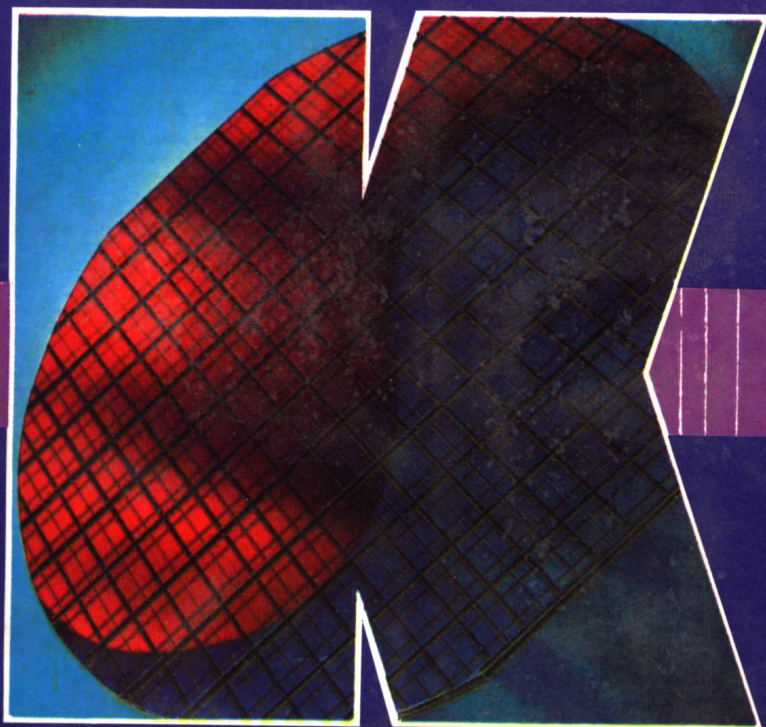


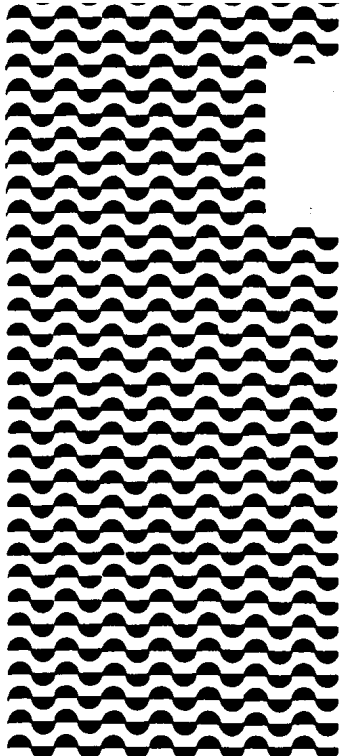


集成电路制造动力学 理论与方法

郝 跃 著



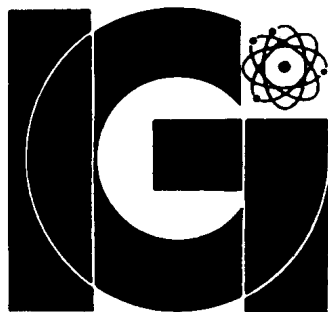
北 京 教 育 出 版 社
河 北 教 育 出 版 社
内 蒙 古 教 育 出 版 社
山 西 教 育 出 版 社
天 津 教 育 出 版 社
联 合 出 版



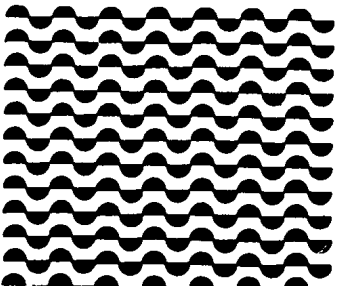
集成电路制造动力学理论与方法

郝跃 著

高科技教育丛书



gaokeji jiao
yu congshu



河北教育出版社

(冀)新登字 006 号

高科技教育丛书
集成电路制造动力学理论与方法
郝 跃

河北教育出版社出版发行(石家庄市城乡街 44 号)
河北新华印刷一厂印刷

850×1168 毫米 1/32 12.375 印张 284 千字 1995 年 11 月第 1 版

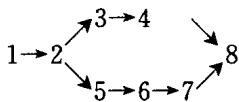
1995 年 11 月第 1 次印刷 定价:13.80 元

ISBN 7-5434-2517-3/O · 32

前 言

半导体集成电路的产生与发展是多学科相互交叉的综合产物。如果说集成电路最终必然实现自动化、智能化的最优性设计和制造,那么集成电路制造动力学理论和方法是达到这一目标的基础。它解决集成电路更深层次的难题——即制造的稳定性和效益的最优化问题。这是当集成电路的设计和制造发展到一定规模和水平后必须考虑和解决的难题。

