

国外电子与通信教材系列

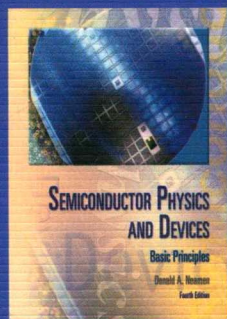
Mc
Graw
Hill
Education

Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles,
Fourth Edition

半导体物理与 器件 (第四版)

[美] Donald A. Neamen 著

赵毅强 姚素英 史再峰 等译



中国工信出版集团



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

半导体物理与器件

(第四版)

Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles
Fourth Edition

[美] Donald A. Neamen 著

赵毅强 姚素英 史再峰 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内容简介

本书是微电子技术领域的基础教程。全书涵盖了量子力学、固体物理、半导体材料物理及半导体器件物理等内容。全书分成三部分,共计15章。第一部分为半导体材料属性,主要讨论固体晶格结构、量子力学、固体量子理论、平衡半导体、输运现象、半导体中的非平衡过剩载流子;第二部分为半导体器件基础,主要讨论pn结、pn结二极管、金属半导体和半导体异质结、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、双极晶体管、结型场效应晶体管;第三部分为专用半导体器件,主要介绍光器件、半导体微波器件和功率器件等。书中既讲述了半导体基础知识,也分析讨论了小尺寸器件物理问题,具有一定的深度和广度。另外,全书各章难点之后均列有例题、自测题,每章末尾均安排有复习要点、重要术语解释及知识点。全书各章末尾列有习题和参考文献,书后附有部分习题答案。

本书可作为高等院校微电子技术专业本科生及相关专业研究生的教材或参考书,也可作为相关领域工程技术人员参考资料。

Donald A. Neamen.

Semiconductor Physics and Devices, Basic Principles, Fourth Edition.

ISBN: 0-07-352958-3. Copyright © 2012 by McGraw-Hill Education.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese translation edition is jointly published by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only, excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan.

Copyright © 2018 by McGraw-Hill Education and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可,对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播,包括但不限于复印、录制、录音,或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字翻译版由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中华人民共和国境内(不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾地区)销售。

版权© 2018 由麦格劳-希尔(亚洲)教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有McGraw-Hill Education公司防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2011-3949

图书在版编目(CIP)数据

半导体物理与器件:第四版/(美)唐纳德·A.尼曼(Donald A. Neamen)著;赵毅强等译.

北京:电子工业出版社,2018.6

书名原文:Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-34321-6

I. ①半… II. ①唐… ②赵… III. ①半导体物理—高等学校—教材 ②半导体器件—高等学校—教材
IV. ①O47 ②TN303

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第111575号

策划编辑:马岚

责任编辑:马岚 特约编辑:马晓云

印刷:三河市鑫金马印装有限公司

装订:三河市鑫金马印装有限公司

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:35 字数:986千字

版次:2005年1月第1版(原著第3版)

2018年6月第2版(原著第4版)

印次:2018年6月第1次印刷

定价:99.00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)88254888,88258888。

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。

本书咨询联系方式: classic-series-info@phei.com.cn。

译者序

从 1947 年第一只晶体管的诞生,到 1958 年第一块集成电路的出现,历经半个多世纪的发展,微电子技术推动了人类社会跨入信息时代,影响着我们生活的方方面面。具有基础性地位的微电子技术对现代信息产业的带动作用,长期以来一直深受世人的瞩目与重视。近年来,在世界半导体集成电路设计与制造中心正加速向中国转移的背景下,我国制定了一批旨在促进微电子产业发展的支持政策,相信在不久的将来,我国将逐渐从集成电路的消耗大国转变成集成电路的设计、制造强国。半导体物理及器件的相关知识是微电子技术的基础,掌握该知识对从事相关工作至关重要。基于此,我们在电子工业出版社的大力支持下,组织天津大学在微电子方向从事教学、科研的老师翻译了本书,作为一本微电子入门书籍奉献给读者。本书既可以作为高等院校微电子技术相关专业本科生及研究生的教材,也可以作为从事相关领域工作的工程技术人员的参考资料。

