

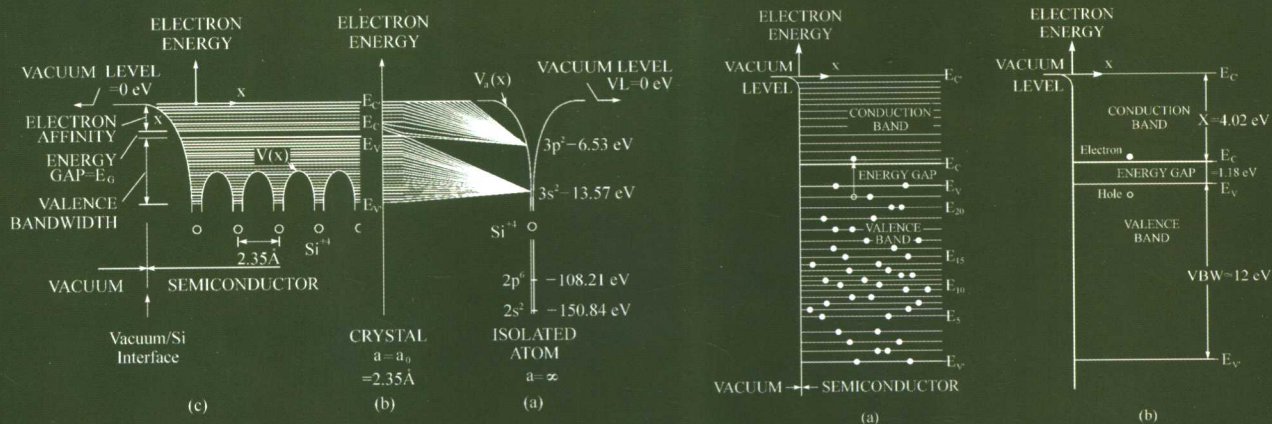
# 固态电子学基础

FUNDAMENTALS OF SOLID-STATE ELECTRONICS

[美籍华裔科学家] 薩支唐 (Chih-Tang Sah) 著

阮刚 汤庭鳌 章倩苓 包宗明 译

阮刚 总校



復旦大學出版社

(新加坡) 世界科技出版公司

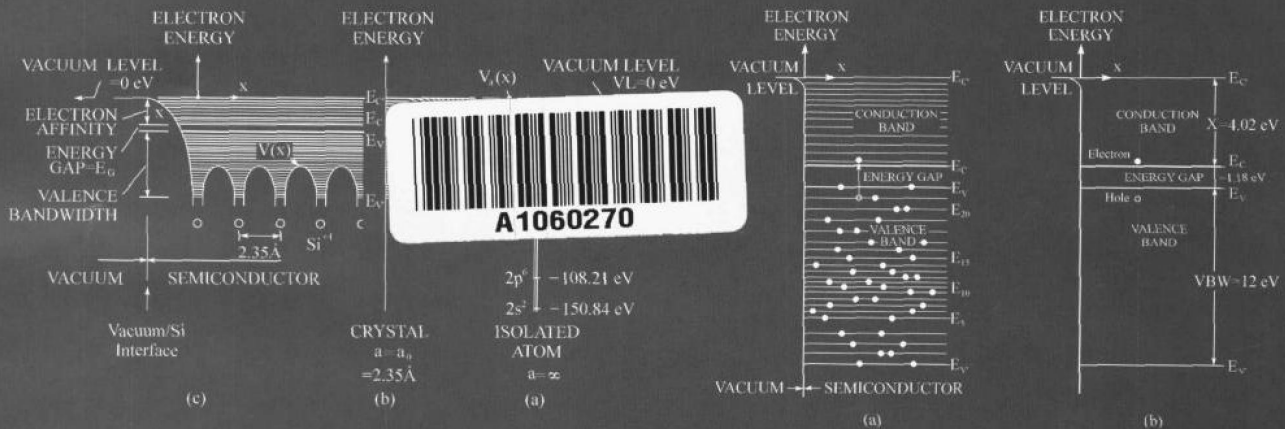
# 固态电子学基础

FUNDAMENTALS OF SOLID-STATE ELECTRONICS

[美籍华裔科学家] 薩支唐 (Chih-Tang Sah) 著

阮刚 汤庭鳌 章倩苓 包宗明 译

阮刚 总校



復旦大學出版社

(新加坡) 世界科技出版公司

## 图书在版编目(CIP)数据

固态电子学基础/[美]薩支唐著;阮刚等译. —上海:  
复旦大学出版社, 2003. 4

书名原文: Fundamentals of Solid-State Electronics

ISBN 7-309-03544-5

I. 固… II. ①薩…②阮… III. 半导体集成电路-  
基础理论 IV. TN43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 009234 号

本书中文版得到世界科技出版公司的授权

Copyright © 1991 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

## 固态电子学基础

[美籍华裔科学家] 薩支唐 著

---

出版发行 復旦大學出版社

上海市国权路 579 号 200433

86-21-65118853(发行部) 86-21-65109143(邮购)

