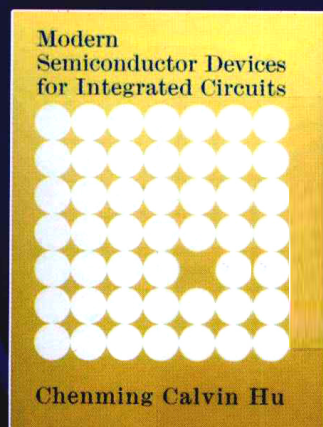


国外电子与通信教材系列

PEARSON

现代集成电路 半导体器件

Modern Semiconductor
Devices for Integrated Circuits



[美] Chenming Calvin Hu (胡正明) 著

王 燕 张 莉 译
佐 昌 岳瑞峰



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

现代集成电路半导体器件

Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits

[美] Chenming Calvin Hu(胡正明) 著

王 燕 张 莉 译
叶佐昌 岳瑞峰

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了现代集成电路中的半导体器件,是一本深入阐述半导体器件的物理机制和工作原理并与实践相结合的教材。本书没有按电子器件、光电子器件、微波器件等通常的分类形式讲解,而是强调了不同半导体器件中的共性,集中介绍了PN结、金属-半导体接触、双极型晶体管和MOSFET等几个基本器件的结构和理论,在此基础上引入了其他重要的半导体器件,如太阳能电池、LED、二极管激光器、CCD和CMOS图像传感器、HEMT器件和存储器等。

本书可作为高等学校微电子专业本科生相应课程的教科书或参考书,也可供在相关领域工作的专业技术人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled *Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits*, 9780136085256 by Chenming Calvin Hu, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright ©2010 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright ©2012.

本书中文简体字版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。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。

本书贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2009-3463

图书在版编目(CIP)数据

现代集成电路半导体器件/(美)胡正明著;王燕等译.

北京:电子工业出版社,2012.7

书名原文:Modern Semiconductor Devices for Integrated Circuits

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-17662-3

I. ①现… II. ①胡… ②王… III. ①集成电路-半导体器件-高等学校-教材 IV. ①TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第162016号

策划编辑:马 岚

责任编辑:李秦华

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:17 字数:435千字

印 次:2012年7月第1次印刷

定 价:49.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。

中国工程院院士、清华大学教授
“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长	
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长	

译者序

微电子技术是高科技和信息产业的核心技术，是信息社会的基石，它深刻地影响了其他相关学科和工程技术的发展。

作为集成电路核心的晶体管自 1947 年问世以来，经过半个多世纪的快速发展，主流工艺已经进入到纳米级阶段。了解和掌握半导体器件的基本理论和物理模型对于微电子及相关专业人员是非常必要的。胡正明教授所著的《现代集成电路半导体器件》是一本非常成功的本科生教材。与其他教材不同的是，本书没有采用按电子器件、光电子器件、微波器件等通常的分类形式，而是强调了不同半导体器件中的共性，集中介绍了 PN 结、金属-半导体接触、双极型晶体管和 MOSFET 等几个基本器件的结构和理论，在此基础上引入了其他重要的半导体器件，如太阳能电池、LED、二极管激光器、CCD 和 CMOS 图像传感器、HEMT 器件和存储器等。本书内容从半导体物理的基本知识开始，深入介绍了现代半导体器件的基本理论和最新进展，并在每一章的最后列出了许多习题和很有价值的参考资料。本书结构清晰紧凑，内容深入浅出，理论讲解生动有趣，为我们提供了一本深入阐述半导体器件的物理机制和工作原理并与实践相结合的优秀教材。本书不仅可以作为本科生教材，也可以作为半导体工艺、IC 设计、MEMS、光学器件、纳米技术和材料科学等领域研究人员的参考书。

本书在美国加州大学伯克利分校的教学中取得了很好的效果。作者胡正明教授是 TSMC 杰出讲习教授，美国工程院院士和中国科学院外籍院士，曾任世界最大的 IC 代工厂 TSMC 的首席技术官。他领导的小组从实际 MOSFET 晶体管的复杂物理推演出的数学模型，即 BSIM 模型，于 1997 年被国际晶体管模型理事会选为集成电路设计的第一个国际标准模型；他发明了在国际上极受瞩目的 FinFET 等多种新结构器件。正是由于他对半导体器件的研发及微型化做出了重大贡献，本书在内容上既有前瞻性，又接近实际应用。

