中国加拿大高等教育项目资助　材料科学翻译丛书

固体电子器件

（第五版）

[美] BEN G. STREETMAN
SANJAY BANERJEE 著

杨建红　译

兰州大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容提要

本书是关于固体电子器件的教学用书。全书共分 11 章，第 1 章至第 4 章是关于半导体物理的内容，第 5 章至第 11 章是关于各种电子器件（包括集成电路）工作原理和制造工艺方面的内容。第 5 章至第 11 章分别介绍了 p-n 结（包括金属－半导体结）、双极结型晶体管（BJT 和 HBT）、场效应晶体管（JFET、MESFET、MOSFET）、光电子器件、负电导微波器件、以及功率器件的工作原理。第 5 章的一部分和第 9 章的全部对现代器件和集成电路的制造技术也作了概略性的介绍。本书的内容全面，繁简适中，基本上涵盖了 20 世纪末器件发展的最新理论和技术成果。各章后面均附有习题和参考读物。适合于微电子学专业和电子科学与技术专业高年级本科生教学使用，也可供微电子领域的从业人员和有关科技工作者参考。

译者序

本书是受加拿大国际开发署资助、通过兰州大学和加拿大 Manitoba 大学之间开展的“面向 21 世纪高等教育发展战略”研究项目而引进的国外教材。作为本科生的教材，从学习效果和教学质量的要求来看，将英文原版翻译成中文版是适宜的，对帮助学生理解很有益处。再者，从我国高校微电子学专业目前所用的教材来看，由于理、工科的教学内容和侧重点不同，可选的教材比较少。译者希望本书的引进和翻译能为微电子学专业的师生提供一本适合教学的、内容较为全面的教材。这是译者选择引进本教材的初衷。

本书的英文原版是德克萨斯大学（奥斯汀）电子与计算机工程系微电子研究中心的 Ben G. Streetman 教授和 Sanjay Banerjee 教授编写的，于 2000 年由 Prentice Hall 出版（第五版）。正如作者指出的那样，它是一本面向本科生的教科书。Ben G. Streetman 教授长期从事半导体材料与器件的教学和科学研究工作，他编写的本书内容覆盖面广、繁简适中，基本上反映了 20 世纪末电子器件发展的最新理论和技术成果。各章后面均配有适当数量的习题、列举了一定数量的参考读物，正文中配有大量的插图，书后也给出了若干附录以方便读者查阅。总之，译者认为本书同样适合于我国高校微电子学专业或相近专业高年级本科生教学使用。实际上，美国多所著名大学也在使用本书的英文原版作为教材或参考书。

由于本书的内容涉及面广，并配有大量的插图，加之英文表达习惯和中文有所不同，所以本书的翻译工作十分繁杂。译者在翻译过程中，力求保持英文版的原意，在此基础上尽量做到正确和准确。但是，译者对某些可能影响读者理解的地方，还是作了些小的改动；对表达不够完善的地方，则作了适当补充。译者与原书作者进行过必要的沟通和商讨，并参考了原书作者提供的勘误表，对不正确或错误的地方作了更正。另外，在某些需要增加注释的地方，则以“译者注”的形式增加了注释。总的说来，翻译时所作的改动是非常少的，基本上完整地反映了原作的思想。

本书的翻译和出版得到了项目组领导和其它许多同志的热情关心和支持。译者感谢兰州大学李发伸教授、贺德衍教授、薛德胜教授和 Manitoba 大学 G. Williams 教授、周学智先生给予的支持和有益建议。兰州大学微电子研究所的研究生汪再兴、聂政、詹晖等同学对部分插图的绘制和文字的录入等工作提供了帮助，在此一并表示感谢。

译文中的不当或错误之处，敬请广大师生和读者不吝指正。

杨建红

2005 年 5 月于兰州大学

英文版序

本书的适用对象是电子工程专业、微电子学专业的本科生，也可供对固体电子器件感兴趣的学生和科技工作者作为参考读本。本书的主要内容是固体电子器件的工作原理，同时对许多新型器件和制造技术也有所介绍。该书在内容安排上力求使那些具有物理背景知识的高年级学生对专业知识有更为深入的理解，从而使他们能够阅读关于新器件及其应用的参考文献。

课程目的

在我来看，对本科生开设的电子器件课程有两个基本目的：一是让学生对现有器件有一个透彻的理解，这样才能充分体现对电子线路和电子系统课程学习的意义；二是培养学生分析器件的基本方法，使他们能够有效地掌握新型器件。从长远的观点来看，第二个目的可能会更重要些，因为从事电子学领域工作的人员在其工作中需要不断地学习和掌握新器件和新工艺。基于这样的考虑，我曾尝试把半导体材料和固体导电机理两方面的基本知识融合到一起；特别是在介绍新器件时更是如此。这些观念在指导性课程讲授中常常被忽略掉了。比如，有一种观点认为没有必要在本课的讲授中去详细介绍有关半导体 p-n 结和晶体管的基本知识，但我认为：培养学生的一个重要目的，就是要让学生能够通过阅读最新的、专业性很强的相关文献来理解一种新器件，而上述观点却忽视了这一点。所以，本书介绍了大多数常用的半导体术语和概念，并将它们与器件的各种性质联系起来阐述器件物理问题。