fupnet@fudanpress.com <http://www.fudanpress.com>

---

责任编辑 龚少明 邸明

装帧设计 周进

总编辑 高若海

出品人 贺圣遂

---

印刷 江苏丹阳教育印刷厂

开本 787×1092 1/16

印张 40.5 插页 5

字数 1066 千

版次 2003 年 4 月第一版 2003 年 4 月第一次印刷

印数 1—2 000

---

书号 ISBN 7-309-03544-5/O·303

定价 68.00 元

---

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

## 内 容 简 介

《固态电子学基础》一书曾在 Florida 大学用了 6 个学期,这也作为向电子工程三年级约 300 名学生讲授固态器件核心课程的教科书。物理、科学及其他工程系的大学生及研究生也参加了这门课程的学习。本书分三部分:(1) 3 章电子材料物理及 4 章器件(MOSC, p/n-m/s-欧姆二极管, MOST-FETs, BJT-HBJTs 及 SCRs), 每章包含:(2) 历史、制作、物理特性及电路模型,以及(3) 基本模块电路。其中每章第二部分中的扩展内容可选作第二门课程,并可在材料及器件物理基础、器件模型及复杂集成电路的基本模块电路(B<sup>3</sup>C)方面作为做实际工作的工程师及管理人士的参考书。例如:先进的器件物理(消离化及重掺杂效应、亚阈值电流、高场迁移率、MOSC、p/n 和 m/s 结的反向电容及电流瞬变、欧姆接触……)、最新的(1990—1991)器件概念(异质结 MOSFET 及异质结 BJT……)、可靠性机制(沟道热电子注入、Fowler-Mordheim 隧穿、带间热空穴产生和注入、p 型硅栅 1.2 eV 比 n 型硅栅的欠可靠……),以及 B<sup>3</sup>C(BiC-MOS, CBiCMOS, DRAM, SRAM, UV-EPROM, flash-EEPROM 及 FRAM)。本书从大一学生的化学及大二学生的物理基础(Newton, Coulomb, Planck 及 de Broglie 定律)出发给出了器件物理所需的基本概念(电子及空穴、价键及能带模型、平衡及非平衡态、统计分布、漂移与扩散、产生-复合-俘获及隧穿)。本书还给出了如亚微米硅 MOSFET 及硅 BJT 等最先进的器件的物理意义及数值说明。近 100 种经精选及评论的中高等水平的参考书以及约 500 道习题均可用以扩展本书范围外的学习。

## 原作者的中文版序

本书英文版自 1991 年初版至今已有 12 年了。硅半导体集成电路的生产从 12 年前使用 500~1000 nm 工艺已进展到目前的 130 nm 工艺,且不久将达 100 nm。为探求电子学在各方面的新应用,特别在便携式电子产品方面,半导体制造技术正面临由模拟电路功能渗透到数字电路之中,以及将通信和计算机系统集成在一个芯片上。这些进展恢复了曾被放弃的双极型晶体管的需求,填补了 20 年来起支配作用的 MOS 晶体管的不足;并要求用掺 Ge 的 Si 来制备晶体管以提高用纯粹 Si 制得的晶体管的速率。

制造半导体晶体管器件的这些进展并未改变其基本物理、基本特性及可靠性,只是改进了某些细节。因此,为了满足近两年(2000—2002 年)刚开始建立的快速发展的中国半导体芯片和电子整机厂中工程师们的大量需要,也为了众多的将投身于迅猛发展的中国微电子及信息技术产业的大学本科生及研究生们的需要,现在是出版本书中文版的一个特别适合的时机。

本书是 1998 年我到厦门大学和复旦大学访问期间,由复旦大学阮刚教授建议翻译的,我非常高兴在阮刚教授的领导和直接参与下,四位平均年龄约 65 岁的复旦大学资深教授在繁忙的科研、教学任务之中担任了本书的翻译工作。我要特别感谢复旦大学的谢希德教授对这项翻译工作的鼓励和支持。我们都非常遗憾,在她永远离开我们之前,未能见到本书中文版的正式出版。本书的中文版是奉献给她的,不仅因为她对翻译本书的鼓励和支持,而且为她对中国的半导体科学、教育和工业发展的贡献;特别是她同北京大学黄昆教授等十多位教师在 1956—1958 年期间为集中培养近 300 名从中国几所优秀大学选送的学生所做的贡献,这些受训过的当时的青年人,已成为当今中国半导体科学、教育和工业发展的主要领导力量。

薩支唐(Chih-Tang Sah)

2002 年 11 月 11 日

Gainesville, Florida, U.S.A.

(本文由阮刚教授译自原作者提供的英文稿)

## 中文版出版者的话

《固态电子学基础》一书是在谢希德院士的推动和组织下,才进入中文版的翻译和出版日程的。她在病重住院期间,一面吩咐译者抓紧进度,一面忙于筹措经费,在病床上给有关单位写信,介绍这本书:

此书是一本非常好的本科生、研究生和有关人员的参考书。作者在该领域做了很多开拓性工作,是一位国际知名的华裔科学家。本书的早日出版,对培养我国这方面的人才定能做出更大的贡献。

谢希德仙逝之后,阮刚、汤庭鳌、章倩苓、包宗明四位教授,牢记谢先生的嘱托,在百忙中挤时间,笔耕不止。同时,他们还为落实出版资金而奔走忙碌,这也是出版中文版的先决条件之一。

本书出版过程中得到了复旦大学微电子学系的大力支持,值此出版之机,表示衷心的感谢。

考虑到本书的读者对象是高年级大学生和研究生及相关专业技术人员,本书在制作中文版过程中,全盘复制了世界科技出版公司的英文版的图表、文献,图表中的英文术语除第1、第2两章有术语的英汉对照外,各章均未译成中文,正文中的物理符号一概保留原书的正体风格,计量单位也采用原书的表述。这虽然不符合国内的出版惯例,但对我们来说,却又是一种多快好省的办法,因此请读者和出版管理部门谅解。