本书的目的是使读者在对集成电路及其发展规律有所了解的基础上,明确集成电路制造动力学理论和方法研究的必然性,以及对推动集成电路从功能设计向优化设计和制造发展的巨大作用。明确该领域的具体内容和研究方法,并注意用这些理论和方法解决集成电路设计和制造中的问题。虽然全书以硅单片集成电路为主要对象,但所有的理论和方法对化合物半导体集成电路和器件、混合集成电路、甚至对分立电路及相应的系统均有同样的实用价值。由于在集成电路制造动力学理论和方法各方面的发展历史和研究深度均不相同,本书不同章节的风格也有所不同,但总的来讲是偏重于基础理论和基本方法的论述。全书可分为三部分内容,即功能成品率模型和最优化理论与方法,参数成品率模型和最优化理论与方法,以及集成电路效益模型和统计最优控制理论与方法。因此,全书的公共部分为第一、二和八章,有关功能成品率部分为第三、四章,参数成品率部分为第五、六和七章。其结构为



虽然功能成品率与参数成品率有许多共同之处，但是研究理论和方法是很不相同的。全书在写作过程中力求严谨和通俗，同时避免过多的理论证明和推导。正因为如此，要求阅读本书的读者已有最优化理论与方法、数理统计以及应用泛函分析的初步知识。

本书是在西安电子科技大学研究生课程和讲义的基础上写成的。在该课程的实施过程中，历届研究生为本书的框架和内容提出了若干建议、要求和补苴。多年来，作者在该研究领域得到了国家自然科学基金、国防科技光华基金、国家教委博士点基金以及国家科技攻关课题等方面的大力支持和资助。同时得到了国内专家和同行的支持和帮助。中国华晶电子集团公司总工程师许居衍教授为本书集成电路制造成本模型研究提供了大力的帮助。北京大学王阳元教授、西安交通大学游兆永教授对本书提供了支持和帮助，作者对这些前辈和专家的厚爱表示衷心感谢。西安电子科技大学微电子所为作者的研究和本书的完成提供了良好的条件和环境，尤其与贾新章、张义门和姚立真等教授多年的支持和合作，以及刘志镜、张卫东等同事及多位研究生的长期研究和合作。他们的积极鼓励和帮助，才使作者有信心和勇气完成这本著作。同时，本书的出版要归功于华北五省（市）教育出版社，尤其是河北教育出版社的鼎力扶助和支持，感谢他们对祖国高科技事业的一片赤诚。为此，本人谨此对一切为本书作出贡献的同事、朋友和亲人表示诚挚的谢意。

由于这是第一本系统论述集成电路制造动力学理论和方法

的专著，该领域的研究目前正蓬勃发展且许多方面并非十分成熟，加之作者本人的经验和水平有限，在本书中定有许多不适之处，肯请读者给予指正。尤其希望读者就本书具体研究模型、理论和方法提出更新的见解，共同推动这一领域的研究向更新和更深层次发展。

郝 跃

1993年10月于西安

序

高科技研究及产业的发展对我国实现四个现代化的宏伟事业具有重要的战略意义。从1986年开始我国高技术研究发展计划实施以来,极大地促进了诸如生物、信息、自动化、新能源、新材料等一些重要领域在研究开发及产业化方面的进展。然而与国际上迅速发展的局面相比,无论在覆盖的领域、研究开发水平及产业化的进度方面都还存在着程度不同的差距。这一方面有赖于随着国家经济实力的增长而加强在研究开发及成果转化方面的投入,而更重要的是要造就及培养一大批能从事高科技工作的人才。高科技竞争归根到底是人才的竞争,而人才的培养要从教育着手。出于这样的目的,出版“高科技教程与专著”主要是使正在大学就读的大学生、研究生及已经从事相关领域工作的科学技术工作者有更广泛的机会较深入地了解一部分与高科技领域有关的基本概念、基础理论及主要应用。这无疑对于我国高科技人才的培养起到促进作用。这套丛书的撰写虽然选材的角度及所涉及的学科的范围不尽相同,然而著者却是在这方面有造诣及有教学研究工作经验的专家。形成一个专集,并作为整个“高科技教育丛书”的一个重要组成部分而出版是一件很有价值的事情。