参考读物

为培养学生独立学习的能力，我在每章的参考读物列表中，给出了可供学生阅读的若干文章。某些文章选自科普期刊，比如《科学美国人》（Scientific American）和《今日物理》（Physics Today）等。还有些文章选自课本和专业刊物，对相关内容作了更为详细的阐述。一般来说，学生阅读这些文章并不困难。我不期望学生读遍列表中的所有文章，但鼓励他们尽可能多地阅读一些有关文章，以便为以后的工作打好基础。

课后习题

学好本课的关键之一是多做课后习题，以便加深理解并透彻掌握基本概念。每章的后面都给有一定量的习题，其中有一小部分是“附加”题，用以扩展或深化每章的内容。

物理量的单位

本书对物理量采用的单位是半导体领域的常用单位。一般情况下均采用 MKS 单位制，但有时采用厘米作长度单位更方便，这在例题和习题中已给出了不少实例。出于同样的原因，本书中能量的单位更多地采用的是电子伏特（eV）而不是焦耳（J）。附录 I 和附录 II 分别列出了某些物理量的常用符号及其单位。

内容安排

在给本科生讲授这门课程时，有时可能会使用“可以证明……”这样的术语来直接引用

某些更高级或更复杂的内容，但往往收不到应有的效果。为避免这种情况过多出现，可以根据需要把课程的某些内容拖后、留待研究生阶段学习，因为那时就可以把统计力学、量子理论以及其它高级知识轻易地穿插进来。虽然这样做可以使课程讲授起来容易一些，但同时也使学生失去了探索某些器件问题的乐趣。

本书的内容包括硅和化合物半导体器件，特别是对化合物半导体在光电子和高速器件应用方面日益增长的重要性作了适度的介绍。某些内容，比如异质结、三元和四元合金的晶格匹配、带隙随杂质组分的变化、以及量子阱的共振隧穿等，拓宽了讨论的范围。但是，在讲授时不要太过强调化合物半导体的应用，硅基器件照样有显著的进展；这些进展在场效应晶体管结构和硅基集成电路的讨论中得到了具体的反映。我们不可能介绍所有的、最新的器件，那是专业刊物和国际会议论文所关注的事；我们只对那些有代表性和说明性的器件加以介绍。

本书前四章阐述半导体性质和固体导电理论，其中第二章对量子概念作了简单介绍，这是为那些尚不具备这方面基础知识的学生而准备的。第五章和第六章阐述半导体 p-n 结及其某些应用。第七章和第八章则是关于晶体管的作用原理的，第九章介绍了这些原理在集成电路中的应用。第十章到十二章则把 p-n 结理论和导电理论应用到激光器、开关器件、以及微波器件中去。书中介绍的所有器件在当今电子学中都很重要。对这些器件的学习将是充满乐趣、富有收获的；我希望本书能让读者有这样一种体验。

致谢

那些使用过本书前四版的学生和教师提出的意见和建议使第五版受益匪浅；正是他们宝贵的、无私的意见，促成了第四版的修改和第五版的出版。我们向前四版序言中提到的那些人深表感谢，他们对本书的贡献巨大；特别地，Nick Holonyak 在五个版本的完成和出版过程中一直是我们的精神动力和信息源泉。我们还要感谢德克萨斯大学（奥斯汀）的同事们给我们提供的特别的帮助，他们是：Joe Campbell，Ray Chen，Dennis Deppe，Russ Dupuis，Archie Holmes, Dim-Lee Kwong，Jack Lee，Christine Maziar，Dean Neikirk 和 Al Tasch。Kay Shores 和 Qingyou Lu 对本书文稿的录入工作提供了有益的帮助。谨向那些为本书慷慨提供器件和工艺照片以及插图的公司和机构表示感谢，特别值得提及的是：Motorola 公司的 Kobi Benzvi 和 Pradipto Mukherjee，Micron 公司的 Shubneesh Batra 和 Mary Miller，以及 IBM 公司的 Tom Way。最后，我们想说的是，我们珍视并感谢 Greg Stillman 与我们多年的交往，他既是我们的好同事，又是一位难得的朋友。

