

赵保经 编著

大规模和 超大规模 集成电路



科学技术文献出版社

大规模和超大规模集成电路

赵保经 编著

科学技术文献出版社

1984

8510022

内 容 简 介

本书比较通俗地介绍了大规模和超大规模集成电路的基础知识,内容包括大规模和超大规模集成电路兴起和发展的技术背景;它们在现代科学技术和国民经济发展中的重要作用;区别于一般中、小规模集成电路的特点——发展特点、电路结构设计特点、工艺设备特点等;大规模和超大规模集成电路的工艺基础——精细和超精细加工技术;电路设计制版手段;关键工艺设备和检测工具;制作环境和基础材料要求以及超大规模集成技术的可能发展前景。可供具有电子学基本知识和中等以上文化程度的广大读者阅读。

大规模和超大规模集成电路

赵保经 编著

科学技术文献出版社出版

中国科学技术情报研究所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本: $787 \times 1092^{1/32}$ 印张: 5.75 字数: 123千字

1984年6月北京第一版第一次印刷

印数: 1—18400册

科技新书目: 75—47

统一书号: 15176·601 定价: 0.74元

序

自从本世纪初真空电子管发明后，电子器件已经历了五代的发展过程。正是由于电子器件一代接一代的演进，才引起了无线电设备一次又一次的变革和更新，才谱写成了一篇又一篇电子学的新篇章。

1967年大规模集成电路的诞生，照示了电子技术发展的新道路，而十年后（1977年）超大规模集成电路的问世，更迎来了无线电电子学的新时代。这个新时代的最大特点是电子技术以空前的规模和速度渗透到各行各业，集成电路以惊人的广度和深度进入生产和生活领域。三十年前，被认为是最复杂的电子设备或电子系统，其内部所包含的数万、甚至十余万个电子元件，今天已可集成（制作）在一块面积比人手的小指甲还要小的晶片上。以前占满大厅或整幢房子的庞然大物般的电子设备，如今应用大规模或超大规模集成电路，已可被缩小成台式收音机那样大小了。过去价值连城、普通人难以企及的电子计算机，现在由于大规模和超大规模集成电路的出现，已逐渐变为廉价的普及商品了。大规模和超大规模集成电路的兴起和发展，正在日益深入地影响人们的工作和生活。

大规模，特别是超大规模集成电路是现代各门科学技术的综合结晶。如果我们将超大规模集成电路看成是一座巍峨的金字塔之顶，那么支撑这个闪光塔顶的各块坚实的基石，正是现代科学技术业已取得的许多成就——如有关基础理论、基础材料、器件物理、工艺物理等的突破，以及电子光学、离子光学、电子计算技术、超净和超纯技术、自动控制

技术和精密机械等方面取得的成果。因此，国外许多人把超大规模集成电子学看成是与原子能和宇航工程一样，具有“大科学”的性质；将以大规模和超大规模集成电路为主体的半导体工业看作是钢铁、石油等工业同等重要的、具有战略意义的国家命脉工业。

迄今为止国内尚未有一本论述大规模和超大规模集成电路的专著。作者受托撰写本书时，不能不感到有点儿惶悚。因为要将这些涵义丰富深刻、头绪纵横交错和牵涉面又是如此纵深宽广的内容，汇集、整理和浓缩到一本小册子中，似乎感到格外困难。

在编著本书时，作者的初衷是以比较通俗和生动地描绘出大规模和超大规模集成电路的基本概念；清晰地阐明它们的设计思想和区别于一般集成电路的特点；概要地介绍有关大规模和超大规模集成电路的工艺基础和关键设备；哲理地阐明大规模和超大规模集成电路兴起的必然性；辩证地指出它们对国民经济和其他科学技术的巨大促进作用。作者力图衬托出大规模和超大规模集成电路的真谛。

本书虽然避免引用高深理论和摒弃繁冗数学计算公式，但书中有些章节内容有一定技术深度。作者认为本书读者已具有一般中、小规模集成电路的基本概念。如果有些读者在阅读本书某些章节时感到困难的话，则可先参阅作者编著的《集成电路》一书（科学出版社1981年出版）。

