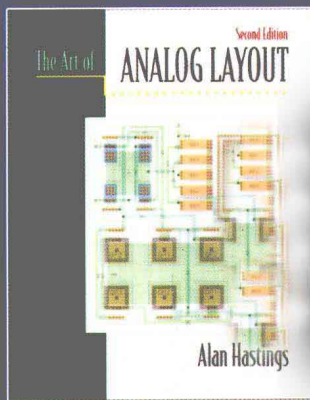


国外电子与通信教材系列

PEARSON

# 模拟电路版图的艺术 (第二版)

The Art of Analog Layout, Second Edition



Alan Hastings 著

为 等译



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

# 模拟电路版图的艺术

(第二版)

The Art of Analog Layout

Second Edition

[美] Alan Hastings 著

张 为 等译

电子工业出版社

People's Electronics Industry Press

100013 · BEIJING

## 内 容 简 介

作者 Alan Hastings 具有渊博的集成电路版图设计知识和丰富的实践经验。本书以实用和权威性的观点全面论述了模拟集成电路版图设计中所涉及的各种问题及目前的最新研究成果。书中介绍了半导体器件物理与工艺、失效机理等内容；基于模拟集成电路设计所采用的三种基本工艺：标准双极工艺、CMOS 硅栅工艺和 BiCMOS 工艺，重点探讨了无源器件的设计与匹配性问题，二极管设计，双极型晶体管和场效应晶体管的设计与应用，以及某些专门领域的内容，包括器件合并、保护环、焊盘制作、单层连接、ESD 结构等。最后介绍了有关芯片版图的布局布线知识。

本书可作为相关专业高年级本科生和研究生教材，对于专业版图设计人员也是一本极具价值的参考书。

Authorized translation from the English language edition, entitled **THE ART OF ANALOG LAYOUT, Second Edition**, ISBN: 978-0-13-146410-0 by ALAN HASTINGS, published by Pearson Education, Inc, publishing as Prentice Hall, Copyright©2006 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©2011.

本书简体中文版由 Pearson Education 培生教育出版亚洲有限公司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。

本书简体中文版贴有 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：01-2006-5237

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

模拟电路版图的艺术：第 2 版 / ( 美 ) 黑斯廷斯 ( Hastings, A. ) 著；张为等译.

北京：电子工业出版社，2011.9

书名原文：The Art of Analog Layout, Second Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-14393-9

I. ①模… II. ①黑… ②张… III. ①模拟电路-电路设计-高等学校-教材 IV. ①TN710.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 ( 2011 ) 第 168312 号

责任编辑：许菊芳

印 刷：北京京师印务有限公司

装 订：

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：34.75 字数：890 千字

印 次：2011 年 9 月第 1 次印刷

定 价：65.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题，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。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：( 010 ) 88258888。

## 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和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”。

为作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	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 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 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
	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 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 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 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 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 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 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 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 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、通信与信息工程学院院长 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委员
	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 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 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 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	

# 译 者 序

集成电路已进入深亚微米和SOC时代。作为设计与制造的纽带，版图的地位至关重要。在各类集成电路中，模拟集成电路由于对器件特性的依赖性更强，所以其性能更大程度地受到版图因素的影响。正如作者所述，模拟版图设计更像是从事艺术创作而不仅是研究一门科学。

本书是模拟集成电路版图设计领域的一部力作，自第一版正式出版以来一直受到广大读者的普遍欢迎，这也是促成第二版和中译本出现的主要原因。作者 Alan Hastings 是业界权威，在版图设计领域享有崇高的声望。本书结构合理、内容丰富、特色鲜明，读者无须掌握过多的器件物理和半导体工艺知识即可对模拟集成电路版图设计的理论和方法有完整而深刻的认识。书中大量的实例和习题有助于动手和实践能力的培养。

进入 21 世纪后，中国集成电路产业如雨后春笋般迅猛发展，集成电路各个环节的人才炙手可热。引进这样一部权威著作，无疑会对国内培养更多高水平模拟集成电路版图设计人才起到促进作用。原书作者也对第二版中译本的出现表示出极大关注。

