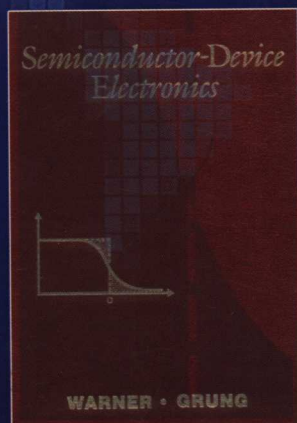


国外电子与通信教材系列

半导体器件 电子学

Semiconductor-Device Electronics



[美] R. M. Warner 著
B. L. Grung

吕长志 冯士维 张万荣 等译

吴武臣 王东风 等审校



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

半导体器件电子学

Semiconductor-Device Electronics

[美]R. M. Warner B. L. Grung 著

吕长志 冯士维 张万荣 等译

吴武臣 王东风 等审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是半导体器件电子学课程的教科书。全书分5章,从现代电子学基础开始,依次讲述半导体体特性、PN结、双极结型晶体管(BJT)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)等半导体器件电子学中最基本、最经典的内容。本书还特别强调 SPICE 分析方法。

本书属于基础课教材,内容经典,既可作为高校电子、电机、计算机等专业本科生或研究生教材,也可作为有关工程技术人员的参考用书。

Copyright © 1991 by Oxford University Press, Inc.

This translation of *Semiconductor-Device Electronics*, originally published in English in 1991, is published by arrangement with Oxford University Press, Inc., U. S. A.

本书中文简体版专有出版权由 Oxford University Press, Inc. 授予电子工业出版社,未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号:图字:01-2005-0352

图书在版编目(CIP)数据

半导体器件电子学/(美)沃纳(Warner, R. M.), (美)格朗(Grung, B. L.)著;吕长志等译. —北京:电子工业出版社, 2005. 2

(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Semiconductor-Device Electronics

ISBN 7-121-00882-3

I. 半… II. ①沃…②格…③吕… III. 半导体器件—电子学—教材 IV. TN389

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 004751 号

责任编辑:杨丽娟 特约编辑:明足群

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:41.75 字数:1069 千字

印 次:2005 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:62.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

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。

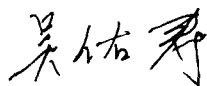
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版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

为作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、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
杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师
总参通信部副部长、中国电子学会会上、副理事长
中国通信学会常务理事 |
| 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委员会委员 |
| | 徐安士 | 北京大学教授、博士生导师、电子学系副主任
教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员 |
| | 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 会上 |
| | 程时昕 | 东南大学教授、博士生导师
移动通信国家重点实验室主任 |
| | 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委员会委员 |
| | 阮秋琦 | 北方交通大学教授、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 |
| | 张晓林 | 北京航空航天大学教授、博士生导师、电子工程系主任
教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导委员会委员 |
| | 郑宝玉 | 南京邮电学院副院长、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 | 西安交通大学教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 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委员会委员 |
| | 徐重阳 | 华中科技大学教授、博士生导师、电子科学与技术系主任
教育部电子信息科学与工程类专业教学指导委员会委员 |
| | 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、教材建设委员会主任 |
| | 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、秘书长 |
| | 杜振民 | 电子工业出版社副社长 |

译 者 序

本书是国外优秀电子与通信教材,属于微电子学科的基本教科书,既可作为通信专业本科生和研究生的基础课教学用书,也可作为电子科学与技术、计算机科学与技术、控制科学与工程和材料科学与工程等有关专业人员的参考书。

本书的重点是讲授 PN 结、双极结型晶体管(BJT)和金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)(分别为第 3,4,5 章)。在前面的第 1 章用浅显、易懂的语言介绍了理解上述重点内容所必需的电学、原子物理学和晶体学知识及在第 2 章中介绍的半导体物理学知识。它为物理专业知识较少的读者提供了极大的方便。

本书采用“从特殊推广到一般”的叙述,有利于读者对本书内容的理解,书中的大量练习题和解答、复习题及分析题有助于读者对本书内容的掌握,并为教学提供了极大的方便。

本书第 1~5 章分别由吴武臣、王东风、冯士维、吕长志和张万荣翻译、之后彼此之间进行了交换审校,吕长志负责全书的统稿及组织等工作。由于译者水平有限,书中难免有翻译错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