本书作者有着多年丰富的教学和科研经验,本书作为第四版,是在前三版作为教材使用多年的基础上,结合当今微电子器件发展的现状而修订的。除了保持原书的综合性和基础性的特点,第四版在章节安排上进行了调整,将讲述场效应晶体管(MOSFET)的两章内容提前到双极型晶体管(BJT)章节的前面,充分体现了现代半导体集成电路中 MOSFET 的重要性。其次,结合最新技术进展在第 15 章中增加了微波器件的内容。为了帮助读者更好地学习,在每一章的开始,增加了本章内容的说明。书中主要内容包括量子力学基本知识、能带理论、半导体物理、半导体器件和特种半导体器件等,既有一定广度,又有深入的分析。全书共有 15 章,作者讲解深入浅出,理论分析透彻,重点突出,每一章都配有小结和知识点汇总,并配以大量习题供读者选做。从第三版使用情况来看,读者反映良好,对于拟学习半导体物理与器件的读者来说,是一种很好的选择。

第四版的翻译工作是在第三版的基础上补充完善的,参与本版翻译与校对工作的有赵毅强、姚素英、史再峰和盛大力等人。其中姚素英负责第 1 章至第 3 章,赵毅强负责第 4 章至第 9 章,史再峰负责第 10 章至第 12 章,盛大力负责第 13 章至第 15 章。根据我们的教学体会和读者的反馈,最近我们对全书进行了勘误,参与人员有叶茂、胡凯和何家骥等人。

鉴于译者的水平有限,书中难免有不足和疏漏之处,敬请读者批评、指正。

赵毅强
天津大学微电子学院
2018 年 5 月

前 言

宗旨与目标

出版本书第四版的目的在于将有关半导体器件的特性、工作原理及其局限性的基础知识介绍给读者。要想更好地理解这些基础知识，就必须对半导体材料物理知识进行全面了解。本书有意将量子力学、固体量子理论、半导体材料物理和半导体器件物理综合在一起，因为所有这些理论对了解当今半导体器件的工作原理及其未来的发展是非常重要的。

在本书中所包含的物理知识远远超过了许多半导体器件入门书籍中所涵盖的内容。尽管本书覆盖面很广，但作者坚信：一旦透彻理解了这些入门知识和材料物理知识，那么对半导体器件物理的理解就会水到渠成，而且会理解得更快，学习效率更高。本书对基础物理知识的不惜篇幅，将有助于读者更好地理解甚至可能开发出新型的半导体器件。

既然本书的目的在于为读者奉献一部有关半导体器件理论的入门书籍，因此许多深奥的理论并未涉及，同时也未对半导体的制造工艺做详细描述。虽然本书对诸如扩散和离子注入等制造工艺有所涉猎并进行了一般性讨论，但仅局限于那些对器件特性有直接影响的工艺和场合。

预备知识

由于本书针对的是电气工程领域大学三年制和四年制的学生，因此假设读者已经掌握了微分方程、大学物理和电磁学的基础知识。当然，了解现代物理知识更好，但这并不是必需的。预先修完电子线路基础课程对阅读本书会更有帮助。

章节安排

本书分为三部分：第一部分介绍量子力学初步知识和半导体材料物理；第二部分介绍半导体器件物理的基本知识；第三部分介绍专用半导体器件，包括光器件、半导体微波器件和功率器件。

第一部分包括第1章至第6章。第1章先从固体晶格结构开始，然后过渡到理想单晶半导体材料。第2章和第3章介绍量子力学和固体量子理论，这些都是必须掌握的基础物理知识。第4章到第6章覆盖了半导体材料物理知识。其中，第4章讨论热平衡半导体物理，第5章讨论半导体内部的载流子输运现象。非平衡过剩载流子是第6章的主要内容，理解半导体中的过剩载流子行为对于理解器件物理至关重要。

第二部分包括第7章到第13章。第7章主要讨论pn结电子学；第8章讨论pn结电流-电压特性；第9章讨论整流及非整流金属半导体结和半导体异质结；第10章和第11章阐述MOS场效应晶体管理论；第12章探讨双极晶体管；第13章阐述结型场效应管。在详尽介绍pn结理论后，关于这三种基本晶体管类型的章节，读者可不必按顺序阅读，因为这些章节彼此之间是相互独立的。

