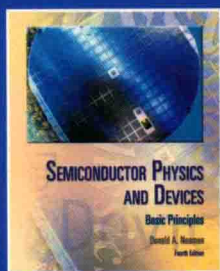


国外电子与通信教材系列

Mc  
Graw  
Hill  
Education

唐纳德·尼曼

*Semiconductor Physics and Devices*  
*Basic Principles, Fourth Edition*



# 半导体物理与器件

## (第四版) (英文版)

[美] Donald A. Neamen 著



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) (英文版)

Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles  
Fourth Edition

[美] Donald A. Neamen 著

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,分成三部分,共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双语教学教材或参考书,也可作为相关领域工程技术人员的参考资料。

Donald A. Neamen

Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition.

ISBN: 0-07-352958-3

Copyright © 2011 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 Bilingual 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 © 2017 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。

本授权双语版由麦格劳-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国大陆销售。

版权© 2017 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:01-2011-4152

### 图书在版编目(CIP)数据

半导体物理与器件:第四版 = Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition: 英文版 / (美)唐纳德·A. 尼曼(Donald A. Neamen)著. —北京:电子工业出版社,2017.3

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-30965-6

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第031678号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:三河市双峰印刷装订有限公司

装 订:三河市双峰印刷装订有限公司

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:48 字数:1597千字

版 次:2017年3月第1版(原著第4版)

印 次:2017年3月第1次印刷

定 价:109.00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。

# 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。

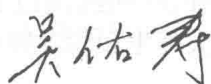
我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代，在原教委教材编审委员会的领导下，汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家，编写、出版了一大批教材；很多院校还根据学校的特点和需要，陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来，随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步，有的教材内容已比较陈旧、落后，难以适应教学的要求，特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天，如何适应这种情况，更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题，除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外，引进和出版一些国外优秀电子与通信教材，尤其是有选择地引进一批英文原版教材，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 and 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,我们通过与作者联络、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<br>杨千里 | 北京邮电大学校长、教授、博士生导师<br>总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长<br>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<br>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<br>清华大学深圳研究生院副院长 |
|     | 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<br>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<br>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<br>计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长<br>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<br>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<br>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<br>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                             |
|     | 朱世华        | 西安交通大学副校长、教授、博士生导师<br>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   |
|     | 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<br>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<br>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<br>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   |

# 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的了解。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。

在这本教科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级和大学大四级的学生，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，但这并不必需。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、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章探讨双极型晶体管；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给出了部分习题的答案，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。和许多课本一样，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型晶体管。其他的一些主题可考虑在学期末学习。

尽管MOS晶体管先于双极型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，是在讲授双极型晶体管之前讲授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型晶体管。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	双极型晶体管,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	双极型晶体管
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的两章移到了双极型晶体管一章的前面。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基本数学知识的严密性。
- 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：每一章的末尾提供了小结部分，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，可用于自测，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：小结和复习节中的一些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](http://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。

## 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 Massart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

Timothy Wilson，俄克拉荷马州立大学

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

# 绪论 半导体和集成电路

我们经常听说我们生活在信息时代。譬如，我们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具有更强的计算能力。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。