本书初稿写成后曾蒙几位同志试读，并提出意见。复旦大学电子工程系唐璞山同志审阅了本书稿。值本书出版之间，谨向他们深表谢忱。

作者

1983年4月于上海

目 录

第一章 电子学发展新阶段	(1)
一、大规模和超大规模集成电路的诞生.....	(1)
二、大规模和超大规模集成电路的涵义.....	(4)
三、大规模和超大规模集成电路开创了电子学的新 局面.....	(6)
四、超大规模集成电路的发展特点.....	(10)
第二章 大规模和超大规模集成电路是科学技术发展的 迫切需要	(14)
一、突破中、小规模集成电路的速度极限.....	(14)
二、大规模和超大规模集成电路全面刷新了电子设 备的指标.....	(18)
第三章 大规模和超大规模集成电路是集成技术发展 的必然结果	(27)
一、集成技术发展的主要趋向.....	(27)
二、提高加工工艺精度和缩小晶体管图形几何尺寸	(29)
三、探索新的晶体管结构形式.....	(30)
四、扩大芯片面积.....	(31)
五、硅片直径的不断增大.....	(33)
第四章 大规模和超大规模集成电路的设计思想和结 构特点	(37)
一、设计思想的改变.....	(37)
二、电路功耗的考虑.....	(41)

三、单元电路的结构设计特点·····	(42)
四、向立体结构方向发展·····	(48)
第五章 大规模和超大规模集成电路的设计分析手段	
·····	(53)
一、问题的提出·····	(53)
二、计算机辅助设计 (CAD) 的主要内容·····	(55)
三、利用计算机分析和设计集成电路·····	(59)
第六章 计算机辅助制版 ·····	(63)
一、计算机辅助制版基本原理·····	(64)
二、制版程序——软件系统·····	(66)
三、图形发生器·····	(70)
四、计算机设计制版技术的进一步发展·····	(77)
第七章 大规模和超大规模集成电路的工艺与设备特点	
·····	(80)
一、大规模和超大规模集成电路孕育于新工艺、新设备之中·····	(80)
二、大规模和超大规模集成电路的工艺与设备特点·····	(86)
三、检测设备在大规模和超大规模集成电路制作中的重要性·····	(90)
第八章 大规模和超大规模集成电路的工艺基础——精细和超精细加工技术 ·····	(97)
一、精细和超精细加工技术所包含的主要内容·····	(97)
二、非接触式曝光技术·····	(100)
三、远紫外光曝光技术·····	(108)
四、X 射线曝光技术·····	(110)

五、电子束曝光技术	(113)
六、离子束曝光技术	(117)
七、离子束干法蚀刻技术	(120)
八、精密控制掺杂技术——离子束注入技术	(122)
九、薄膜生长技术	(127)
第九章 对材料和制作环境的要求	(134)
一、硅单晶材料	(135)
二、超纯水	(142)
三、超纯气体	(145)
四、超纯化学试剂和化学品	(149)
五、超净制作环境	(155)
第十章 现实与展望	(164)

第一章 电子学发展新阶段

一、大规模和超大规模 集成电路的诞生

1958年，在电子学工作者面前闪烁着一个诱人的新技术的火花，那就是有人打破了半个多世纪以来电子线路的旧概念，用单根硅棒制成一个相移振荡器。这个振荡器中各个电子元件不需要用金属导线相互连接，硅棒本身既用来构成振荡器所需要的电子元件，又成为电流的通路。这就是世界上第一块集成电路。从此集成电子学的新时代开始了。

经过了十年左右的理论发展和工艺实践阶段，在1967年4月，科学工作者面前又升起新的、更大的希望。因为在这一年，人们在一块米粒般大小的硅晶片上制造出包含1千多个晶体管的大规模集成电路。这就标志着集成电子学已发展到了一个新的阶段——大规模集成的阶段。由于大规模集成电路的出现，无线电电子学的面貌将大为改观；电子设备的性能指标也将全面刷新，并由此而促进了其他各个科学技术分支的发展。

时间又整整过了十年，一个更大的奇迹震撼了世界各国的科技界。1977年4月，美国人在一块面积为30平方毫米、大小相当于一颗小孩门牙的硅晶片上集成了十三万多个晶体管，制成所谓超大规模集成电路。同年，日本也研制出包含十五万六千余个晶体管的超大规模集成电路（硅晶片——芯

片面积为 6.1×5.8 平方毫米)。在中世纪，欧洲的一些经院哲学家们曾为“一个针尖上能站得下多少个天使”这样的问题争论不休，而现在在人类智慧的造物——超大规模集成电路的芯片上，在一根头发丝般粗细的横截面积上，确实容纳得下40个左右晶体管。古代经院哲学家争论的问题毕竟是神话，而现今科学家创造的却是活生生的现实。