第三部分包括第14章和第15章。第14章介绍光器件，如太阳能电池和发光二极管；第15章介绍半导体微波器件和半导体功率器件。

本书末尾是 8 个附录。附录 A 是符号列表，以帮助读者了解各种符号及其含义。附录 B 包含单位转换表与常数表。附录 H 给出了部分习题答案，有助于学生检查自身的学习情况。

使用说明

本书可作为本科生第三学期或第四学期一个学期的教材。和许多教材一样，本书的内容不可能在一个学期内全部讲授完。这就给授课老师提供了一定的自由空间，授课老师可根据教学目的对教材内容进行取舍。下文给出了两种可供选择的安排，但本书不是百科全书。对于可以略过而又不会影响全书连贯性的章节，我们在目录和对应章节中用 * 号予以标记。这些章节尽管在半导体器件物理的发展中很重要，但可以推迟讲授。

新墨西哥大学电子工程专业大三学生的一门课程广泛使用了本书中的材料。建议用略小于半个学期的时间学习前六章；剩余的时间用于学习 pn 结、金属-氧化物-半导体场效应晶体管和双极晶体管。其他的一些主题可考虑在学期末学习。

尽管 MOS 晶体管先于双极晶体管或结型场效应晶体管阐述，但描述三种基本晶体管类型之一的各个章节都是彼此独立的，任何一种类型都可以先讲。

注意事项

本书引入了有关半导体材料和器件物理等理论知识。虽然许多电子工程系的学生更乐于制作电子电路和计算机编程，而不是去学习有关半导体器件的理论，但是本书的内容对于理解诸如微处理器等电子器件的局限性是至关重要的。

数学的应用贯穿全书，这看起来很枯燥，但最后的结论是其他手段无法获得的。尽管有些描述工艺的数学模型看起来很抽象，但它们描述和预言物理过程方向的能力已完全经受住了时间的考验。

作者鼓励读者经常研读每一章的开始部分，以便深刻领会每章或每个主题的目的。这种不断的复习对学习前五章尤为重要，因为它们讲述的是基础物理知识。

还应注意的是，尽管有些章节可以略过且不会影响连贯性，但有些教师还是会选择这些章节。因此，标 * 号的章节并不意味着不重要。

有些问题可能到课程结束时也得不到解答，理解这一点也很重要。虽然作者不喜欢“它可以这样讲”之类的说法，但书中有些概念的推导确实超出了本书的范围。本书对这一科目仅具导论性质。对那些修完课程后还没有解决的问题，我们鼓励读者记下这些问题，或许在后续课程中这些问题就能得到解答。

教学顺序

对于教学顺序，每位教师都有自己的选择，但通常有两种方案。第一种方案称为 MOSFET 方案，是在讲授双极晶体管之前讲授 MOS 晶体管。读者会注意到本书中的 MOSFET 内容放到了 pn 结二极管之后的第 10 章和第 11 章。

第二种方案称为双极型方案，也称为传统方案，是在讨论 pn 结二极管后立即介绍双极晶体管。由于 MOSFET 留在学期末讲授，因此到时可能没有足够的时间来讲授这一重要主题。

遗憾的是，由于时间限制，将每一章中的所有内容在一个学期内都讲完是不可能的。余下的内容可以留到下一个学期讲授或留给读者自学。

MOSFET 方案

第1章	晶格结构
第2章、第3章	量子力学和固体物理选讲
第4章	半导体物理
第5章	输运现象
第6章	非平衡过剩载流子选讲
第7章	pn结
第10章、第11章	MOS晶体管
第8章	pn结二极管
第9章	肖特基二极管简介
第12章	双极晶体管, 其他选讲内容

双极型方案

第1章	晶格结构
第2章、第3章	量子力学和固体物理选讲
第4章	半导体物理
第5章	输运现象
第6章	非平衡态特性选讲
第7章、第8章	pn结和pn结二极管
第9章	肖特基二极管简介
第12章	双极晶体管
第10章、第11章	MOS晶体管, 其他选讲内容