本书由清华大学微电子学研究所王燕教授组织翻译，参加翻译工作的教师和学生还有张莉、叶佐昌、岳瑞峰、陆斌、郭泽邦和冀翔，他们翻译了本书的部分章节，完成了文字输入和文稿整理。本书在翻译过程中得到了电子工业出版社的热心指导和大力支持，得到了清华大学微电子学研究所多位老师的帮助与指正，在此深表谢意。虽经仔细校对，但由于译者水平有限，文中定有不当或欠妥之处，望读者批评指正。

在本书的翻译过程中，对于一些涉及人名的术语的翻译，我们分成了两类。与大学物理知识相关的人名，是根据习惯来翻译的，如将“de Broglie”译成“德布罗意”，将“Gauss”译成“高斯”。而与专业知识相关的术语，我们采用原文，不予翻译，如“Fermi”、“Schottky”等。对于一些专用名词，我们采用了“全国科学技术名词审定委员会”的规范，将“nonvolatile memory”译成“非易失性存储器”，而不是以前相关教科书常用的“非挥发性存储器”。特此说明。另外，有些章节的小结中再次提到正文中的公式编号，因本书公式较多，所以保留了小结部分的公式编号。此外，重复出现的公式，我们也按原书的方式保留公式编号。保留公式编号有助于读者理解本书的内容。

译者

2012 年 3 月于清华园

前 言

本书是为本科生编写的，但是也适合研究生、实习工程师和科学家。

这是针对加州大学伯克利分校一学期课程的一本非常成功的教材，同时也为对半导体工艺、IC 设计、MEMS、光学器件、纳米技术和材料科学等领域感兴趣的学生所接受。

学习这本书需要的基础知识包括基本的微分方程、现代物理学和电子学。以此为基础本书对现代器件物理知识体系给出详细的介绍，并训练学生进一步学习的能力，为未来的职业生涯打好基础。与本领域同类教科书相比，本书对现代晶体管及其对电路设计的影响给出了更详细的解读，为解决未来器件及其设计中的问题打下更深厚的基础。

本书强调了器件中的共性，避免了通常按电子器件、光学器件、微波器件等分类形式。本书集中在几个基本器件，如 PN 结、金属-半导体接触、双极型晶体管和 MOSFET 等进行深入的介绍。这些器件提供了理论基础，并在各章节中引入其他的重要器件，如太阳能电池、LED、二极管激光器、CCD 和 CMOS 图像传感器、HEMT 器件和存储器等。本书的目标是以更加清晰的、紧凑的和有趣的方式获得具有深度和广度的知识。

本书可以为讲课的教授们提供教师手册、PPT 和教学课件^①。其中教学课件已经在课堂上使用过几年。

在这里感谢那些帮助本书成型的人。Bingliang Yang、Hyuck Choo 和 Vivian Lin 帮助打印了本书的正文，准备了图表和习题答案。Jemin Park、Kanghoon Jeon、ChungHsun Lin，尤其是 Babak Heydari 提供了大量的材料。许多学生包括 Anupama Bowonder、Pratik Patel 和 Darsen Lu 帮助校对手稿。衷心感谢评审小组成员：布朗大学的 John Beresford；得州理工大学的 Tim Dallas；蒙大拿州立大学的 Todd J. Kaiser；路易斯安那理工大学的 Long Que；维拉诺瓦大学的 Pritpal Singh；得克萨斯大学奥斯汀分校的 Nina Telang；康科迪亚大学的 Pouya Valizadeh 和特拉华大学的 Joshua M. O. Zide。

感谢 Pearson Prentice Hall 的工作人员尤其是 Jane Bonnell 专业的指导。特别感谢我的夫人 Margaret 和我的儿子 Jason 为本书设计了漂亮的封面，也感谢另一个儿子 Raymond，当我长时间写作本书而忽视了他们的生活时，他们给予了理解和支持。