愿以此书作为对谢希德院士的永久纪念。

复旦大学出版社

2002.12.15

11/17/2002

## 译者序

迄今为止,阐述固态电子学、半导体电子学或半导体物理及半导体器件物理基础的、并且适用于大学本科生和研究生或有关工程技术人员作为教科书和参考书(包括英文的、中文的)的并不算少,但我们(阮刚、汤庭鳌、章倩苓、包宗明)四位教授愿意在繁忙的教学和科研工作中抽时间将美籍华裔科学家萨支唐教授(Professor Chih-Tang Sah)的《Fundamentals of Solid-State Electronics》一书翻译出版,这是因为本书有同类书籍难以相比的以下特点:

1. 本书有特别详尽的固态电子学发展历史的叙述;
2. 本书有特别系统和独到的固态电子材料、集成电路中所用的电子器件和典型的模块集成电路基本物理和基本特性的描述;
3. 本书既有原理的深入的定性描述,又有必要的、难得的实例定量分析;
4. 本书文献齐全,有些文献还加上确切的、有特色的评注;
5. 本书各章所附习题,对读者理解及活用本书内容一定很有帮助。

本书的这些特点充分反映了作者的治学经历、科研成就和教学经验。他目前是美国工程科学院院士,中国科学院外籍院士,美国 Florida 大学资深教授。

我们也相信本书将对我国正在从事和将投身于微电子、信息技术及应用物理领域的科技、教育、企业界人士提高固态电子学的水平和能力会有较大的帮助。

本书翻译的分工是:阮刚(序言、目录、第6章以及附录等),汤庭鳌(第3章大部分及第4、5章),章倩苓(第7章),包宗明(第1、2章及第3章小部分),全书由阮刚总校。

由于译校者水平有限,差错难以避免,敬请读者批评指正

译者

2002年12月16日于复旦大学

## 为纪念我的良师益友

John Bardeen

William Shockley

Karl R. Spangenberg

William L. Everitt

Adam Pen-Tung Sah

本书专为纪念我在上面所列的良师益友和父亲。正是他们使我进入真空管和固态电子学领域。在中国读完小学和中学后,送我在 Illinois 读完大学本科,指导我在 Stanford 做行波管方面的博士论文,提供我第一份工作并教我固态电子学和半导体物理的基础,并使我开始了 30 年之久的教学生涯。本书还献给 Gordon E. Moore 并作为对 Robert N. Noyce 的怀念。他们是我在 Schockley 半导体实验室的最初的合作研究者,后来他们又提供机会,使我进入并管理和领导了在仙童半导体实验室(Fairchild Semiconductor Laboratory)开发第一代硅集成电路的工业研究与制造。我还得感谢从 Illinois 荣誉退休的电子工程系系主任 Edward C. Jordan 及已故的 John Bardeen 的帮助,由于他们的力荐使我于 1961 年从 Palo Alto 回到 Urbana。在 Illinois 荣誉退休的工程学院院长 Daniel C. Drucker 以及 Jordan 对我的科学事业给予了支持。本书还奉献给当今及未来的固态电子学方面的师生,期望本书有益于他们应对提高质量的挑战并能透彻地领悟此领域的基础。

本书的完成有赖于 Robert C. Pittman 对 Florida 大学的捐助,使得此大学的前任校长 Marshall M. Criser, Provost Robert A. Bryan, 工程学院院长 Wayne H. Chen, 电气工程系系主任 Robert L. Sullivan 以及搜寻调查组主席 Fredrik A. Lindholm 能说服我加入到 Florida 大学,并使得他们的继任人工程学院院长 Winfred M. Phillips 和电子工程系系主任 Martin A. Uman 支持我的教学与研究兴趣并取得成功。特别感谢 Fred Tsang 对第 7 章硅二极管和电路的详细建议, Jack Yuan-Chen 对第 7 小节中关于  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  HBJT 的评注, Toshikazu Nishida 对第 6 章关于 MOS 晶体管的校阅, Arnost Neugroschel 对全部原稿的校阅以及 Nishida, Neugroschel 和 Fredrik A. Lindholm 通过两年中五个学期在 Florida 器件核心课程里使用本书草稿对近  $2^8$  位三年级学生进行教学的经验的反馈。Scott E. Thompson 和 Jack T. Karalieros 1989 年秋季在本书第一次用于对  $2^6$  电子工程三年级学生的教学时担任研究生教学助理。Thompson, Yi Lu 及 Mickeal K. Han 在复合动力学与 MOS 界面陷阱方面所提的问题,改进了本书有关章节。感谢 Phui-Hong Tham 小姐(新泽西州)以前的两年多的邀请和 Kok-Khoo Phua 博士(主编及主席),后者为教学目的的高质量低成本运作导致我将本书在世界科技出版公司(World Scientific)出版以及 Tham 小姐在伦敦时安排的 Tony Moore 先生的帮助。还要对 Barbara Aman 夫人(于新加坡)全身心编辑努力表示特别的感谢。最后,向 Linda Chang Sah 长达  $2^5$  年对我应写一本书的不懈的提醒以及 Linda, Dinah 和 Robert 长期的支持给予致谢。