译 者

2004 年 10 月于北京

前 言

半导体器件电子学是为半导体器件的核心课程设计的一本教科书。通常地它被提供在电气工程系和计算机科学系低年级的课程表中。在本书出版之前它被作为明尼苏达大学第九学期(1/4 年为一学期)考查类课程的教材,并满意地接受。它是在电子学的第一序列中 10 周的课程。在这 10 周的课程中仅仅能够涉及本书的最基本的内容,因此它将被容易地扩展为一个学期(半年)的课程。然而,本书中的丰富材料足够一个学年使用,因此它能更好地适用于高年级的选修课或者研究生的计划。

起源和观念

我们已经看到对于新生器件电子学专门种类教材的迫切需要。一个学生谈到此学科需要广博的基础知识。至少大多数的电气工程系的学生已经被暴露到这些必需的大多数题目之下。我们的经验表明,除了那些最有才能的学生之外的其余学生,对这些题目仍然停留在皮毛的了解上。

由于上述原因,本书已经包括基础课题的材料,并在复习材料中组成了与教学法要求深度相一致的内容。本书的叙述顺序是从特殊推广到一般。首先作为台阶的石头给出最简单、最清晰的例子,然后迈向更复杂的情况。在一个课题上具有较长经历的人更赞赏从一般推广到特殊情况的雅致发展,而对于大多数的新手不喜欢后者。他们需要专门的和易处理的部件以构造他们自己观念的框架。

我们将图解原理的应用,强调场的理论。我们谈论一系列的与器件理论相关的特殊类型的一维问题,而不是从麦克斯韦方程开始。我们强调获得直观了解的重要性,在这些简单的上下文和其他一些内容中了解泊松方程的精髓,然后了解像电位移和介质弛豫时间等更难以理解的概念。对于器件的理论即本书的主题不需要我们超过一维范围的描述,也不允许对其空间的限制。但是本书为学生在其后面面对二维和三维问题和状态而需要的更一般的场的理论提供了一个坚实的基础。按照类似的方法,玻尔原子被处理为:力图以在单晶固体中孤立原子的电子来论述其性能。

另一方面,结晶学是大多数的电气工程系的学生在以前没有遇见的课题。然而就器件工程师将它作为几乎日常的概念来使用而言,它有资格作为一个基础的课题。所谈论的其他基础课题是所有工程和科学分支的基础。这些课题包括解决一般问题的程序和熟练性,单位的协调使用。

写作这本书的主要目标是获得清晰性。我们已经自由地使用了类比和启发式的描述,避免不必要的专门术语。在解释方面,我们试图选择一个在它第一次出现时即能明白的水平。在大多数的推导中已经包括中间的方程,所以学生可以容易地跟随推导,而不是依从地读方程直到“后面”。

本书的作者之一在明尼苏达大学已经为电气工程系低年级的 20 多个班级讲授了器件电子学课程;在同一时期内,为全美国不同地方的工业公司的 10 个在职班做了讲授。在此学校

中的班级是很大的,其学生的数量超过了 200 人,从而使他自己产生了困惑的特殊问题。最小的问题是更大声地讲话或者在黑板上写更大的字符。像每一个有经验的人都知道的那样,对于一个很大的班级最烦恼的事情是负有管理的责任甚至需要做合适的和被许可的帮助。我们的书提供了对这种状态的一个重要的减轻措施。本书提供了 229 个分析习题和一本伴随的解题手册。给出这些分析习题和习题解以后,学生们可以选择方法,最好地适应这些直觉的状态。频繁使用的方法是给定习题,其后提供习题解,当然是一种选择。但是,至少有另一种有价值的选择——我们已经成功地使用几年的一种方法:在上课的第一天给学生提出问题并提供可用的解。然后告诉学生测验题和考试题将与这些习题紧密相关,因此学生们必定熟悉这些问题和彻底地解答它们。这一方法消除了为家庭作业评分的负担,因为在第一次提供特殊课程的家庭作业答案之后,它常常被大量的家庭作业复制。(没有什么学术活动比为家庭作业评分更浪费时间了。)这种方法还可进一步免除讲师分配计算机,代之以设计问题作为家庭作业。

在我们的练习中,提供了练习题和解的方法,以便引导在学生角色方面高度渴望地聚焦在理解上。问题的讨论和相关的概念统治了叙述的时间和学生在办公室访问期间的的时间。为了加强讲师在此方面的专心致志,我们常常在初期的测验中放一个直接从书中拿来的习题,甚至不改变其题号。

