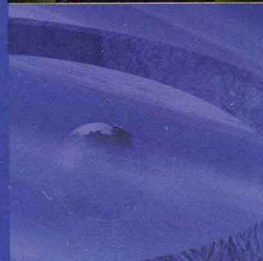
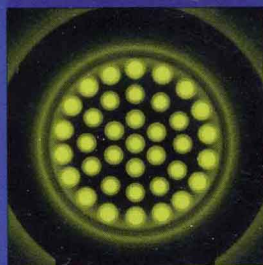




国际机械工程先进技术译丛

三维集成电路设计

Three-dimensional Integrated
Circuit Design



(美) Vasilis F. Pavlidis Eby G. Friedman 著

缪旻 于民 金玉丰等 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际机械工程先进技术译丛

三维集成电路设计

[美] Vasilis F. Pavlidis Eby G. Friedman 著

缪旻 于民 金玉丰 等译

机械工业出版社

在 21 世纪的前十年结束时,基于三维集成技术的“超越摩尔定律”时代就悄然来临了。具备多个有源器件平面的三维集成电路(3-D IC),有望提供结构紧凑、布线灵活、传输高速化且通道数多的互连结构,从而为 IC 设计者们提供突破“互连瓶颈”的有效手段,而且还能够有效集成各种异质材料、器件和信号处理形式,成为三维集成技术发展的主要方向之一。本书是世界上三维集成电路设计方面的第一本专著,既有一定的理论深度,又有较高的可读性。它系统、严谨地阐释了集成电路三维集成的设计技术基础,包括 3-D IC 系统的工艺、互连建模、设计与优化、热管理、3-D 电路架构以及相应的案例研究,提出了可以高效率解决特定设计问题的解决方案,并给出了设计方面的指南。

本书是一本优秀的技术参考书,适用的读者范围包括:超大规模集成电路(VLSI)设计工程师,微处理器和系统级芯片的设计者以及相关电子设计自动化(EDA)软件的开发者,微机电及微系统集成方面的设计开发者,以及微电子行业中对未来技术走向高度敏感的管理者和投资者。本书也可以作为相关专业研究生的教材和教师的教辅参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

三维集成电路设计/(美)华斯利斯(Pavlidis F.),
(美)伊比(Friedman G.)著;缪旻,于民,金玉丰
等译. —北京:机械工业出版社,2013.7
(国际机械工程先进技术译丛)
ISBN 978-7-111-43351-4

I. ①三… II. ①华…②伊…③缪…④于…⑤金…
III. ①集成电路-电路设计 IV. ①TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 161652 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:孔 劲 责任编辑:孔 劲 杨明远

版式设计:霍永明 责任校对:任秀丽

封面设计:鞠 杨 责任印制:张 楠

北京京丰印刷厂印刷

2013 年 9 月第 1 版·第 1 次印刷

169mm×239mm·14 印张·311 千字

0 001—2 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-43351-4

定价:58.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑 (010) 88379772

社服 务 中 心:(010)88361066

网络服务

销 售 一 部:(010)68326294

教 材 网: <http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部:(010)88379649

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010)88379203

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版

译 丛 序

一、机械工程高速发展

机械工程是以自然科学和技术科学为理论基础,结合在生产实践中积累的技术经验,研究和解决机械产品开发、设计、制造、安装、运用、修理及再制造等方面的全部理论和实际应用的学科。机械工程的学科内容包括:机械工程基础理论研究,机械产品开发、设计,机械产品的制造、装备、检验,机械产品的应用与维护,机械制造企业的经营和管理,机械产品的绿色生命周期等问题及技术措施。机械工程先进技术涉及设计、制造、应用、管理等相关环节的机械、电子、信息、材料、能源和管理科学等领域的先进技术。