第四版新内容

排列顺序: 关于 MOSFET 的两章移到了双极晶体管一章的前面。这一改变强调了 MOS 晶体管的重要性。

半导体微波器件: 第 15 章中添加了一小节关于三种专用半导体微波器件的内容。

新附录: 添加了关于有效质量概念的附录 F。教材的许多计算中使用了两个有效质量。该附录给出了每种有效质量的理论知识, 并讨论了何时在特定计算中使用哪一种有效质量。

预习小节: 每章以简介开始, 然后以项目列表的形式给出预习内容。每个预习项均给出了该章的一个特殊目标。

练习题: 添加了超过 100 道练习题, 每道例题后面均提供一道练习题。练习题类似于例题, 以便读者即时测试对刚讲内容的理解程度。每道练习题均提供有答案。

测试理解题: 每章主要小节末尾添加了约 40% 的新测试理解题。通常, 这些练习题比每个例题后的练习题更全面。这些习题将有助于读者在学习新内容前理解所学内容。

章末习题: 添加了 330 多道章末习题, 即这一版中有约 48% 的章末习题是全新的。

第四版特色

- **数学知识更为严密:** 保留了清晰理解半导体材料和器件物理的基本数学知识。
- **例题:** 书中列举了大量的例子来强化涉及的理论概念, 这种做法贯穿全书。这些例子覆盖了所有分析和设计的细节, 因此读者不必自行补充其忽略的步骤。
- **小结:** 每一章的末尾都提供了小结, 它总结了该章得出的结论并复习所描述的基本概念。
- **重要术语解释:** 每章的小结之后列出了重要术语解释, 这部分定义并总结了该章所讨论的重要术语。

- 知识点：指出了学习该章应该达到的目的及读者应该获得的能力。在转到后续章节前，这些知识可以用来帮助评估学习的进展。
- 复习题：每章末有一系列复习题，可用做自我测试，以让读者了解自己对该章概念的掌握程度。
- 章末习题：按照每章中专题出现的顺序，给出了大量的习题。
- 小结和复习题：小结里的习题和复习题是开放式的设计习题，在多数章的末尾给出。
- 参考文献：每章后都附有参考文献，其中那些难度高于本书的参考书用星号标明。
- 部分习题答案：最后的附录给出了部分习题的答案。了解答案会有助于解题。

联机资源

本书的配套网站为 www.mhhe.com/neamen。网站上包含有适用于教师的习题解答手册和图像库。教师也可以访问这一版本的完整联机解答手册组织系统，以生成试题并布置作业、生成定制内容、编辑提供的习题和解答^①。

致谢

几年来，我的许多学生帮助我改进了本书的第四版，当然也包括前几版。在此，对他们的工作表示衷心的感谢，感谢他们的热情与建设性的意见。

感谢 McGraw-Hill 公司的许多员工，感谢他们的大力支持。特别要感谢策划编辑 Peter Massar 和责任编辑 Lora Neyens，感谢他们的鼓励、支持和对细节的关注。还要感谢项目经理们在本书出版的最后阶段提供的指导。

感谢那些审读过本书前三版手稿并提出过建设性意见的所有人员，还要感谢那些仔细校对新习题解答的人员。最后，感谢本书新版本出版前审阅过本书的人员，他们的贡献和建议对于提升本书水平很有价值。

第四版的审阅人员

特别感谢如下审阅人员对本书第四版提出的建设性意见与建议：

Sandra Selmic, 路易斯安那工学院

Terence Brown, 密歇根州立大学

Jiun Liou, 中佛罗里达大学

Timothy Wilson, 俄克拉何马州立大学

Lili He, 圣何塞州立大学

Michael Stroschio, 伊利诺伊-芝加哥大学

Andrei Sazonov, 滑铁卢大学

^① 采用本书作为教材的教师可联系 te_services@phei.com.cn 获取相关教辅资源。——编者注

目 录

绪论 半导体和集成电路	1
历史	1
集成电路(IC)	1
制造	2
参考文献	4
第一部分 半导体材料属性	
第1章 固体晶格结构	6
1.0 概述	6
1.1 半导体材料	6
1.2 固体类型	7
1.3 空间晶格	7
1.4 金刚石结构	12
1.5 原子价键	13
* 1.6 固体中的缺陷和杂质	15
* 1.7 半导体材料的生长	16
1.8 小结	18
重要术语解释	18
知识点	19
复习题	19
习题	19
参考文献	21
第2章 量子力学初步	22
2.0 概述	22
2.1 量子力学的基本原理	22
2.2 薛定谔波动方程	26
2.3 薛定谔波动方程的应用	29
2.4 原子波动理论的延伸	37
2.5 小结	40
重要术语解释	40
知识点	41
复习题	41
习题	41
参考文献	44