当然,使用如此一个系统,在测验和考试时,闭合书本的方法是必需的。为了进一步加强理解的重要性(而不是一个文件管理员的技术),此系统没有对学生的记忆做不正当的没有理由的要求。学生必须知道极简单的方程,一般只涉及三个或四个符号的方程。例如:学生能够真正地理解扩散流正比于浓度梯度,他们能够不费力气地写出相关的方程。对于更复杂的方程,例如连续性方程,我们在习题中叙述了必须掌握的方程。一般地我们要求学生必须理解的最复杂的方程是传输方程。

沿着上述的方向,一个进一步的例子是恰当的。在不同种类的突变结中耗尽层厚度的方程是重要的,但是它能够被工程师在工作中迅速地捡起来。我们认为记住这些方程在能量的投入上相对是无益处的。但是我们要求学生必须清楚地理解在突变结中耗尽层厚度随结两侧间电势差的平方根变化,以及为什么存在这种关系。在这一基础上提出测验理解的习题比提出记忆的习题要容易。我们已经选择了一些强调基础的复习题,而不是当前技术水平的概念题。仅仅两种主要的器件——双极结型晶体管和 MOS 场效应晶体管——在这里被谈到,因为这些器件的详尽知识使学生能够了解所有其他重要的 IC 器件。当前的器件水平是被它们的性质不断地革新的,这些变化的事实最好在工作当中学习。

内容和组织

第 1 章以新鲜方式叙述当前的电学基础,以及单位变换和问题解、玻尔模型和晶体学。

第 2 章论述平衡态和非平衡态半导体的体特性,着重于硅的论述,介绍了能带理论,解释了半导体、导体和绝缘体具有怎样的差别。紧接着的是费米能级的概念和它的应用,它与最基本的近似一起在半导体中被频繁地使用。“掺杂”的性质和结论进一步地引入到基础方程和质量作用定律、中性方程和玻耳兹曼关系。在这一章中还完成了作为分析载流子性质的载流子传输、复合和产生以及连续性方程。

第 3 章广泛地处理 PN 结问题,以及它在平衡和偏压条件下的情况;在基本的结概念被引入之后,仔细地选择一系列应用耗尽近似的例子,紧接着它被推广到突变结以外的情况。通过

一组仔细记录的取自于特殊硅二极管的试验数据,扩展了静态的理论。除了通常课本的论述之外,本章还讨论了击穿现象。

然而,只有我们的书新鲜和完整论述了 PN 结二极管的动态性质。其后它被用做论述 BJT 和 MOSFET 动态性质的基础。本章还包括突变结和半导体表面问题的一般论述。这个论述仅仅在另一本书中被发现。本章还讨论了用高-低结作为欧姆接触——能够在大量的半导体器件中找到的而被大多数的电子学教科书忽略的描述。本章给出 SPICE 数值分析的原理,在某些情况下,其描述的细节甚至超过了在 SPICE 手册中能够找到的内容。

第 4 章提供了 BJT 的基础、基本的器件理论、偏置实践、电路结构的选择,并且强调每个问题的性质。接着的是真实 BJT 的结构和特性,在 BJT 中大注入效应的详细评述。但是在大多数的课本中省略了大注入的效应,因为常规 BJT 被使用在大注入条件下,因此这种省略不能被认为是正当的。在我们的 Ebers-Moll 静态模型部分重点是其清澈性和每一步物理意义的鉴别,并且具有丰富的应用举例。BJT 的小信号动态模型由混合模型开始,涉及器件物理,通过混合 π 模型、电荷控制模型,直到优值指数。还介绍了 SPICE 模型的独特的细节,大信号、小信号及寄生的特性。本章还包括了热阻。

第 5 章论述了 MOS 电容器和 MOSFET。在初步的理论介绍和反相器的选择之后,描述在 MOS 电容器中必须被论述的大多数现象。对这些现象,在本章使用等效电路和在第 3 章介绍的一般半导体表面的分析方法进行仔细的模仿。包括了在 MOS 电容器、在结型二极管中的电容——元件的相互作用的物理和分析的论述,然后比较这两种器件中电容的性质。跟随的是 MOSFET 的高级模拟,小信号和大信号的 SPICE 处理。本章也是本书还包括了一个新的、详细考查的 MOSFET-BJT 性能比较,它是在任何其他教材中没有找到的内容。