20 世纪后期,特别是进入 21 世纪,计算机、信息技术在机械工程领域的广泛、深入应用,使机械工程技术高速发展。机械工程技术由线性到非线性、由静态到动态、由二维到三维的研究发展,为现代机械设计方法的研究、应用奠定了工程理论基础;虚拟技术、创新设计、绿色设计、并行工程等,为现代机械设计提供了技术基础;机床数控技术、工业机器人、柔性制造技术、传感技术、集成制造技术、自动检测及信号识别技术等,为机械制造工艺自动化提供了支撑技术;ERP(企业资源计划)、MES(制造管理信息系统)、CIMS(计算机集成制造系统)等,为机械制造企业的经营和管理提供了现代化的支撑平台;PLM(产品全生命周期管理)、IWM(废物管理一体化)、EMS(环境管理体系)等理念、技术的发展,已成为机械工程先进技术的重要组成部分。

机械工程先进技术是实现工业技术现代化重要的技术支撑之一。但是,机械工程先进技术的发展要受到自然条件、经济条件、社会条件、技术基础等的限制,我国作为发展中国家,在机械工程先进技术方面同工业发达国家还有很大差距。为了加快我国机械工程先进技术的发展进程,通过各种方式引进外国机械工程先进技术,是一条切实可行的发展之路。

二、图书交流传播知识

图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式。早在 19 世纪末期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络通信、计算机等信息传输和储存手段,但图书仍将以严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经

济性而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势，可满足不同层次读者的阅读习惯，同时它具有长期的参考价值和收藏价值。

近年来，国际间的交流与合作对机械工程技术领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，对机械工程技术领域科技人员及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、取得的最新成果及应用情况等，发挥了积极作用。

机械工业出版社希望通过引进、翻译国外机械工程技术领域的先进技术图书，传播国外机械工程领域的先进技术，推动国内学者和技术人员对国外机械工程先进技术的引进、消化、吸收和创新。从而提升我国机械工程技术自主创新能力，提高我国装备制造业的技术水平，加速实现我国工业的现代化。

三、精挑细选精雕细刻

为真正实现翻译国外机械工程技术领域先进技术图书、推动我国机械工程技术发展的战略目标，机械工业出版社将认真执行：

(1) 精挑细选 坚持从机械工程技术比较发达的国家、国外优秀出版社引进优秀技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。本套译丛将涵盖机械工程的基础理论研究，产品开发、设计、制造、运用、维修、再制造和资源、环保、信息、管理等相关学科。

(2) 精雕细刻 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员把关，以充分保证图书内容的先进性、适用性和翻译质量。内容翻译力争达到信、达、雅，真正实现传播国际机械工程先进技术，服务于国内机械工程技术的发展。

(3) 精益求精 本套丛书作为我社的精品重点书，将统一封面装帧设计，在版式编排、内容编校、图书印制等方面追求高质量，把“精品”体现到书的整体中去，力求为读者奉献一套高品质的《国际机械工程先进技术译丛》。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢广大积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐翻译的知名专家；特别要感谢承担翻译工作的译者所付出的辛勤劳动；同时要感谢从事图书版权贸易的工作人员辛勤工作。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社《国际机械工程先进技术译丛》编委会

译者序

近年来，三维集成技术发展迅猛，成为集成、封装乃至整个半导体行业的热门研究方向。三维集成技术是实现微电子产品向着小型化、高效能、高整合、低功耗及低成本方向发展的关键技术，被业界和学术界认为是决定微电子和微系统领域未来发展的一项核心高技术。译者认为主要价值有三：一是 CMOS 进入纳米时代后的平面集成难度越来越大，迫切要求新的集成方法解决集成度提高问题；二是越来越先进的功能芯片基于不同工艺线设计制造，再组装成为功能模块，如何将这些功能芯片进行芯片级的高密度、高性能集成组装，三维集成可能是最具优势的一种途径；三是随着高性能、多功能微系统的诞生和日益普及，多种传感器和电路芯片间的信号互连通道越来越密，信号传输速度越来越快，三维集成成为解决方案的首选。

国际上大规模开展三维集成技术研究已有十多年的历史。CIS (CMOS Image Sensor) 和高容量存储器等基于三维集成的产品显示了巨大的市场价值，但总体上国际三维集成技术的研究仍处于研发的初级阶段。三维集成技术的工艺开发、电路/系统设计以及测试都还没有形成统一的技术标准和规范。特别是 3-D IC 的 EDA 设计工具也刚刚开始研发，工程化和商业化尚待时日，因此，对于大规模 IC 的三维集成而言，设计上也存在较大的挑战。