Ben G. Streetman
Sanjay Banerjee

需要全本请访问 www.ertongbook.com

作者简介

Ben G. Streetman 是德克萨斯大学（The University of Taxes at Austin）工程学院院长，并担任 Dula D.Cockrell Centennial 工程部主席。他曾在 1984~1996 年期间担任德克萨斯大学微电子研究中心主任一职；目前是电子与计算机工程系教授，从事半导体材料与器件的教学和科研工作。1966 年从德克萨斯大学获得博士学位后，在伊利诺斯大学（The University of Illinois at Urbana-Champaign）任教，直到 1982 年重返德克萨斯大学。他曾获得的荣誉主要有：1989 年电子电气工程师协会（IEEE）颁发的教育勋章；1981 年美国工程教育协会（ASEE）颁发的 Frederick Emmons Terman 奖章，以及化合物半导体国际会议颁发的 Heinrich Welker 奖章。他是国家工程院院士，同时也是 IEEE 和电化学协会会员。曾荣膺德克萨斯大学奥斯汀分校优秀学生和工程学院优秀研究生称号。因在电子工程教学方面成绩斐然，曾被授予 General Dynamics Award 奖；他的本科生的教学工作受到广泛赞誉。他曾在工业界、政府的许多专门小组和委员会中担任重要职务。他发表的论文有 270 多篇；在他的指导下，先后有 33 名来自电子工程、材料、物理等学科的学生获得了博士学位。

Sanjay Kumar Banerjee 现任德克萨斯大学（The University of Taxes at Austin）电子与计算机工程系教授、微电子研究中心主任。同时也是工程一系责任教授（Cullen Trust Endowed Professorship）和监事会主席团成员（Fellow of Cockrell Family Regent's Chair）。他的研究领域包括硅基异质结构器件、器件模拟和超大规模集成电路技术。1979 年从印度理工学院（Indian Institute of Technology Kharagpur）获得电子工程学士学位，并分别于 1981 年和 1983 年从伊利诺斯大学（The University of Illinois at Urbana-Champaign）获得电子工程硕士和博士学位。1983~1987 年他曾在德克萨斯仪器公司（Texas Instruments）多晶硅晶体管的有关工作，并参与开发了世界上第一块 4M DRAM 中所采用的动态随机存储单元，为此于 1986 年 IEEE 固态电路国际会议上获得了最佳论文奖。他还于 1988 年获得了国家科学基金青年探索者奖，1991 年因教学优秀而获得了工程基金顾问委员会 Halliburton 奖，1990~1997 年获得德克萨斯 Atomic Energy Centennial 会员资格。他发表的技术论文超过 225 篇，在学术会议上发表过 200 多次演讲，拥有 12 项美国专利。截至目前，他已指导过 18 名博士生和 35 名硕士生。1996 年成为 IEEE 会员，1997 年成为 IEEE 电子器件协会杰出讲师（Distinguished National Lecturer）。

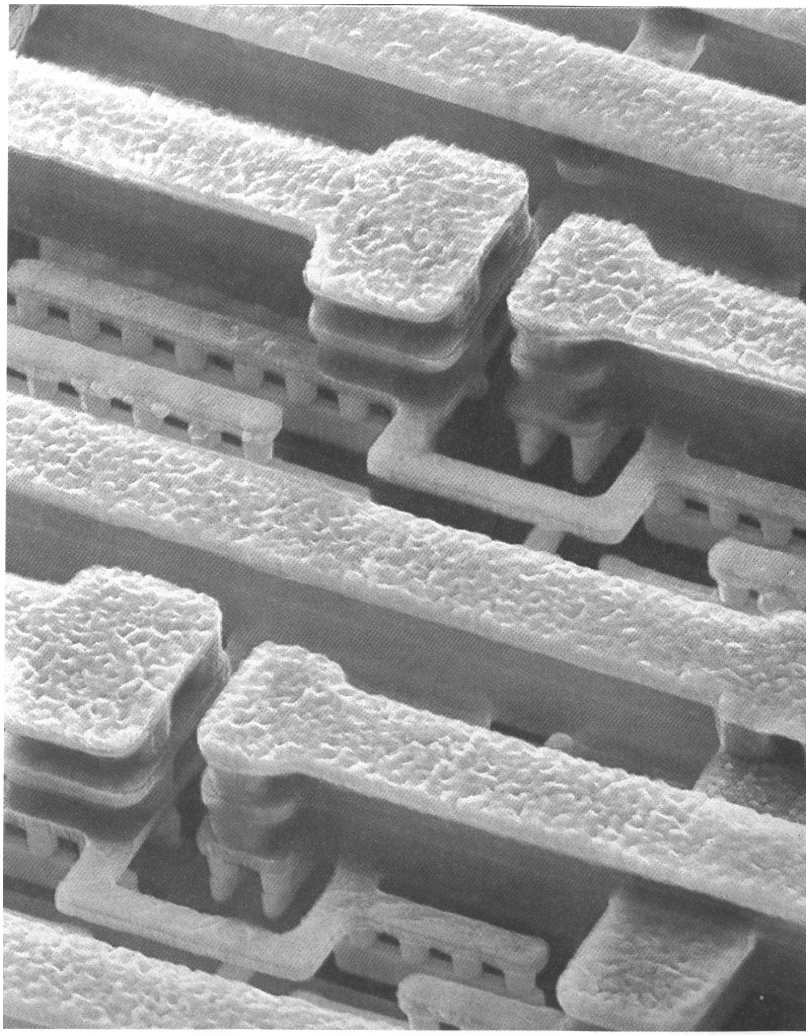
---

* 简介中的相关数据均采用了原书出版时（2000 年）的数据。下页同时给出了英文原版关于作者介绍的原文，如对译文有任何疑问，请参阅英文原文，并以原文为准。—译者注。