Chenming Calvin Hu
加州大学伯克利分校

^① 有关本书的教辅资料的获取，请参阅书后所附的“教学支持说明”——编者注。

目 录

第 1 章 半导体中的电子和空穴	1
1.1 硅的晶体结构	2
1.2 电子和空穴的成键模型	3
1.3 能带模型	5
1.4 半导体、绝缘体和导体	7
1.5 电子和空穴	8
1.6 态密度	10
1.7 热平衡与 Fermi 函数	11
1.8 电子和空穴的浓度	13
1.9 n 和 p 的通用理论	17
1.10 在极端温度下的载流子浓度	20
1.11 本章小结	21
习题	21
参考文献	23
相关阅读资料	24
第 2 章 电子和空穴的运动与复合	25
2.1 热运动	25
2.2 漂移	27
2.3 扩散电流	32
2.4 能带图与 V 、 \mathcal{E} 的关系	34
2.5 D 和 μ 之间的爱因斯坦关系	34
2.6 电子-空穴复合	36
2.7 热产生	37
2.8 准平衡和准 Fermi 能级	37
2.9 本章小结	39
习题	40
参考文献	41
相关阅读资料	41
第 3 章 器件制造技术	42
3.1 器件制造简介	42
3.2 硅的氧化	43
3.3 光刻	45
3.4 图形转移——刻蚀	49

3.5 掺杂	50
3.6 掺杂剂的扩散	53
3.7 薄膜淀积	54
3.8 互连——后端工序	58
3.9 测试、组装与合格鉴定	60
3.10 本章小结——一个器件的制造实例	61
习题	62
参考文献	64
相关阅读资料	64
第4章 PN结和金属-半导体结	65
第1部分:PN结	65
4.1 PN结的理论基础	65
4.2 耗尽层模型	68
4.3 反偏PN结	70
4.4 电容-电压特性	71
4.5 结击穿	73
4.6 正向偏置时的载流子注入——准平衡边界条件	75
4.7 电流连续性方程	78
4.8 正偏PN结中的过剩载流子	79
4.9 PN结二极管的 <i>I-V</i> 特性	81
4.10 电荷存储	84
4.11 二极管的小信号模型	85
第2部分:PN结在光电器件中的应用	85
4.12 太阳能电池	85
4.13 发光二极管和固态照明	90
4.14 二极管激光器	93
4.15 光电二极管	97
第3部分:金属-半导体结	97
4.16 Schottky 势垒	97
4.17 热发射理论	100
4.18 Schottky 二极管	100
4.19 Schottky 二极管的应用	102
4.20 量子力学隧道效应	103
4.21 欧姆接触	103
4.22 本章小结	106
习题	108
参考文献	113
相关阅读资料	114

第5章 MOS 电容	115
5.1 平带条件和平带电压	116
5.2 表面积累	117
5.3 表面耗尽	119
5.4 阈值电压	120
5.5 高于阈值的强反型	121
5.6 MOS 结构的 $C-V$ 特性	124
5.7 氧化层电荷——对 V_{th} 和 V_t 的修正	128
5.8 多晶硅栅的耗尽——等效 T_{ox} 的增大	130
5.9 反型层和积累层厚度以及量子力学效应	131
5.10 CCD 和 CMOS 成像传感器	133
5.11 本章小结	137
习题	139
参考文献	144
相关阅读资料	144
第6章 MOSFET 晶体管	145
6.1 MOSFET 简介	145
6.2 互补 MOS(CMOS) 工艺	147
6.3 表面迁移率和高迁移率 FET	149
6.4 MOSFET 的 V_t , 体效应和超陡倒掺杂	154
6.5 MOSFET 中的 Q_{inv}	156
6.6 基本 MOSFET 的电流电压模型	157
6.7 CMOS 反相器——电路实例	160
6.8 速度饱和	163
6.9 速度饱和下的 MOSFET 的电压电压模型	165
6.10 寄生源漏电阻	168
6.11 串联电阻和等效沟道长度的提取	169
6.12 速度过冲和源区速度极限	171
6.13 输出电导	172
6.14 高频性能	172
6.15 MOSFET 的噪声	174
6.16 SRAM, DRAM 和非易失性(FLASH) 存储器件	177
6.17 本章小结	183
习题	185
参考文献	191
相关阅读资料	192
第7章 IC 中的 MOSFET——按比例缩小、漏电及其他问题	193
7.1 按比例缩小工艺——成本、速度及功耗	193