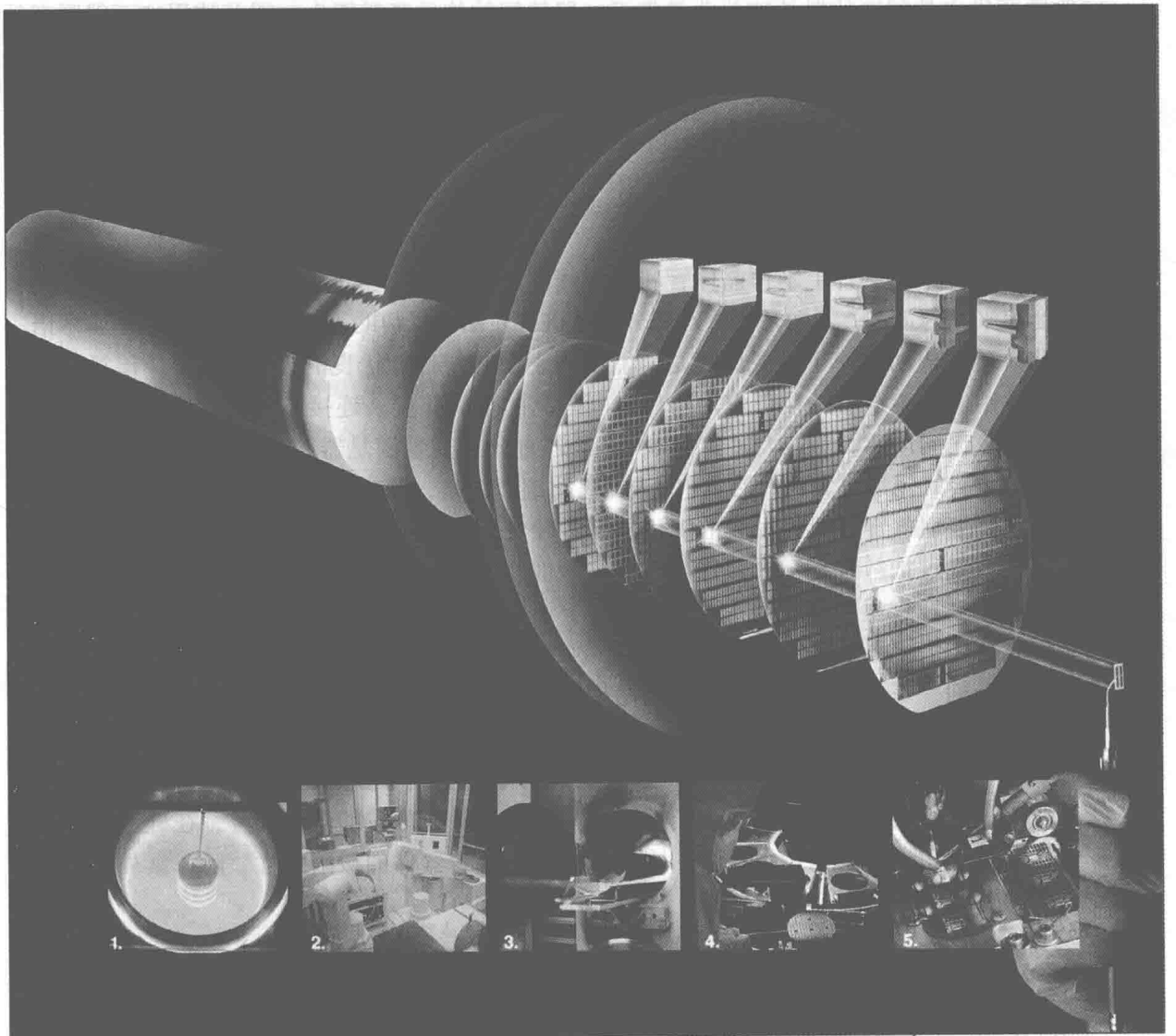
到1935年，硒整流器和硅点接触二极管已经可用做收音机的检波器。随着雷达的发展，整流二极管和混频器的需求量上升。这时，获得高纯度硅、锗的方法得到了发展。随着半导体物理的发展，人们对金属半导体接触的理解得到了显著提高。也许该阶段最重要的就是1942年Bethe提出的热离子发射理论，根据该理论，电流是由电子向金属发射的过程决定的，而不是由漂移或扩散过程决定的。

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，用多晶锗做成。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。



Compliments of Texas Instruments Incorporated

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。器件间的信号延时很小，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，以使延时最小化。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。下面几段将对部分工艺进行介绍，以帮助读者了解一些工艺基本术语。

**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天然 $\text{SiO}_2$ 层。该氧化层在MOSFET中被用做栅绝缘层，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。其他大多数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 $\text{SiO}_2$ 。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%。

**掩膜版和光刻** 每个芯片上的实际电路结构是用掩膜版和光刻技术制作形成的。掩膜版是器件或部分器件的物理表示。掩膜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光照射下发生化学反应的有机聚合物。如图0.2所示，紫外线通过掩膜版照射到光刻胶上。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。掩膜和光刻工艺是很关键的，因为它们决定着器件的极限尺寸。除了紫外光，电子束和X射线也能用来对光刻胶进行曝光。