About the Authors

Ben G. Streetman is Dean of the College of Engineering at The University of Texas at Austin and holds the Dula D.Cockrell Centennial Chair in Engineering. He is a Professor of Electrical and Computer Engineering and was the founding Director of the Microelectronics Research Center (1984-96). His teaching and research interests involve semiconductor materials and devices. After receiving a Ph.D. from The University of Texas at Austin (1966) he was on the faculty (1966-1982) of the University of Illinois at Urbana-Champaign. He returned to The University of Texas at Austin in 1982. His honors include the Education Medal of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), the Frederick Emmons Terman Medal of the American Society for Engineering Education (ASEE), and the Heinrich Welker Medal from the International Conference on Compound Semiconductors. He is a member of the National Academy of Engineering. He has been honored as a Distinguished Alumnus of The University of Texas at Austin and as a Distinguished Graduate of the UT College of Engineering. He has received the General Dynamics Award for Excellence in Engineering Teaching, and was honored by the Parents' Association as a Teaching Fellow for outstanding teaching of undergraduates. He has served on numerous panels and committees in industry and government, and several corporate boards. He has published more than 270 articles in the technical literature. Thirty-three students of Electrical Engineering, Materials Science, and Physics have received their Ph.D.s under his direction.

Sanjay Kumar Banerjee is Professor of Electrical and Computer Engineering, and Director of the Microelectronics Research Center at The University of Texas at Austin, where he currently holds the Cullen Trust Endowed Professorship in Engineering No.1 as well as being a Fellow of the Cockrell Family Regent's Chair. His research interests include silicon-based heterostructure devices, device modeling and ultra-large-scale IC technology. He received his B.Tech from the Indian Institute of Technology, Kharagpur, and his M.S and Ph.D. from the University of Illinois at Urbana-Champaign in 1979,1981 and 1983,respectively, all in electrical engineering. At Texas Instruments from 1983-1987, he worked on polysilicon transistors and dynamic random access memory cells used in the world's first 4Megabit DRAM, for which he was the co-recipient of the Best Paper Award at the 1986 IEEE International Solid State Circuits Conference. His honors include the NSF Presidential Young investigator Award (1988), Engineering Foundation Advisory Council Halliburton Award (1991) for teaching excellence, and the Texas Atomic Energy Centennial Fellowship (1990-1997). He has more than 225 archival referred publications, has presented over 200 talks at conferences, and has 12 U.S. patents. He has supervised 18 Ph.D. and 35 MS students. He is a Distinguished National Lecturer for the IEEE Electron Devices Society (1997-), and Fellow of the IEEE (1996).



这是一张 CMOS 集成电路芯片的多层金属（Cu）互连线的扫描电子显微镜（SEM）照片，从中可清楚地看到有 6 层互连线。互连线之间的隔离介质已被腐蚀掉。（照片由 IBM 公司惠赠。）

图书在版编目 (CIP) 数据

固体电子器件／(加) 斯特里特曼 (Streetman，B. G.) 著 杨建红译 . —兰州 :兰州大学出版社，2005.4

ISBN 7-311-02564-8

Ⅰ.**固**... Ⅱ.①**斯**...②**杨**... Ⅲ. **电子器件—高等学校—教材** Ⅳ.TN103

中国版本图书馆 CIP **数据核字 (**2005**) 第** 037719 **号**

固体电子器件 (第五版)

Ben G. Streetman **著**
Sanjay Banerjee

杨建红 译

兰州大学出版社出版发行

兰州市天水南路 222 **号 电话 :**8912613 **邮编 :**730000

E-mail :press@onbook.com.cn

http ://www.onbook.com.cn

兰州大学出版社激光照排中心照排

兰州残联福利印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 **印张 :**27

2005 **年** 5 **月第** 1 **版** 2005 **年** 5 **月第** 1 **次印刷**

字数 :680 **千字** **印数 :**1～1000 **册**

ISBN7-311-02564-8/T.154 **定价 :**40.50 **元**

目　　录

第 1 章　晶体性质和半导体生长

1.1 半导体生长 1
1.2 晶格 2
1.2.1 周期结构 3
1.2.2 立方晶格 4
1.2.3 晶面与晶向 5
1.2.4 金刚石晶格 7
1.3 块状晶体生长 9
1.3.1 原材料的制备 10
1.3.2 单晶的生长 10
1.3.3 晶片加工 11
1.3.4 晶体掺杂 12
1.4 薄层晶体的外延生长 13
1.4.1 外延生长的晶格匹配 14
1.4.2 汽相外延 16
1.4.3 分子束外延 18
习题 18
参考读物 20