第3章 固体量子理论初步	45
3.0 概述	45
3.1 允带与禁带	45
3.2 固体中电的传导	54
3.3 三维扩展	61
3.4 状态密度函数	63
3.5 统计力学	66
3.6 小结	72
重要术语解释	72
知识点	73
复习题	73
习题	73
参考文献	76
第4章 平衡半导体	78
4.0 概述	78
4.1 半导体中的载流子	78
4.2 掺杂原子与能级	86
4.3 非本征半导体	89
4.4 施主和受主的统计学分布	94
4.5 电中性状态	98
4.6 费米能级的位置	102
4.7 小结	107
重要术语解释	107
知识点	108
复习题	108
习题	108
参考文献	112
第5章 载流子输运现象	113
5.0 概述	113
5.1 载流子的漂移运动	113
5.2 载流子扩散	124
5.3 杂质梯度分布	127
*5.4 霍尔效应	129
5.5 小结	131
重要术语解释	132
知识点	132
复习题	132
习题	133
参考文献	137

第6章 半导体中的非平衡过剩载流子	139
6.0 概述	139
6.1 载流子的产生与复合	139
6.2 过剩载流子的性质	143
6.3 双极输运	145
6.4 准费米能级	157
*6.5 过剩载流子的寿命	158
*6.6 表面效应	162
6.7 小结	165
重要术语解释	165
知识点	166
复习题	166
习题	166
参考文献	171

第二部分 半导体器件基础

第7章 pn 结	174
7.0 概述	174
7.1 pn 结的基本结构	174
7.2 零偏	175
7.3 反偏	180
7.4 结击穿	186
*7.5 非均匀掺杂 pn 结	189
7.6 小结	192
重要术语解释	193
知识点	193
复习题	194
习题	194
参考文献	198
第8章 pn 结二极管	199
8.0 概述	199
8.1 pn 结电流	199
8.2 产生-复合电流和大注入	212
8.3 pn 结的小信号模型	219
*8.4 电荷存储与二极管瞬态	226
*8.5 隧道二极管	228
8.6 小结	230
重要术语解释	231
知识点	231
复习题	231

习题	232
参考文献	236
第9章 金属半导体和半导体异质结	238
9.0 概述	238
9.1 肖特基势垒二极管	238
9.2 金属-半导体的欧姆接触	250
9.3 异质结	253
9.4 小结	260
重要术语解释	261
知识点	261
复习题	261
习题	262
参考文献	265
第10章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管基础	266
10.0 概述	266
10.1 双端 MOS 结构	266
10.2 电容-电压特性	280
10.3 MOSFET 基本工作原理	287
10.4 频率限制特性	300
*10.5 CMOS 技术	303
10.6 小结	305
重要术语解释	305
知识点	306
复习题	306
习题	307
参考文献	313
第11章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管: 概念的深入	314
11.0 概述	314
11.1 非理想效应	314
11.2 MOSFET 按比例缩小理论	321
11.3 阈值电压的修正	323
11.4 附加电学特性	328
*11.5 辐射和热电子效应	334
11.6 小结	338
重要术语解释	339
知识点	339
复习题	340
习题	340
参考文献	344

第 12 章 双极晶体管	346
12.0 概述	346
12.1 双极晶体管的工作原理	346
12.2 少子的分布	352
12.3 低频共基极电流增益	358
12.4 非理想效应	367
12.5 等效电路模型	377
12.6 频率上限	382
12.7 大信号开关	386
* 12.8 其他的双极晶体管结构	388
12.9 小结	391
重要术语解释	392
知识点	393
复习题	393
习题	393
参考文献	399
第 13 章 结型场效应晶体管	401
13.0 概述	401
13.1 JFET 概念	401
13.2 器件的特性	405
* 13.3 非理想因素	416
* 13.4 等效电路和频率限制	418
* 13.5 高电子迁移率晶体管	421
13.6 小结	426
重要术语解释	427
知识点	427
复习题	427
习题	428
参考文献	431

