2 pn结能带图
 - 6.2.1 开路
 - 6.2.2 正偏和反偏
- 6.3 pn结的耗尽层电容
- 6.4 扩散(存储)电容和动态电阻
- 6.5 反向击穿:雪崩击穿和齐纳击穿
 - 6.5.1 雪崩击穿
 - 6.5.2 齐纳击穿
- 6.6 双极晶体管
 - 6.6.1 共基极直流特性
 - 6.6.2 共基极放大器
 - 6.6.3 共射极直流特性
 - 6.6.4 低频小信号模型
- 6.7 结型场效应晶体管
 - 6.7.1 基本原理
 - 6.7.2 JFET放大器
- 6.8 金属氧化物半导体场效应晶体管
 - 6.8.1 场效应和反型
 - 6.8.2 增强型MOSFET
 - 6.8.3 阈值电压
 - 6.8.4 离子注入MOS晶体管和多晶硅栅
- 6.9 光发射二极管
 - 6.9.1 LED原理
 - 6.9.2 异质结高亮度LED
 - 6.9.3 LED特性
- 6.10 太阳能电池
 - 6.10.1 光伏器件原理
 - 6.10.2 串联和分流电阻
 - 6.10.3 太阳能电池材料、器件和效率

附加的专题

- 6.11 pin二极管、光电二极管和太阳能电池
- 6.12 半导体光放大器和激光器

术语解释

习题

第7章 电介质材料和绝缘

- 7.1 物质极化和相对电容率

- 7.1.1 相对电容率:定义
- 7.1.2 电偶极矩和电子极化
- 7.1.3 极化矢量 P
- 7.1.4 局域场和克劳修斯-莫索提方程
- 7.2 电子极化:共价固体
- 7.3 极化机制
 - 7.3.1 离子极化
 - 7.3.2 偶极取向极化
 - 7.3.3 界面极化
 - 7.3.4 总极化
- 7.4 频率依赖性:介电常数和介电损耗
 - 7.4.1 介电损耗
 - 7.4.2 德拜方程、科尔-科尔图和串联等效电路
- 7.5 高斯定律和边界条件
- 7.6 击穿场强和绝缘击穿
 - 7.6.1 击穿场强:定义
 - 7.6.2 电介质击穿和局部放电:气体
 - 7.6.3 电介质击穿:液体
 - 7.6.4 电介质击穿:固体
- 7.7 用于电容器的电介质材料
 - 7.7.1 常用电容器结构
 - 7.7.2 电介质:比较
- 7.8 压电性、铁电性和热释电性
 - 7.8.1 压电性
 - 7.8.2 压电性:石英谐振器和滤波器
 - 7.8.3 铁电和热释电晶体

附加的专题

- 7.9 电位移和去极化电场
- 7.10 局域电场和洛伦兹方程
- 7.11 偶极子极化
- 7.12 离子极化和介电响应
- 7.13 复合电介质和非均匀电介质

术语解释

习题

第8章 磁性和超导性

- 8.1 物质的磁化
 - 8.1.1 磁偶极矩
 - 8.1.2 原子磁矩
 - 8.1.3 磁化矢量 M
 - 8.1.4 磁化场或磁场强度 H
 - 8.1.5 磁导率与磁化率

- 8.2 磁性材料分类
 - 8.2.1 抗磁性
 - 8.2.2 顺磁性
 - 8.2.3 铁磁性
 - 8.2.4 反铁磁性
 - 8.2.5 亚铁磁性
- 8.3 铁磁性起源和交换相互作用
- 8.4 饱和磁化与居里温度
- 8.5 磁畴:铁磁材料
 - 8.5.1 磁畴
 - 8.5.2 磁晶各向异性
 - 8.5.3 畴壁
 - 8.5.4 磁致伸缩
 - 8.5.5 畴壁运动
 - 8.5.6 多晶材料及其 $M-H$ 特性
 - 8.5.7 去磁
- 8.6 软磁与硬磁材料
 - 8.6.1 定义
 - 8.6.2 初始和最大磁导率
- 8.7 软磁材料:例子和应用
- 8.8 硬磁材料:例子和应用
- 8.9 超导性
 - 8.9.1 零电阻与迈斯纳效应
 - 8.9.2 I类和II类超导体
 - 8.9.3 临界电流密度
- 8.10 超导性的起源