第 2 章　原子和电子

2.1 关于物理模型 21
2.2 重要实验及其结果 22
2.2.1 光电效应 22
2.2.2 原子光谱 23
2.3 玻尔模型 24
2.4 量子力学基础知识 27
2.4.1 几率和不确定性原理 27
2.4.2 薛定谔波动方程 28
2.4.3 势阱问题 30
2.4.4 量子隧穿 31
2.5 原子结构和元素周期表 32
2.5.1 氢原子 32
2.5.2 元素周期表 35
习题 38
参考读物 39

第 3 章　半导体的能带和载流子

3.1 固体结合性质与能带 41
3.1.1 固体的结合性质 41
3.1.2 能带 42
3.1.3 金属、半导体和绝缘体 45
3.1.4 直接禁带半导体和间接禁带半导体 46
3.1.5 能带结构随合金组分的变化 47
3.2 半导体中的载流子 49
3.2.1 电子和空穴 49
3.2.2 有效质量 52
3.2.3 本征半导体 54
3.2.4 非本征半导体 56
3.2.5 量子阱中的电子和空穴 58

3.3 载流子浓度 59
3.3.1 费米能级 59
3.3.2 平衡态电子和空穴浓度 61
3.3.3 载流子浓度对温度的依赖关系 65
3.3.4 杂质补偿和空间电荷中性 67
3.4 载流子在电场和磁场中的运动 68
3.4.1 电导率和迁移率 68
3.4.2 电阻率 72
3.4.3 迁移率对温度和掺杂浓度的依赖关系 73
3.4.4 高场效应 74
3.4.5 霍尔效应 75
3.5 平衡态费米能级的不变性 77
习题 78
参考读物 80

第 4 章 半导体中的过剩载流子

4.1 半导体对光的吸收特性 82
4.2 半导体发光 84
4.2.1 光致发光 85
4.2.2 电致发光 87
4.3 载流子寿命和光电导 87
4.3.1 电子和空穴的直接复合 87
4.3.2 间接复合；载流子俘获 89
4.3.3 稳态载流子浓度；准费米能级 92
4.3.4 光电导 94
4.4 载流子在半导体中的扩散 95
4.4.1 扩散机制 95
4.4.2 载流子的扩散和漂移；自建电场 97
4.4.3 扩散和复合；连续性方程 100
4.4.4 稳态注入；扩散长度 101
4.4.5 海恩斯－肖克莱（Haynes － Shockley）实验 103
4.4.6 准费米能级的空间梯度 106
习题 106
参考读物 108

第 5 章 半导体 p-n 结和金属－半导体结

5.1 p-n 结的制造 110
5.1.1 热氧化 110
5.1.2 扩散 111
5.1.3 快速热处理 113
5.1.4 离子注入 114
5.1.5 化学汽相沉积 116
5.1.6 光刻 117
5.1.7 腐蚀（刻蚀） 120
5.1.8 金属化 121
5.2 平衡态 p-n 结 121
5.2.1 接触电势 123
5.2.2 平衡态费米能级 126
5.2.3 结的空间电荷 127
5.3 结的正偏和反偏；稳态条件 130
5.3.1 结电流的定性分析 130
5.3.2 载流子的注入 134
5.3.3 反向偏置 140
5.4 反向击穿 141
5.4.1 齐纳击穿 142
5.4.2 雪崩击穿 143
5.4.3 整流二极管 145
5.4.4 击穿二极管 147
5.5 瞬态特性和交流特性 148
5.5.1 存贮电荷的瞬态变化 148
5.5.2 反向恢复过程 152
5.5.3 开关二极管 154

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.5.4 p-n 结电容 154
5.5.5 变容二极管 160
5.6 对二极管简单理论的修正 161
5.6.1 接触电势对载流子注入的影响 161
5.6.2 空间电荷区内载流子的产生和复合 163
5.6.3 欧姆损耗 165
5.6.4 缓变结 167
5.7 金属－半导体结 168
5.7.1 肖特基势垒 168
5.7.2 整流接触 169
5.7.3 欧姆接触 171
5.7.4 典型的肖特基势垒 173
5.8 异质结 174
习题 177
参考读物 183

