

国外电子与通信教材系列

 Pearson

Electronic Devices and Circuit Theory, Eleventh Edition

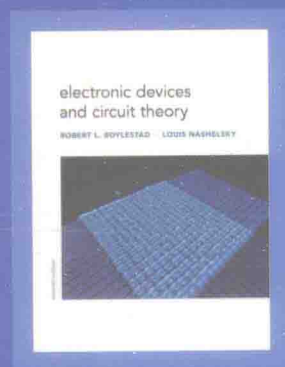
模拟电子技术

(第二版)

[美]

Robert L. Boylestad 著
Louis Nashelsky

李立华 李永华 译
许晓东 王莹



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

模拟电子技术

(第二版)

Electronic Devices and Circuit Theory

Eleventh Edition

[美] Robert L. Boylestad 著
Louis Nashelsky

李立华 李永华 译
许晓东 王莹

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书内容包括半导体器件基础、二极管及其应用电路、晶体管和场效应管放大电路的基本原理及频率响应、功率放大电路、多级放大电路、差分放大电路、电流源等模拟集成电路的单元电路、反馈电路、模拟集成运算放大器、电压比较器和波形变换电路等。本书对原版教材进行了改编,精简了内容,突出了重点,补充了必要知识点,内容更加新颖和系统化,反映了器件和应用的发展趋势,强调了系统的概念。

本书与英文版教材配套使用,适合电子、计算机、通信等相关专业电子电路基础课程 40 学时到 68 学时的英语或双语教学要求。本书也可作为相关专业工程技术人员的中文参考书。

Authorized translation adaptation from the English language edition, entitled *Electronic Devices and Circuit Theory*, Eleventh Edition, 9780132622264 by Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013 Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD. and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2016.

本书中文简体字翻译改编版专有出版权由 Pearson Education(培生教育出版集团)授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书贴有 Pearson Education(培生教育出版集团)激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2013-5968

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术:第十一版 / (美) 罗伯特·L. 博伊斯坦 (Robert L. Boylestad), (美) 路易斯·纳什斯基 (Louis Nashelsky) 著; 李立华等译. —2 版. —北京:电子工业出版社, 2016. 8

书名原文: *Electronic Devices and Circuit Theory*, Eleventh Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-28925-5

I. ①模… II. ①罗… ②路… ③李… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117364 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚 特约编辑:姚 旭

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

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:28.25 字数:813 千字

版 次:2008 年 6 月第 1 版(原著第 9 版)

2016 年 8 月第 2 版(原著第 11 版)

印 次:2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价:69.00 元

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 zltz@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

本书是改编版《模拟电子技术(第二版)(英文版)》的中译本,可以与英文版教材配套使用,适合电子、计算机、通信等相关专业电子电路基础课程 40 学时到 68 学时的英语或双语教学要求。本书也可作为相关专业工程技术人员的中文参考书。为了与英文版教材对照,本书中的所有符号沿用英文版中的符号。

原著作自 1972 年首次出版后,被多所大学作为教材使用,经过不断实践与修订,成为流行四十多年的优秀经典教材。*Electronic Devices and Circuit Theory, Eleventh Edition* 涵盖了更为广泛和新颖的内容,其内容体系与国内高校电子电路基础相关课程的教学内容体系有较高的一致性,仅在一些内容细节安排上与国内相关专业的理论教学课程设置以及实验课程设置存在不协调或者重复现象。基于此,为了使教材内容更合理,满足国内高等教育相关专业英语或双语“电子电路基础”课程的教学要求,李立华于 2007 年对原著进行了改编,精简内容,突出重点,补充了必要知识点。并且从 2007 年开始,李立华及其课程组将改编版英文教材应用于北京邮电大学国际学院“电子电路基础”课程的双语教学中,多年来取得了良好的效果。

在进行电子电路基础双语教学的多年实践中,一方面体会到一本范围和内容适合的英文教材的重要性,同时也感受到学生对于配套中文教材的迫切需要。尤其对于电子类课程的英语或者双语授课,知识难度和英语授课都增加了学生学好这些课程的难度,有一本与英文教材配套的中文教材作为辅助,便于学生在有限学时下把握重点,深入理解,提高学生自学的效率,也可以为不同基础和不同目标的读者提供更好的帮助和更多的选择。因此,这本优秀英文教材的中译本便应运而生。

本书的内容更加新颖和系统化,反映了器件和应用的发展趋势,强调了系统工程的概念。例如,随着可见光技术的新发展,本书补充了发光二极管的基本知识。本书的组织非常合理:每一章都增加了知识重点提示,同时配有概述,介绍本章的基本内容和重要的背景知识;每章最后都有小结,总结本章的基本概念和结论;并且每章最后都提供重要的公式列表,以便于读者复习。值得一提的是,本书提供了丰富的例题和非常详尽的解答,同时每章还提供了大量的练习题,对于提高读者对电子电路知识的应用能力大有帮助。对于重要参数、公式、结论和概念,本书采用不同字体样式来突出表示,同时提供了大量总结性图表,增强了可读性。本书上述特点使其不仅可以作为一本优秀的教材,也可以作为电子、计算机、通信等相关专业的一本很有价值的参考书。

李立华负责全书的审校,并且在最新的版本中对教材使用中出现的、以及译文进行了修订。前言及第 3 章至第 5 章、第 10 章和第 11 章由李立华翻译,第 6 章至第 9 章由李永华翻译,第 1 章和第 2 章由许晓东翻译,第 12 章和第 13 章由王莹翻译。在本书的翻译过程中,北京邮电大学蒯志清教授、刘宝玲教授和已退休的张春茂教授都给予了大量的帮助和指导,译者在此表示衷心感谢!