附加的专题

- 8.11 能带图与磁性
 - 8.11.1 泡利自旋顺磁性
 - 8.11.2 铁磁性的能带模型
- 8.12 各向异性磁阻效应与巨磁阻效应
- 8.13 磁存储材料
- 8.14 约瑟夫森效应
- 8.15 磁通量子化

术语解释

习题

第9章 材料的光学特性

- 9.1 均匀介质中的光波
- 9.2 折射率
- 9.3 色散:波长和折射率关系
- 9.4 群速度和群折射率
- 9.5 磁场:辐射和坡印廷矢量

- 9.6 斯涅耳定律和全内反射
- 9.7 菲涅耳方程
 - 9.7.1 振幅反射和透射系数
 - 9.7.2 强度、反射系数和透射系数
- 9.8 复折射率和光吸收
- 9.9 晶格吸收
- 9.10 带-带吸收
- 9.11 介质的光散射
- 9.12 光纤中的衰减
- 9.13 发光、磷光体和白光 LED
- 9.14 偏振
- 9.15 光学各向异性
 - 9.15.1 单轴晶体和非涅耳光率体
 - 9.15.2 方解石的双折射

- 9.15.3 二向色性
- 9.16 双折射延迟片
- 9.17 旋光效应和圆偏振双折射

附加的专题

- 9.18 电光效应

术语解释

习题

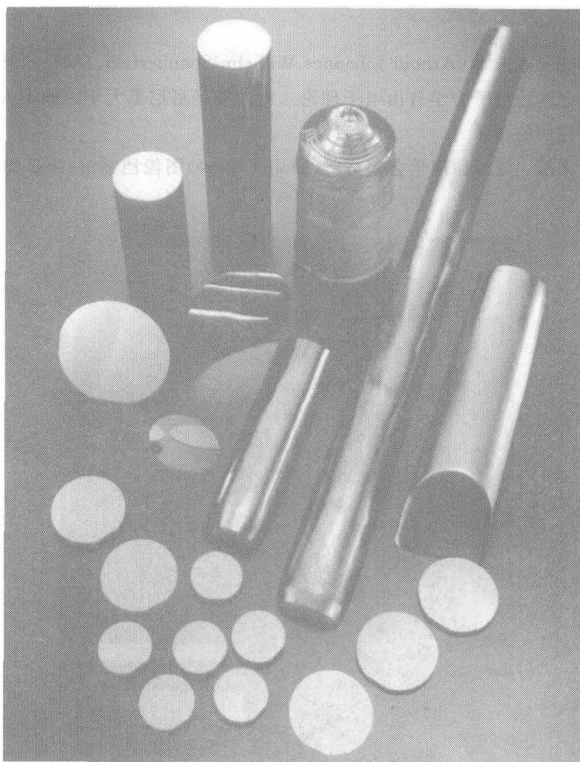
附录 A 布喇格衍射定律与 X 射线衍射

附录 B 通量、光通量和辐射亮度

附录 C 主要符号和缩写

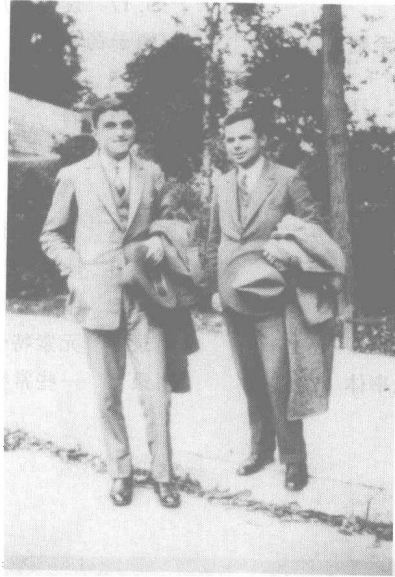
附录 D 元素特性(氢至铀)