本书由张为组织翻译，其中闫珍珍负责第 1 章和第 2 章的翻译工作；郝瑜霞负责第 3 章和第 4 章的翻译工作；吕波负责第 5 章的翻译工作；菅端端负责第 6 章的翻译工作；杨宇负责第 7 章的翻译工作；周永奇负责第 8 章和第 9 章的翻译工作；卜尔龙负责第 10 章和附录的翻译工作；冯煜晶负责第 11 章和第 12 章的翻译工作；李建恒负责第 13 章的翻译工作；任彤负责第 14 章的翻译工作。张为对全书内容进行了审校。此外，本书的翻译得到了天津大学电子信息工程学院领导、教师以及电子工业出版社外版教材事业部的大力支持与帮助。在此，对所有为这本书的出版提供了帮助的人们表示诚挚的感谢！

需要指出的是：有关集成电路版图和工艺的词汇及其译法尚无统一标准，特别是有关版图设计规则的内容，建议读者首先阅读附录 C，利用图例帮助理解，然后再开始正文的学习。由于译审者水平有限，译文中难免有不妥乃至错误之处，敬请读者不吝指正。

## 第二版前言

我最初撰写《模拟电路版图的艺术》一书的文稿时是用于一系列讲座的。很多人鼓励我将其出版。刚开始我有点犹豫，因为我认为读者非常有限。出版之后证明了我的担心是多余的。令我惊讶的是，《模拟电路版图的艺术》居然被翻译成了中文！

过去的几年时间提醒我第一版存在的局限性，并且促成了这次全面的修订。本书的每一章都经过了检查和校正，并且还加入了很多新内容和约50个新的图例。第二版介绍的新内容包括：

- 先进金属化系统
- 介质隔离
- MOS 晶体管的失效机制
- 集成电感
- MOS 安全工作区
- 非易失性存储器

在准备本书第二版期间，我从德州仪器的同事身上汲取了大量的经验和智慧。同时我还不断参阅 IEEE Xplore 网站的可用资源，尤其是 *IEEE Journal of Electron Devices* 上的文献。我要向所有帮助我理解或纠正了我很多错误的人们表示感谢。如此长时间大强度的工作虽然无法使每件事都做到完美，但是第二版确实比第一版有了很大的进步。

Alan Hastings



# 第一版前言

集成电路只有在高倍放大下才会展露其真实面目。无论是覆盖在表面的错综复杂的微细连线，还是其下方同样复杂的掺杂硅结构，所有这些都是依据一套称为版图的设计图制作而成的。模拟和混合信号集成电路版图设计难以自动实现。每个多边形的形状及位置都要求对器件物理原理、半导体制造和电路理论有深入的理解。尽管已有30年的研究，然而很多内容仍不确定。有些信息隐藏在晦涩的期刊文献以及未发表的手稿当中。本书以专题的形式将这些信息进行了汇总，主要目的是提供给从事版图设计的人员使用，对于希望更好地理解电路与版图关系的电路设计者也很有价值。

本书针对的是广泛的读者群，其中一些人对高等数学和固体物理仅有有限的了解。书中的数学内容很少，而将重点放在区分所有变量以及采用最容易理解的单位上。读者只需掌握基础代数和初步的电子学知识即可。书中许多习题以读者可以使用版图编辑软件为前提，但是不具备这些资源的读者仍然可以借助纸和笔完成大量的习题。

全书总共包括14章和5个附录。前两章概述了器件物理和半导体工艺。这两章中没有数学推导，而是将重点放在简单的口语化解释及可视模型上。第3章介绍了3种基本工艺：标准双极工艺、硅栅CMOS工艺以及模拟BiCMOS工艺。讲述的重点是剖面图以及剖面图与实例器件传统版图视图的对应关系。第4章涵盖的内容是常见失效机制，重点是版图在确定可靠性中的作用。第5章和第6章介绍了电阻和电容的版图。第7章以电阻和电容为例介绍了匹配原则。第8章至第10章介绍了双极器件的版图，而第11章和第12章介绍的是场效应晶体管的版图和匹配。第13章和第14章阐述了多个前沿问题，包括器件合并、保护环、ESD保护结构以及布局规划。附录中包括缩写词汇表、有关米勒指数的讨论、用于完成习题的版图规则范例以及书中所用公式的推导等内容。

