

微电子技术的发展展望

杨之廉

(清华大学微电子学研究所, 北京 100084)

阐述了电子整机系统与微电子技术的关系,介绍了世界半导体市场的增长情况.在讨论中规模、大规模、超大规模、特大规模集成电路各阶段的主要特征之后,分析了各主要技术的变化.同时预测到本世纪末前,微电子技术的十个主要发展动向.

Abstract

The relationship between electronic systems and microelectronic technology is described in detail, and the developing status of the world semiconductor marketing is also introduced in this paper.

After a discussion of the important features in each phase of MSI, LSI, VLSI and ULSI integrated circuits, the change and development of some main technologies is analysed. Finally, the trends of development in ten aspects of the microelectronic technologies in next decade are also predicted.

自1959年诞生第一块集成电路以来,迄今只有短短33年.但在这短短的30多年中,芯片的集成度已从每个芯片上仅有四个元件而一跃成为每个芯片上集成了一亿多个元件,并始终保持着每三年集成度翻两番的增长速度.这种增长速度在现代科学技术史上是很少见的.

集成电路已成为电子信息产业的核心.日本则把半导体工业的产值达到整个工业产值的0.5%作为一个国家进入信息化社会的重要指标.集成电路工业已是当今世界的战略性工业,它的水平正在成为一个国家是否已是大国地位的标志之一.

一、微电子工业是战略性工业

集成电路的高速发展来源于电子整机系统的需求推动,而集成电路的性能提高和价格下降又反过来带动了电子整机系统的更新换代.这具体体现在:

(1)整机的高速化要求芯片的高速化,如超高速计算机、高速高性能工作站、32位个人计算机.

(2)整机的高智能化、高精细化要求芯片进行高速数字化处理,如激光打印、传真机、多功能电话、电视电话、大尺寸电视、数字式高清晰度电视、彩色的摄像录象一体化、卫星接收机、盒式激光唱机.

(3)整机的小型化推动芯片的高集成化和低功耗化,如膝上型个人计算机、便携式工作站、便携式打印机、复印机、小型传真机、电子笔记本、移动电话.

(4)整机的网络化要求芯片系统化,如局域网(LAN)、综合业务数据网(ISDN).

现以汽车电子化为例说明行业的更新必须紧紧依靠微电子技术.

汽车电子化开始于60年代(为第一阶段),当时以晶体管和中小规模集成电路为主.第二阶段始于70年代,开始采用微处理器.从80年代进入第三阶段,这时采用ASIC(专用集成电路)电路为主.

汽车电子化开始于点火装置和电压调整器等,接着发展成由电子控制的燃料喷射、防滑装置、故障诊断以及安装了汽车电话等.目前已进一步发展到以微机控制的发动机系统综合控

制、显示系统综合控制、底盘系统综合控制、车内信息综合控制、车身系统控制和车内附设装置的电子化。如日本丰田某车型内采用 22 个微机, 300 块集成电路, 500 个晶体管和 4500 个元器件。虽然多年来汽车外型变化不大, 但汽车性能却大大提高。

海湾战争的事实进一步证实了微电子技术 在国防上的绝对重要性。据统计, 美国的武器系统中 有 20 种重要的零部件为日本所生产, 而且其中 7 种只有日本才能供应而无其他来源。因而日本军工界人士说, “没有日本先进的微电子芯片, 海湾就不可能打高技术的战争”。日本的

石原慎太郎在《敢说不字的日本》一书中甚至说: “日本可以通过停止向美国提供微电子芯片来打破全球的军事力量对比”。

1992 年世界电子系统的销售额为 6400 亿美元。而半导体器件(包括集成电路和分立器件两大类), 1992 年的世界销售额为 820 亿美元, 其中集成电路部分为 641 亿美元。半导体器件和集成电路的销售额占世界电子系统销售额的比例分别为 12.8% 和 10%。1983 年至 1995 年世界电子系统和半导体器件的销售额变化见图 1, 1987 年至 1994 年世界集成电路的市场变化见图 2。