国内从“十一五”开始就有组织地进行了三维集成技术的研究开发，多家高校和科研机构已经投入这项研究，包括中芯国际、南通富士通、江阴长电、天水华天等龙头企业，北京大学、清华大学、复旦大学、华中科技大学、东南大学、中科院微电子研究所、中科院微系统所、中科院深圳先进技术研究院等重点高等学校和科研院所。近年来，国家大力支持发展半导体和集成电路行业，国家 02 重大科技专项重点支持了三维集成技术的研究，并取得初步成果。译者所在的北京大学科研团队，开展了以 TSV (Through Silicon Via) 为核心的三维集成工艺研发，完成了四层芯片的 TSV 叠层工艺开发。在工艺研究的同时，我们深感三维集成设计方法与技术将是未来三维集成的研发重点和难点。本着系统学习和借鉴国际已有成果的思路，我们把目光瞄准了近年出版的国际三维集成专著上。适时地，将三维集成技术归类分析，将主流的三维集成技术及设计方法介绍给本领域的研究者们，对于他们的研究工作应该有很大的指导作用。该书译本的出版，将填补目前国内 3-D IC 设计研究专著的空白，也体现了机械工业出版社的慧眼卓识。

如下同志对本书的翻译作出了贡献：缪旻博士（北京信息科技大学副教授，北京大学微米/纳米加工技术国家级重点实验室客座副教授）翻译了原书序言和第 1、2、4 章，并审校了全书；于民博士（北京大学微电子学研究院副教授）翻译了第

VI 三维集成电路设计

11 章和附录，并审校了全书；金玉丰博士（北京大学微电子学研究院教授）审校了全书；鲁文高博士（北京大学微电子学研究院副教授）审校了全书；译者指导的多名博士生参与了本书的翻译，朱韞晖翻译了第 3 章，方孺牛翻译了第 6 章，孙新翻译了第 9 章，皮宇丹翻译了第 10 章；许一超、王贯江、那伟聪对其余章节进行了翻译。

本书承蒙北京大学吉利久教授、深圳国微电子公司谢文刚副总裁审阅并提出中肯的意见，在此表示由衷的谢意以及对他们卓越学识的敬意。

译 者

原 书 序

撰写本书的根本原由在于,近年来三维集成电路这一激动人心的新兴技术已经取得了巨大的进步,但尚缺乏一本对三维集成电路设计进行统一阐释的书籍。因此,写作本书的意图,是将三维集成电路设计所涉及的、各不相同却相互依存的诸多研究方向所取得的标志性成果,凝聚为有机的整体并呈现给读者。本书最主要的目标是提出3-D电路的设计方法学,这些方法学将有效地利用三维集成领域蓬勃发展的、日益多样化的制造技术。虽然关注的焦点是设计技术和方法学,但也萃集了制造技术方向的显著进展的相关资料,从而反映了三维集成研究的全貌。

三维或者垂直集成是提升现代集成电路的性能和拓展其功能的一条令人振奋的技术途径。这些功能是三维集成电路所固有的。前一种对性能的增强作用是垂直方向上的互连长度大大缩短所促成的,而后一种增强作用则来源于该技术在一个多平面系统中对不同类型技术的组合能力。还值得注意的是,垂直集成与过去几十年中人们已经开发出的集成电路设计流程具有极为良好的兼容性。虽然也提出过一些其他革命性的技术方案,以试图解决日益增加的有关片上互连的技术难题,但相比之下,三维集成技术仍以其突出的特点显得格外引人注目。

三维集成技术所提供的机会本质上是无限的,实际的限制源于这些电路的设计和制造方面的专门技术的缺乏。要实现这些复杂的系统,就必须采用先进的制造方法以及新颖的、满足若干抽象层次需求的设计技术,这就需要正确理解层间通信和制造工艺的物理行为特性和机理。本书的中心就是尽力达到这一目标。