薩支唐(Chih-Tang Sah)

1991 年 7 月 4 日

Gainesville, Florida



## 序 言

### 历史和动机

研究生程度的晶体管电子学的教学始于 1952 年春季在 Urbana-Champaign 的 Illinois 大学由 John Bardeen 开设的一门两系共同的课程 EE-Physics 435, Conduction of Electricity in Solids(《固体中电的传导》), 本书作者当时作为一个高年级学生旁听了这门课程。用 Shockley 的书[199.1]作教科书。Karl R. Spangenberg 1954 年在 Stanford 为高年级研究生开设了一门电子器件方面的课程, 包括真空管和晶体管两方面, 用他的书 Fundamentals of Electron Devices(《电子器件基础》)作教材, 本书作者曾是该书的读者。1955 年从 Bell Telephone Laboratories(贝尔电话实验室)加入 Stanford 后, John G. Livill 开设了一门关于晶体管电路的研究生课程, 使用他的书和 James F. Gibbons 的 Transistors and Active Circuits(《晶体管和有源电路》)。这本书十多年来一直用于大学电气工程本科生晶体管器件和电路的教学。1960 年秋季由 Ford 基金资助的半导体教育委员会(SEEC)成立, 着手开发教学资料, 通过将 18 个教授和 13 个工业界的工程师组织在一起, 由 MIT 教授 Campbell L. Searle 做主席及 Richard B. Adlex 做技术指导, 并利用来自 MIT 及其他学校的学生去检验这些资料。1964 年出版了七卷教科书系列[750.1]—[750.7], 内容覆盖了材料物理、器件物理——理论—模型以及模拟—数字电路, 仅描述双极结型晶体管。这些系列书除正在全世界范围使用外, 随后引论性的三年级学生用的器件和电路教科书则由几位 SEEC 教授在以后五年中写就, 例如: Stanford 的 James F. Gibbons 的 Semiconductor Electronics (1962—1964)[《半导体电子学》(1962—1964)]; Berkeley 的 Donald O. Pederson, Jack J. Studer 及 John R. Whinnery 的 Introduction to Electronic System, Circuits and Devices (1964—1966)[《电子系统、电路和器件引论》(1964—1966)]; MIT 的 Paul E. Gray and Campbell L. Searle 的 Electronic Principles, Physics, Models and Circuits (1969)[《电子学的原理、物理、模型和电路》(1969)]。这十本书, 都集中于双极结型晶体管, 其质量及深度完全根据 20 世纪 60 年代期间大学本科生能理解的半导体器件的基础来设置。

始于 20 世纪 70 年代初, 由第三代年轻的教师所写的其他引论性的教科书, 包含了新的半导体器件, 例如: 场效应晶体管、发光二极管、结型莱塞、光二极管、阳光电池以及光晶体管。然而, 其基本质量和深度没有达到 SEEC 丛书的水准。当时, 起主导作用的电子工程系(例如 MIT 的)在器件核心课程的教科书的选择上采用混合方法, 在增补新内容的同时, 老的三年级用的教科书则改用由工业界的工程师们所写的器件和工艺方面的中级和高级的书及专题著作, 例如 S. M. Sze 的简明的 Physics of Semiconductor Devices(《半导体器件物理》)以及 A. S. Grove 的概要的 Physics and Technology of Semicnductor Devices(《半导体器件的物理和工艺》), 但是大多数电子工程系(例如 Illinois 的)则单独使用新书, 使二十多年(1970—1990)来美国大学本科毕业的电气工程师们得到作为设计者和技术员的最好的教育, 他们精通的是使用已学过的现成的知识, 即使不缺乏想像力也不是具有创新精神和能力的工程师和科学家, 这种不充分的基础教育使他们在研究生院中同外国学生的竞争以及在价廉物美的市场上同外国制造商的竞争中难以处于优势。

前十年, 固态电子学教师对所需的新的固态电子学引论性的三年级的教科书有着共识: 它

应包含新器件,但仍以基础为主,其基础需等于或超过 SEEC 系列。

本书的构想始于 1980 年秋季,当时我在 Urbana, Edward W. Ernst(后来的副系主任)请我为大学本科三年级学生教一门半导体器件方面的引论性的核心课程。选用 MIT SEEC 系列最基础的两册,在材料物理和 MOS 晶体管方面补充了约 100 页我自己的笔记。这班学生优越的质量(25 个学生中有 20 个的成绩超过 4.5,有的为 5)以及 Illinois 大学一年级学生的化学和二年级学生的普通和近代物理课程的基础的扎实,有助于我确认所有电气工程大学本科生应理解的必要基础。这个试验提供的最初成功表明:任何教师只要他愿意付出时间去进修,再学习或使他(她)们的大学一年级的化学及大学二年级的物理的基础知识现代化,则使用包含材料物理、器件物理、器件理论和基本电路的现代化的固态电子学教科书是完全可能的。

没有想到,本书的成长始于 1989 年 1 月在 Florida,当时同事们请我为电子工程系秋季和春季半导体器件方面的核心课程推荐一本合适的教科书。我的回答是:我将修改 1980 年的讲课笔记,但由于我不清楚如何才能用这些材料进行教学,决定边修改边为学生授课。几个未来的讲课者也参加了这项工作。