由于译者水平有限,书中难免存在错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

译者
北京邮电大学
2016 年 5 月

目 录

第1章 半导体二极管	1
1.1 概述	1
1.2 半导体材料:锗、硅和砷化镓	2
1.3 共价键和本征材料	3
1.4 掺杂材料: n 型材料和 p 型材料	5
1.5 半导体二极管	6
1.6 理想特性与实际特性	14
1.7 电阻水平	16
1.8 二极管等效电路	20
1.9 势垒电容和扩散电容	22
1.10 反向恢复时间	23
1.11 二极管规格表	24
1.12 半导体二极管符号	27
1.13 齐纳二极管	27
1.14 发光二极管	31
1.15 小结	37
1.16 计算机分析	38
习题	43
第2章 二极管应用	46
2.1 概述	46
2.2 负载线分析	47
2.3 等效模型分析	50
2.4 与/或门	54
2.5 正弦波输入、半波整流	56
2.6 全波整流	58
2.7 限幅电路	61
2.8 钳位电路	68
2.9 齐纳二极管	71
2.10 小结	78
习题	79
第3章 双极性结型晶体管	87
3.1 概述	87
3.2 晶体管的结构	88
3.3 晶体管的工作原理	89
3.4 共基组态	90
3.5 晶体管放大原理	93
3.6 共射组态	94

3.7	共集组态	99
3.8	晶体管的工作限	100
3.9	晶体管规格说明书	102
3.10	晶体管外形及引脚识别	105
3.11	小结	107
	习题	108
第4章	BJT 电路直流偏置	111
4.1	概述	111
4.2	工作点	112
4.3	固定偏置电路	113
4.4	射极偏置	119
4.5	分压式偏置	123
4.6	电压反馈式直流偏置	127
4.7	其他偏置电路	130
4.8	晶体管开关电路	133
4.9	pnp 型晶体管	137
4.10	偏置的稳定性	138
4.11	小结	139
	习题	140
第5章	BJT 交流分析	147
5.1	概述	147
5.2	交流放大	147
5.3	BJT 管建模	148
5.4	r_e 晶体管模型	150
5.5	混合等效模型	155
5.6	混合 π 模型	160
5.7	晶体管参数的变化	161
5.8	固定偏置共射放大电路	163
5.9	分压式偏置共射放大电路	165
5.10	射极偏置共射放大电路	167
5.11	射极跟随电路	172
5.12	共基电路	175
5.13	集电极反馈电路	177
5.14	集电极直流反馈电路	181
5.15	电流放大倍数的确定	183
5.16	R_L 和 R_S 的影响	184
5.17	双端口网络方法	189
5.18	总结表	193
5.19	级联系统	196
5.20	达林顿复合管	200
5.21	反馈对复合管	205

5.22	镜像电流源电路	208
5.23	电流源电路	210
5.24	简化混合等效模型	211
5.25	小结	216
	习题	218
第6章	场效应晶体管	233
6.1	概述	233
6.2	结型场效应管的构造和特性	234
6.3	转移特性	239
6.4	规格清单(结型场效应管)	242
6.5	重要关系	244
6.6	耗尽型 MOS 场效应管	244
6.7	增强型 MOS 场效应管	249
6.8	互补型 MOS 场效应管	255
6.9	总结表	256
6.10	小结	257
	习题	258
第7章	场效应管的偏置	261
7.1	概述	261
7.2	固定偏置电路	262
7.3	自偏置电路	264
7.4	分压偏置电路	269
7.5	耗尽型 MOSFET	273
7.6	增强型 MOSFET	276
7.7	总结表	280
7.8	组合电路	281
7.9	p 沟道场效应管	283
7.10	小结	285
	习题	286
第8章	场效应管放大器	291
8.1	概述	291
8.2	场效应管的小信号模型	292
8.3	结型场效应管固定偏置的共源放大电路	297
8.4	结型场效应管自偏置的共源放大电路	299
8.5	结型场效应管分压偏置的共源放大电路	303
8.6	结型场效应管的源极跟随器(共漏极)电路	304
8.7	结型场效应管的共栅极电路	307
8.8	耗尽型 MOSFET	310
8.9	增强型 MOSFET	311
8.10	增强型 MOSFET 漏极反馈共源放大电路	312
8.11	增强型 MOSFET 分压偏置共源放大电路	315

8.12	总结表	315
8.13	R_L 和 R_{sig} 的影响	317
8.14	级联电路	320
8.15	小结	323
	习题	323
第9章	BJT 和 FET 的频率响应	330
9.1	概述	330
9.2	一般的频率因素	330
9.3	低频分析——伯德图	332
9.4	低频响应——BJT 放大器	337
9.5	低频响应——FET 放大器	340
9.6	密勒效应电容或密勒电容	342
9.7	高频响应——BJT 放大器	344
9.8	高频响应——FET 放大器	349
9.9	多级频率响应	351
9.10	小结	352
	习题	354
第10章	运算放大器	358
10.1	概述	358
10.2	差分放大电路	360
10.3	差模和共模操作	367
10.4	BIFET, BiMOS 和 CMOS 构成的差分放大电路	370
10.5	运算放大器基础	372
10.6	运算放大器参数——直流补偿参数	377
10.7	运算放大器参数——频率参数	379
10.8	运算放大器规格说明书	381
10.9	小结	387
	习题	387
第11章	运算放大器的应用	390
11.1	运算电路	390
11.2	有源滤波器	393
11.3	比较器应用	396
11.4	施密特触发器	398
11.5	小结	401
	习题	402
第12章	功率放大器	407
12.1	概述——功率放大器的定义与类型	407
12.2	串馈型甲类功率放大器	408
12.3	变压器耦合甲类功率放大器	412
12.4	乙类功率放大器的工作	418
12.5	乙类功率放大器	422