值得指出的是北京、天津、河北、山西和内蒙古教育出版社为了支持这套专著的出版在资金及人力上都作出了贡献,借此机会要向他们表达谢意。

张孝文

一九九四年七月十四日

注:张孝文同志为国家教委副主任。



郝跃，1958 年生于四川省重庆市，1986 年和 1991 年分别获西安电子科技大学和西安交通大学博士学位。现为西安电子科技大学教授、微电子研究所副所长，中国电子学会高级会员，SIAM 学会委员，机电部有突出贡献专家。主要研究领域为微电子学与半导体器件，研究方向为集成电路可制造性理论与方法、统计最优化和统计模型、集成电路制造动力学理论与方法，以及专用电路集成与系统集成技术和方法。在国内外著名杂志和会议已发表论文 80 余篇，出版《集成电路可制造性设计与统计最优化》等专著及合著 6 本。先后主持了多项国家自然科学基金、国防光华基金、国家教委博士点基金、国家科技攻关课题，其中有三项分别获机电部科学进步一、二、三等奖。

责任编辑：刘克琦 刘贵廷
张静莉 姜玉敏

版式设计：寮 克

装帧设计：王引之

内 容 简 介

本书是集成电路制造动力学理论和方法的一本专著。全书共分八章，它从集成电路发展规律出发，论述了随着器件尺寸缩小和集成度提高给集成电路设计和制造提出的更高要求和目标。给出了集成电路制造成本和效益模型，以及与此相关的功能成品率与参数成品率模型，并从不同层次论述了功能成品率、参数成品率和 IC 产品最优化的理论和方法，给出了实现这一目标所必须的统计最优控制理论和过程。

本书可作为高等院校有关专业的研究生、本科高年级学生阅读教材，也可供从事集成电路设计、制造和管理等领域的工程技术人员参考。

目 录

第一章 集成电路技术经济规律与制造动力学	(1)
一、集成电路发展的技术经济规律	(2)
二、器件按比例缩小与制造灵敏度	(17)
三、电路功能设计向优化设计过渡的必然性	(27)
四、集成电路制造动力学及其分类	(44)
第二章 集成电路制造成本模型	(62)
一、经典成本和利润模型	(62)
二、广义前道工序成本模型	(71)
三、广义后道工序成本模型	(78)
四、收入综合与最优化	(85)
第三章 功能成品率模型与模拟	(93)
一、集成电路的局域缺陷模型	(93)
二、缺陷统计分布特征	(100)
三、功能成品率模型	(119)

四、关键面积模型与算法	(132)
五、功能成品率模拟	(139)
第四章 功能成品率最优化理论与方法	(149)
一、功能成品率与版图设计规则最优化	(149)
二、冗余成品率模型与最优设计	(158)
三、二叉树最佳容错方法	(172)
四、动态缺陷增殖与电路加工最佳分配	(181)
第五章 参数成品率模型与模拟	(188)
一、参数成品率模型	(188)
二、Monte Carlo 统计分析方法	(197)
三、参数统计分析与统计模型构造方法	(210)
四、集成电路制造工艺宏模型构造方法	(226)
五、电路容差与最不利条件分析	(248)
第六章 参数成品率最优化理论和方法	(261)
一、Monte Carlo 参数游动类方法	(261)
二、 R_A 几何逼近类方法	(271)
三、极大极小类统计最优化方法	(284)
四、空间分离策略与椭球算法	(292)
第七章 DCTT 统计最优化	(300)
一、DCTT 统计最优化基础	(300)
二、模型及其性质	(313)
三、最佳逼近方法	(319)
四、DCTT 进一步策略	(328)
第八章 集成电路工艺统计控制	(336)
一、工艺可控性诊断和分析方法	(336)
二、数据获取与控制模型	(349)
三、最优统计控制与 IC 决策支持系统	(362)

发展与展望	(369)
参考文献	(372)

第 一 章

集成电路技术经济规律与制造动力学

同其它科学技术发展一样,半导体集成电路(IC)与技术高速发展的原始动力是半导体集成电路本身独特的优越性及其对社会、科技、经济和军事的推动作用.纵观世界科学技术的发展历史,半导体集成电路与技术的历史虽然很短,但它的作用和影响却是巨大的,而且这种影响在今后仍难予估量.