附录 E 一些常数和有用的资料



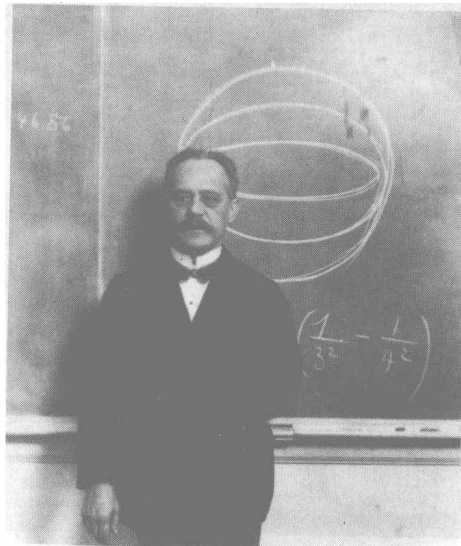
GaAs 晶锭和晶片

照片来源:承蒙日本住友电气工业株式会社(Sumitomo Electric Industries, Ltd)提供

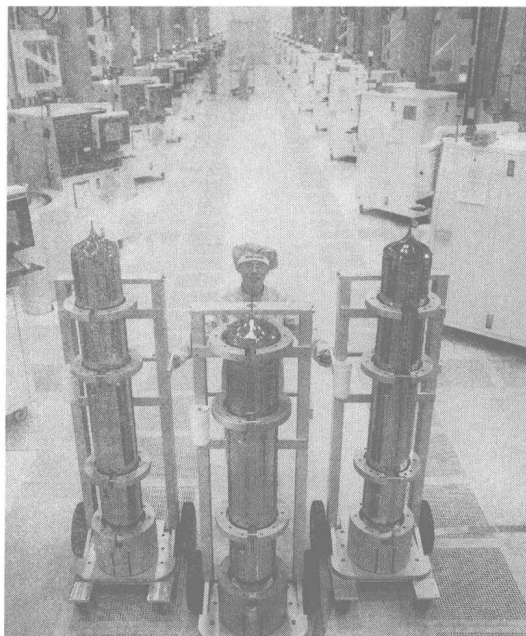


阿诺德·索末菲(Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld, 1868—1951)提出了第4章中金属的量子力学自由电子理论。索末菲是慕尼黑大学由他本人创建的理論物理研究所的所长

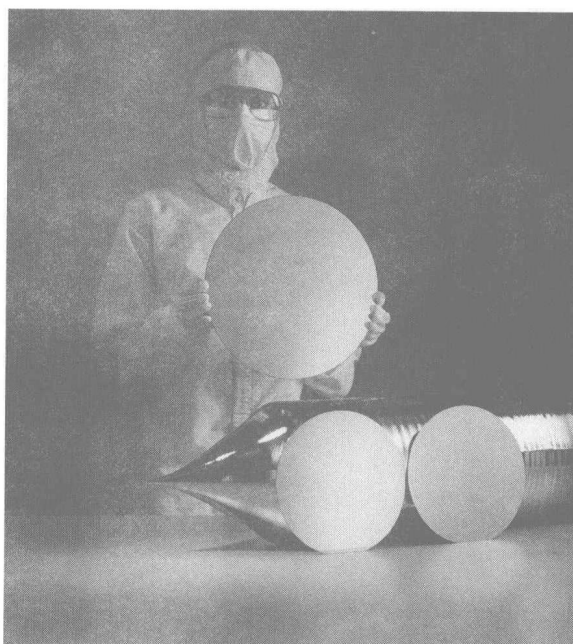
照片来源: 美国物理学会塞格雷(Emilio Segrè)图像档案馆, 今日物理收藏



照片来源: 美国物理学会塞格雷(Emilio Segrè)图像档案馆, Uhlenbeck 收藏



切克劳斯基提拉法生长的硅单晶棒(背景中为切克劳斯基晶体生长设备)
来源: MEMC 电子材料公司



直径 200 mm 和 300 mm 的硅片
来源: MEMC 电子材料公司

目 录

译者序
前言

上册(理论篇)