生物以传种接代的方式延续自己的生命。新陈代谢，一代接一代，这是一个自然发展规律。同样，人们常常喜欢形象地以“代”来标志电子器件的发展演进程度。尽管电子器件的“代”只是标志电子器件在其发展过程中技术水平的高低新旧之分，新一代电子器件的问世，并不意味着老一代电子器件的必然消亡和立即退出应用舞台。但是毫无疑问，新一代电子器件的诞生，必然适应和反映了那一时期社会的迫切需要，必定显示其独特优点和旺盛生命力，也必然能开拓宽广的应用领域。

如果把1904年佛莱铭发明的真空二极管和1907年德·福雷斯特创制的真空三极管(两者统称为电子管)当作第一代电子器件产品，那么1948年巴丁、布莱廷等人发明的晶体管就是第二代电子器件产品，而1960年前后蓬勃兴起的集成电路被称为电子器件的第三代产品(中、小规模集成电路)。随之1967年和1977年问世的大规模和超大规模集成电路分别叫做第四代和第五代电子器件。一代接一代的电子器件是应无线电电子技术的发展需要而诞生，而无线电整机设备也追随着电子器件的不断演进而一代更新一代；科学技术和人们的生产、生活方式又在很大程度上追随着电子设备的演进而改变。

从第一代电子器件——电子管发展到第二代电子器件

——晶体管，前后经过了长达四十余年历程。但从晶体管发展到电子器件的第三代（中、小规模集成电路）、第四代（大规模集成电路）和第五代（超大规模集成电路），总共只花了近三十年时间。有趣的是这三代电子器件从上一代发展到下代都只经历十年左右的时间。在其他重要技术和工业产品的发展史上，我们很难找到可以与这三代电子器件发展速度相比拟的东西。

需要强调指出，不能把大规模和超大规模集成电路简单地理解为中、小规模集成电路集成度的提高。诚然，从第三代电子器件发展到第四代和第五代的大规模、超大规模集成电路，从其内部技术发展过程来看，在中、小规模集成电路的研究、生产和应用过程中已经孕育了大规模和超大规模集成电路。当技术水平发展到某一高度时，新一代电子器件就分娩了；而且在下节中我们将要讲到，电子器件从第三代发展到第五代确实是以集成度高低（或集成规模大小）作为“代”的划分标准的。但是当电路的集成度提高到大规模，特别是超大规模程度后，就出现了质的飞跃过程。在中、小规模集成电路的生产、应用实践中积累起来的经验、知识和由此而形成的概念和理论，不一定全都适用于大规模和超大规模集成电路。从本书各章所叙述内容我们将会看到，当进入大规模和超大规模集成阶段后，传统的中、小规模电路的设计思想、线路结构、工艺方法、设备工具、生产成本观念和应用概念，将受到愈来愈大的挑战。

大规模集成电路，特别是超大规模集成电路是崭新一代的电子器件，它既继承了前代电子器件的成果，又开创了它自身赖以发展的新理论和新工艺，从而开辟了电子器件发展

的新道路。

二、大规模和超大规模 集成电路的涵义

所谓大规模和超大规模集成电路，现在国际上尚没有一个确切、严格的定义。开始只是笼统地指集成规模完全突破以往中、小规模集成电路的那些高集成度的集成电路。以后在它们进一步发展过程中人们逐渐地形成一种似乎比较一致的划分意见或看法，但这也不是具有充足科学根据的划分标准。

在1967年以前生产的集成电路都是属于中、小规模电路。在单块电路芯片上包含（集成）的元件数最多的也只有几百个。由于早期生产的集成电路都是属于数字电路，而且在一块芯片上往往制造一个以上的具有相同功能的逻辑门。如1962年在市場上最早出现的集成电路就是只包含1个逻辑门（具有12个元件）的集成电路。到了1964年才开始出售包含4个逻辑门的集成电路；一年后又出现了装有20个逻辑门的集成电路。因此，人们不仅以芯片上所包含的元件数目多少作为划分集成电路集成规模的依据，而且也根据所具有的逻辑门数目来划分集成电路。