7.2	亚阈值区电流——“关”不是完全“关”	196
7.3	V_t 下降——短沟 MOSFET 漏电更多	199
7.4	减小栅绝缘层的电学厚度和隧穿电流	201
7.5	如何减小 W_{dep}	203
7.6	浅结及金属源/漏 MOSFET	204
7.7	I_{on} 和 I_{off} 之间的折中以及可制造性设计	205
7.8	超薄体 SOI 及多栅 MOSFET	206
7.9	输出电导	211
7.10	器件模拟和工艺模拟	211
7.11	用于电路模拟的 MOSFET 集约模型	212
7.12	本章小结	213
	习题	214
	参考文献	215
	相关阅读资料	216
第 8 章	双极型晶体管	217
8.1	双极型晶体管简介	217
8.2	集电极电流	218
8.3	基极电流	221
8.4	电流增益	222
8.5	由集电极电压导致的基区宽度调制	225
8.6	Ebers-Moll 模型	227
8.7	渡越时间与电荷存储	228
8.8	小信号模型	231
8.9	截止频率	233
8.10	电荷控制模型	235
8.11	大信号电路模拟模型	236
8.12	本章小节	237
	习题	239
	参考文献	241
	相关阅读资料	241
附录 A	态密度的推导	242
附录 B	Feimi-Dirac 分布函数的推导	244
附录 C	少数载流子假设的自洽性	246
	部分习题的答案	248
	索引	250

第1章 半导体中的电子和空穴

本章目标

本章介绍半导体的基本概念和常用术语,尤其重要的是能带的概念、两种电荷载流子电子和空穴的概念以及用添加掺杂剂来控制载流子浓度的方法。另一组重要的概念和分析工具是 Fermi 分布函数和 Fermi 能级。电子和空穴的浓度与 Fermi 能级密切相关。本章介绍的内容在随后章节介绍每一种新器件时将会多次用到。在学习本章时,请注意(1)概念、(2)术语、(3)Si 材料的典型值以及(4)加方框的公式如式(1.7.1)。

本章的标题和许多概念来自 William Shockley 的开创性著作《半导体中的电子和空穴》^[1]。这本书在晶体管发明后两年即 1950 年出版。1956 年, Shockley 和 Brattain、Bardeen 一起因为发明晶体管而获得了诺贝尔物理学奖(参见图 1.1)。

晶体管的发明

Brattain、Bardeen 和 Shockley 出生于三个不同的洲(Brattain 在中国厦门市;Bardeen 在美国威斯康星州麦迪逊市;Shockley 在英国伦敦市),他们均成长于美国,于 1947-1948 年在贝尔实验室发明了晶体管。Brattain 是一位技术员,而 Bardeen 和 Shockley 在理论方面做出的贡献更多。以下是他们对这件历史性事件的看法:

“……研究了 14 年后,我正开始放弃……”

—Walter H. Brattain (1902 - 1987)

“由 Walter Brattain 和我负责的点接触晶体管发明实验于 1947 年的 11、12 月完成,紧接着 Shockley 发明了结型晶体管。”

—John Bardeen (1908 - 1991)

“我们所有参与的人都坚信我们打开了一扇通往一项新技术的大门。”

—William B. Shockley (1910 - 1988)

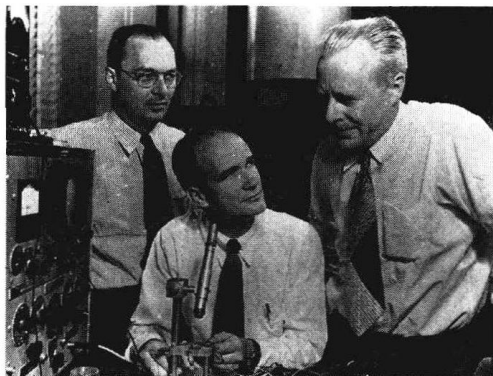


图 1.1 晶体管发明者 John Bardeen、William Shockley 和 Walter Brattain (从左向右)在贝尔实验室(资料来源:Corbis/Bettmann)