为了恰到好处地将有关材料在一个学期内讲完,利用了最新的教学辅助设施替代了传统的粉笔和黑板。在秋季学期前三个月,用了一台个人的 Micro VAX-2 家用计算机以及 MASS-11 科学字符处理器将 100 页扩展到 500 页打字稿。七章(见目录)500 页课文约在各章开始上课前的一个星期,分发给 60 个注册的学生,这样,学生们能在听课前阅读到这些材料。

用透明膜片替代黑板。每次讲课前准备好透明膜片(整个学期为 200 张),讲课开始前发给学生。这样,学生们能集中精力听课,无需为抄黑板而分心。

讲课及透明膜片的内容同课文偏离极小,这样,学生们在家中能复习听课时没有听到的或没有记得的内容。讲课时着重讲基本内容,例如:技术的理解以及材料或器件现象的解释,需要时可通过有关的计算,使用一组在一年级化学及二年级物理学中已学过的基本定律和概念(Newton, Coulomb, Planck, de Broglie)以及演绎出的关系或概念(电子——对链合、能级、Boltzmann、Fermi);而不是讲授电路分析的传统方法,这种方法通过密集数值操作,目的是为了了解问题的速率而不注意数值的物理意义(物理学),其解析结果的结论也仅是在忙碌的数值操作后得出的随机的数值,很易被忘却。

由基本定律推出的原子和晶体模型及晶体中的电子传导,由扩散和产生复合方程得出的二极管方程以及源自二极管方程的晶体管方程将作为拟出的例子在课文中描述。在讲课中补充的物理说明和有工程意义的数值结果,作为附加拟出的例子。强调数值结果的物理意义,为了记住它,以便往后用作评估器件效应,例如:一个元胞中,或每立方微米 100GHz BJT 的基区层中,或 16 兆位 DRAM 中 0.5 微米 MOS 晶体管的深亚微米尺寸的电导沟道中有多少个电子,以及由极少量电子引起的起伏数及对噪声容限限制的原因。

在教这门课中,我进行了若干改革,最初不仅在学生中也在随后不久成为参与者的同事中引起了忧虑。首先,给学生一张表格,表格中列出一年级化学和二年级物理教科书的页数(表 141.1)叫学生回顾基本定律及其实验基础,这些在讲课中仅作简短描述。这与教学中已证明的技巧是一致的:如果先前的学习已忘记,就不能很好地及有效率地学好一种语言或一门学科。新知识是建立在先前的知识上的,这是如 W. L. Everitt(参见 Communication Engineering 1937 年第二版 V 页 9—10 行), F. E. Ternan(参见 Electronic and Radio Engineering 1955 年或较早的 1937, 1947 年版本 VI 页 1—2 行), A. P. T. Sah(参见 Fundamentals of Alternating-Current Machines, 1946 年版, VIII 页 17—19 行)及其他一些知名的资深作者和教育家的信念,也如发明家 John

Bardeen, 在每一次对公众为数众多的询问及对记者的会见中回答他如何成功地获得二次 Nobel 奖所遵循的道路时所表述的。

其次,鼓励学生们的结组学习,但他们必须用他们自己的话给出家庭作业的解答,由于有少数,即使任何硅集成电路项目(或甚至任何近代的工程项目),能由一个工程师完成,他们还是认为已开始的结组的学习方法很好:项目成功同组内成员间的合作密切相关。此外,如果学习者在团、组中得到如正反馈那样的促进,学习过程则更有效率更富有效果。(最近成功的实情见 Thomas A. Stewart 在 FORTUNE, 40—49, Augustin, 1991 上发表的文章 GE KEEPS THOSE IDEAS COMING, 这里的例子给出一个公司完全成功的极重要的依据,不仅同人与人间的团队有关,而且扩展到同部门间的团队、制造和原料供给者间的团队以及最终产品与产品间的团队相关。)

再次,所有考试都是带回家开卷做的!测试学生们对基本内容的理解比记忆能力及不懂物理意义的数字操作处理速率更重要。当今哪项工程开发或改进项目是依赖工程师的记忆力的?此外,对青年人的正直和诚实必须有更多的信赖。电气工程本科生通常是精英,是严肃认真的学生。他们不像仅仅是为得到高收入职业的学位和成绩的探求者,他们需要学习基础和基本原理来推进将来他们一生从事的专业。

尽管如此,显示已学过的及将学习的内容之间的关联去引导学生是教师的职责。在美国的电气工程教育中,不努力去显示同一年级化学及二年级物理学的关联是普遍的,过去 30 年物理电子学的引论性的和高等的教科书中,在大多数的前言和内容中表现得很明显。这是‘建筑在先前知识’的缺乏,或甚至更糟,某些研究生论文的导师以及本科生的教师大多来自工程科学的“经验主义”及“秘方主义”,拒绝经实践的先前的基本知识,这就严重地降低了美国电气工程教育的质量。这是一个很坏的循环,较年轻的(以及某些较年长的)教授不曾且不能从他(她)的从未复习和再学习基本原理的以前的教授那里学得很精通。这样,在电子学以及其他以物理学——或化学为基础的工程科学方面的现在的教授,必须开始再学习他们的一年级学生学的化学及二年级学生学的物理学,以便我们能走出这个在电子学方面不断降低基本知识质量的很坏的循环。