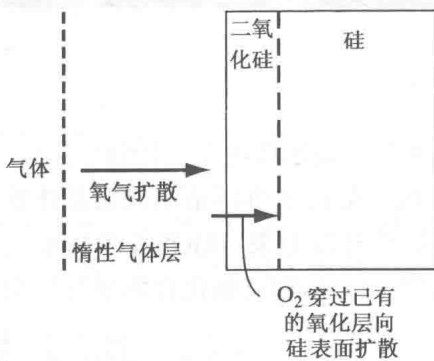


图 0.1 氧化过程示意图

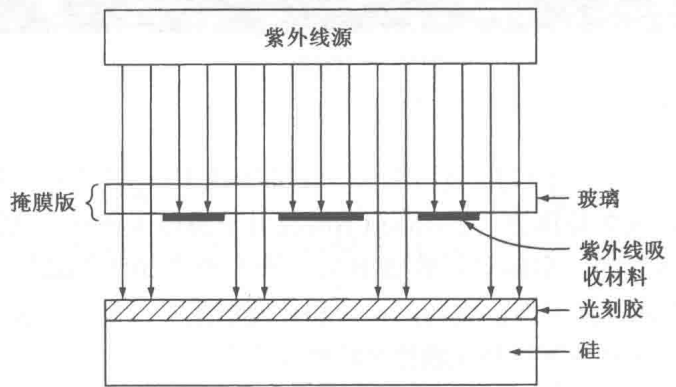


图 0.2 光刻胶使用示意图

① 1 埃 ( $\text{\AA}$ ) = 0.1 nm。——编者注

**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 $\text{SiO}_2$ 层表面，则 $\text{SiO}_2$ 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 $1100^\circ\text{C}$ ）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。