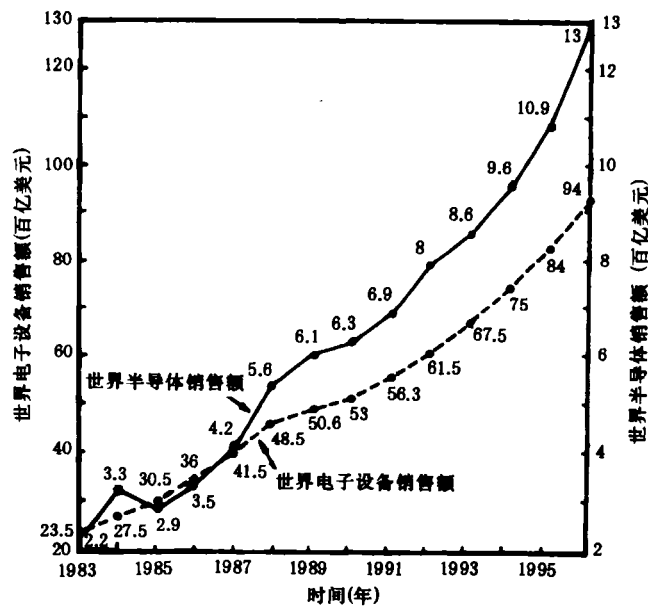


图 1 世界电子系统和半导体器件销售情况(来源:ICE)

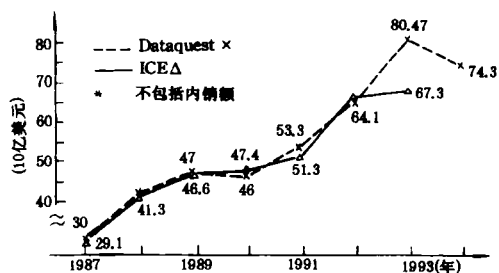


图 2 世界集成电路市场变化

据预测, 世界半导体的销售额到 1995 年为 1000 亿美元, 到 2000 年将高达 2000 亿美元。其中对世界集成电路销售额的预测为, 1995 年为 880 亿美元, 到 2000 年将达 1500 亿美元。

物理

世界半导体市场的增长速率逐年有所不同, 但年均增长率在 12.1% 以上, 集成电路的年均增长率在 13.2%, 每年的变化情况见图 3。

推动下一个半导体繁荣期的电子系统(产品)是什么? 据预测它们将是 RISC(简化指令集计算机)工作站, 高档的个人计算机, 膝上型计算机, 激光打印机, 局部区域网和高清晰电视。有人认为综合业务数据网所要求的多媒体芯片(multimedia chip)也将是一个巨大的市场。前述的六种产品中所用的半导体器件到 1995 年将为 174.5 亿美元, 占当年世界半导体销售额的 16%。其市场销售额及年增长速率见表 1。

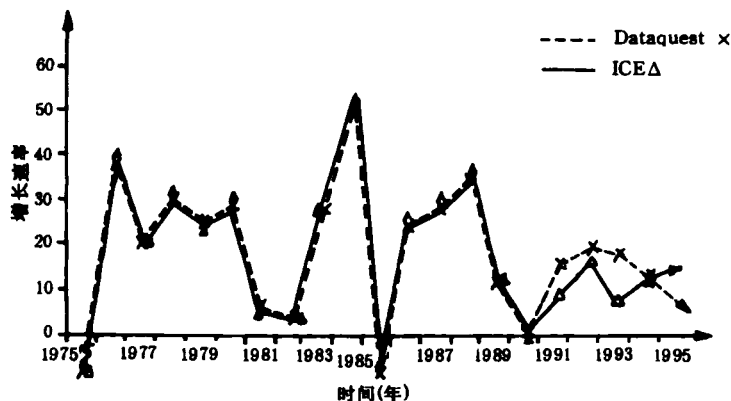


图3 世界集成电路增长速率的变化(来源:Dataquest, ICE)

表1 六种产品市场销售额及年增长率预测

产 品	1995年 市场预测 (\$10亿)	年增长率 1990—1995 (百分数)
RISC 工作站	1.55	56
高档个人计算机	7.49	39
膝上型计算机	3.94	30
激光打印机	2.56	23
局部区域网	1.06	25
高清晰度电视	0.85	>100

特别应该提到的是专用集成电路市场的发展。(这里说的 ASIC 是指对某一个用户需要的门阵列、标准单元、全定制、可编程逻辑器件、可编程门阵等产品,它不包括某种专门用途的

标准产品和一切通用产品)。

近十年来,ASIC 有着飞速的发展.1982 年 ASIC 在总的集成电路销售额中仅占 12.2 亿美元.到 1990 年已高达 19%,为 90 亿美元.预计到 1995 年,ASIC 的销售额将占集成电路总销售额的 21%,将高达 184.8 亿美元。