后来本书加倍到 1000 页,当我决定在每章中加一些中级水平的材料时,出现了‘本书篇幅太多……’的异议(要感谢 World Scientific 出版社,增加篇幅但不提高价格)。下面我将给出这些原因,以对此异议作出反应:(1)为了使读者在器件和材料物理方面能直接接触研究生教科书以及研究和工程文献;(2)为了作为一座桥梁进入后续水平的电路课程,通过引入基本构造的单元电路(1 个晶体管的 RC 放大器,1 个晶体管的存储单元,2 个晶体管的倒相器,2 个晶体管的存储器等),通常这些内容放在下续的晶体管和集成电路课的第一部分;(3)为第二学期器件课提供足够材料。目的(3)没全部达到,由于作者为本书的工作时间有限,于是就缺了描述光电子或光探测及产生的器件原理的第 8 章。(这些器件包括光导、光伏、光电及光发射和成像器件。这已计划在第二版中附加。)

这些中高级材料包含在一卷中的主要优点在于陈述的连续,符号和术语的一贯以及基本物理的一致。作者在 Urbana 的 25 年经验表明:在为半导体和固态物理的一门高等研究生课程准备材料时以及和他的物理学博士生进行理论半导体物理研究时,提出或呈现引论性的及中高级的材料,可以基础物理为基础并使用原本是高级研究生课程中用的相同的数学技术,但要定位在三年级学生用他们先前的一年级化学和二年级物理学基础能理解的水准上。因而,传统上用作理想化的基本例子的模型,在物理电子、晶体管以及甚至固态物理学的引论性的书

中,拒绝需要使用多页代数(例如计算电子态密度的盒模型, Krönig-Penney 周期势将是一个好的例子,如果它是 Fourier 分析而不是精确解,因为后者的结果是朦胧不明的,它遮掩了基础等。)它们被抛弃,不仅因为它们的代数的复杂性(学生们记不住结果,或许连教授们也记不住)而且因为他们对真实晶体的错误的印象,作为替代,提出了利用基本数学及物理学的实际固体的一维结果,它定位于具有一年级化学二年级物理学、微积分学及一些基本微分方程基础的三年级学生易于理解的水平上(例如,周期边界条件,简单的 Fourier 展开式,紧束缚原子轨道展开式,用 Bloch 理论模拟调幅无线电波等)。这样,为三年级学生用于这本引论书中的起点与用于高级研究生固态和半导体物理课及研究和工程文献的起点完全相同。结论是,这个方法有一个超过传统方法的奇特的、重要的教育上的优点:学生不需要丢弃任何由传统教学形成的错误的概念和乏味的技巧。此外,教学生最基本的基础而不是中间的结果(原因—效果或原因—结果而不是效果—效果或结果—结果的相互关联)以便他们能定性地理解及定量地解任何未来的新问题,从最基本的物理及电气工程的法则和概念出发,甚至可以达到有名的物理学家解决问题的熟练或精通程度。

## 结构

本书包含七章,章、节的详细内容在目录中给出。开头三章提供材料物理的基础以及为包括固态/半导体基本法则的应用所做出的例子。例如,用 Coulomb 及 Plank 法则描述 Bohr 原子,所提出的它的应用包括:一维能级和二维轨道图以及为电子—声子互作用的跃迁—能量图;在 Bohr 原子中由 2-d 电子分布的电子对键合模型以及固体中空穴和电子的键合概念;通过将许多 Bohr 原子集合在一起导致晶体内部周期势的形成以及晶体的电子亲合性,在晶体的表面或真空/固体界面(界面也作为固体/固体界面引入),例如 p/n,金属/半导体及金属/氧化物/半导体界面。其他例子是:总体及部分平衡概念以及它们的每天物理现实;电子漂移和扩散现象的描述通过一个统计的扩展,它将为很少散射的真空中电子运动得到的经典 Newtonian 解用于固体中,以给出测得的晶体管参数,这些参数是半导体中对随机散射事件的时间和系综的平均;时间和系综平均的制造模拟;以及基于经典的能量和动量守恒或交换定律,通过产生一复合—俘获和隧穿的半导体中电子和空穴的基本的产生和消失机制。

接下去的四章描述二极管和晶体管。以下描述的顺序是对所有器件的:历史(发明,动机和目的),制造(制造工序的流程图,工艺过程的化学—物理和理论,以及工艺过程动力学数据),器件(理论、模型:直流,小信号交流,大信号瞬变),B<sup>3</sup>C(Basic-Building-Block Circuits 的首字母缩写,基本积木式电路:小信号,开关,逻辑,存储),参考文献(具有章节的评注和选择)以及习题(通过节的号码同节相联)。选择大量生产和广泛使用的器件,从第 4 章的 MOS 电容开始,由于它是描述和分析的最简单的器件,且它的结构在所有半导体器件和集成电路中出现频率最高,因而是 BSEE(基础半导体教育)需首先处理的。p/n, m/s(金属/半导体)以及欧姆结在第 5 章中描述分析。MOS 场效应晶体管(MOSFET)先于第 7 章的双极结型晶体管(BJT)在第 6 章中描述,由于从 1980 年起在集成电路和应用中(例如个人计算机、摄像机、电视机、立体声装置、汽车和其他应用以及工业电子学)MOSFET 已置换了 BJT,且由于 MOSFET 在概念上和数学上都比 BJT 简单。关于描述 BJT 的第 7 章,它最长(约占全书的 30%),由于 BJT 理论在已有的教科书和参考书中全然没有被足够及正确地处理,以及由于使用 BJT 的重要性,例如在 Bi-CMOS 和 CBiCMOS 倒相器电路中作为输出驱动器以增加 MOSFET 的速率以及最后是由于 Si-VLSI-工艺—兼容的皮秒( $10^{-12}$ 秒)BJT 工艺的再度兴起,因为近来 IBM 在 Ge 外延膜成比例地、匹