本书基于 Vasilis Pavlidis 2002 至 2008 年于 University of Rochester 攻读其博士学位时,在 Eby G. Friedman 教授指导下所完成的研究工作。作者意识到垂直互连结构在3-D电路中的重要性,因此这些结构便成为本书的中心内容。书中的各教程性的章节致力于阐述这些结构的制造工艺、技术挑战和电学模型。这些垂直方向上的连线不仅作为3-D系统内部的通信介质得到研究,而且也作为热导通路得到了研讨。从这个视角出发,书中阐述了分析垂直互连的电行为特性的新颖和高效率的算法,用于改善异质的三维系统中的信号传输延迟特性。此外,本书还叙述了垂直互连在改善全局信号传输和热特性方面的重要作用。从一个关于3-D电路的案例研究获得的测量结果,将加深人们对这一关键性的互连结构的物理上的理解和相应提升人们的直觉洞察力。

上述这些短小的垂直连线使得若干种3-D架构成为可能,这些架构将服务于那些以通信能力为核心的电路。书中研讨了3-D系统在通信带宽的拓展、延迟特性的拓展和低功耗化等方面所面临的机遇。书中还讨论了与这些架构相关的解析模型和研究工具。撰写这一部分内容的意图是,在阐明重要的设计问题的同时,为这些不

断在演进的 3-D 架构的设计提供指导方针。

本书的基本组织结构是“自下而上”式的，以 3-D 系统的技术和加工方面的内容来作为全书的开篇。最前面的这两章内容涵盖了可用的多种多样的 3-D 技术以及相应的加工工艺。这些章节展示了 3-D 电路设计方面可供选用的多种技术选项。基于这些技术以及一个先验性的互连模型，对 3-D 电路的功能得到了预测。3-D 电路的物理设计方法，作为本书的核心，在接下来的 8 章中得到了阐释。由于 3-D 系统具有多平面结构这一基本特征，故诸如布局和布线等设计工作的复杂性更高，书中对此进行了评述。本书提供了应对如此水平的复杂性的有效方法。本书探讨了推广至多目标方法学的问题，其中以热学问题作为一个主要的参考点。由于垂直互连在 3-D 电路中既可能起到阻碍作用，也可能起到建设性作用，因此对利用这些互连特性的各种不同设计方法也进行了详尽的讨论。书中特别以 3-D 电路中重要的垂直互连结构硅通孔为重点进行了讨论。各种各样的 3-D 电路架构，如处理器和内存系统，FPGA 和片上网络得到了讨论。作者探讨了片上网络和 FPGA 的各种不同 3-D 布局。书中对新颖的算法以及精确的延迟与功耗模型进行了评述。作者也探讨了时钟同步这一重要的论题，力图解决在多平面电路中分配时钟信号时遇到的种种挑战。从一款实际制造的 3-D 电路上获得的试验结果，则可以让读者对这一全局信号分配问题有一个直观认识。

三维集成是一种具有巨大潜力的技术，它可望将半导体路线图向前延伸数代。性能和功能度的提升是当前和未来集成系统的关键性要求，而 3-D 技术中的第三个维度为满足这个要求提供了无可比拟的机遇。在过去的十年间，3-D 电路的制作已经取得了相当大的进展，然而 3-D 电路的设计方法学，却明显落后于技术方面的进展。本书力图弥补这一差距，增强 3-D 电路的设计能力，同时也关注了这一新兴半导体技术制造工艺的方方面面。

致 谢

作者对 Democritus University of Thrace 的 Dimitrios Soudris 教授对第9章作出的重要贡献表示感谢。作者也对美国国家自然科学基金的 Sankar Basu 博士表示谢意。没有他的支持，本研究中的许多工作是不可能完成的。

作者还感谢 MIT Lincoln 实验室为 3-D 测试电路提供的代加工方面的支持，具体地说，要感谢该实验室的 Chenson Chen 博士和 Bruce Wheeler 博士在第二次多项目流片中提供的帮助。我们还要对 University of Rochester 的 Yunliang Zhu、Lin Zhang 和 Hui Wu 教授在对 3-D 电路的测试方面提供的帮助表示感谢。我们特别要感谢 Nopi Pavlidou 为本书封面所做的创造性设计。最后要提及的是，没有 Charles Glaser 的不断支持和鼓励，本书是无法完成的，他赞赏本书的想法并激励我们完成了整个写作过程。多谢了！