第 1 章 材料科学的基本概念	(3)	1.11 玻璃和非晶态半导体	(64)
1.1 原子结构和原子数	(3)	1.11.1 玻璃和非晶态固体	(64)
1.2 原子质量和摩尔	(6)	1.11.2 单晶硅和非晶硅	(66)
1.3 固体中的键及类型	(7)	1.12 固溶体和二相固体	(67)
1.3.1 分子和成键基本原理	(7)	1.12.1 同构固溶体:同构合金	(67)
1.3.2 共价键晶体:金刚石	(9)	1.12.2 相图;Cu-Ni 合金和其他同构合金	(68)
1.3.3 金属键:铜	(11)	(68)
1.3.4 离子键晶体:盐	(11)	1.12.3 区熔提纯和硅单晶的提纯	(72)
1.3.5 弱键	(15)	1.12.4 二元低共熔相图和 Pb-Sn 合金	(73)
1.3.6 混合键	(17)	(73)
1.4 分子动力学理论	(20)	附加的专题	(77)
1.4.1 平均动能和温度	(20)	1.13 布拉维格子	(77)
1.4.2 热膨胀	(25)	术语解释	(79)
1.5 分子速率与能量分布	(29)	习题	(83)
1.6 热,热涨落与噪声	(32)	第 2 章 固体中的电导和热导	(95)
1.7 热激活过程	(36)	2.1 经典理论:德鲁德模型	(95)
1.7.1 阿累尼乌斯反应速率方程	(36)	2.1.1 金属与电子电导	(95)
1.7.2 原子扩散及其扩散系数	(38)	2.2 温度与电阻率的关系:理想纯金属	(102)
1.8 晶体结构	(40)	(102)
1.8.1 晶体的种类	(40)	2.3 马希森定则与诺德海姆定则	(104)
1.8.2 晶向和晶面	(46)	2.3.1 马希森定则与电阻温度系数(α)	(104)
1.8.3 同素异形体和碳单质	(50)	(104)
1.9 晶体缺陷及其意义	(52)	2.3.2 固溶体与诺德海姆定则	(112)
1.9.1 点缺陷:空位和杂质	(53)	2.4 混合物与多孔物质的电阻率	(116)
1.9.2 线缺陷:刃位错和螺位错	(56)	2.4.1 多相混合物	(116)
1.9.3 面缺陷:晶界	(57)	2.4.2 两相合金(银镍合金)电阻率与电	(119)
1.9.4 晶体表面和表面性质	(59)	接触	(119)
1.9.5 化学计量、非化学计量和缺陷结构	(61)	2.5 霍尔效应与霍尔器件	(120)
.....	(61)	2.6 热导	(124)
1.10 单晶的切克劳斯基生长法	(62)		

2.6.1 热导率	(124)	3.9.2 氦-氖激光器	(215)
2.6.2 热阻	(129)	3.9.3 激光器输出光谱	(217)
2.7 非金属的电导率	(130)	附加的专题	(219)
2.7.1 半导体	(130)	3.10 光纤放大器	(219)
2.7.2 离子晶体与玻璃	(133)	术语解释	(221)
附加的专题	(137)	习题	(224)
2.8 趋肤效应:导体的高频电阻	(137)		
2.9 金属薄膜	(140)	第4章 现代固体理论	(237)
2.9.1 金属薄膜中的电导	(140)	4.1 氢分子:分子轨道成键理论	(237)
2.9.2 薄膜的电阻率	(140)	4.2 固体能带理论	(241)
2.10 微电子器件中的互连	(144)	4.2.1 能带形成	(241)
2.11 电迁移与布莱克方程	(147)	4.2.2 能带中电子的性质	(246)
术语解释	(149)	4.3 半导体	(248)
习题	(151)	4.4 电子有效质量	(251)
		4.5 能带中的状态密度	(252)
第3章 量子物理基础	(163)	4.6 统计:粒子体系	(258)
3.1 光子	(163)	4.6.1 玻耳兹曼经典统计	(258)
3.1.1 光的波动性	(163)	4.6.2 费密-狄拉克统计	(259)
3.1.2 光电效应	(165)	4.7 金属的量子理论	(260)
3.1.3 康普顿散射	(169)	4.7.1 自由电子模型	(260)
3.1.4 黑体辐射	(170)	4.7.2 金属中的电导	(262)
3.2 电子的波动性	(173)	4.8 费密能的意义	(264)
3.2.1 德布罗意关系	(173)	4.8.1 金属-金属接触:接触势	(264)
3.2.2 定态薛定谔方程	(175)	4.8.2 塞贝克效应和热电偶	(265)
3.3 无限深势阱:束缚电子	(178)	4.9 热电子发射和真空管器件	(271)
3.4 海森伯测不准原理	(182)	4.9.1 热电子发射:理查森-杜什曼方程	(271)
3.5 隧道现象:量子泄露	(184)	4.9.2 肖特基效应和场发射	(274)
3.6 势能箱:三个量子数	(191)	4.10 声子	(278)
3.7 类氢原子	(192)	4.10.1 简谐振子和点阵波(格波)	(278)
3.7.1 电子波函数	(192)	4.10.2 德拜热容	(282)
3.7.2 量子化的电子能量	(196)	4.10.3 非金属的热传导	(286)
3.7.3 轨道角动量和空间量子化	(199)	4.10.4 电导率	(288)
3.7.4 电子自旋和本征角动量 S	(203)	附加的专题	(289)
3.7.5 电子的磁偶极矩	(204)	4.11 金属的能带理论:晶体中的电子衍射	(289)
3.7.6 总角动量 J	(208)	4.12 热膨胀的格林爱森模型	(297)
3.8 氢原子和元素周期表	(209)	术语解释	(298)
3.8.1 氢原子和泡利不相容原理	(209)	习题	(300)
3.8.2 洪特规则	(211)		
3.9 受激辐射与激光器	(213)		
3.9.1 受激辐射与光子放大	(213)		