Alan Hastings

# 致 谢

本书包含的信息是通过许多学者、工程师及技术人员的辛苦工作搜集而得的,但其中肯定还会由于许多人士的工作内容尚未发表,所以未能向他们表示感谢。我尽其所能参考了大量的基本发现和原理,但是在很多情况下却无法确定它们的出处。

我要向提供大量建议的 TI 同事表示感谢。尤其要感谢 Ken Bell, Walter Bucksch, Taylor Efland, Lou Hutter, Clif Jones, Alec Morton, Jeff Smith, Fred Trafton 和 Joe Trogolo, 他们为本书提供了非常重要的信息。同时还要感谢 Bob Borden, Nicolas Salamina 和 Ming Chiang 对我的鼓励, 否则本书根本无法完成。

# 目 录

第 1 章 器件物理 .....	1
1.1 半导体 .....	1
1.2 PN 结 .....	9
1.3 双极型晶体管 .....	16
1.4 MOS 晶体管 .....	20
1.5 JFET 晶体管 .....	25
1.6 小结 .....	27
1.7 习题 .....	28
第 2 章 半导体制造 .....	30
2.1 硅制造 .....	30
2.2 光刻技术 .....	33
2.3 氧化物生长和去除 .....	35
2.4 扩散和离子注入 .....	41
2.5 硅淀积和刻蚀 .....	46
2.6 金属化 .....	51
2.7 组装 .....	60
2.8 小结 .....	64
2.9 习题 .....	64
第 3 章 典型工艺 .....	66
3.1 标准双极工艺 .....	66
3.2 多晶硅栅 CMOS 工艺 .....	80
3.3 模拟 BiCMOS .....	96
3.4 小结 .....	110
3.5 习题 .....	110
第 4 章 失效机制 .....	113
4.1 电过应力 .....	113
4.2 玷污 .....	121
4.3 表面效应 .....	125
4.4 寄生效应 .....	139
4.5 小结 .....	154
4.6 习题 .....	155

<b>第 5 章</b>	<b>电阻</b> .....	157
5.1	电阻率和方块电阻 (薄层电阻) .....	157
5.2	电阻版图 .....	159
5.3	电阻变化 .....	162
5.4	电阻的寄生效应 .....	167
5.5	不同电阻类型的比较 .....	170
5.6	调整电阻阻值 .....	182
5.7	小结 .....	191
5.8	习题 .....	191
<b>第 6 章</b>	<b>电容和电感</b> .....	193
6.1	电容 .....	193
6.2	电感 .....	210
6.3	小结 .....	215
6.4	习题 .....	216
<b>第 7 章</b>	<b>电阻和电容的匹配</b> .....	218
7.1	失配的测量 .....	218
7.2	失配的原因 .....	220
7.3	器件匹配规则 .....	253
7.4	小结 .....	259
7.5	习题 .....	259
<b>第 8 章</b>	<b>双极型晶体管</b> .....	262
8.1	双极型晶体管的工作原理 .....	262
8.2	标准双极型小信号晶体管 .....	274
8.3	CMOS 和 BiCMOS 工艺小信号双极型晶体管 .....	292
8.4	小结 .....	306
8.5	习题 .....	307
<b>第 9 章</b>	<b>双极型晶体管的应用</b> .....	309
9.1	功率双极型晶体管 .....	309
9.2	双极型晶体管匹配 .....	327
9.3	双极型晶体管匹配设计规则 .....	340
9.4	小结 .....	345
9.5	习题 .....	345
<b>第 10 章</b>	<b>二极管</b> .....	349
10.1	标准双极工艺二极管 .....	349
10.2	CMOS 和 BiCMOS 工艺二极管 .....	363
10.3	匹配二极管 .....	365