第 6 章 场效应晶体管

6.1 场效应晶体管的工作原理 185
6.1.1 晶体管的负载线 185
6.1.2 放大和开关作用 186
6.2 结型场效应晶体管 186
6.2.1 夹断和饱和 187
6.2.2 栅的控制作用 188
6.2.3 电流－电压特性 190
6.3 金属－半导体场效应晶体管 192
6.3.1 GaAs 金属-半导体场效应晶体管 192
6.3.2 高电子迁移率晶体管 193
6.3.3 短沟效应 194
6.4 金属－绝缘体－半导体场效应晶体管 195
6.4.1 MOSFET 的基本工作原理 195
6.4.2 理想 MOS 结构的性质 199
6.4.3 真实表面的影响 208
6.4.4 阈值电压 210
6.4.5 电容-电压特性分析 211
6.4.6 瞬态电容测量（*C-t* 测量） 214
6.4.7 氧化层的电流－电压特性 215
6.5 MOS 场效应晶体管 216
6.5.1 输出特性 217
6.5.2 转移特性 219
6.5.3 迁移率模型 220
6.5.4 短沟 MOSFET 的 *I-V* 特性 222
6.5.5 阈值电压的控制 223
6.5.6 衬底偏置效应 227
6.5.7 亚阈区特性 229
6.5.8 MOSFET 的等效电路 230
6.5.9 按比例缩小；热电子效应 232
6.5.10 漏致势垒降低 234
6.5.11 短沟效应和窄沟效应 236
6.5.12 栅诱导泄漏电流 238
习题 239
参考读物 242

第 7 章 双极结型晶体管

7.1 BJT 的基本工作原理 244
7.2 BJT 的放大作用 247
7.3 BJT 的制造工艺简介 251
7.4 少数载流子分布；器件的端电流 251
7.4.1 扩散方程对基区的求解 252
7.4.2 端电流分析 254
7.4.3 端电流的近似表达式 256
7.4.4 电流传输系数 257
7.5 BJT 的偏置状态和工作模式 258
7.5.1 BJT 的耦合二极管模型 259

7.5.2 电荷控制分析 262
7.6 BJT 的开关特性 264
7.6.1 截止 265
7.6.2 饱和 266
7.6.3 开关周期 266
7.6.4 开关晶体管的主要参数 267
7.7 某些重要的物理效应 268
7.7.1 载流子在基区的漂移 268
7.7.2 基区变窄效应 270
7.7.3 雪崩击穿 271
7.7.4 小注入和大注入；热效应 272
7.7.5 基区串连电阻，发射极电流集边效应 272
7.7.6 BJT 的古默尔－庞（Gummel －Poon）模型 274
7.7.7 Kirk 效应 277
7.8 晶体管的频率限制因素 279
7.8.1 结电容和充电时间 279
7.8.2 渡越时间效应 281
7.8.3 Webster 效应 282
7.8.4 高频晶体管 282
7.9 异质结双极晶体管 283
习题 285
参考读物 288

第 8 章 光电子器件

8.1 光电二极管 290
8.1.1 半导体结对光照的响应 290
8.1.2 太阳能电池 292
8.1.3 光探测器 295
8.1.4 光探测器的噪声和带宽 297
8.2 发光二极管 299
8.2.1 发光材料 299
8.2.2 通信光纤 301
8.2.3 多层膜异质结发光二极管 302
8.3 激光器 303
8.4 半导体激光器 306
8.4.1 粒子数反转 307
8.4.2 p-n 结激光器的发射光谱 309
8.4.3 半导体激光器的基本制造步骤 310
8.4.4 半导体异质结激光器 311
8.4.5 半导体激光器所用的材料 313
习题 314
参考读物 316

第 9 章 半导体集成电路

9.1 集成电路的基本知识 318
9.1.1 集成化的优点 318
9.1.2 集成电路的分类 319
9.1.3 单片电路和混合电路 319
9.2 集成电路的发展历程 321
9.3 单片集成电路元件及其制造 322
9.3.1 CMOS 工艺集成 323
9.3.2 SOI 结构 331
9.3.3 其它电路元件的集成 333
9.4 电荷转移器件 336
9.4.1 MOS 电容中的动态效应 337
9.4.2 CCD 的基本结构及其工作原理 338
9.4.3 对基本结构的改进 338
9.4.4 CCD 的应用 340
9.5 特大规模集成电路 340
9.5.1 逻辑器件 342
9.5.2 半导体存储器 349
9.6 测试、压焊和封装 358
9.6.1 测试 358
9.6.2 引线压焊 359

9.6.3 倒装片焊接技术 362
9.6.4 封装 364
习题 365
参考读物 366

第 10 章 负电导微波器件

10.1 隧道二极管 367
10.1.1 简并半导体 367
10.1.2 隧道二极管 367
10.1.3 在电路中的应用 370
10.2 碰撞雪崩渡越时间二极管（IMPATT） 370
10.3 Gunn 二极管 373
10.3.1 电子转移机制 373
10.3.2 空间电荷畴的形成及其在电场中的运动 375
10.3.3 Gunn 二极管的制造 377
习题 378
参考读物 379