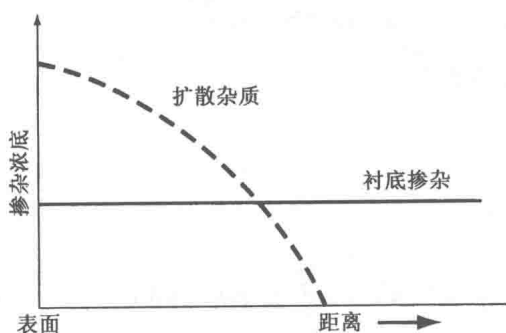


图 0.3 半导体表面扩散杂质的最终浓度

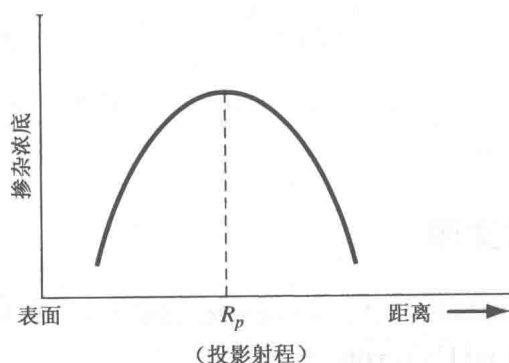


图 0.4 硅中硼离子注入的最终浓度

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，因此离子注入可仅在被选中的硅区域发生。

离子注入的一个缺点是，入射杂质原子和原位硅原子的碰撞会使硅晶格受到损伤。然而，大部分损伤可以通过硅高温退火消除，而热退火温度一般远低于扩散工艺温度。

**金属化、键合和封装** 半导体器件通过上述讨论的工艺加工过之后，它们要通过互连以形成电路。一般通过气相沉（淀）积得到金属薄膜，用光刻和刻蚀技术获得实际的互连线。通常，在整个硅片上会沉积氮化硅，以作为保护层。

硅片通过划片分成独立的集成电路芯片，然后将芯片固定在封装基座上，最后用导线键合机在芯片和封装引脚间连上金线或铝线。

小结 pn结的简单制作过程：图0.5给出了制作pn结的基本步骤，这些步骤中包含了前面段落所讲的一些工艺。

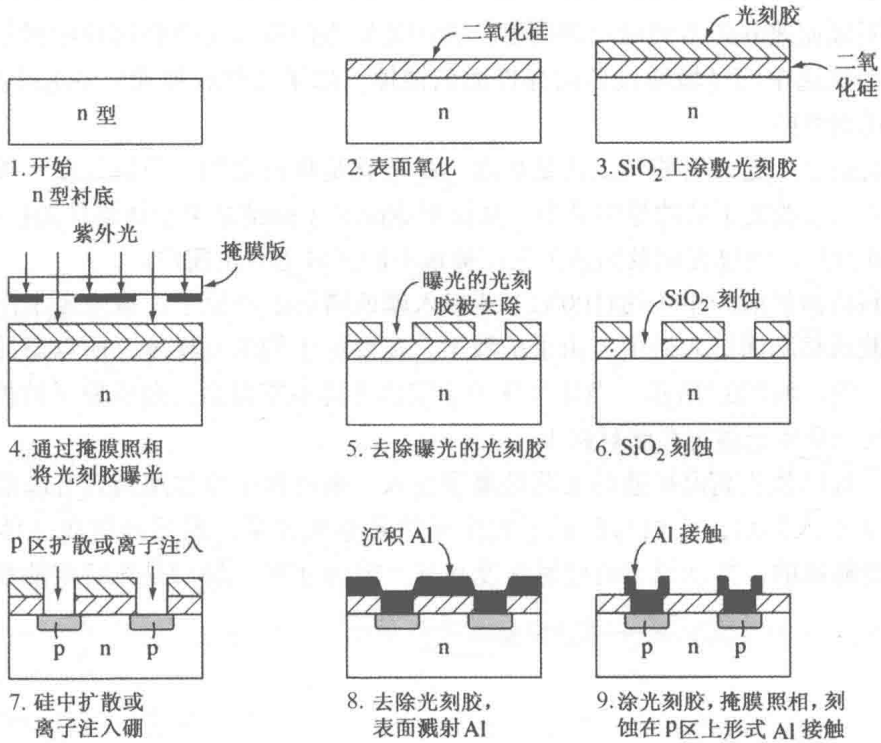


图 0.5 制作 pn 结的基本步骤

## 参考文献

1. Campbell, S. A. *The Science and Engineering of Microelectronic Fabrication*. 2nd ed. New York: Oxford University Press, 2001.
2. Ghandhi, S. K. *VLSI Fabrication Principles: Silicon and Gallium Arsenide*. New York: John Wiley and Sons, 1983.
3. Rhoderick, E. H. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford: Clarendon Press, 1978.
4. Runyan, W. R., and K. E. Bean. *Semiconductor Integrated Circuit Processing Technology*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1990.
5. Torrey, H. C., and C. A. Whitmer. *Crystal Rectifiers*. New York: McGraw-Hill, 1948.
6. Wolf, S., and R. N. Tauber. *Silicon Processing for the VLSI Era*, 2nd ed. Sunset Beach, CA: Lattice Press, 2000.

# 目 录

## 第一部分 半导体材料属性

第 1 章 固体晶格结构 .....	1
1.0 预习 .....	1
1.1 半导体材料 .....	1
1.2 固体类型 .....	2
1.3 空间晶格 .....	3
1.3.1 原胞和晶胞 .....	3
1.3.2 基本的晶体结构 .....	4
1.3.3 晶面和密勒指数 .....	6
1.3.4 晶向 .....	9
1.4 金刚石结构 .....	10
1.5 原子价键 .....	12
*1.6 固体中的缺陷和杂质 .....	14
1.6.1 固体中的缺陷 .....	14
1.6.2 固体中的杂质 .....	16
*1.7 半导体材料的生长 .....	17
1.7.1 在熔融体中生长 .....	17
1.7.2 外延生长 .....	19
1.8 小结 .....	20
重要术语解释 .....	20
知识点 .....	21
复习题 .....	21
习题 .....	21
参考文献 .....	24
第 2 章 量子力学初步 .....	25
2.0 预习 .....	25
2.1 量子力学的基本原理 .....	25
2.1.1 能量量子化 .....	26
2.1.2 波粒二相性 .....	27
2.1.3 不确定原理 .....	30
2.2 薛定谔波动方程 .....	31