本书所呈现的研究工作的各部分分别得到了美国国家自然科学基金（资助合同号 CCF-0541206）、纽约州科技处（New York State Office of Science）、电子成像系统先进技术中心技术与学术研究部（Technology & Academic Research to the Center for Advanced Technology in Electronic Imaging Systems）以及 Intel 公司、Eastman Kodak 公司和 Freescale 半导体公司提供的经费资助。

Vasilis F. Pavlidis and Eby G. Friedman
Rochester, New York

目 录

译丛序

译者序

原书序

致谢

第1章 导言	1
1.1 从集成电路到计算机	2
1.2 互连, 一位老朋友	4
1.3 三维或垂直集成	6
1.3.1 三维集成的机遇	6
1.3.2 三维集成面临的挑战	7
1.4 全书概要	9
第2章 3-D 封装系统的制造	12
2.1 三维集成	12
2.1.1 系统级封装	13
2.1.2 三维集成电路	13
2.2 单封装系统	14
2.3 系统级封装技术	17
2.3.1 引线键合式系统级封装	17
2.3.2 外围垂直互连	18
2.3.3 面阵列垂直互连	20
2.3.4 SiP 的壁面金属化	21
2.4 3-D 集成系统的成本问题	22
2.5 小结	24
第3章 3-D 集成电路制造技术	25
3.1 单片 3-D IC	26
3.1.1 堆叠 3-D IC	26
3.1.2 3-D 鳍形场效应晶体管	31
3.2 带硅通孔 (TSV) 或平面间过孔的 3-D IC	32
3.3 非接触 3-D IC	36

3.3.1 电容耦合 3-D IC	36
3.3.2 电感耦合 3-D IC	37
3.4 3-D 集成电路垂直互连	38
3.5 小结	42
第 4 章 互连预测模型	44
4.1 2-D 电路的互连预测模型	44
4.2 3-D IC 的互连预测模型	46
4.3 3-D IC 特性的推算	49
4.4 小结	53
第 5 章 3-D IC 物理设计技术	54
5.1 布图规划技术	54
5.1.1 3-D IC 的单步和多步布图规划方法比较	55
5.1.2 3-D IC 的多目标布图规划技术	57
5.2 布局技术	59
5.3 布线技术	61
5.4 版图工具	64
5.5 小结	65
第 6 章 热管理技术	66
6.1 3-D IC 热分析	66
6.1.1 封闭式温度表达式	67
6.1.2 紧凑热模型	71
6.1.3 基于网格的热模型	73
6.2 无热通孔的热管理技术	73
6.2.1 热驱动布图规划	74
6.2.2 热驱动布局	78
6.3 使用热通孔的热管理技术	80
6.3.1 区域受限制的热通孔插入	80
6.3.2 热通孔布局技术	82
6.3.3 热导线的插入	85
6.4 小结	86
第 7 章 双端互连的时序优化	88
7.1 平面间互连模型	88
7.2 由单一通孔连接的双端平面间互连网络	93
7.2.1 平面间互连的 Elmore 延迟模型	93