在早期，一般一个完整的双极型逻辑门内包含10个左右元件，所以人们将包含100个元件或10个逻辑门以下的集成电路称为小规模集成电路，而将芯片上所含有的元件数在100个以上、1,000个以下，或包含的逻辑门数在10个以上，而又不超过100个的，称为中规模集成电路。进到大规模集成阶段后，随着集成技术不断取得进展，单块芯片上含有的元件

数也愈来愈多，电路所具有的功能也愈益复杂化。这时，在同一块芯片上已不再象过去那样都是相同类型的基本逻辑门或触发器，因而在估量电路的集成度时出现了“等效门”的概念。所谓等效门，就是指其元件数目或功能等效于（相当于）基本逻辑门的单元电路。

一般认为：单块芯片具有100—5,000个等效门，或者包含1,000—100,000个元件的集成电路称为大规模集成电路（LSI）；门数目超过5,000、或元件数目高于10万的，则称为超大规模集成电路（VLSI）。当然，超大规模集成电路并不仅仅限于单片集成形式，也可以采用多个芯片组合后封装在一个管壳中的所谓多片式封装形式，但是现阶段（或近阶段）大规模集成技术的主攻方向是单片集成。

以上仅仅是从门数或元件数来规定大规模和超大规模集成电路的。后来人们又考虑到超大规模集成电路的性能和应用特点，以及估计到制作技术的难易程度，对超高速集成电路另行规定了超大规模标准，即凡是超过1,000个门的单片超高速电路（单个门的传输延迟时间小于1毫微秒——即十亿分之一秒），也算作超大规模集成电路。

超大规模集成电路的概念和设想最早是在1973年初提出来的，不过当时是以“未来系统”（Future System，简称“FS”系统）这一术语提出的。当时是个别人对集成电路未来可能

*在1973年2月举行的国际固体电路会议（ISSCC）上，美国国际商业机器公司（即IBM公司）向与会者透露了有关“FS”系统的零星消息。随后，在日本旅游的美国英特尔（Intel）公司的挪伊斯向日本人提到“FS”系统，从而激起日本政府和各大厂商研制超大规模集成电路的热情。

发展的预测*。后来“FS”系统被演变为“超大规模集成电路”这样的名词。目前超大规模集成电路的元件数已突破百万了，一些科研工作者已提出达到1亿—10亿元件数的努力目标。

超大规模集成电路不仅标志着电路集成度的大突破，而且还冲破了半导体的范畴。自从1948年晶体管发明后，电子器件的小型化、微型化或集成化总是与半导体紧密联系在一起。一直到大规模集成电路兴起后，仍没有超越半导体的工艺结构和半导体器件的设计理论框框。因此，大规模集成电路实际上就是高集成度的半导体集成电路。

发展到超大规模集成电路阶段后，电路概念有了新的涵义。超大规模集成电路是现代各个门类科学技术的综合结晶。为了达到愈来愈高的集成度，人们必须引用和发展新的理论，寻找新的材料，探索全新的工艺手段和器件结构形式，因而就不再局限于传统的半导体领域。尽管现时大量生产的超大规模集成电路并未脱离半导体集成电路范畴（仍是在一块半导体硅晶片上将许许多多晶体管集成为一个完整的电路），但不能排斥有别于半导体电路结构的其他各种形式的超大规模集成电路出现。现时在这方面已显露出种种可喜的迹象，如超导结电子器件在扩大集成规模和信息存储容量方面，已向人们散发出诱人的光芒。

三、大规模和超大规模集成电路 开创了电子学的新局面

如果我们浏览一下无线电电子学的发展历史，那么就不难发现，正是由于电子器件一代接一代的演进，才引发了无

线电电子学一次又一次的革命或变革，谱写成了电子学一篇又一篇新篇章。

六十年代集成电路的兴起，照示了无线电电子学新的发展道路，但是只有当进入大规模集成阶段后，集成电路才得以普遍地、全面地渗入各个应用领域，才掀起了风驰电掣般的无线电设备集成化运动。这是因为中、小规模集成电路虽然已显示出巨大的优越性（与分立晶体管线路相比），将无线电电子学推进到一个新的境界。但由于它们的集成度比较低，在许多急速发展和开拓的应用领域中，在可靠性、体积和重量等方面仍不能满足应用需求。另外，中、小规模集成电路的售价和成本还不能降低到能使应用者可以随心所欲和得心应手的普遍使用地步。