12.6	丙类和丁类功率放大器	427
12.7	小结	428
	习题	429
第 13 章	反馈电路	431
13.1	反馈的概念	431
13.2	反馈的组态类型	432
13.3	实用反馈电路	437
13.4	反馈放大器——相位和频率考虑	442
13.5	小结	443
	习题	444

第1章 半导体二极管

学习目标

- 认识硅、锗和砷化镓这三种重要的半导体材料的一般特性
- 理解电子和空穴的导电原理
- 能够描述 n 型和 p 型半导体材料的区别
- 掌握二极管在无偏置、正向偏置和反向偏置条件下的基本工作原理和特性
- 能够通过特性曲线计算二极管的直流、交流和平均交流电阻
- 理解等效电路的概念,包括理想的和实际的
- 了解齐纳二极管和发光二极管的应用和特性

本章提纲

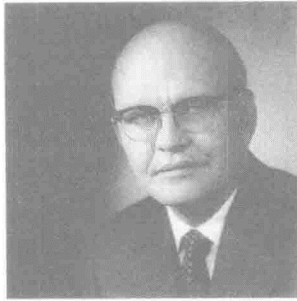
- | | |
|----------------------------|---------------|
| 1.1 概述 | 1.9 势垒电容和扩散电容 |
| 1.2 半导体材料:锗、硅和砷化镓 | 1.10 反向恢复时间 |
| 1.3 共价键和本征材料 | 1.11 二极管规格表 |
| 1.4 掺杂材料: n 型材料和 p 型材料 | 1.12 半导体二极管符号 |
| 1.5 半导体二极管 | 1.13 齐纳二极管 |
| 1.6 理想特性与实际特性 | 1.14 发光二极管 |
| 1.7 电阻水平 | 1.15 小结 |
| 1.8 二极管等效电路 | 1.16 计算机分析 |

1.1 概述

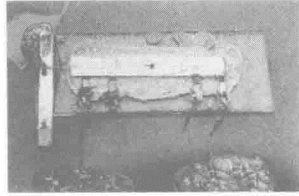
像其他领域的技术一样,电子技术领域值得关注的事情之一是其基本原理随时间变化而变化的部分如此之少。系统越来越小、操作速度越来越快、设计精巧的小装置层出不穷,让我们只能猜想技术到底会带来什么。然而,如果我们花一点时间考虑一下,大多数我们当前使用的设备都是在 20 年前发明的,本书中介绍的设计技术从 20 世纪 30 年代开始就一直在沿用。可以认识到,我们看到的大多数系统其实主要是那些设备在构造技术和应用方面的提高带来的,而不是新元件和基本设计方面的新理论发展而来的。因此,本书中讨论的大多数设备已经存在了一段时间了,写于几十年前的相关书籍仍然是很好的参考资料,其内容并没有太大改变,主要的变化体现在理解这些设备如何工作、其能力的全部范围以及相关基本理论的教学方法改进等。这样做给新同学带来的好处在于我们希望本书可以使学生相对容易地掌握其内容,并且提供的信息可以在未来多年内仍然可以得到应用。

近年来出现的小型化趋势让我们猜想其可能的极限到底有多小。现在,一个完整的系统可以在晶片上,比早些年电路中一个元件的千分之一都还要小。第一个集成电路(IC)是由 Jack Kilby 在德州仪器公司工作时于 1958 年发明的(见图 1.1)。而现在,英特尔奔腾 4 处理器拥有超过 4200 万晶体管及许多其他元件,如图 1.2 所示。目前的进展显示,不久之后 10 亿个晶体管可以放置在小于指

甲面积的硅片上。集成化已经达到了一个很高的程度,使容器的主要作用仅仅成为提供处理设备或系统的方式,并提供与电路中其他部分连接的机制。



(a)



(b)

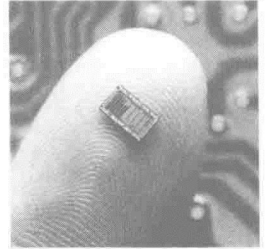


图 1.2 计算机芯片 (Stock 图像/CORBIS 版权所有)

图 1.1 (a) Jack St. Clair Kilby, 集成电路的发明人及电子手持计算器的共同发明人之一(经德州仪器公司许可)。出生于密苏里州杰弗逊市, 1923 年, 威斯康星州立大学硕士毕业, 德州仪器公司器件部门工程技术总监, IEEE 会士, 持有 60 多项美国专利。(b) 1958 年发明第一块集成电路, 即一个相移振荡器(经德州仪器公司许可)

这里介绍的第一个设备是所有电子设备中最简单的, 然而其应用范围却似乎是无穷尽的, 我们将用两节来介绍这个设备, 以介绍其通常用于电晶体设备的材料, 并回顾电子电路的基本原理。