配地生长在 Si 衬底上的技术取得了突破, Si/Ge<sub>x</sub>Si<sub>1-x</sub>/Si BJT 已经给出, 它在基区, 接近 100GHz, 甚至不用最佳化晶体管结构和锗及掺杂剂杂质也具有较窄的能隙分布。

## 教育方法

请特别关注符号的选择及它们的上标和下标。基本规则是:(1)必须一眼就能看出在物理上是否是新的或已见过的;(2)表示特征的上标和下标数限于两个, 如果它由于一个子—分类而超过两个则再用短划分开或用框的改变来区分;(3)基本参数用希腊字母( $\mu, \tau$ )表示, 而应用参数( $D_n, L_B$ )和电路变数 [ $v_{BE}(t), V_{cb}, V_{EB} \dots$ ] 由英文字母表示; 以及(4)IEEE 符号标准和它们的上标和下标依旧被采用。

对术语的选择也特别关注。使用符号依据相同的法则选择: 术语和首字母缩略字必须一看便知其物理含义, 并能判断谁先谁后。如果合宜, 可遵从传统应用, 一般, 这种选择是可能的, 因为大多数固态/半导体和晶体管术语是由先驱物理学家 (Bardeen, Shockley, Slater 以及先前的英国和德国物理学家) 所创造, 在选择时, 他们通过基于物理的仔细思考作了选择。避免使用混乱物理的语义上错误的字, 例如, RCA 频繁使用的术语 ‘bandgap’ 独特地用作能量间隙 (energy-gap) 始于 1970 年代中, 但 Bell 实验室不用这个术语直至最近 (见 1991) (IEEE Field Awards 的引证, 见 SPECTRUM 的八月号上) 而不使用对语, energy-band 和 energy-gap。一个相似的使用为二端网络的  $\omega$ - $\beta$  图所使用的对语频率 pass-band 以及频率 stop-band, 曾把难推广的含糊的 ‘pass-stop’ 用作频率 stop-band。幸而在行业中没有许多滥用。在评估学生们的家庭作业和试题的解答中强调了用语义上正确的科学术语的重要性。

本书用数字标记节的格式是新颖的。传统上应用多样的十进位点表示子节, 而次—子节是不用的, 由于在讲课时的发音难以被清楚地理解, 同时如果使用多于一个点时, 看起来也易混淆。(它不满足 ‘一瞄’ ‘一字’ 的准则。) 在若干试验后, CXY 成为最后的选择, C = 章的数字编号, X = 第一层次或子—类别的数字编号, 而 Y = 第二层次或次—子节类别的数字编号, X = 0 及/或 Y = 0, 限于用在章的引言节及子节, 包括历史和动机及目的。方程用 (123·4A) 方式编号, 这里 123 是节的编号而 4A 是第 4 个方程 (4B 将是同第 4 个有密切关系的第 5 个方程)。图用 123.4(a), (b), …… 编号。

本书的 ‘前提知识’ 的合乎逻辑的流图如下。1 学期 3 学分引论课的大概范围包括所有 1—3 章, 除进一步的后面几节以外, 将用 5 到 6 周, 15 到 18 学时讲完。余下的 8—9 周或 24—27 学时学 4—7 章, 包括历史和制造, 开始若干节有关每种器件 (直流, 交流和开关) 的分析以及 B<sup>3</sup>C 所选例子。每章末尾的节 n99 (n = 1 到 7) 中, 给出广博的参考文献 (大约 100 种参考文献或 90 本书被反复引证)。若干文献的列出为了历史原因, 但其他所有被选择的是考虑在内容方面的某些唯一性, 以方便学生通过自学高升到下一个水平以及直接提高到高年级或研究生课的水平。为进一步自学, 在每本列出的书中给出了有关章节的描述。给出了大约 500 个习题。它们出现在每章的末尾, 通过编号去跟踪每一节 (例如, P136.5 是 136 节的第 5 道习题)。大多数习题的设计, 为了扩展理论和基础, 而不是提供数值操练, 如果为了某些原因的需要, 后者很容易由教师补充编选, 给出了少数评论性的习题, 目的在于练习学生的解析推导或数值分析技能, 通过用—不同组的参数而不是那些在教科书中已给出的 (例如用空穴, 当—组为电子的参数已在教科书中给出的情况)。也包括一些 (十分少数) 不实际的习题, 虽然这是浪费学生的学习时间, 但受到缺乏实际经验的教科书作者和教师的喜爱。这些习题被包括而不是抛弃, 为了引起缺乏实践的学生们注意, 这也是做这种选择的基本理由。

一年级化学, 二年级普通物理 和原子物理 及微分方程→ 学生们有责任 复习他们的 先前的知识	半导体材料物理 1,2,3章→ 5—6周 除最后几节以外	器件特征和模型 4,5,6,7章→ 历史 制造 直流 交流 开关	B <sup>3</sup> C 基本的积木式 电路 4,5,6,7章→ 交流 开关 * 倒相器 * 存储器	接下去的高等 课程 在以下方面 电路 器件 材料 物理
--	---------------------------------------	--	---	---