10.4	小结 .....	368
10.5	习题 .....	368
<b>第 11 章</b>	<b>场效应晶体管 .....</b>	<b>370</b>
11.1	MOS 晶体管的工作原理 .....	371
11.2	构造 CMOS 晶体管 .....	384
11.3	浮栅晶体管 .....	402
11.4	JFET 晶体管 .....	408
11.5	小结 .....	412
11.6	习题 .....	412
<b>第 12 章</b>	<b>MOS 晶体管的应用 .....</b>	<b>415</b>
12.1	扩展电压晶体管 .....	415
12.2	功率 MOS 晶体管 .....	423
12.3	MOS 晶体管的匹配 .....	440
12.4	MOS 晶体管的匹配规则 .....	454
12.5	小结 .....	457
12.6	习题 .....	457
<b>第 13 章</b>	<b>一些专题 .....</b>	<b>460</b>
13.1	合并器件 .....	460
13.2	保护环 .....	469
13.3	单层互连 .....	474
13.4	构建焊盘环 .....	479
13.5	ESD 结构 .....	483
13.6	习题 .....	496
<b>第 14 章</b>	<b>组装管芯 .....</b>	<b>500</b>
14.1	规划管芯 .....	500
14.2	布局 .....	506
14.3	顶层互连 .....	511
14.4	小结 .....	520
14.5	习题 .....	520
<b>附录 A</b>	<b>缩写词汇表 .....</b>	<b>523</b>
<b>附录 B</b>	<b>立方晶体的米勒指数 .....</b>	<b>527</b>
<b>附录 C</b>	<b>版图规则实例 .....</b>	<b>529</b>
<b>附录 D</b>	<b>数学推导 .....</b>	<b>536</b>
<b>附录 E</b>	<b>版图编辑软件的出处 .....</b>	<b>541</b>

# 第1章 器件物理

在1960年以前,大多数电子电路采用真空电子管完成放大和整流中的关键任务。普通量产的调幅收音机需要5支电子管,而一台彩色电视机则至少需要20支。真空管体积大、易碎并且价格昂贵,它们散发出大量的热,而且可靠性低。因此,只要电子学依赖于真空管,那么建立由成千上万支有源器件组成的系统几乎是不可能的。

1947年双极型晶体管(BJT)的出现标志着固态革命的开始。这种新型器件体积小、价格便宜、坚固且性能可靠。固态电路使便携式晶体管收音机、助听器、石英表、按键式电话、CD播放机和个人电脑等产品的出现成为可能。

固态器件由表面掺入杂质的晶体形成。这些杂质改变了晶体的电性能,使它能够放大或调制电信号。为了理解其工作原理必须掌握有关器件物理的知识。本章不仅包括器件物理的基本知识,此外还介绍了3种最重要的固态器件的工作原理:结型二极管、双极型晶体管和场效应管(FET)。在第2章将介绍这些器件以及其他固态器件的制造工艺。

## 1.1 半导体

在元素周期表中,元素的排列按照性质的相似性组成行和列。元素周期表左边的元素被称为金属,而右边的元素被称为非金属。金属通常是热和电的良导体。同时,它们具有可延展性和金属光泽。非金属不易导热导电,固态非金属易碎且缺乏金属光泽。周期表中间的一些元素(如硅和锗)的电学特性介于金属和非金属之间,这些元素被称为半导体。金属、半导体和非金属之间的差别源于各自原子中的电子排布方式。

每个原子由带正电的原子核及原子核周围的电子云组成。电子云中的电子数目等于原子核中的质子数目,也等于该元素的原子序数。因此,由于碳的原子序数为6,所以一个碳原子有6个电子。这些电子占据了一系列的壳层,这些壳层与洋葱的层状结构很相似。随着电子的增加,壳层由里向外被填充。最外层或价层可以不完全填充。占据最外层的电子被称为价电子。元素所拥有的价电子数目决定了其大部分的化学和电学特性。

元素周期表的每行都对应于一个壳层的填充情况。最左边的一列元素只有一个价电子,而最右边的元素则是满价层结构。价层被填满的原子具有特别稳定的结构。价层未被填满的原子通过交换或共用电子形成满价层结构。由于静电引力,交换或共用电子的原子间会形成化学键。根据价层填充的方法将生成3种类型的键。