1.2 半导体材料: 锗、硅和砷化镓

构造每一个分离(独立)的电晶体(硬晶体结构)电子设备或集成电路都是由高质量的半导体材料开始的。

半导体是一类特别的材料, 其导电性介于良导体与绝缘体之间。

总体来说, 半导体器件包含两大类, 单晶体和复合晶体半导体, 单晶体半导体如锗(Ge)和硅(Si), 有重复的晶体结构, 而复合半导体如砷化镓(GaAs)、硫化镉(CdS)、氮化镓(GaN)和磷砷化镓(GaAsP)等, 是由具有不同原子结构的两种或更多种半导体材料构成的。

构成电子设备最常用的三种半导体是锗、硅和砷化镓。

在二极管于 1939 年、晶体管于 1947 年被发明后最初的几十年中, 锗基本上作为专用材料, 因为它相对来说比较常见而且数量也较多, 它也相对更容易提炼至高纯度, 这是制作过程中非常重要的环节。然而, 在早期使用中发现锗作为基本材料制作的二极管和晶体管, 对温度变化的敏感性较大, 因此其稳定性较差。当时, 科学家们发现了另一种物质——硅, 其温度敏感性较好, 但是提炼高纯度硅的过程仍然有待改进。最终在 1954 年, 第一批硅晶体管制作完成, 硅迅速成为了半导体的使用材料。不仅因为硅对温度的敏感性较低, 而且因为硅是世界上现存可用物质中数量最丰富的。硅的使用大量增加, 其后经过多年, 硅制造与设计技术日益进步, 最终发展到当前的水平。

然而随着时间的推移, 电子领域对速度的追求越来越高。计算机处理的速度越来越快, 通信系统也工作在更高的性能水平, 我们需要找到满足这些需求的半导体材料。20 世纪 70 年代早期, 第一个砷化镓晶体管出现了, 这种新的晶体管工作速度是硅的 5 倍。然而, 由于硅在使用方面有着多年的设计与制造方面的成就, 硅晶体管电路的成本更加便宜, 而且还有高效设计策略的优势, 这让硅得到了很多的应用。砷化镓在高纯度情况下很难制造, 也更昂贵, 而且在早期发展阶段, 没有设计方面的支持。但是提高速度的需求也导致了更多支持砷化镓的研究, 到目前为止, 砷化镓材料已经广泛应用于新的高速、超大规模电路设计中。

上述对半导体材料发展历史的简要描述并不意味着砷化镓不久以后将成为唯一合适的电晶体构造材料,锗设备仍然还在制造,虽然其应用范围有限。尽管锗是对温度敏感的半导体,它还是具有一些特性,并在有限的一些领域中得到应用。由于其材料丰富、制造成本低,锗将仍然存在于产品目录中。如前面提到的,硅具有多年发展的优势,并且在电子元件和集成电路应用材料中处于主导地位。砷化镓更昂贵,但随着制造方法的改进和更高速度的需求,它将挑战硅在半导体材料中的主导地位。

1.3 共价键和本征材料

想要完全了解为什么锗、硅和砷化镓被选为电子工业的半导体材料,需要先了解每一种材料的原子结构及原子是如何结合在一起并构成晶体结构的。每个原子是由三种基本粒子组成的:电子、质子和中子。在晶格结构中,中子和质子构成原子核,电子围绕原子核在固定的轨道运动,图1.3提供了这三种材料的玻尔模型。

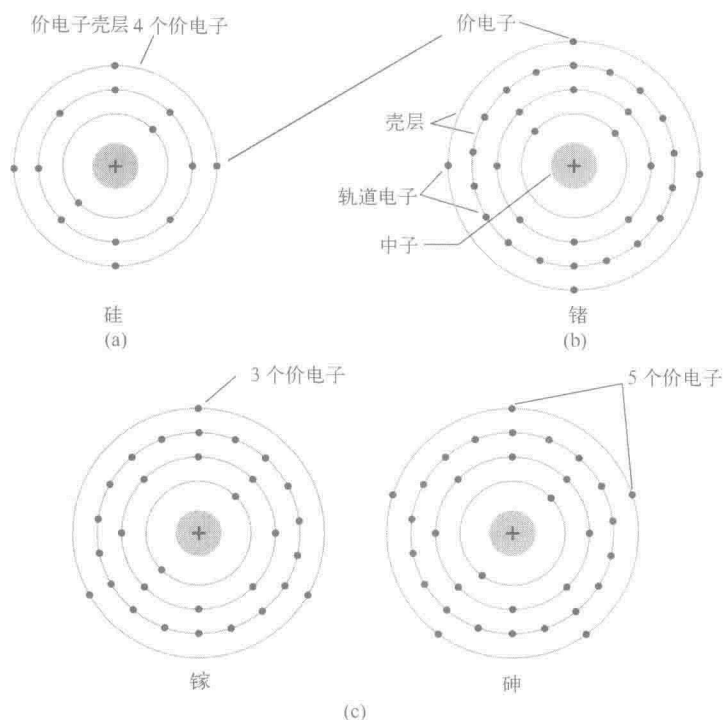


图 1.3 原子结构。(a)硅;(b)锗;(c)砷化镓

在图1.3中,硅具有14个电子,锗具有32个电子,镓具有31个电子,砷具有33个电子(砷还是一种剧毒的化学药剂)。锗和硅在最外层都具有4个电子,称为价电子。锗具有3个价电子,砷具有5个价电子。具有4个价电子的原子称为四价原子,具有3个价电子的原子称为三价原子,具有5个价电子的原子称为五价原子。“价”用于表示将其中一个价电子从原子结构中移除需要的势能(电离势能)远远低于原子结构中的其他电子。