XII 三维集成电路设计

7.2.2 平面间互连延迟	94
7.2.3 最优通孔定位	95
7.2.4 对互连线延迟的改善	98
7.3 带有多个平面间通孔的双端口互连	100
7.3.1 双端口网络通孔布局问题的试探式求解	103
7.3.2 双端口通孔布局算法	105
7.3.3 通孔布局技术的应用	106
7.4 小结	111
第8章 多端互连的时序优化	113
8.1 平面间互连树的时序驱动通孔布局	113
8.2 多端互连的通孔放置试探法	116
8.2.1 互连树	116
8.2.2 包含单一关键电流沉的互连树	117
8.3 互连树的通孔布局算法	117
8.3.1 互连树通孔布局算法 (ITVPA)	118
8.3.2 具有单一关键电流沉互连树的通孔布局算法 (SCSVPA)	118
8.4 通孔布局的结果及讨论	119
8.5 小结	123
第9章 三维电路架构	124
9.1 连线受限三维电路的分类	124
9.2 三维微处理器以及存储器	125
9.2.1 三维微处理器的逻辑模块	126
9.2.2 高速缓存的三维设计	127
9.2.3 3-D 微处理器的架构设计——存储器系统	130
9.3 三维片上网络 (NoC)	131
9.3.1 3-D NoC 的拓扑结构	132
9.3.2 3-D NoC 的零负载等待时间	133
9.3.3 3-D NoC 的功耗	137
9.3.4 3-D NoC 的性能和功耗分析	138
9.3.5 3-D NoC 设计辅助	149
9.4 三维 FPGA	158
9.5 小结	165
第10章 案例分析: 3-D IC 的时钟分配网络	167
10.1 美国麻省理工学院林肯实验室 (MITLL) 3-D 集成电路制造技术	167
10.2 3-D 电路架构	171

10.3 3-D 电路中的时钟信号分配	176
10.3.1 同步电路中的时序特性	176
10.3.2 测试电路中的时钟分配网络结构	177
10.4 实验结果	180
10.5 小结	185
第 11 章 结论	187
附录	189
附录 A 三维集成电路中门对数目的计算	189
附录 B 单通孔布局优化方法的严格证明	190
附录 C 两端通孔布局试探法的证明	191
附录 D 多端网络的通孔放置条件的证明	193
参考文献	195

第 1 章 导 言

近百年来，电子技术实现了巨大的进步。在这一时期，电子商品的应用获得了稳步的增长，同时，这些产品的尺寸却不断缩小。从微米到纳米尺度的过渡将电子产品的应用范围进一步扩展至新的领域，而原先这些系统的尺寸过大，无法在这些领域找到应用空间。引发电子产品大幅成长——即电子业的“大爆炸”（big-bang）的种子——是一粒锗晶体，1947 年 J. Bardeen、W. Brattain 和 W. Shockley 就是基于该晶体首次制成了点接触式的晶体管^[1]。

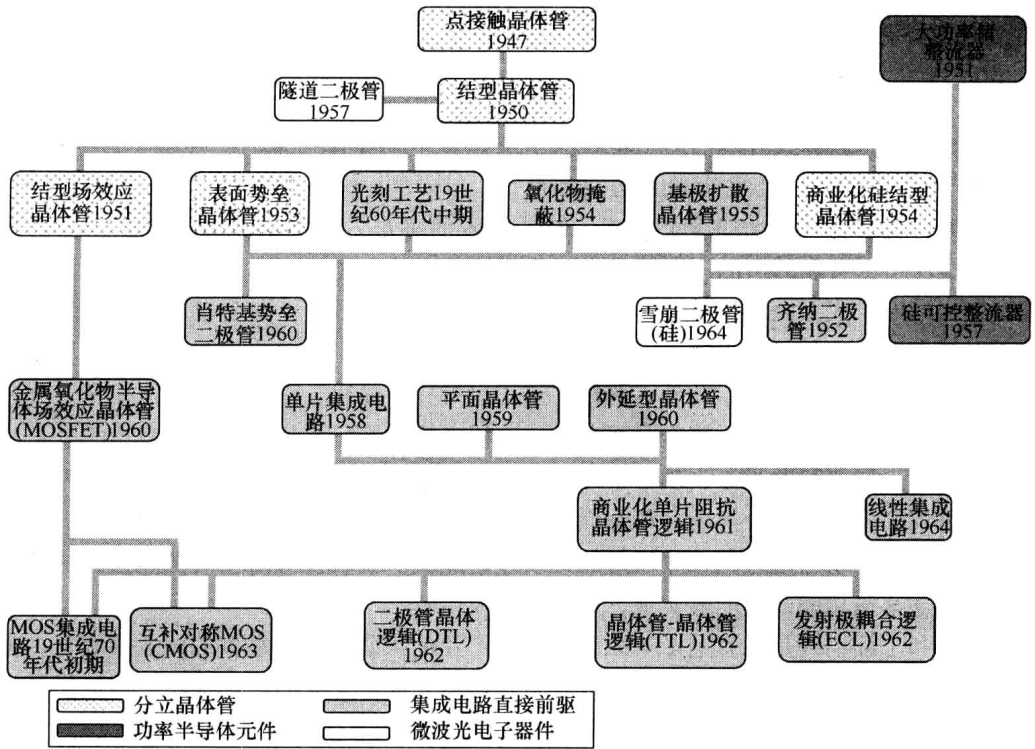
该发明吸引了众多科学家和工程师的关注，催生了多项专注于开发各种半导体器件的研究工作^[2]，这些器件用于替换笨重的、大量吞噬功率的、低性能的真空管和机电式继电器，而前晶体管时代大量电子装置都是以这些器件为构建单元的。上述的探索带来了一个新的电子学分支，即半导体业的出现，该领域在过去的数十年间经历了巨大的增长。推动这一爆炸式发展的一个重要的引擎是基于半导体技术的、种类丰富的应用。半导体产品最终影响了我们社会的方方面面。