第三部分 专用半导体器件

第 14 章 光器件	434
14.0 概述	434
14.1 光学吸收	434
14.2 太阳能电池	437
14.3 光电探测器	443
14.4 光致发光和电致发光	451
14.5 发光二极管	454
14.6 激光二极管	458
14.7 小结	463

重要术语解释	464
知识点	464
复习题	465
习题	465
参考文献	468
第 15 章 半导体微波器件与功率器件	469
15.0 概述	469
15.1 隧道二极管	469
15.2 耿氏二极管	470
15.3 雪崩二极管	472
15.4 功率双极晶体管	473
15.5 功率 MOSFET	478
15.6 半导体闸流管	483
15.7 小结	491
重要术语解释	491
知识点	492
复习题	492
习题	493
参考文献	494
附录 A 部分参数符号列表	496
附录 B 单位制、单位换算和通用常数	502
附录 C 元素周期表	505
附录 D 能量单位——电子伏特	506
附录 E 薛定谔波动方程的推导	508
附录 F 有效质量概念	509
附录 G 误差函数	513
附录 H 部分习题参考答案	514
索引	521

绪论 半导体和集成电路

人们经常听说我们生活在信息时代。譬如，可以通过互联网或卫星通信系统从千里之外获得大量信息，而正是基于数字与模拟电子系统的信息技术和晶体管与集成电路(IC)的发展使之成为可能。IC产品已渗透到我们日常生活的每一个方面，包括CD播放器、传真机、零售商店的激光扫描仪和移动电话在内的电子设备，均要使用IC。IC技术最明显的例子之一是数字计算机，与几十年前将人送上月球的设备相比，今天一台较小的便携式计算机有更强的计算能力。半导体电子领域依旧是一个快速变化的领域，每年有数千篇技术论文发表。

历史

虽然IC技术的大爆炸发生在最近的二三十年，但半导体器件已经有相当长的历史。这个介绍只是为了对半导体器件和集成电路的历史进行简要的回顾。数以千计的工程师和科学家在半导体电子学的发展过程中做出了不可磨灭的贡献，这里所涉及的事件和人名只是半导体发展史中的一部分。金属半导体接触可追溯到1874年的Braun，他发现了金属(如铜、铁、硫化铅)半导体接触时的电流传导非对称性。这些器件被用做收音机早期试验的检波器。1906年，Pickard给出了用硅制作的点接触检波器。1907年，Pierce在向各种半导体上溅射金属时，发现了二极管的整流特性。

到1935年，硒整流器和硅点接触二极管已经可用做收音机的检波器。随着雷达的发展，整流二极管和混频器的需求量上升。这时，获得高纯度硅、锗的方法得到了发展。随着半导体物理的发展，人们对金属半导体接触的理解得到了显著提高。也许该阶段最重要的就是1942年Bethe提出的热离子发射理论，根据该理论，电流是由电子向金属发射的过程决定的，而不是由漂移或扩散过程决定的。

另一个科学技术的重大进展发生在1947年12月，当时贝尔实验室的William Shockley、John Bardeen和Walter Brattain制作了第一个晶体管并进行了测试。这个晶体管是点接触器件，用多晶锗制成。很快在硅上也显示出了同样的晶体管效应。1949年又发生了显著进步，单晶材料而非多晶材料得到了使用。单晶生长的一致性改善了整个半导体材料的特性。

晶体管发展的下一个重要阶段是使用扩散工艺制作所需要的结。这种工艺可以更好地控制晶体管特性，并由此产生了高频器件。锗、硅台面扩散晶体管分别在1957年和1958年进入商业化生产。扩散工艺还允许在单个硅片上制作多个晶体管，从而降低了器件的成本。

集成电路(IC)

晶体管由于较小且比之前使用的真空管更为可靠而导致了电子学革命。当时，电路是分立的，即必须通过导线将每个元件单独连接起来形成电路。集成电路导致了电子学的革新，而分立