2.2.1 波动方程 .....	31
2.2.2 波函数的物理意义 .....	32
2.2.3 边界条件 .....	33
2.3 薛定谔波动方程的应用 .....	34
2.3.1 自由空间中的电子 .....	35
2.3.2 无限深势阱 .....	36
2.3.3 阶跃势函数 .....	39
2.3.4 势垒和隧道效应 .....	44
2.4 原子波动理论的延伸 .....	46
2.4.1 单电子原子 .....	46
2.4.2 周期表 .....	50
2.5 小结 .....	51
重要术语解释 .....	51
知识点 .....	52
复习题 .....	52
习题 .....	52
参考文献 .....	57
第 3 章 固体量子理论初步 .....	58
3.0 预习 .....	58
3.1 允带与禁带 .....	58
3.1.1 能带的形成 .....	59
3.1.2 克龙尼克-潘纳模型 .....	63
3.1.3 $k$ 空间能带图 .....	67
3.2 固体中电的传导 .....	72
3.2.1 能带和键模型 .....	72
3.2.2 漂移电流 .....	74
3.2.3 电子的有效质量 .....	75
3.2.4 空穴的概念 .....	78
3.2.5 金属、绝缘体和半导体 .....	80
3.3 三维扩展 .....	83
3.3.1 硅和砷化镓的 $k$ 空间能带图 .....	83
3.3.2 有效质量的补充概念 .....	85



3.4 状态密度函数 .....	85	重要术语解释 .....	148
3.4.1 数学推导 .....	85	知识点 .....	148
3.4.2 扩展到半导体 .....	88	复习题 .....	149
3.5 统计力学 .....	91	习题 .....	149
3.5.1 统计规律 .....	91	参考文献 .....	154
3.5.2 费米-狄拉克概率函数 .....	91		
3.5.3 分布函数和费米能级 .....	93		
3.6 小结 .....	98		
重要术语解释 .....	98		
知识点 .....	99		
复习题 .....	99		
习题 .....	100		
参考文献 .....	104		
<b>第 4 章 平衡半导体 .....</b>	<b>106</b>	<b>第 5 章 载流子输运现象 .....</b>	<b>156</b>
4.0 预习 .....	106	5.0 预习 .....	156
4.1 半导体中的载流子 .....	106	5.1 载流子的漂移运动 .....	156
4.1.1 电子和空穴的平衡分布 .....	107	5.1.1 漂移电流密度 .....	156
4.1.2 $n_0$ 方程和 $p_0$ 方程 .....	109	5.1.2 迁移率 .....	159
4.1.3 本征载流子浓度 .....	113	5.1.3 电导率 .....	164
4.1.4 本征费米能级位置 .....	116	5.1.4 饱和速度 .....	169
4.2 掺杂原子与能级 .....	118	5.2 载流子扩散 .....	172
4.2.1 定性描述 .....	118	5.2.1 扩散电流密度 .....	172
4.2.2 电离能 .....	120	5.2.2 总电流密度 .....	175
4.2.3 III-V族半导体 .....	122	5.3 杂质梯度分布 .....	176
4.3 非本征半导体 .....	123	5.3.1 感生电场 .....	176
4.3.1 电子和空穴的平衡状态分布 .....	123	5.3.2 爱因斯坦关系 .....	178
4.3.2 $n_0$ 和 $p_0$ 的乘积 .....	127	*5.4 霍尔效应 .....	180
*4.3.3 费米-狄拉克积分 .....	128	5.5 小结 .....	183
4.3.4 简并与非简并半导体 .....	130	重要术语解释 .....	183
4.4 施主和受主的统计学分布 .....	131	知识点 .....	184
4.4.1 概率函数 .....	131	复习题 .....	184
4.4.2 完全电离与束缚态 .....	132	习题 .....	184
4.5 电中性状态 .....	135	参考文献 .....	191
4.5.1 补偿半导体 .....	135		
4.5.2 平衡电子和空穴浓度 .....	136	<b>第 6 章 半导体中的非平衡过剩载流子 .....</b>	<b>192</b>
4.6 费米能级的位置 .....	141	6.0 预习 .....	192
4.6.1 数学推导 .....	142	6.1 载流子的产生与复合 .....	193
4.6.2 $E_F$ 随掺杂浓度和温度的变化 .....	144	6.1.1 平衡态半导体 .....	193
4.6.3 费米能级的应用 .....	145	6.1.2 过剩载流子的产生与复合 .....	194
4.7 小结 .....	147	6.2 过剩载流子的性质 .....	198
		6.2.1 连续性方程 .....	198
		6.2.2 与时间有关的扩散方程 .....	199
		6.3 双极输运 .....	201
		6.3.1 双极输运方程的推导 .....	201
		6.3.2 掺杂及小注入的约束条件 .....	203
		6.3.3 双极输运方程的应用 .....	206
		6.3.4 介电弛豫时间常数 .....	214
		*6.3.5 海恩斯-肖克莱实验 .....	216