金属键形成于金属元素原子之间,如钠。我们考虑大量钠原子靠得很近的情况。每个原子都有一个价电子围绕内壳层旋转,假设钠原子失掉了价电子。由于此时每个原子的价层都是满的,所以失掉的电子仍被带正电的钠原子所吸引,但却不被束缚。图1.1(A)所示是简化的钠晶体结构。静电力使钠原子具有规则的晶格结构。失掉的价电子能够在晶体里自由移动。由于存在大量的自由电子,从而使得金属钠成为极好的电导体,这也是元素产生金属光泽和高热传

导率的原因。其他金属也具有类似的晶体结构,它们都是靠金属键将大量的自由价电子和严格位于晶格格点的带电原子核结合在一起形成的<sup>①</sup>。

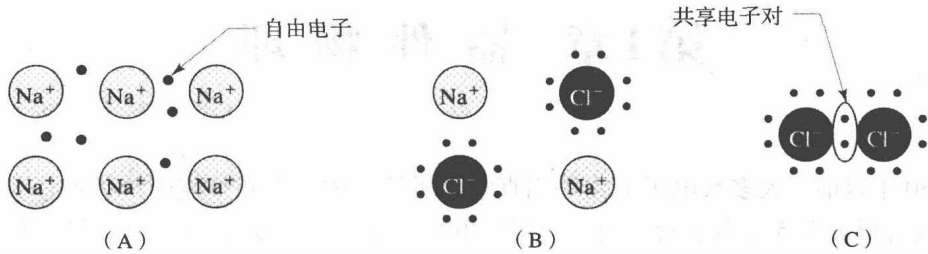


图 1.1 不同化学键简图: (A)金属键形成的钠晶体; (B)离子键形成氯化钠晶体; (C)共价键结合的氯分子

离子键形成于金属原子和非金属原子之间。考虑钠原子和氯原子靠得很近的情况:钠原子有一个价电子,而氯原子恰好缺少一个电子从而不能形成满价层。钠原子可将一个电子给氯原子,这就意味着两个原子都能拥有填满的最外层。交换之后,钠原子带正电,氯原子带负电。这两个带电的原子(或离子)互相吸引。因而,固态氯化钠由排布于规则晶格格点的氯离子和钠离子组成,并形成晶体[见图 1.1(B)]。由于所有电子都被束缚在不同原子的壳层中,因此晶体氯化钠是电的不良导体。

共价键存在于非金属原子之间。考虑两个靠得很近的氯原子。每个原子有 7 个价电子,而充满价层需要 8 个电子。假设两个原子中每个原子都贡献一个价电子形成共用电子对。这样,每个氯原子便获得了 8 个价电子:自己的 6 个电子,加上两个共用的电子。两个氯原子通过二者之间的共用电子对结合在一起形成分子[见图 1.1(C)]。共用电子对就形成了共价键。可以用缺少自由价电子来解释非金属不导电并且缺乏金属光泽的现象。因为电中性分子并不是强烈地互相吸引,所以许多非金属在室温下通常为气体,而不能浓缩为液体或者固体。

半导体原子之间也形成共价键。考虑一种典型的半导体(硅原子)的情况。每个原子有 4 个价电子,还需要 4 个才能填满价层。理论上讲,两个硅原子可以共享全部外层电子以获得满价层结构。但事实上这并不会发生,因为若 8 个电子聚在一起就会强烈地相互排斥。实际上,每个硅原子和周围的 4 个原子各形成一个共用电子对。这样,价电子分散到 4 个不同的位置上,相互之间的排斥就会达到最小。

图 1.2 显示了硅晶体的二维结构简图。每个小圆圈代表一个硅原子。在圆圈之间的直线代表了共用价电子对形成的共价键。每个硅原子有 8 个电子(4 对共用电子对),所以所有原子都是满价带结构。这些原子靠相互之间的共价键形成了分子网络。无数这样的晶格格点便代表了硅晶体的结构。整个晶体可看做是一个单分子,因而晶体硅牢固坚硬,并且有很高的熔点。由于所有的价电子都用于形成晶格结,所以硅是一种不良导体。

理论上任何 IV 族元素都可形成同样的大分子晶体<sup>②</sup>,包括碳、硅、锗、锡和铅。碳以金刚石的形式出现时具有所有 IV 族元素中最强的键。金刚石正是以它的强度和硬度而闻名的。硅