本章和下一章将要介绍的内容对于深刻理解各种半导体器件是非常有用的。掌握这两章介绍的术语、概念和模型,不仅有助于理解现有多种半导体器件的原理,为未来开发新结构器件做准备,也便于能够与半导体器件领域的同行进行学术交流。

1.1 硅的晶体结构

晶体具有重复排列的原子结构，利用 X 射线衍射和电子显微技术能够确定其周期性结构。图 1.2 中大的立方单元是硅晶体的结晶学原胞，每个球代表一个硅原子。晶胞沿所有三个方向重复排列形成一块硅晶体。晶胞的长度，例如 5.43 \AA ^①，被称为晶格常数。

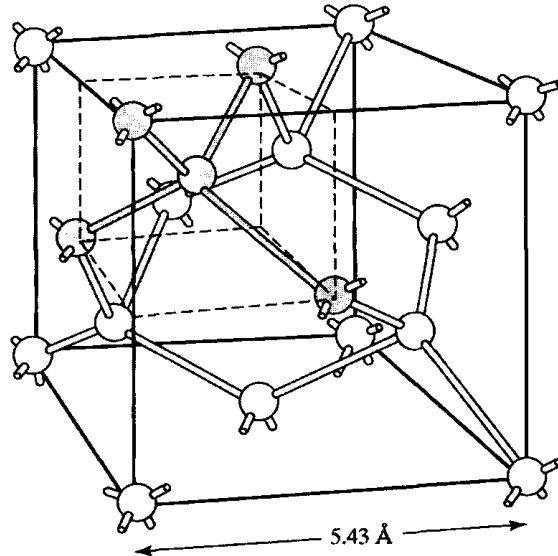


图 1.2 硅晶体的结晶学原胞，每个球代表一个硅原子。每一个硅原子有 4 个最近邻的硅原子，如小立方体中的深色原子所示(选自 Shockley^[1])。关于晶胞的多媒体交互式模型，参见 <http://jas.eng.buffalo.edu/>

图 1.2 给出的最重要的信息是每一个硅原子都以 4 个其他硅原子作为最近邻的原子。这一事实在图 1.2 采用一个中心原子和 4 个近邻原子的深色原子表示出来，这是一个最小重复单元。硅是元素周期表中的四族元素，有 4 个价电子，与最近邻的 4 个原子共享，因此每个原子最外层都有 8 个电子。图 1.2 给出的结构被称为金刚石结构，因为由碳原子组成的金刚石晶体也是这样的结构。用于制造第一个晶体管的锗同样具有金刚石结构。

图 1.3 介绍了一种表示硅晶体晶向的方法。图 1.3(a) 中的立方体代表图 1.2 中的硅晶胞，每一个阴影面是一个晶面。图 1.3(a) 中最左边的 (100) 晶面表示的是图 1.2 中面向读者的平面，与 x 轴相交于单位晶格常数的点，与 y 和 z 轴的截距无穷大。通常的习惯称其为 $(1/1, 1/\infty, 1/\infty)$ 或 (100) 晶面。一般来说， (abc) 晶面与 x, y, z 轴分别相交于晶格常数的 $1/a, 1/b$ 和 $1/c$ 位置处。图 1.3(a) 中间的 (011) 面与 x 轴的截距无穷大，与 y 和 z 轴相交在单位晶格常数处。圆括号中的数字被称为 Miller 指数，相关的符号 $[abc]$ 表示晶体中与 (abc) 晶面垂直的方向。如果电子沿 $[100]$ 方向运动，指的就是沿与 (100) 晶面垂直的方向即 x 轴运动。