第 11 章 功率半导体器件

11.1 p-n-p-n 二极管 381
11.1.1 基本结构 381
11.1.2 双晶体管模型 382
11.1.3 电流传输系数的改变 383
11.1.4 正向阻断态 383
11.1.5 正向导通态 384
11.1.6 触发机制 385
11.2 半导体可控整流器 386
11.2.1 栅极及其控制作用 386
11.2.2 SCR 的关断 387
11.2.3 双向开关器件 388
11.2.4 SCR 的制造及应用 388
11.3 绝缘栅双极晶体管 389
习题 392
参考读物 392

附 录

附录I 本书所用符号的定义 393
附录II 物理常量和换算因子 397
附录III 某些半导体材料的性质（300K） 398
附录IV 导带态密度的推导 399
附录V 费米-狄拉克分布的推导 402
附录VI 在 Si(100)面干氧和湿氧生长的氧化层厚度与氧化时间和温度的关系 404
附录VII 某些杂质在 Si 中的固溶度 405
附录VIII 某些杂质在 Si 和 SiO_2 中的扩散系数 406
附录IX Si 中离子注入的射程及射程偏差随注入能量的变化关系 407
索引 408
重要公式 412

第 1 章　晶体性质和半导体生长

我们在研究固体电子器件时主要关心的是固体的电学行为。从后面几章我们将看到，金属或半导体中的电荷输运不仅依赖于电子的性质，而且也与原子排列有关。这一章我们讨论半导体区别于其它固体的物理性质、各种材料的原子排列、以及半导体晶体的生长方法。已经有许多教科书对晶体结构与晶体生长技术作了专门讨论；本书作为导论性质的课程教材，只对半导体性质和器件制造技术的基本概念和主要方面加以介绍。

1.1　半导体材料

半导体的导电性介于金属和绝缘体之间，它们的电导率随着温度、激发源的强度、杂质浓度等因素的改变可以发生很大程度的改变（可在几个数量级范围内变化）。正是基于这种性质，半导体材料才成为电子器件材料的自然选择。

在周期表的 IV 族元素及其附近可以找到半导体材料，典型的半导体材料见表 1-1。IV 族元素的原子组成的半导体，如 Si 和 Ge，因为只含有一种原子，故称名为元素半导体。另外，III 族和 V 族元素的化合物以及 II 族和 VI 族元素的化合物也是常用的半导体材料，称为金属间半导体或化合物半导体。

表 1-1 所示的半导体材料具有各不相同的电学和光学性质，这为器件的设计、制造和应用带来很大的灵活性。在半导体器件的发展初期，首先使用的是元素半导体 Ge 用以制造二极管和三极管，现在正广泛应用的整流器件、晶体管、以及集成电路则主要使用元素半导体 Si 材料，某些高速器件和光电子器件则使用化合物半导体材料。二元化合物半导体如 GaAs 和 GaP 被广泛用作发光二极管（LED）的材料。在 1.2.4 节还可看到，三元化合物半导体（如 GaAsP）和四元化合物半导体（如 InGaAsP）在材料性质和器件特性的控制方面具有更多的灵活性，因此也有非常重要的应用。

电视屏幕的荧光材料通常是 II-VI 族化合物半导体材料，如 ZnS。其它 II-VI 族半导体如 InSb、CdSe、PbTe、以及 HgCdTe 则常用于制作光探测器。Si 和 Ge 广泛用于红外探测器和辐射探测器中。某些重要的微波器件，如 Gunn 器件（见 10.3 节），常用 GaAs 或 InP 材料制作。半导体激光器则使用 GaAs、AlGaAs、以及其它三元或四元化合物半导体材料。

半导体区别于金属和绝缘体的重要特征之一是禁带宽度。半导体的禁带宽度决定了半导体的许多性质；比如，纯净半导体对光的吸收特性以及半导体发光的波长就是由其禁带宽度决定的（见第 3 章的有关说明）。例如，GaAs 的禁带宽度是 1.43eV，因而发光的波长位于近红外区。又如，GaP 的禁带宽度是 2.3eV，故发光波长与可见光区的绿光的波长接近[1]。附录 III 给出了各种半导体材料的禁带宽度和其它性质。由于不同半导体的禁带宽度不同，使用不

[1] 光子能量 E（以 eV 为单位）和波长 λ（以 μm 为单位）之间的对应关系是 $\lambda = 1.24/E$。比如，GaAs 的禁带宽度是 1.43eV，对应的光波波长是 $\lambda = 1.24/1.43 = 0.87\mu m$。

表 1-1 常用的半导体材料：（a）半导体在周期表中的位置；（b）元素半导体和化合物半导体。

(a)

II 族	III 族	IV 族	V 族	VI 族
	B	C		
	Al	Si	P	S
Zn	Ga	Ge	As	Se
Cd	In		Sb	Te

(b)

元素半导体	IV 族化合物半导体	二元 III-V 族化合物半导体	二元 II-VI 族化合物半导体
Si	SiC	AlP	ZnS
Ge	SiGe	AlAs	ZnSe
		AlSb	ZnTe
		GaP	CdS
		GaAs	CdSe
		GaSb	CdTe
		InP	
		InAs	
		InSb	