例如，自动化在很大程度上推动了制造技术的进步，降低了成本，缩短了上市时间，并提供了更可靠的产品，同时，由于采用了先进的、能识别关键的设备故障并相应发出警报的电子式安全防护系统，雇员的安全也得到了提升^[3]。办公自动化也显著地简化了对信件、备忘录和报告的繁琐的处理工作，而且提供了多样化的存储介质，从而方便了文件的整理与归档^[4]。此外，医疗的过程也得到了简化，对病人而言往往是十分危险的侵入式的诊断方法，已被安全而有效的非侵入式诊断所取代。另外，微小的电子装置，如心脏起搏器和助听器，改善了无数病人的治疗效果^[5]。过去数十年间，作为社会的重要组成部分，另一个经历了革命性发展的技术是通信。卫星通信、地理定位系统、蜂窝式电话和互联网是通信领域取得的几项显著成就。倘若没有耐用而功能强大的晶体管，则上述这些功能即使能够实现，也是极为原始的。

科学和工程也许是从微电子革命和半导体产业的兴盛中获益最多的两大领域^[6]。曾经令人生畏的计算工作，如今只需几分之一秒即可完成。无数的计算程序、测量仪器和监测装置被开发出来，拓展了我们对环境、自然和宇宙的知识。与 20 世纪初期相比，信息的处理和传播能力呈现了几个数量级的增长，这让全球几乎每个角落都可以获取知识。反过来，这些发展在智力和财力两方面又支持了电子产业的进步。新的应用进一步推进了半导体革命，所产生的巨大收益则有助于业界开展研发工作并为其提供动力。下面的章节将描述这一惊人进展的一些里程碑。1.2 节讨论了自集成电路业界早期以来就出现的与互连有关的诸问题，以及互连所带来的、迫在眉睫的性能瓶颈问题。1.3 节介绍了微电子领域发展中一项极有发展前景的解决方案和重要的下一步骤，即三维集成技术。1.4 节给出本书的概要。

1.1 从集成电路到计算机

在 1947 年点接触晶体管发明后的岁月里，人们开发了若干种不同的半导体器件，以满足控制系统、军事、医药和多个其他领域中的重要应用的需要。图 1-1 所示为这些发明的时间路线。这些晶体管都是分立元件，相互间通过金属引线连接起来，以实现不同的电路功能。虽然与真空管或者其他机电式设备相比，这些创新性的器件的工作频率可以更高，性能更好，也更为可靠，但完全由分立元件构成的系统的性能仍然受限，无法充分利用半导体器件带来的巨大潜力。直到 1960 年开发出平面化的工艺并最终加工出众所周知的、如图 1-2 所示的集成电路（Integrated Circuit，IC），人们才开始充分利用晶体管的功能^[7]。这一成就增强了半导体工业的发展，将大量器件集成到硅片中，并实现了种类繁多的电路功能。