在一个纯的硅或锗晶体中,一个原子的4个价电子与相邻原子的4个价电子构成键合关系,如图1.4所示。

原子的键合是由共享电子加强的,称为共价键。

由于砷化镓是一种复合半导体,在两个不同原子间存在电子共享,如图1.5所示,每个原子都有其他类型的原子所环绕,也存在类似于锗和硅结构中的电子共享,只是砷原子提供5个电子,而镓原子提供3个电子而已。

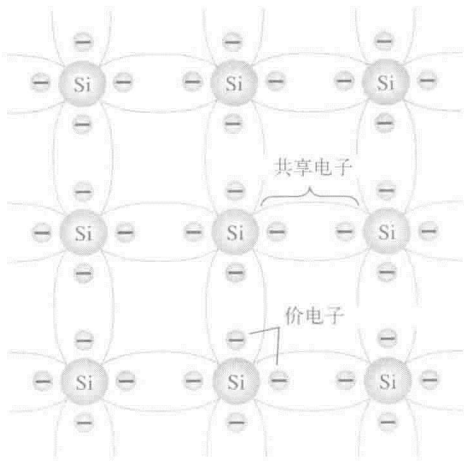


图 1.4 硅原子的共价键

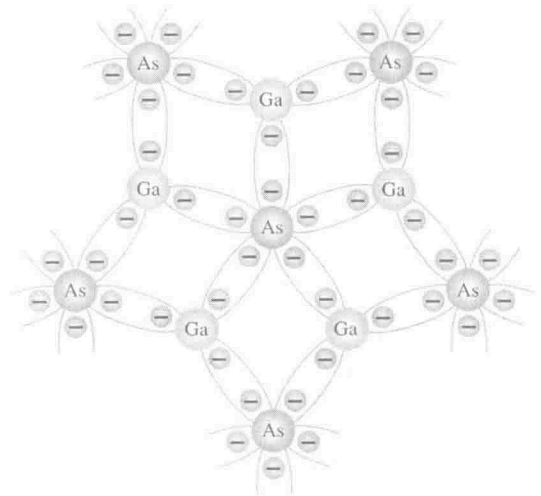


图 1.5 砷化镓晶体的共价键

虽然共价键将导致电子与其原子间更强的结合力,但是电子仍然有可能由外部原因而吸取足够的动能,突破共价键并处于“自由”状态。“自由电子”是指任何离开晶格结构的电子,并对外加电场敏感,例如由电压源或任何不同的电势造成的电场。外部原因包括由光子表示的光能和由环境媒介带来的热能(热量)等效应。在室温下, 1 cm^3 的硅本征材料中大约含有 1.5×10^{10} 个自由载流子,即在小于一块方糖大小的空间里存在 15 000 000 000 (150 亿) 个电子——非常巨大的数量。

“本征”用于任何经过仔细提纯的半导体材料,将其杂质降低到一个很低的级别——最终达到目前工艺所能达到的纯度。

仅由于外部原因引起的材料中的自由电子称为**本征载流子**,表 1.1 中对比了每立方厘米的锗、硅和砷化镓材料中的本征载流子数量。有趣的是,其中锗包含的数量最多,砷化镓最少。事实上,锗中的数量超过砷化镓的两倍,本征形式的载流子数量非常重要,但是材料的一些其他特性在确定其使用领域方面也非常重要。其中一个因素是材料中自由载流子的**相对运动**(μ_n),即自由载流子可以在材料中运动的能力。表 1.2 清晰地表示了砷化镓中自由载流子的运动力超过硅的 5 倍,对应地将导致使用砷化镓材料的电子设备其响应时间比用硅材料制造的同样的电子设备要快 5 倍。注意,锗中的自由载流子的运动性超过硅材料的两倍,所以锗在高速射频应用中将会继续使用。

表 1.1 本征载流子

半导体	本征载流子 (cm^3)
GaAs	1.7×10^6
Si	1.5×10^{10}
Ge	2.5×10^{13}

表 1.2 相对运动因子 μ_n

半导体	μ_n [$\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$]
Si	1500
Ge	3900
GaAs	8500

这几十年来最重要的进展之一是在制造半导体材料时提高纯度的能力,回忆一下,这曾经是硅在早期应用过程中碰到的问题之一——制造高纯度的锗更容易一些。杂质含量在十亿分之一级别的纯度今天已经很常见,可以应用于大规模集成电路的更高纯度也可以达到。有人或许会问,如此高的纯度是否需要?这是确实需要的。可以设想一下,在一片硅中加入百万分之一的杂质(合适的类型),就可以把一个非常差的导体变为具有很好导电性的导体,通过此过程改变材料特性的能力称为“掺杂”,锗、硅和砷化镓很容易接受这一点。很明显,当我们处理半导体介质时,需要进行一个全新水平的比较。掺杂过程将在 1.4 节和 1.5 节详细介绍。

半导体与导体之间一个重要且有趣的区别是它们受热后的反应。对于导体,其电阻会随着热量增加而增大,这是因为导体中的载流子数量不会随着温度的升高而有明显的增加。但它们相对固定位置