学习的助手

在每一章课文之后紧跟着的是两个被设计的特写,用以提供对本章主题内容坚实的、定性的理解。第一个特写是尽力对本章基本要素节略的总结。第二个特写是称做“复习课”(平均每章 115 题)的一套问题,以便让学生很明确地知道是否这些关键点已经掌握,或者可能全部地未领会。在此部分提出的最基本的问题也被用于测验和考试的目的。

本书的另一个附加特写是在课文中的练习和解答。呈现在每一章的练习平均为 60 个。在这里期望这些问题能够合理地普及,进入一个活跃的读者的头脑。(我们渴望为达到这一成功的目标而获得反馈。)然而对于更积极的或有雄心的读者在简单地阅读问题并且进入解答之前能够深思这些问题,试图支持他或她自己的答案。

在我们的书中具有不同于工程教科书的一些方面。具有重要关系的空间题目在本课题的领域中是大量的,在第 1 章中的空间晶格提供了一个很好的例子。在如此的情况下,使用透视的图画,用以代替通常遇见的原始正交立方体图画。

在近些年来我们任命的代理 ABET 已经有效地和日益增长地将重点放在设计技能上,因为工程师们在工作中做比分析更多的综合工作。由于这一原因我们已经在每章的末尾除了较早讨论的分析问题外还提供了设计的习题。在类似的方面,为了类似的原因,计算机的习题也伴随着每一章,平均每章多于两个习题。在这里我们选择了需要数值处理的习题。在最后的三章,这些习题的重点是 SPICE 模型。通常,我们确定设计和计算机习题作为家庭作业。我们已经选择用 Pascal 程序解题,但是对此书的使用者选择其他的程序也是明显可用的。

最后,伴随此书的解题手册已经准备,并具有不平常的易读性和精确性。特别是单位的仔

细处理,重点强调在第 1 章中对此课题的加强。

参考文献的特点

像进入课文的材料一样,如此仔细和详尽地给出了主题索引的集合。它是不平常详尽地被做出,重要的题目被慷慨地交叉引证。当我们感觉到辛苦的因素时,有时产生委派非技术的办事人员做索引的准备。我们认为,在这里的额外投入将增强本书作为研究和参考资源的巨大价值。以一个类似的脉络,我们在参考文献上的政策是已经提供了巨大的数量,但它远小于百科全书上的列表。(假如有沙文主义的标准进入这种选择的过程,希望我们的读者能够理解。)我们相信这本书能够被用做参考书,也能被用做教材。总之,我们已经试图选择和强调最基本和不变的主题;然后我们已经寻找可能是最清楚的表述。希望这一结果将为许多未来的学生提供进入固态器件电子学的折衷训练。

致谢

我们深深地感激过去的大约 1000 名学生,他们已经使用我们的手稿作为教材,并且给出他们的评价和大量的修改。我们也十分赞赏地感谢由 Alfons Tuszynski 教授提供的长期鼓励。感谢 Ronald D. Schrimpf 教授提供的包括在练习 3-54 和图 5-48(b)中的见识。应当专门提及 Mae Warner 对出版过程每一步的无休止的检查和对手稿的大部分的计算机录入。非常地感激我们的项目编辑、具有专业化和耐心的 Mary Patton 在此作品期间的大量工作。我们也同样地感激 Becca Grulow,她完成了全部加工。也感激我们具有技能和知识的复制编辑 Andy Potter,她制造了比我们在其他地方能够获得的更平整、更清晰的结果。

我们感谢手稿的复审者,不仅是为他们主要的正反馈,也为他们省掉我们若干失误的苦恼,否则这些失误将出现在本书中。他们是 Alan Marshak(路易斯安那州立大学),Donald Willson(圣迭戈州立大学),Larry Burton(弗吉尼亚工学院),Robert Engleken(阿肯色州立大学),Hisham Massoud(杜克大学),D. K. Reinhard(密执安州立大学)和 H. P. D. Lanyon(伍斯特工学院)。

最后,我们感谢三位不可多得的编辑,他们在准备本书的四年间先后服务于该项目中。他们是 Deborah Moore, Bob Argentieri 和 Barbara Gingery。