正是由于微细加工技术、硅材料技术、硅结构设计技术和大生产技术等方面的发展,使集成电路从小规模(SSSI)、中规模(MSI)、大规模(LSI)和超大规模(VLSI)进入了极大规模(ULSI),并逐步向巨大规模(GSI)时代发展.今天,已无人怀疑,作为本世纪使人类从容进入信息社会的基础是集成电路,它的出现和发展使人类社会发生了巨大变化,而且这种变化还在不断地延续和发展.与此同时,这种巨大变化也改变着传统的科学研究、设计和生产的方式和方法.科学的决策与最优化的设计和制造逐步改变着集成电路投资和效益之间的关系,并使集成电路从过去具有“农业特征”的设计和制造,逐步进入了集成化、自动化和智能化的时代.因此,了解集成电路发展的技术经济规律,明确面临的问题和挑战,是正确认识和把握集成电路进一步发展的

关键。

本章将论述集成电路技术经济规律以及制造动力学的研究目的和意义,明确研究的内容和发展趋势。

一、集成电路发展的技术经济规律

自 1958 年第一块 IC 问世以来,集成电路经历了草创期、开发期、发展期到了成熟期,其发展分期以及主要特征如表 1-1 所示。表中的集成度是指每个 IC 芯片所包含的元件数,而集成密度是指单位面积上集成的元件数。集成电路从最初仅有两只晶体管、两只电容和八只电阻器组成的 SSI,发展为如今可在单片上集成 5.6 亿个元件的 ULSI 和 GSI。整个集成电路技术正向着高密度微型化、高速度低功耗、高频率大功率、高灵敏低噪声、高可靠长寿命的理想境界发展。在高密度微型化方面,从 IC 问世到现在,依靠微电子技术所集成的电子元器件密度已达到近乎人脑神经细胞的密度,实现了电路的单元集成、部件集成、整机集成、系统集成,正向着软、硬结合的智能化系统集成方向发展。在高速低功耗方面,IC 的开关速度已经达到了千亿分之一秒 (10^{-12}s),正向万亿分之一秒发展,而其功耗已经达到微瓦级。电路的延迟时间和功耗乘积已经低到 0.005 微微焦耳的新水平,这比人的脑神经细胞活动一次所需能量还低 40 倍;在高可靠长寿命方面,IC 的失效率已低到 10^{-10} /元件小时,如果按照绝对换算,其寿命已经高达 112 万年,已经达到了“半永久性”的理想境界,这比人的脑神经细胞的平均失效率低 1 万倍。目前的发展总趋势是向前更高层次的知识和技术密集的目标发展。这一趋势正带动着超纯、超净、仪器仪表和专用设备等多项支撑技术同时向着各自的理想境界发展;这一趋势正强有力地推动着各项技术(包括传统技术和新兴技术),特别是

军事科学技术向着高度现代化方向发展。

表 1-1 发展分期特征表

年 代	50	60	70	80	90	—
代表产品	晶体管	SSI, MSI	LSI	VLSI	ULSI	GSI
集成度	1~10	10~1 千	1 千~10 万	10 万~1 千万	1 千万~1 亿	1 亿以上
集成密度 (元件/mm ²)	1~5	5~100	100~5 千	5 千~50 万	50 万~1 百万	1 百万以上

总体来讲, IC 发展有如下规律和特点

1. 集成度高

1975 年美国 Intel 公司的 G. Moore 归纳了集成度随年份的增长规律, 提出了著名的 Moore 定律, 即每一芯片的集成度每年增加一倍。近三十年来, IC 集成度基本上是按此规律增加的。图 1-1 给出了 IC 集成度随年份的增长曲线。曲线给出了动态随机存储器 (DRAM) 和微处理器芯片的集成度增长规律。从曲线中可以看出, 在 70 年代集成度变化规律为每年增长一倍; 80 年代为每 1.5 年增长一倍; 到了 90 年代以后, 集成度基本上为每 3 年增加一倍。

IC 集成度的提高主要依赖于制造特征线条宽度的减小、芯片面积的增加和设计技术的改进。

(1) 特征尺寸的减小。特征尺寸定义为器件中最小的线条宽度, 其变化规律如图 1-2 所示。从变化规律看到, 特征尺寸每年约减小 12%。特征尺寸的减小主要依赖于微细加工技术的改进和提高。一般认为, 光学曝光机的光刻极限为 $0.35\mu\text{m}$; X 射线和电子束光刻极限为 $0.1\mu\text{m}$; 有人认为采用深紫外光光刻可