电路不可能做到这一点。集成意味着由几百万个器件组成的复杂电路可制造在单片半导体材料上。

1959年1月，德州仪器公司的 Jack Kilby 首先在锗材料上实现了第一块集成电路。1959年7月，仙童半导体公司的 Robert Noyce 用平面技术在硅上实现了集成电路。最初的电路是用双极晶体管制作的。实际可行的 MOS 晶体管大约在 20 世纪 60 年代中期和 70 年代开发出来。MOS 技术特别是 CMOS 技术现已成为 IC 设计和开发的焦点。硅是主要的半导体材料。GaAs 和其他化合物半导体则用于高频器件和光器件等特殊场合中。

自从第一块 IC 问世以来，电路设计日益成熟，集成电路也渐趋复杂。一块芯片的容量达到几百万个晶体管每平方厘米。有些 IC 有几百个引脚，而单个晶体管却只有三个。在一块芯片上的 IC 可以有算术、逻辑、存储等功能，如微处理器。集成意味着电路可应用于对尺寸、质量和功率有严格要求的卫星与便携式计算机上。

IC 的重要优点是制造的器件彼此非常靠近。器件间的信号延迟时间很小，因此使用 IC 可得到高频和高速电路，而使用分立电路是不可能的。例如，在高速计算机中，逻辑和存储电路放置得非常靠近，以使延迟时间最小化。此外，器件间的杂散电容和电感的降低也大大提升了系统的速度。

对硅工艺的集中研究，以及设计制造自动化水平的提高，导致了 IC 制造的低成本和高产率。

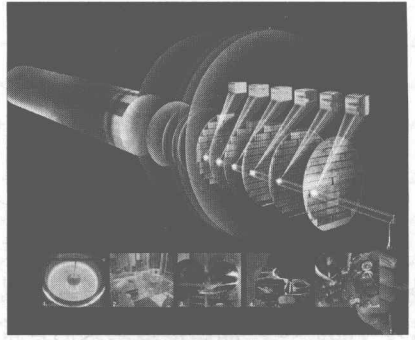
制造

集成电路是在单个芯片上制作晶体管和互连线的加工技术发展的直接结果。这些制作 IC 的加工技术综合起来称为工艺。下面的几个段落将对部分工艺进行介绍，以帮助读者了解一些工艺中的基本术语。

热氧化：硅 IC 成功的一个主要原因是，能在硅表面获得性能优良的自然 SiO_2 层。该氧化层在 MOSFET 中被用作栅绝缘层，也可作为器件之间隔离的场氧化层。连接不同器件用的金属互连线可以放置在场氧化层顶部。大多数其他的半导体表面不能形成质量满足器件制造要求的氧化层。

硅在空气中会氧化形成大约厚 $25 \text{ \AA}^{\text{①}}$ 的天然氧化层。但是，通常的氧化反应都在高温下进行，因为基本工艺需要氧气穿过已经形成的氧化层到达硅表面，然后发生反应。图 0.1 给出了氧化过程的示意图。氧气通过扩散过程穿过直接与氧化层表面相邻的凝滞气体层，然后穿过已有的氧化层到达硅表面，最后在这里与硅反应形成 SiO_2 。由于该反应，表面的硅被消耗了一部分。被消耗的硅占最后形成的氧化层厚度的 44%。

掩模版和光刻：每个芯片上的实际电路结构是用掩模版和光刻技术制作形成的。掩模版是器件或部分器件的物理表示。掩模版上的不透明部分是用紫外线吸收材料制作的。光敏层即光刻胶被预先喷到半导体表面。光刻胶是一种在紫外线照射下发生化学反应的有机聚合物。如图 0.2 所示，紫外线通过掩模版照射到光刻胶上。然后用显影液去除光刻胶的多余部分，在硅上产生需要的图形结构。掩模和光刻工艺是很关键的，因为它们决定着器件的极限尺寸。除了紫外线，电子束和 X 射线也能用来对光刻胶进行曝光。