R. M. Warner
B. L. Grung

目 录

第 1 章 现代电子学基础	1
1-1 电荷、电场和能量	1
1-1.1 电场的概念	1
1-1.2 电场中的功和能	3
1-1.3 静电势	3
1-1.4 电力线	5
1-1.5 势能和动能	7
1-2 单位制及问题的解决	9
1-2.1 单位因子	9
1-2.2 解决问题的步骤	10
1-2.3 单位与变量符号	12
1-2.4 一维问题	12
1-2.5 归一化	13
1-3 处理运动电荷及静止电荷的方程	13
1-3.1 电导率和电阻率	14
1-3.2 用电场表述的欧姆定律	15
1-3.3 介质材料、电容率和极化	15
1-3.4 电位移	18
1-3.5 位移电流	20
1-3.6 介质弛豫	21
1-3.7 泊松方程的意义	22
1-4 氢原子的玻尔模型	25
1-4.1 行星模拟	25
1-4.2 电磁辐射和量子	26
1-4.3 玻尔模型中的经典分量	28
1-4.4 玻尔假设	31
1-4.5 模型的预言	32
1-4.6 玻尔模型的改进	35
1-5 晶体学	40
1-5.1 晶格	40
1-5.2 单胞和原胞	43
1-5.3 空间晶格	44
1-5.4 相关晶格和晶体	46
1-5.5 硅晶体	49

1-5.6 原子平面和晶向	50
总结	53
参考文献	56
复习题	57
分析题	61
计算机求解题	68
设计题	70
第2章 半导体体特性	72
2-1 能带	72
2-1.1 振子类比	72
2-1.2 能带结构与原子间距的关系	74
2-1.3 与价键有关的能带	75
2-1.4 电子和空穴	76
2-1.5 能带间隙	78
2-1.6 导体	79
2-2 导体和本征硅中的电子分布	80
2-2.1 费米能级	80
2-2.2 导带中的状态密度	82
2-2.3 能带对称近似	82
2-2.4 等效态密度近似	83
2-2.5 本征载流子浓度	86
2-3 掺杂硅	87
2-3.1 施主掺杂和施主态氢原子模型	88
2-3.2 均匀掺杂	90
2-3.3 受主掺杂	92
2-3.4 杂质补偿	93
2-3.5 费米能级“计算器”	94
2-4 半导体体材料问题的分析	97
2-4.1 电中性方程	97
2-4.2 玻耳兹曼近似	98
2-4.3 质量作用定律	100
2-4.4 以静电势表示的能带图	101
2-4.5 以静电势表示的载流子浓度	102
2-4.6 玻耳兹曼关系	103
2-5 载流子输运	104
2-5.1 声子和离子引起的载流子散射	104
2-5.2 漂移速度	106
2-5.3 电导迁移率	109
2-5.4 速度饱和	111
2-5.5 电导率方程	113

2-5.6	载流子的扩散	115
2-5.7	输运方程	117
2-5.8	爱因斯坦关系式	118
2-6	载流子的复合和产生	119
2-6.1	过剩载流子	119
2-6.2	小注入复合率	123
2-6.3	与时间相关的复合	124
2-6.4	载流子寿命	125
2-6.5	复合机理	127
2-6.6	相对的和绝对的载流子浓度	131
2-7	连续性方程	133
2-7.1	恒定电场连续性输运方程	133
2-7.2	连续性方程的应用	135
2-7.3	海恩斯-肖克莱实验	138
2-7.4	表面复合速度	140
2-7.5	基于复合的欧姆接触	141
2-7.6	平衡和稳态条件的比较	142
	总结	143
	参考文献	148
	复习题	149
	分析题	152
	计算机求解题	164
	设计题	165
第3章	PN结	166
3-1	PN结的概念	166
3-1.1	PN结的空间电荷	166
3-1.2	偶极层	168
3-1.3	电场和电位分布	168
3-1.4	结的能带图	168
3-1.5	通过PN结的载流子分布	170
3-1.6	对称突变结	172
3-1.7	PN结的电流密度分布	172
3-2	耗尽近似	173
3-2.1	全部耗尽假设	173
3-2.2	电荷密度分布	174
3-2.3	电场分布	175
3-2.4	静电势分布	177
3-2.5	接触电势	177
3-2.6	非对称突变结	180
3-2.7	单边突变结	180