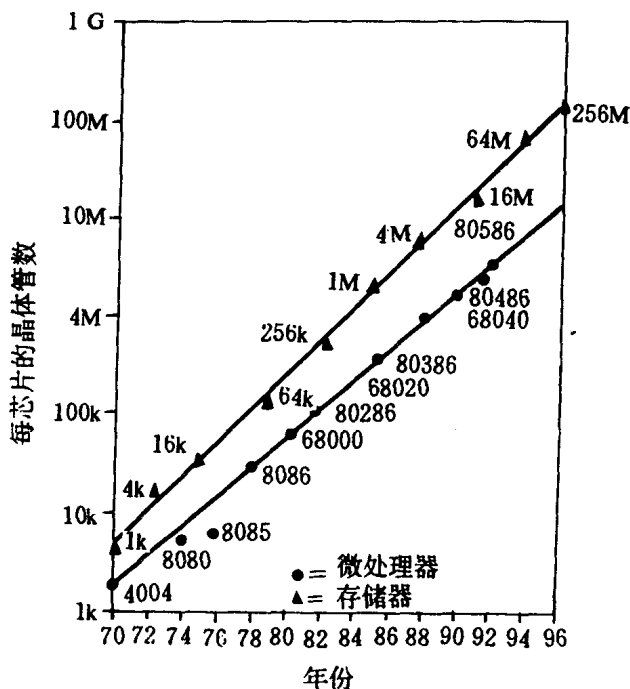


图 1-1 集成度变化曲线

使特征线宽达到 $0.25\mu\text{m}$ 。特征尺寸减小使 IC 性能也大为改善，例如电路的功耗延迟时间随特征尺寸变化在图 1-2 中给出。

(2) 芯片面积的增加。集成度提高的另一个原因是芯片面积增大。从 70 年代以来，以存储器和微处理器为代表的通用 IC 其芯片面积大约每年增长 13%，其变化趋势如图 1-3 所示。但是芯片面积的增加也带来了一系列的新问题，如电路成品率下降、封装困难以及一块晶片上有效芯片数目减小等等。当然，增

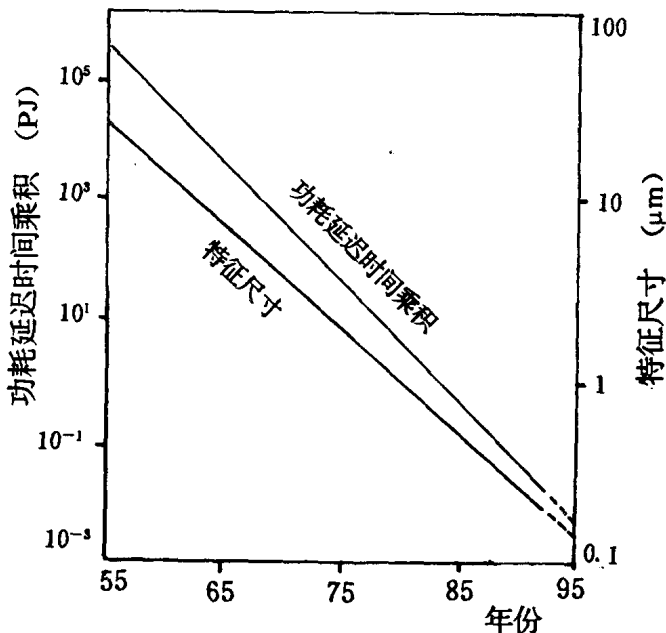


图 1-2 特征线宽和功耗延迟时间的变化趋势

加晶片上有效芯片数目最直接的方法是增大晶片面积。表 1-2 给出了晶片直径引入年份。晶片直径的增加提高了生产的效率和成品率，从而对 IC 集成度提高起到了积极作用。

(3) 硅结构设计的变化。硅结构设计包括电路的功能结构、线路结构、器件结构和隔离工艺结构等方面的设计。IC 中的器件结构是指适应硅微电子制造特点的独特构造，如双极集成电路中的多发射极结构、金属氧化物半导体 IC (MOSIC) 中的多漏极结构，这些结构减少了器件数量，提高了线路的紧凑性和