后来对廉价的硅衬底上制造工艺和集成技术的改进，使得集成电路的生产具有更高的成品率与更低的成本、更高的性能和可靠性。在接下来的十年中，人们又提出了若干逻辑电路系列，如晶体管—晶体管逻辑（TTL）、发射极耦合逻辑（ECL）和互补金属氧化物半导体（CMOS）。随着 IC 的复杂程度的提升，出现了一个意义深远的需求，即面向通用化应用的电路。实际上，在那个年代，每个 IC 都是为单个应用而设计的，因

此各公司必须要设计多种多样的低成本元件来维持盈利能力。Intel 公司的一位工程师 M. E. Hoff Jr. 对这一意义深远的需求给出了答案。他设想了一种更为灵活的方法，以充分利用这些集成电路的潜能。在 Intel 的创始人 Gordon Moore 和 Robert Noyce 的支持下，这一努力取得了成果，即如图 1-3 所示的世界上第一款微处理器 4004。这一平面面积为 $0.11 \times 0.15 \text{in}^2$ ($0.71 \times 0.97 \text{cm}^2$) 的 IC 可以执行 4bit 数的加法和乘法，并拥有用于存储的寄存器组。虽然这一能力在今天看来是微不足道的，但 4004 微处理器却从根本上改变了人们对计算机的理解和使用方式。

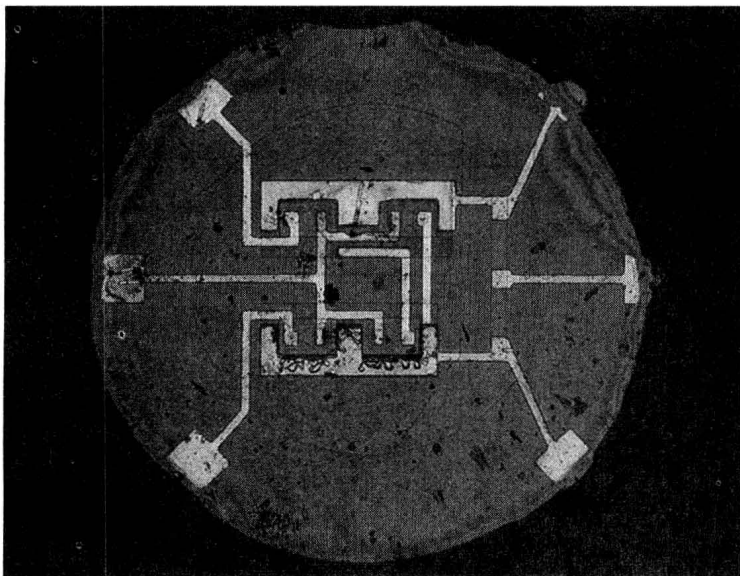


图 1-2 第一款平面化的集成电路^[9]

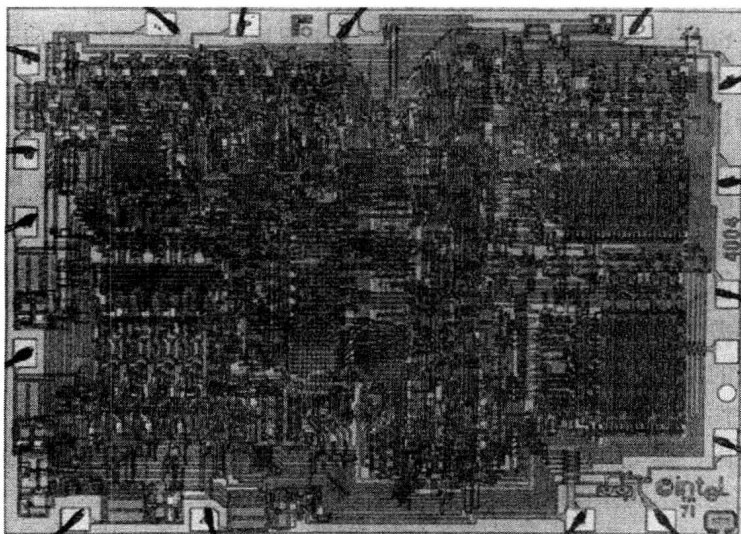


图 1-3 4004 Intel 微处理器^[9]