的振动模式使得通过材料的载流子的流动更加困难。具有这种反应方式的材料称为具有正温度系数。然而半导体材料在受热后具有更好的传导特性,因为当温度升高时,更多的价电子吸收到足够的热能来打破共价键的同时增加了自由载流子的数量,因此,

半导体材料具有负温度系数。

1.4 掺杂材料: n 型材料和 p 型材料

因为硅是最常用于晶体管设备制造的基础材料,以下几节将只针对硅半导体,因为锗和砷化镓具有类似的共价键,讨论可以很容易地延伸至在制造过程中使用的其他材料。

如前所述,半导体材料可以通过在相对纯净的半导体材料中添加特定的杂质原子来改变其特性。即使只添加千万分之一的杂质,也可以足够用于改变材料的导电特性。

经过掺杂过程的半导体材料称为掺杂半导体。

在半导体的制作中,共有两种同样重要的掺杂材料: n 型材料和 p 型材料,分别将在下面的小节中详细描述。

n 型材料

n 型材料和 p 型材料都是由添加规定数量的杂质原子到硅基片中形成的, n 型材料是通过掺杂一定数量的具有5个价电子的元素形成的,如锑、砷和磷。

图1.6表现了这种掺杂元素的作用(使用锑作为硅基片的掺杂元素),注意图1.6中4个共价键依然存在,但是由于掺杂元素含有5个价电子,所以剩余的一个价电子没有形成共价键。这个剩余的电子与其所属原子间的关系非常松散,在新构成的 n 型材料中可以相对自由地运动,形成自由电子。由于掺杂的原子贡献了一个相对自由的电子,

这种含有5个价电子的杂质原子称为施主原子。

虽然 n 型材料中包括了很多的自由载流子,但它仍然呈现电中性,因为原子核中带正电的质子与带负电的电子在数量上仍旧保持相等。认识到这一点很重要。

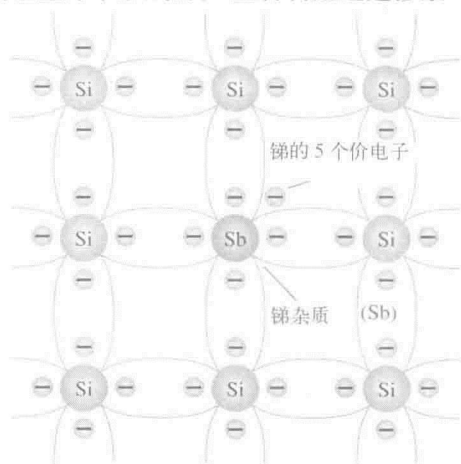


图1.6 n 型材料中的锑杂质

p 型材料

p 型材料是通过在纯的锗或硅晶体中掺杂具有三个价电子的元素形成的,常用的此类元素包括硼、镓和铟。图1.7示出了将硼元素掺杂到一个硅基片上产生的效果。

注意,现在的情况是缺少足够的电子来填补到新网格的共价键中,由此导致的空位称为空穴,由一个圈或一个加号表示,表示缺少一个负电荷。因此,这个空位可以方便地接受一个自由电子,

这种含有三个价电子的杂质原子称为受主原子。

p 型材料也是电中性的,其原因与 n 型材料相同。

电子流与空穴流

图1.8中表示了空穴传导的情况,如果一个价电子获得足够的动能,可以突破它自身的共价键并填补到空穴形成的空位中,这样在电子释放后其共价键将会出现一个空穴。因此,出现了空穴向左移

动,而电子向右移动的情况,如图 1.8 所示。本书中介绍的方向是常规的电荷流动方向,是由空穴流动的方向指示的。

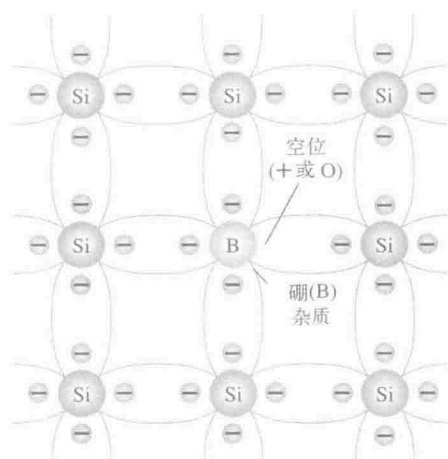


图 1.7 p 型材料中的硼杂质

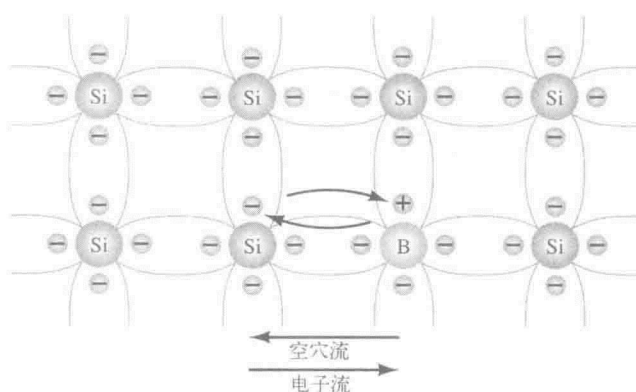


图 1.8 电子流与空穴流

多数载流子和少数载流子

在本征状态,锗或硅中自由电子的数目仅取决于共价键中非常少的电子,它们从热源或光源中获得足够的能量挣脱共价键的束缚,或者是少量不能除去的杂质带来的电子。共价键结构中留下来的空位表示了非常有限数量的空穴。在 n 型材料中,空穴的数量与本征情况下变化不大,因此其净效果是自由电子数量远远多于空穴数量。由于上述原因,如图 1.9(a)所示,