硅晶圆通常沿 (100) 晶面切割以获得均匀良好的器件性能，如图 1.3(b) 所示。沿 (011) 晶面切出平边或缺口是为了在器件制造过程中精确统一地定位。不同晶向的表面具有不同的性质，比如氧化速率以及氧化物/半导体界面的电学性质。表面晶向和沿表面流动的电流方向都会影响表面器件的性能，如金属-氧化物-半导体晶体管 (MOSFET，参见 6.3.1 节) 的速度。在微电子学中采用的最重要半导体材料都是晶体。但是，大部分常见的固体并不是 3.7 节提到的单晶。

① 1 埃 (Å) = 0.1 nm——编者注。

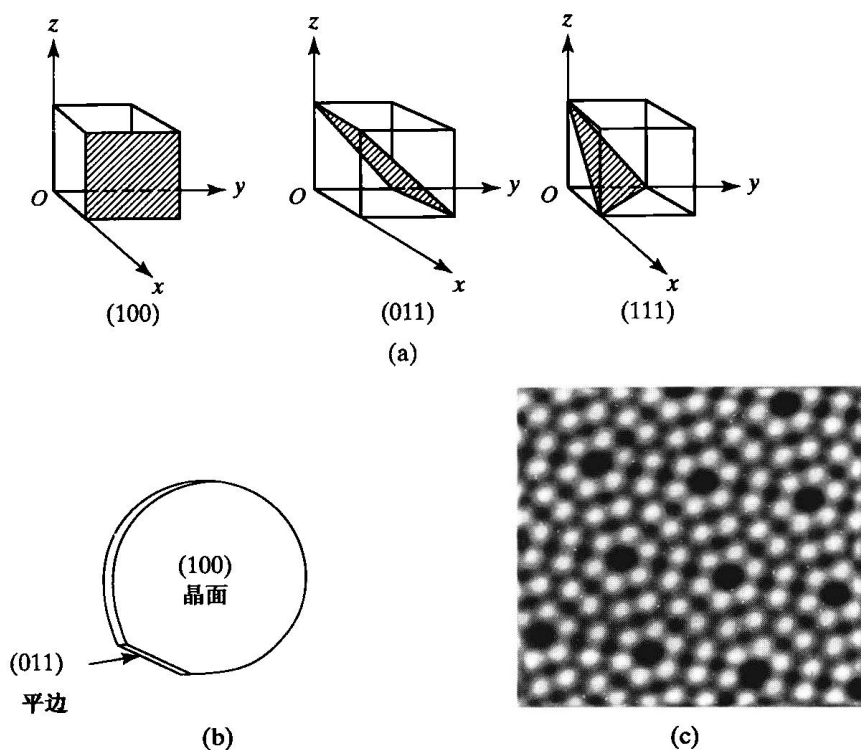


图 1.3 (a)描述晶面的方法。每个立方体代表图 1.2 中的晶胞;(b)硅晶圆通常沿(100)晶面切割。本例中有一个(011)平边用于在器件制造过程中确定硅晶圆方向;(c)硅(111)面扫描隧道显微镜照片

1.2 电子和空穴的成键模型

如图 1.2 中的一组深色球所示,每一个硅原子都被 4 个最近邻的硅原子包围。我们可以用图 1.4 中的二维图来表示硅晶体结构。一个硅原子用两个点与近邻的原子相连,代表着共价键中的两个共享电子。图 1.4 表面没有可传导电流的自由电子,但这只有在热力学温标零度时才完全正确。在其他温度下,一小部分价电子将由于热振动挣脱出来,变成如图 1.5(a)所示的导电电子。导电电子可以在晶体中移动,因此可以运输电流。因此,对于器件工作,导电电子比价电子更重要。

当挣脱出来的价电子自由运动时,会发生一件有趣的事。它留下一个空位或空穴,在图 1.5(b)中用空心圆圈表示。空穴能够很容易地接受一个新电子,这为电子提供了另一种移动和传导电流的方式。这一过程还可以这样理解:考虑空穴移动到一个新位置,正如考虑一个气泡在液体中的运动要比考虑产生移动气泡的液体的运动容易得多,因此将这种电流传导方式视为带正电的空穴的运动要比考虑带负电的电子向相反方向的运动更为方便。