由于大规模的和超大规模集成电路的制作工艺流程与普通集成电路没有太多不同，因此随着集成度的大幅度提高，电路中每一个门或单个晶体管的制作成本就相应地大幅度降低（要比中、小规模集成电路降低百、千倍。如1975年生产的大规模集成电路每门成本仅为1美分，现在超大规模集成电路中单个门电路的制作成本仅为0.001美分），而其可靠性却要比一般集成电路提高百倍、千倍以上。

大规模和超大规模集成电路以无可比拟的生命力最充分地、最突出地体现在现代电子计算机上。自从1950年美国人W·福雷斯特提出和发明磁芯存储器后，赋予计算机以惊人的记忆力和灵活而全面的功能。但是磁芯存储器旷时费资的制作工艺和其体积与重量不能达到小型化要求，严重地阻碍了电子计算机向大存储容量和小型化方向发展。虽然在集成电路问世后不久，人们就已知道可用小型的半导体存储器

(集成电路存储器)来代替日益相形见绌的磁芯存储器。但由于受到当时工艺制作水平或集成规模的限制,中、小规模存储器的每位价格要比磁芯存储器贵。因此,当时只在少数电子计算机中作为高速缓冲存储器使用(集成电路存储器存取数据速度要比磁芯存储器快得多。即使是速度较慢的MOS存储器,其速度也比磁芯存储器快十倍以上)。

大规模和超大规模集成电路出现后彻底地改变了电子计算机的状况。无论是大规模集成电路,还是超大规模集成电路,都是在存储器方面首先取得突破的。特别由于当时高速集成电路和改进了的逻辑结构已使电子计算机逻辑部分的运算速度显著地提高了,因而存储器的存取数据速度在很大程度上决定了计算机的工作速度。因此这样的突破更含有重要意义。1970年,存储容量为1K位(1,024位,相当于集成1,000个门)的集成电路的存储器开始替代磁芯存储器而被应用到电子计算机中。从此以后,集成电路存储器长驱直入计算机领域,其集成度每隔一年提高一倍。到1980年,包含六万四千个等效门的64K位集成电路存储器已成为廉价的商品(如按位数计算,售价比1970年降低1万倍左右)。

大规模和超大规模集成电路给电子计算机带来极为光辉的前景。电子计算机的神机妙算功能虽然早已为人们认识,但它的昂贵得令人咋舌的售价和庞然大物般的体积,妨碍了它的推广应用。只有进到大规模集成电路阶段后,电子计算机才开始从深闺秀阁似的大型实验室中解放出来,日渐成为普及的商品。五十年代初价值几百万美元、重达几十吨的电子计算机,到七十年代中期,已可被装配在一块印刷电路板上的大规模集成微型电子计算机(又称微处理机)替代,而后者

的全部重量还不到一市斤，售价只是几十美元。

正是由于大规模和超大规模集成技术的兴起，使电子计算机的价格每隔四年下降一个数量级，这就为电子计算机的大普及奠定了最可靠的基础。在大规模集成电路出现前，在六十年代初，用计算机进行一万次十位乘法运算，需花费1.4美元；而到七十年代中期以后，只需花费一美分。

电子计算机的普及应用又促进了包括无线电电子学本身在内的几乎所有科学技术的大发展，有利于新兴科学技术分支的兴起。如今在欣欣向荣的电子计算机领域里，无论是每秒钟能进行几亿次计算的巨型机，还是小到足以放入拎包内的微型机，都是植根于大规模集成技术的基础上才发展起来的。

当然，电子计算机只是大规模和超大规模集成电路一个突出应用的例子。大规模和超大规模集成电路正在日益渗入无线电电子学的各个领域；它赋予无线电电子学更多、更大、更广泛的功能。由于它的出现，使无线电电子学以空前的速度渗透到各部门、各行各业，从生产到生活，几乎达到了无所不包的地步。即使是过去看来被认为是无法实现的电子设备，现在也已能成为普及的日常用品。

这里我们只要举出一个生活中大家熟悉的例子，就可领悟到大规模集成电路创造的奇迹！现在大家只要花费几十元钱就能买到一只走时极为准确的电子手表。但是你可曾知道，戴在手腕上的这块还不到一寸见方的金属表壳里，有着三千多只晶体管在工作，而且这三千多只晶体管是制作（集成）在一块小晶片上的，晶片的总面积只有表壳面积的数百分之一。这就是大规模集成电路所显示的奇迹。如果回溯到四十