① 一些金属用空穴而不是电子导电,但本书中的结论仍然适用。

② 在元素周期表中,III,IV,V 和 VI 族元素位于长周期表的 III-B,IV-B,V-B 和 VI-B 列。II 族元素在 II-A 或 II-B 列。A/B 编号系统是历史的产物,国际理论和应用化学联合会(IUPAC)已经建议放弃使用;参见 J. Hudson 所著的 *The History of Chemistry* (New York: Chapman and Hall, 1992), pp.122-137。

和锗的键稍微弱一点,这是因为填满内壳层部分屏蔽了原子核与价电子之间的引力。由于拥有更多的内层壳层,所以锡和铅的共价键更弱一些,它们通常形成金属键晶体而非共价键大分子。在所有IV族元素中,只有硅和锗具有中等强度的价键,所以硅和锗是真正的半导体,而碳属于非金属,锡和铅则都属于金属。

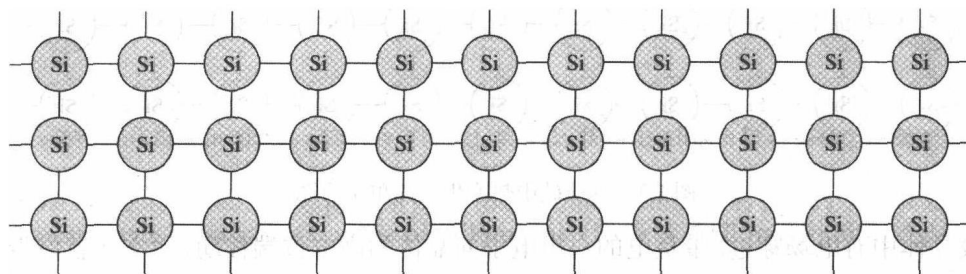


图 1.2 硅晶体的二维结构简图

### 1.1.1 产生与复合

IV族元素的导电能力随着原子序数的增加而增强。金刚石形式的碳是真正的绝缘体。硅和锗的导电能力强一些,但比金属材料(如锡和铅)仍然弱很多。由于导电能力适中,因而将硅和锗称为半导体。

导电意味着存在自由电子。半导体中至少有一部分价电子要脱离晶格参与导电。实验也确实证明了在纯硅和锗中有少量的可测量的自由电子浓度。这些自由电子的存在意味着存在某种机制提供了打破共价键所需的能量。热力学统计原理认为这种能量来自于晶格的无规则热运动。尽管一个电子的平均热能相对较小(25°C时大约为0.04 eV),但这些能量是随机分布的,所以某些电子就拥有更高的能量。价电子脱离晶格所需的能量称为带隙能量。带隙能量高的材料拥有牢固的共价键,因此拥有的自由电子数就少。而带隙能量低的材料会拥有更多的自由电子,从而具有更好的导电能力(见表1.1)。

表 1.1 IV族元素的一些特性

元素	原子数	熔点/°C	电导率( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) <sup>-1</sup>	带隙能量(eV)
碳(金刚石结构)	6	3550	$\sim 10^{-16}$	5.2
硅	14	1410	$4 \cdot 10^{-6}$	1.1
锗	32	937	0.02	0.7
白锡	50	232	$9 \cdot 10^4$	0.1

当电子离开晶格时就产生了一个空位。原先满价层的原子现在缺少了一个价电子,因而带正电。图1.3所示是这种情况的简单图示。电离的原子如果能从邻近的原子获得一个电子,便可回到满价层状态。这个很容易做到,因为它还和邻近的3个原子共享电子。但这个电子空位却没有消除,它只不过是转移到了邻近的另一个原子中。随着空位在不同原子之间转移,就好像在晶格中移动一样。这个移动的电子空位便称为空穴。

① 硅、锗的带隙能量参见 B. G. Streetman 所著的 *Solid State Electronic Devices*, 2d ed (Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1980), p. 443。碳的带隙能量参见 N. B. Hannay 等所著的 *Semiconductors* (New York: Reinhold Publishing, 1959), p. 52。锡的电导率参见 R. C. Weast 等所著的 *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 62d ed (Boca Raton, FL: CRC Press, 1981), pp. F135-F136。其他值通过计算而得。熔点参见 Weast, pp. B4-B48。