本书中晶体管器件理论的整个发展和推导及电路应用基于四个基本法则,这些法则学生们已在一年级化学和二年级物理学中学习过,它们是 Newton 的机械力定律, Coulomb 的静电力定律, Plank 的能量—频率量子化条件以及 de Broglie 动量—波长假设。Pauli 的不相容原理和 1/2 电子自旋应用于分析量子态的统计占有,但仅是陈述,不用数学,作为由于相对论的自旋轨道力在重原子和晶体中附加能级分裂的原因。不讨论小的磁性或 Lorentz 力以及 Ampere 定律(能从 Coulomb 定律推导,用移动坐标系,使用特殊相对论),也不需要去理解所有低频(高至波导频率)器件的特征,因为磁性的器件在本书中不描述。Heisenberg 的测不准原理用于定性证明某些现象,例如能带宽度。推导中需要的数学仅仅是 Fourier 级数展开式。2×2 矩阵的对角化以及 Laplace 变换已能解决,没有把这些知识作为先前必备的知识,虽然,学生们很可能在同时选修的课程中正在学习有关内容。

## 后记

简言之,固态电子学这一学科是较容易的、较有系统的,同时是实际的,即使不全是实际的,比起那些已经教过的,如:一年级化学(~100 元素,几百种化合物,可能是 100 个经验规律要记住,而固态电子学:一个元素 Si 或两个元素, GeSi 或 GaAs,加上约三个或四个杂质元素以及四个基本法则);二年级普通和原子物理(多得多的例子去解释几百种实验现象,而固态电子学:仅两种输运现象,扩散和漂移,以及约 12 到 15 种基本的电子—空穴产生—复合—俘获过程来自 4 种能量和 3 种动量交换机构,呈现在一个简单的 4×3 表格中),以及二年级微分方程(比本书多得多的理论和大量例子)。由一些教授和学生出发的、作为三年级学生的第一门课程,本书内容太困难和太先进的主张及抱怨可以被扼要地否定:他们需要去复习他们先前学过的知识:一年级化学和二年级物理学,这是较复杂和困难的。第一次教这些材料(或任何材料)对任何一个教师来说都是艰难的工作,包括作者自己,由同事作出的实践证明,他们已成功地教了这些材料,尽管某些人是双极型晶体管研究了二十年的资深研究员。但振兴美国电气工程教育,通过教基础而不是结果—结果或结论—结论的老教法是教授们的职责。这也是美国工程系和学院管理者的责任,提供支持以帮助成功地教本课程以及所有核心课程,包括研究生助教,他们已经学习过这些材料以及在研究中用这些材料(1950 年代有过一次实践),给新的教职员时间,为了第一次教这一学科或用一本新书,为三年级学生的教职员成员的小范围讨论提供询问部门及实验室。通常,因预算限制仅配备本科生助教,他们只能勉强地担任这门课程,在研究、应用或更进一步提高的课程方面没有经验,而这些更进一步的课程是帮助新教师的极重要的基础。

作者用一台专用的 Micro VAX-2(由 Digital Equipment Corporation 制造)及 MASS-11 科学字处理器(由 Microsystem Engineering Corporation 制造)。作者也手工绘制了所有的图,除少数几张

由出版者重画以使坐标网络线更清晰外。在准备照相页被送到印刷商之前,这一手工的努力中包括最近材料及校正无误。不管本书不同部分已经过许多编辑的校订,排字、印刷上的错误也是难以避免的,因而我欢迎来自教师和学生两方面的评注和告知,不仅在内容上、陈述上还是学习和教学经验上,也包括任何剩下的排字、印刷上的错误。



**阮刚**，教授，博士生导师。  
1955年毕业于复旦大学物理系。1956-1958年参加创办我国第一个半导体专业，1960年初研制成功我国第一批锗固体电路。长期从事半导体器件工艺、物理、模型和模拟的教学和研究工作，已合作编译出版专著4本，发表论文近200篇。近年来兼任德国Chemnitz技术大学顾问教授及德国Fraunhofer微集成研究所高级科技顾问。



**汤庭璋**，教授，博士生导师。  
1961年毕业于复旦大学物理系。现任复旦大学微电子学研究所所长，微电子学系学术委员会主任。中国电子学会学术工作委员会委员、高级会员；《中国半导体》、《半导体技术》、《微电子技术》编委；《微型电脑应用》理事。主要从事半导体器件模型及集成铁电技术的研究，合作出版专著1本、译著2本，发表论文90余篇；主编国际会议论文集4集。





**章倩苓**（女），教授，博士生导师。1960年毕业于复旦大学物理系。曾任复旦大学电子工程系首席教授，副系主任；ASIC和系统国家重点实验室主任。长期从事集成电路设计和研制的教学及研究工作，曾获科技进步奖多项，已合作出版专著2本，译著1本，发表论文近100篇。



**包宗明**，复旦大学微电子学系教授。1956年毕业于复旦大学物理系。曾获得国家科技进步二等奖1项，国家教委、电子工业部、上海市科技进步二等奖6项，合作编写的学术著作有《半导体物理实验》、《抗辐射电子学——辐射效应及加固原理》、《同步辐射应用概论》、《现代科学技术概论》等。是中国电子学会高级会员。

责任编辑 龚少明  
邵明  
装帧设计 周进