3-2.8	突变结的比较	183
3-3	偏置下的 PN 结	183
3-3.1	代数符号规则	184
3-3.2	反向偏置	185
3-3.3	正向偏置和玻耳兹曼准平衡	189
3-3.4	PN 结定律	191
3-4	静态分析	193
3-4.1	正向电流-电压特性	193
3-4.2	反向和全部结特性	196
3-4.3	模型和相关项的定义	198
3-4.4	分段线性模型	200
3-4.5	电荷控制模型	202
3-4.6	实际硅 PN 结的特性	204
3-4.7	大注入正向偏置	206
3-5	突变 PN 结以外的其他结	207
3-5.1	PIN 二极管	207
3-5.2	线性缓变结	208
3-5.3	扩散结	211
3-5.4	高-低结和欧姆接触	216
3-6	击穿现象	219
3-6.1	雪崩击穿	219
3-6.2	隧穿	222
3-6.3	穿通	226
3-7	突变结的近似解析模型	232
3-7.1	泊松-玻耳兹曼方程	232
3-7.2	德拜长度	234
3-7.3	泊松-玻耳兹曼方程的一次积分	236
3-7.4	泊松-玻耳兹曼方程的二次积分	239
3-7.5	耗尽近似替代	241
3-7.6	反型层和积累层	243
3-8	小信号动态分析	246
3-8.1	小信号电导	246
3-8.2	扩散电容	250
3-8.3	耗尽层电容	253
3-8.4	PN 结电容的交叠	258
3-8.5	共存现象和多种时间常数	258
3-8.6	小信号等效电路模型	263
3-8.7	有效寿命和扩散电容	270
3-8.8	小信号电荷控制分析	271
3-8.9	线性微分方程	272

3-9	高级动态分析	273
3-9.1	分析技术概述	274
3-9.2	基于器件物理的电荷控制分析	275
3-9.3	基于电路行为的电荷控制分析	279
3-9.4	基于器件物理的严格分析	287
3-9.5	基于电路行为的严格分析	296
3-9.6	SPICE 分析	300
3-9.7	数值分析举例	302
	总结	311
	参考文献	319
	复习题	323
	分析题	325
	计算机求解题	340
	设计题	342
第 4 章	双极结型晶体管	344
4-1	BJT 的基础	344
4-1.1	结构和术语	344
4-1.2	偏置和端电流	346
4-1.3	载流子的分布	347
4-1.4	典型的器件尺寸和掺杂浓度	349
4-1.5	一维电子电流	351
4-2	基本的器件理论	353
4-2.1	内部的电流分布	353
4-2.2	寄生的内部电流	356
4-2.3	共发射极电流增益	357
4-2.4	电流增益的机理	359
4-3	偏置和 BJT 的使用	360
4-3.1	基本的偏置电路	361
4-3.2	静态等效电路模型	363
4-3.3	基本的 BJT 放大器	364
4-3.4	饱和	366
4-3.5	其他的工作方式	369
4-3.6	其他的电路结构	374
4-4	真实 BJT 的结构和性质	377
4-4.1	电势	378
4-4.2	非均匀的基区掺杂	380
4-4.3	根摩尔数	384
4-4.4	击穿电压	386
4-4.5	输出电导	391
4-4.6	结构的变化	393

4-4.7	正向和反向电流增益	397
4-5	大注入效应	400
4-5.1	Rittner 效应	400
4-5.2	Webster 效应	401
4-5.3	双极性效应	403
4-5.4	Kirk 效应和准饱和	407
4-5.5	基区的横向电压降	410
4-5.6	大注入效应的综合	411
4-5.7	一般掺杂基区的大注入分析	412
4-6	Ebers-Moll 静态模型	417
4-6.1	Gummel-Poon 的革新	417
4-6.2	假设和问题的限定	418
4-6.3	传输型方程	419
4-6.4	原始型方程	423
4-6.5	方程的应用	426
4-6.6	等效电路模型	428
4-7	小信号动态模型	430
4-7.1	低频混合模型	431
4-7.2	混合模型和器件物理	434
4-7.3	BJT 的跨导	437
4-7.4	混合 π 模型和其他模型	438
4-7.5	模型精度的改善	444
4-7.6	电荷控制模型	445
4-7.7	基区充电时间	450
4-7.8	优值指数	455
4-8	SPICE 模型	456
4-8.1	模型方程	457
4-8.2	串联电阻效应	459
4-8.3	厄利(Early)效应	459
4-8.4	大电流效应	459
4-8.5	非理想二极管效应	461
4-8.6	电容效应	462
4-8.7	小信号分析举例	463
4-8.8	大信号分析举例	468
4-8.9	热阻	472
总结	.....	475
参考文献	.....	484
复习题	.....	488
分析题	.....	491
计算机求解题	.....	505