在 n 型材料中,自由电子称为多数载流子,空穴称为少数载流子。

对于 p 型材料,空穴数量远远多于自由电子数量,如图 1.9(b)所示,因此,

在 p 型材料中,空穴称为多数载流子,自由电子称为少数载流子。

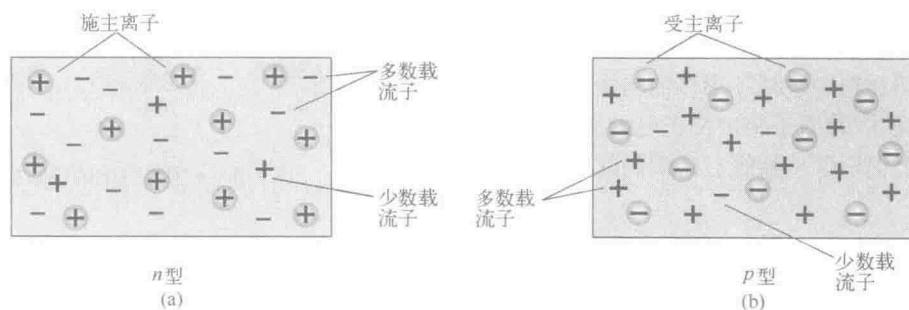


图 1.9 (a) n 型材料;(b) p 型材料

对于 n 型材料,当施主原子的第 5 个电子离开其所属原子时,该原子将带正电,成为施主离子,用加号 \oplus 表示。同样的原因,对于 p 型材料,当受主原子接受一个电子时,该原子将带负电,成为受主离子,用减号 \ominus 表示。

n 型材料和 p 型材料是构成半导体设备的基本材料,我们将在 1.5 节中看到,把一个 n 型材料和 p 型材料结合起来,将产生一个在电子系统中具有非常重要作用的半导体元件。

1.5 半导体二极管

现在 n 型材料和 p 型材料都存在了,可以构造我们的第一个电子设备:半导体二极管,通过简单

地将 n 型材料和 p 型材料结合在一起,不需要其他的,仅将电子作为多数载流子的材料与空穴作为多数载流子的材料结合即可,这种设备有着广泛的应用,其构造的简单性加强了电晶体时代发展的重要性。

无偏置 ($V_D = 0\text{ V}$)

当两个材料结合时,电子与空穴在结合处将会合并,在结合处附近,自由载流子数目减少,如图 1.10(a) 所示。注意,此区域中显示的粒子仅是一旦自由载流子结合后遗留下的带正电和负电的离子。它们形成了一个内部电场,称为内建电场,电场方向为从正离子指向负离子。

这个因为自由载流子被“耗尽”而形成的由暴露的正离子和负离子构成的区域称为耗尽层。耗尽层中的离子形成内建电场。

如果在每个材料的末端连接引线,则可以构成一个双端设备,如图 1.10(a) 和图 1.10(b) 所示。此时可以应用三种情况:无偏置、正向偏置和反向偏置。其中,偏置是指为得到一定的响应而在设备两个终端之间外加的电压。图 1.10(a) 和图 1.10(b) 所示的情况因为没有应用外加的偏置电压,是无偏置的情况,仅在实验平台上具有两个分离极的二极管。图 1.10(b) 中提供了一个半导体二极管的符号,表现了其与 $p-n$ 结的关系。每一幅图中外加电压都是 0 V (无偏置),相应的电流是 0 A ,更像一个孤立的电阻。没有外加电压时,电流为 0 A 。虽然我们刚开始讨论,但要注意图 1.10(b) 中加在二极管上电压的极性及电流的流向也是非常重要的。这种极性是半导体二极管预先设定的极性,如果加在二极管上的外加电压极性与图 1.10(b) 中二极管极性一致,将被认为是正电压;如果相反,则认为是负电压。相同的标准可以同样用于图 1.10(b) 中电流的预先设定方向上。