在半导体中,一般情况下空穴导电与电子导电同样重要。习惯于将空穴视为携带正电荷的可动粒子非常重要,正如实际中的导电电子是携带负电荷的可动粒子。使价电子挣脱束缚,产生一个导电电子和一个空穴需要 1.1 eV 的能量。这个能量可以通过测量光电导来确定。当光照在 Si 样品上时,因为产生了可动电子和空穴,样品的电导率增加了。需要感生光电导的最小光子能量是 1.1 eV。

室温下热能 kT 为 26 meV,热激发产生电子与空穴的密度一般非常小。如果通过半导体掺

杂工艺引入合适的杂质原子，就可以产生非常多的导电电子。例如，图 1.6(a)所示的 V 族元素 As，其每个原子具有 5 个价电子。当其中 4 个电子与周围的 Si 原子成键时，第五个电子就有可能变成可自由移动的电子，留下一个带正电荷的 As 离子。这类杂质因为贡献出电子而被称为施主。注意在这种情况下，产生导电电子的同时没有产生空穴。包含很多自由移动的电子和少量空穴的半导体被称为 N 型半导体，因为电子带负(N)电荷。As 和 P 是 Si 中最常使用的施主杂质。

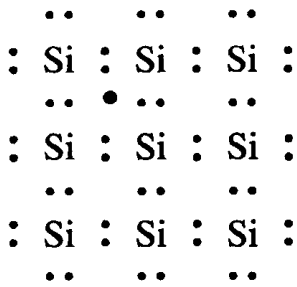


图 1.4 硅晶体结构的二维示意图

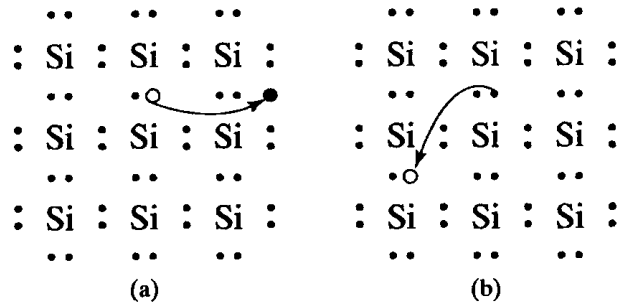


图 1.5 (a)挣脱出来的价电子可以移动，并能传导电流，同时还产生了一个空位或空穴，图中用空心圆圈表示。空穴可以移动并传导电流，如(b)中箭头所示

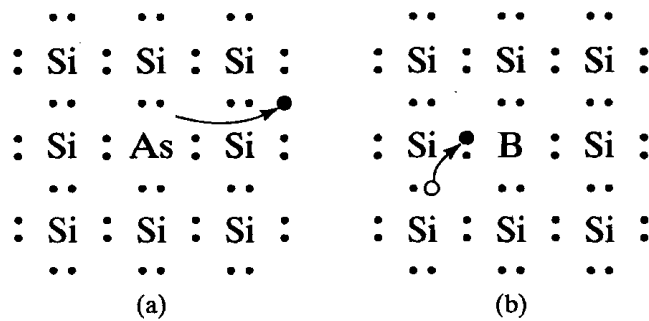


图 1.6 应用成键模型说明半导体的掺杂:(a) As 是施主;(b) B 是受主

类似地，如图 1.6(b)所示中的 III 族元素硼被引入到硅中时，每一个 B 原子能够接受一个额外的电子以形成共价键，因此产生了一个空穴。这样的掺杂剂因为接受电子而被称为受主。掺入受主杂质的半导体有很多空穴和少量自由移动的电子，被称为 P 型半导体，因为空穴带正(P)电荷。B 是 Si 中最常使用的受主杂质，有时也会采用 In 和 Al。