由 Texas Instruments 提供

① 1 埃(\AA) = 0.1 nm——编者注。

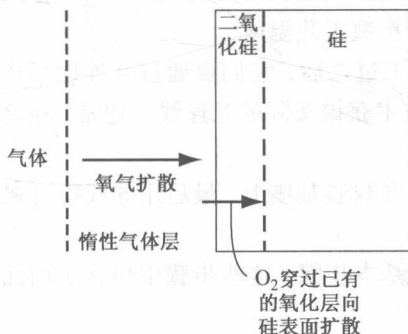


图 0.1 氧化过程示意图

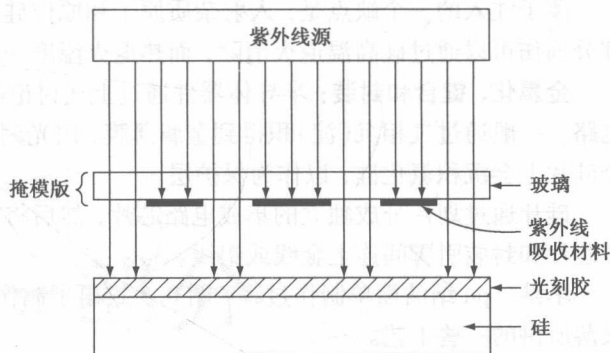


图 0.2 光刻胶使用示意图

刻蚀：在光刻胶上形成图形之后，留下的光刻胶可作为掩蔽层，因此未被光刻胶覆盖的部分就能被刻蚀掉。等离子刻蚀现在已是 IC 制造的标准工艺。通常，需要向低压舱中注入刻蚀气体，比如氯氟烃。通过在阴、阳极之间施加射频电压可以得到等离子体。在阴极处放上硅片，等离子体中的阳离子向阴极加速并轰击到硅片表面上。表面处发生的实际化学物理反应很复杂，但最终效果就是硅片表面被选中的区域通过各向异性而刻蚀掉。如果光刻胶被涂到 SiO₂ 层表面，则 SiO₂ 可以用类似的方式刻蚀掉。

扩散：IC 制造中广泛应用的热工艺是扩散。扩散就是将特定的“杂质”原子掺入硅材料中的过程。这种掺杂工艺改变了硅的导电类型，从而形成 pn 结（pn 结是半导体器件的核心单元）。硅氧化形成二氧化硅薄层，通过光刻及刻蚀工艺在被选中的区域上开出窗口。

将硅片放到高温扩散炉中（约 1100℃）并掺入硼或磷等杂质原子。掺杂原子由于浓度梯度的作用逐渐地扩散或移动而进入硅中。由于扩散工艺需要原子的浓度梯度，所以最后的杂质原子扩散浓度是非线性的，如图 0.3 所示。当硅片从炉中取出并降至室温后，杂质原子的扩散系数基本上降为零，从而使杂质原子固定在硅材料中。

离子注入：可以替代高温扩散的工艺是离子注入。杂质离子束加速到具有高能量后射向半导体表面。当离子进入硅后，它们与硅原子发生碰撞并损失能量，最后停留在晶体中的某个深度上。由于碰撞是随机的，掺杂原子的透射深度具有一定的分布。图 0.4 是在特定能量下硼离子注入硅中的例子。

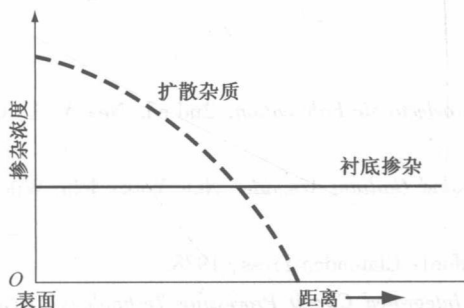


图 0.3 半导体表面扩散杂质的最终浓度

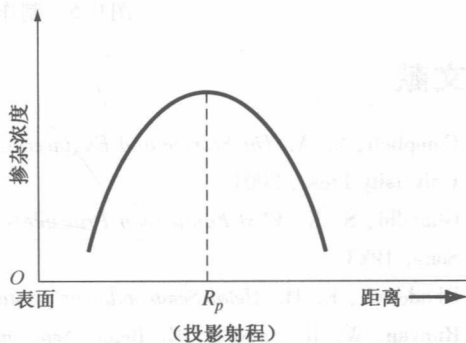


图 0.4 硅中硼离子注入的最终浓度

与扩散相比，离子注入有两个优点：(1) 离子注入工艺是低温工艺；(2) 可以获得良好的掺杂层。由于光刻胶或氧化层都可以阻挡掺杂原子的渗透，因此离子注入就可以仅在被选中的硅区域上发生。