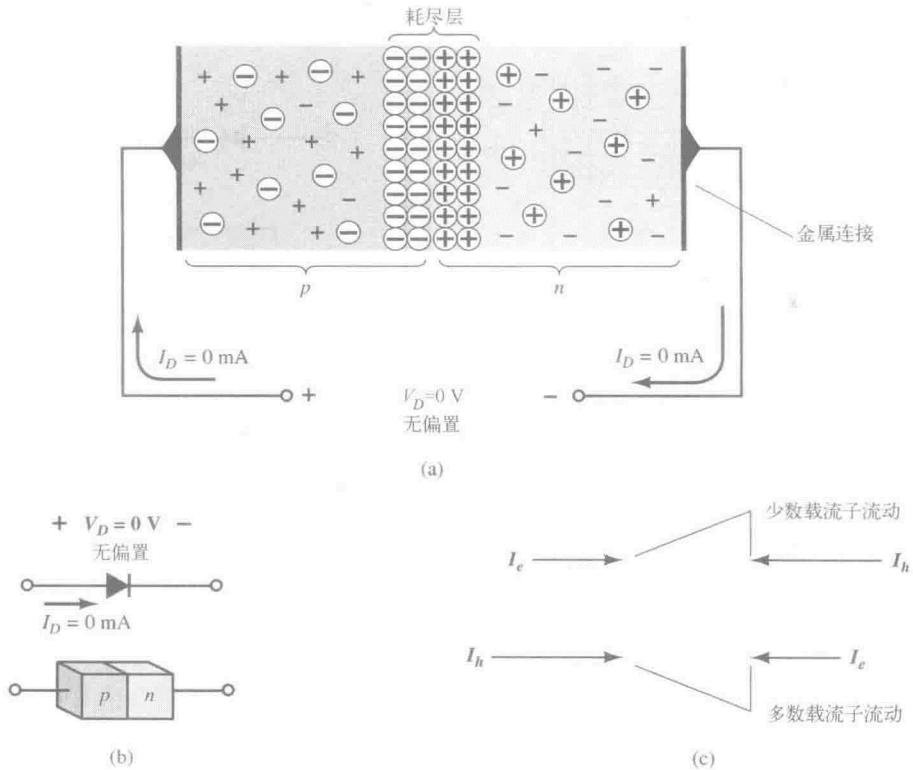


图 1.10 没有外加偏置电压的 $p-n$ 结。(a) 内部电荷分布;(b) 二极管符号,包括定义的极性及电流方向;(c) 表示在设备外加电压 $V_D = 0\text{ V}$ 时,净载流子流量为零

在无偏置情况下, n 型材料中的任何少数载流子(空穴)如果在耗尽区域中,将会迅速地移动至 p 型材料中。少数载流子距离结越近,其受到的负离子层的引力就越大,受到耗尽层中 n 型材料的正离

子层的阻碍就越小。因此,我们可以得出结论,在后面的讨论中, n 型材料中位于耗尽层的任何少数载流子将会直接移动至 p 型材料中,每种材料中少数载流子的流动由图 1.10(c)中的上半部分表示。

n 型材料中的多数载流子(电子)必须克服正离子层的引力及 p 型材料中负离子层的阻碍,才能移动至 p 型材料的耗尽层以外的区域。然而, n 型材料中的多数载流子的数量太大,以至于总有不变的小数量的多数载流子拥有足够大的动能,可以穿过耗尽层到达 p 型材料中。同样,在 p 型材料中的多数载流子(空穴)也将会发生同样的过程,这种多数载流子导致的流动由图 1.10(c)的底部表示。

仔细观察图 1.10(c)可以发现,该流向量的相对数量在每一个方向上的净流量为零,每一种载流子流向量的抵消由交叉线表示,由所画向量的长度表示空穴流比电子流长,表示这两个数量可以不一样,并且每一种材料的掺杂水平可能导致不等的空穴和电子组成的载流子流。总结如下:

在半导体二极管两端不施加偏置电压时,在单一方向上电荷的净流量为零。

换言之,无偏置情况下电流为零,如图 1.10(a)和图 1.10(b)所示。

反向偏置 ($V_D < 0$ V)

如果把一个 V_D 伏的外部电压施加到 p - n 结上,使正极连接到 n 型材料,负极连接到 p 型材料,如图 1.11 所示。 n 型材料耗尽层中正离子的数量将由于大量的自由电子被外加电压的正极吸引而增加。由于同样的原因, p 型材料中的负离子也将增加。因此,其净效果将造成耗尽层的加宽,耗尽层的加宽将形成更大的势垒,以至于多数载流子将无法克服,可以有效地将多数载流子流减为零,如图 1.11(a) 所示。

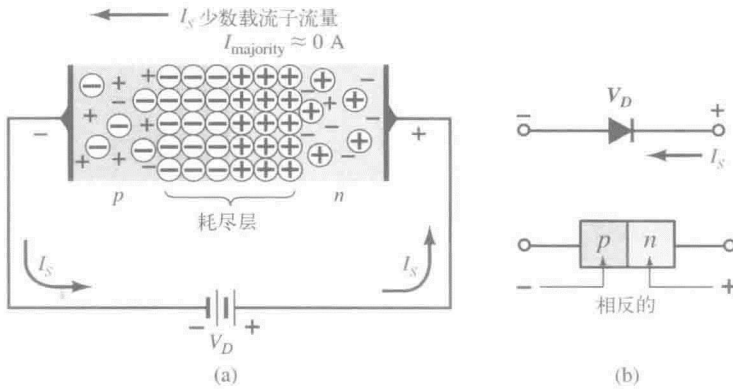


图 1.11 反偏 p - n 结。(a) 反偏状态下电荷的内部分布;(b) 反偏电压极性和反向饱和电流的方向

然而,少数载流子进入耗尽层的数量将会不变,与图 1.10(c)中无偏置情况时少数载流子流向量数量相同。

在反偏情况下的电流称为反向饱和电流,由 I_S 表示。

除了大功率设备之外,反向饱和电流很少超过几微安。事实上,近年来典型的硅器件的反向饱和电流值在纳安范围。术语饱和来自于反向电流很快即可达到最大值并且随着反偏电压的增加而不再有较大的变化这一事实,如图 1.13 中 $V_D < 0$ V 时的二极管特性。反偏情况表现在图 1.11(b)中,包括二极管符号和 p - n 结。需要特别注意的是, I_S 的方向与二极管符号的箭头方向相反。还要注意的,外加电压的负极性端连接到 p 型材料,正极性端连接到 n 型材料。

正向偏置 ($V_D > 0$ V)

正向偏置情况或“导通”状态是通过在 p 型材料上施加正电压,而在 n 型材料上施加负电压形成的,如图 1.12 所示。