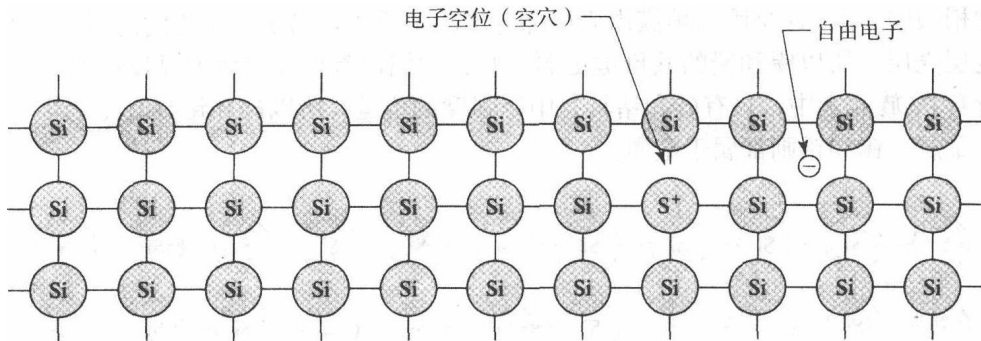


图 1.3 本征硅中热产生的简单示意图

假设晶体中有电场穿过。带负电的自由电子向晶体的高电位端移动，而空穴就像带正电的粒子朝着晶体的低电位端运动。晶格中的空穴就如同水中的气泡。气泡是没有液体的位置，空穴是没有价电子的位置。气泡向上运动是因为它周围的液体下沉，空穴向晶体的低电位端移动也是因为周围的电子移向晶体的高电位端。

空穴通常被当做亚原子微粒处理。一般来说，在解释空穴朝向晶体的低电位端运动时假设空穴带正电。同样，我们采用一个称为迁移率的量衡量空穴在晶体中的移动速率。空穴的迁移率低于电子，在体硅中，空穴和电子迁移率的典型值分别为  $480 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  和  $1350 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ①。空穴的低迁移率使之成为低效率的载流子，因此器件的性能取决于它所采用的载流子类型是空穴还是电子。

只要价电子离开晶格，便产生了一个自由电子和一个空穴。这两种粒子都在电场的作用下运动，电子朝正电势方向运动，产生电子流；而空穴朝负电势方向运动，产生空穴流。总电流等于电子流和空穴流之和。由于空穴和电子在传输电荷方面的作用，因而被称为载流子。

由于价电子离开晶格时同时产生了空穴，所以载流子通常是成对产生的。当晶格吸收能量时就会产生电子-空穴对。与热振动相同，光、辐射、电子轰击、快速热处理、机械摩擦以及很多其他方法都可以产生载流子。这里仅举一例，波长足够短的光就能够产生电子-空穴对。当晶格原子吸收一个光子后，出现的能量转移就可以打破共价键，从而产生一个自由电子和一个自由空穴。只有在光子具有足够可打破共价键的能量的情况下，光产生才会出现，这也就是要求光的波长要足够短的缘故。在大多数半导体中，可见光具有足够的能量来产生电子-空穴对。太阳能电池就是利用这种现象把太阳光转化为电流的。光电池和固态摄像探测器也利用了光产生原理。

正如载流子是成对产生的那样，它们也是成对复合的。载流子复合的真正机制取决于半导体的特性。在直接带隙半导体中，复合极其简单。当电子和空穴相撞时，电子便进入空穴中，同时被破坏了共价键得到修复。电子获得的能量以光子的形式辐射出去 [见图 1.4(A)]。在适当的激励下，直接带隙半导体能够发光。发光二极管 (LED) 就是靠电子-空穴对的复合发光的。制作 LED 的半导体的带隙能量决定了 LED 的发光颜色。同样，用来制造荧光画和塑料的所谓磷光体也含有直接带隙半导体。磷光体一旦暴露在光中便会产生电子-空穴对。于是磷光体里逐渐积累了大量的电子和空穴，这些载流子缓慢的复合过程就引起了发光。

① Streetman, p. 443.