第 1 章 材料科学的基本概念^①

对于物质基本构造单元的认识已成为人类最有兴趣并努力研究的方向之一。在量子力学以及材料中电子和原子核之间静电作用的基础上,我们对原子间相互作用的理解已经使我们可以相当容易地解释物质的宏观性能。材料的诸多性能可以用材料科学的经典论述来解释。在本章和第 2 章,我们通过经典的观点论述材料中的相互作用,并引入许多基本概念。这些概念没有涉及任何量子力学理论,量子力学作为现代物理的主要内容将在第 3 章中介绍。尽管材料的很多有用的工程性能几乎可以不用量子力学来处理,但如果没有现代物理的话,发展电子材料与器件科学却是不可能的。

1.1 原子结构和原子数

用来理解原子综合性能的原子模型涉及到量子力学,量子力学的内容将在第 3 章介绍。现在,我们将简单地接受以下被称为壳模型的基于玻尔模型(1913)的一个简化而直观的原子模型。

原子的质量集中在原子核,原子核由质子和中子组成。质子是带正电荷的粒子,而中子是中性粒子,二者具有相同的质量。尽管在质子之间存在库仑斥力,但所有的质子和中子仍然被一种强力一同吸引在原子核内,这种力是存在于粒子之间的强大的、基础的、自然的力。这种力的作用范围非常小,通常小于 10^{-15} m。当质子和中子非常靠近时,这种强力将平衡质子之间的库仑斥力从而使原子核保持完整。原子核中的质子数目即为元素的原子数 Z 。

相对于原子核的尺寸而言,电子被假定在离原子核很远的轨道上运动,轨道上电子的数量与原子核中的质子数量相等。玻尔模型中的一个重要假设是这些电子轨道只在原子核外一些固定半径上存在,例如,氢原子的最近邻轨道只能在半径 0.053 nm 处。由于电子长时间地(大约 10^{-12} s,相对于原子时间单位)固定在给定半径的轨道上运动,电子应呈现为在原子核外带负电的球形云而不是一个限定尺寸的单个粒子,因而可以将核外电子看成是一个带电的具有给定半径的球形壳层。

由于稳定轨道的要求,电子不是随机地占据原子核外的整个区域,而是占据不同的已定义好的球形区域。电子分布在壳内不同的壳层和亚壳层上,遵守一定的占位规则^②,图 1.1 给出碳原子的例子。

限定电子位置的壳层和亚壳层可用两组整数 n 和 l 表示,这些整数被分别称为主量子数和轨道量子数(这些名字的意义在这里并不十分重要)。整数 n 和 l 的取值为 $n=1, 2, 3, \dots$, 和 $l=0, 1, 2, \dots, n-1$, 且 $l < n$ 。对于 n 的每一个取值,对应有 l 的 n 个取值,因而高阶的壳层包含更多的亚壳层。对应于 $n=1, 2, 3, 4, \dots$ 的壳层用大写字母 K, L, M, N, \dots 表示,而

① 学习过材料科学基础课程的读者可以跳过本章。

② 这将在第 3 章中用量子力学说明。