同材料制作的发光二极管和激光器的发光波长也不同，从红外到可见光都有。

在半导体内引入某些特定的杂质可在较大程度上改变其电学和光学特性，控制和改变杂质的数量可使半导体的导电性能发生很大改变，甚至可以改变导电机制。例如，在纯 Si 中引入 1ppm 的杂质就可以使 Si 由不良导体变为良导体。在半导体内引入杂质的过程称为掺杂。掺杂可由杂质扩散和离子注入工艺实现（在 5.1 节介绍）。

为分析和理解半导体的上述性质，首先需要了解其中的原子排列情况。显然，如果材料纯度的微小改变能够引起电学性质的巨大改变，那么原子的性质和原子的排列情况肯定是起了重要作用的。下面我们从晶体结构入手研究半导体的性质。

1.2 晶格

我们知道，晶体中原子的排列具有周期性，由此可将晶体和其它固体区别开来。我们以基本的具有立方晶格的晶体为参照，定义并解释一些结晶学术语，以帮助我们认识晶面和晶向。在此基础上，着重介绍金刚石结构及其类似结构，这是电子器件所用的绝大多数半导体材料的典型结构。

1.2.1 周期结构

晶体的特征是其中的原子排列具有空间周期性，也可以这样说，晶体原子的排列是以某种基本单元重复进行的。正是因为具有这种周期性，所以从晶体中某一点看到的晶体结构与从其它等效点看到的晶体结构是完全相同的。但是，并非所有的固体都是晶体。如图 1-1 所示，有些固体的原子排列就没有任何周期性，我们将这样的固体材料叫做非晶材料；还有一些固体，从整体上看，原子的排列没有周期性，但其中有很多小的区域，原子在这些小区域中的排列却有周期性，我们将这些固体材料叫做多晶材料。

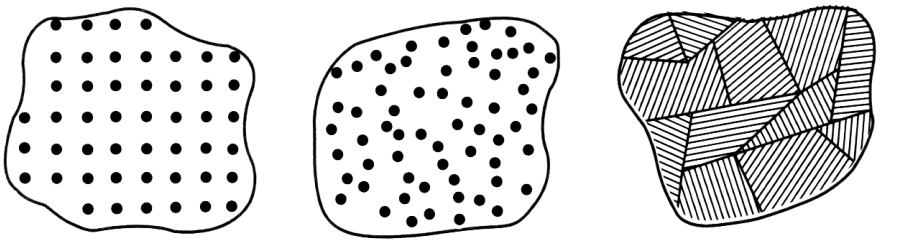


图 1-1 固体中的原子排列：（a）晶体；（b）非晶体；（c）多晶体（其中有大量的晶粒）。

晶体中原子的周期性排列构成晶格。原子的排列方式不同，则原子之间的距离和相对位置也不同，但不管如何排列，整个晶格总是可以由称为晶胞的基本单元按某种规则重复排列而成。图 1-2 给出了某种晶格中原子的二维排列情形，其中 ODEF 代表一个晶胞，在该晶胞的每个顶角处都有一个与相邻晶胞共享的原子。我们可以定义这样的矢量 **a**、**b**、**c**（称为基矢），若将某个晶胞沿这些基矢的整数倍进行平移，则可以找到另一个完全相同的晶胞。比如，将晶胞 ODEF 沿矢量 **r**=3**a**+2**b** 平移后，可找到另一个晶胞 O’D’E’F’ 如图 1-2 中的两个阴影区所示。如果晶格中两个格点的相对位置可以通过矢量

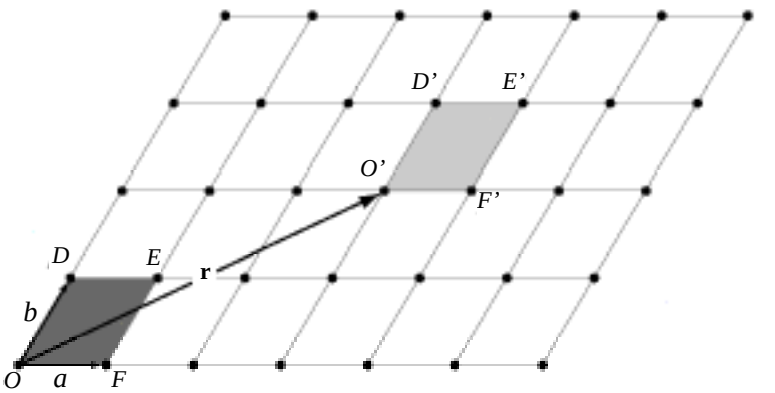


图 1-2 某种晶格中原子的二维排列（示意图），两个阴影区分别表示将晶胞沿矢量 **r** = 3**a** + 2**b** 平移前和平移后的位置。

需要全本请访问 www.ertongbook.com