离化一个施主原子的能量(即释放出额外的电子并留下一个带正电荷的离子)可以通过修正氢原子的电离模型来进行估算

$$E_{ion} = \frac{m_0 q^4}{8 \epsilon_0^2 h^2} = 13.6 \text{ eV} \tag{1.2.1}$$

式中 m_0 是自由电子质量， ϵ_0 是自由空间的介电常数， h 是 Planck 常数。修正包括用 $12\epsilon_0$ 代替 ϵ_0 (这里 12 是硅的相对介电常数)，用电子有效质量 m_n 来代替 m_0 ，后面将会解释 m_n 比 m_0 小若干倍。计算结果大约为 50 meV。因为施主的离化能如此之小，在室温下它们通常是全部离化的。例如， 10^{17} cm^{-3} 的施主原子会产生 10^{17} cm^{-3} 的导电电子。同样的结论也适用于受主杂质。

GaAs, III-V 族化合物半导体及其掺杂剂

GaAs 及其类似的化合物半导体, 如 InP 和 GaN, 在光电子器件如发光二极管和半导体激光器中占据主导地位(参见 4.13 节和 4.14 节)。GaAs 也用在高频电路中(参见 6.3.2 节和 6.3.3 节)。GaAs 的晶体结构与 Si 类似, 如图 1.7 和图 1.8 所示, 图中深色球代表 As 原子, 浅色球代表 Ga 原子。每个 Ga 原子有 4 个近邻的 As 原子, 每个 As 原子有 4 个近邻的 Ga 原子, 晶格常数为 5.65 \AA 。Ga 是 III 族元素, As 是 V 族元素, GaAs 被称为 III-V 族化合物半导体。GaP 和 AlAs 因具有与图 1.7 所示相同的晶体结构, 也被称为 III-V 族化合物半导体。

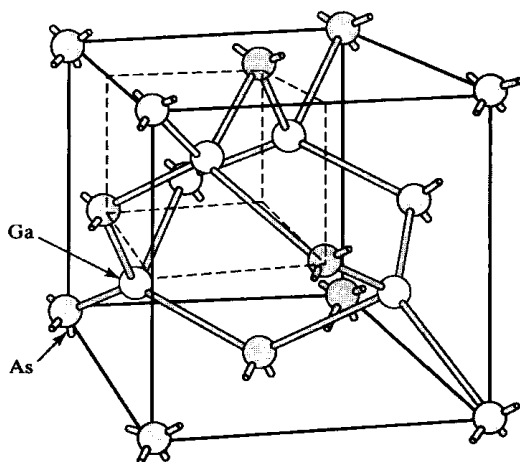


图 1.7 GaAs 晶体结构

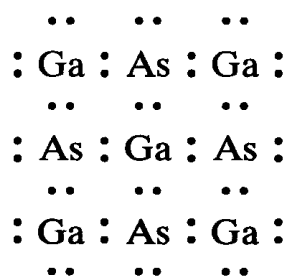


图 1.8 GaAs 成键模型

显然, VI 族元素如 S 和 Se 能取代 V 族元素并在 GaAs 中做施主。类似地, II 族元素如 Zn 能代替 Ga 用做受主。

但是, IV 族元素如 Si 和 Ge, 在 GaAs 中是施主还是受主呢? 答案是它们既可为施主又可为受主, 取决于它们是替代 Ga 原子(三个价电子)还是 As 原子(五个价电子)。这类杂质被称为两性杂质。研究发现, 从体系能量的角度出发, 在 GaAs 中 Si 是施主而 Ge 是受主, 这是因为 Si 的原子半径小, 更容易替代 Ga 原子, 而 Ge 的原子半径大, 更倾向于替代 As 原子。

1.3 能带模型

虽然前一节介绍的成键模型概念简单, 但用于完全理解半导体器件还不够。最有用的模型涉及能带的概念。

如图 1.9(a) 中所示的孤立原子中的电子占据分立的能级。由 Pauli 不相容原理, 在一个电子系统如一个原子或晶体中, 每一个量子态最多只能被一个电子占据。如果两个原子靠得很近, 每个能级将会分裂为两个。当更多的原子像在一个晶体中那样相互靠近时, 分立的能级将分裂成能带, 能带被禁带分开, 如图 1.9(b) 所示。能带可以被看做是一个能级数量非常大的准连续区。

显然, 电子首先趋于填满低能带。能量越低, 能带越容易被填满。在半导体中, 大多数低