二、集成技术的发展

集成电路在经历了小规模 (SSI)、中规模 (MSI)、大规模 (LSI)、和超大规模 (VLSI) 各阶段以后,当前已进入特大规模集成电路 (ultra large scale integration) 阶段,各阶段的主要特征见表 2。

表2 集成电路发展各阶段主要特征

	MSI	LSI	VLSI	ULSI
元件数/芯片	10^2-10^3	10^3-10^5	10^5-10^7	10^7-10^8
特征线宽 (μm)	10—5	5—3	3—1	<1
速度功耗乘积 (μJ)	10^2-10	10—1	$1-10^{-2}$	$<10^{-2}$
栅氧化层厚度 (\AA)	1200—1000	1000—400	400—150	150—100
结 深 (μm)	2—1.2	1.2—0.5	0.5—0.2	0.2—0.1
芯片面积 (mm^2)	<10	10—25	25—50	50—100
加工硅片直径 (mm)	50—70	100—125	150	>150

自1970年以来,每个芯片上晶体管数的平均增长率为:存储器类每年为1.5倍,微处理器类每年为1.35倍,按此速度发展下去,到2000年动态随机存储器(DRAM)的单片存储容量将达到 10^3 Mb,集成度会超过 10^9 个元件.1970

年至1996年集成度的变化见图4.

芯片尺寸也在逐年增大,存储器类和微处理器类都以每年增长1.13倍的速度加大.现以Intel公司的MPU(微处理器单元)芯片为例,说明其变化的程度,见图5.

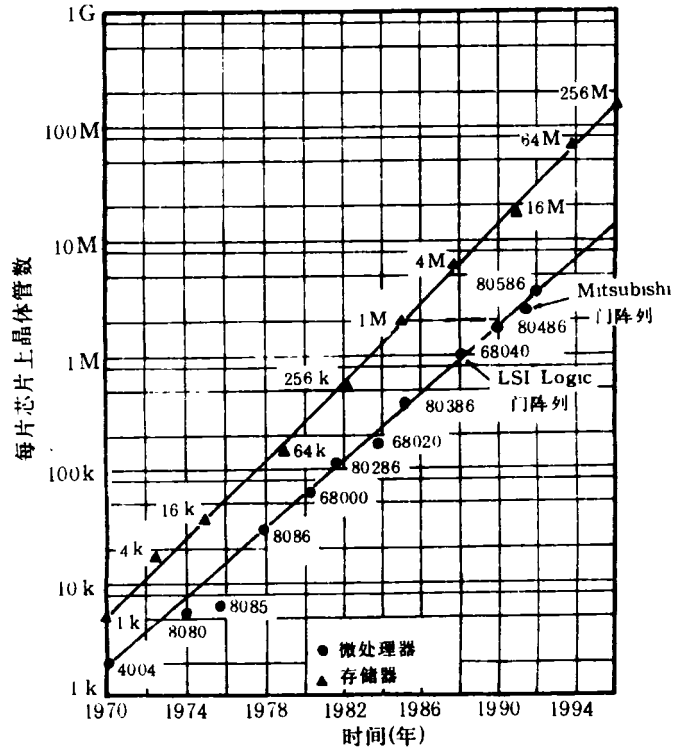


图4 集成度变化趋势(来源: Intel/ICE)

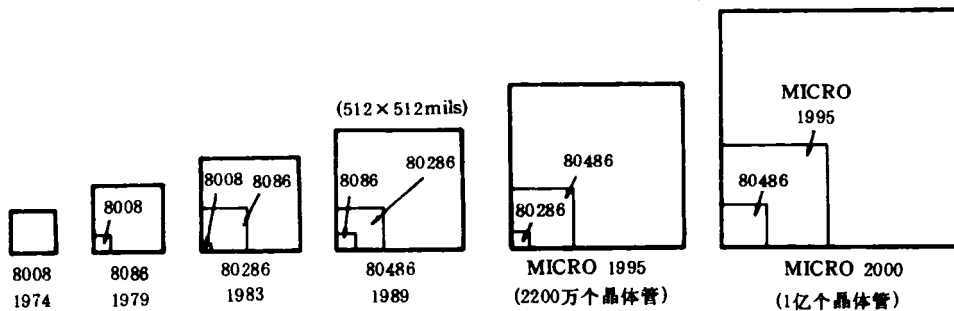


图5 Intel公司MPU芯片尺寸的变化(来源: Intel)

对于典型的生产产品而言,其特征尺寸(线宽)已从80年代初期的 $5\mu\text{m}$ 水平下降到现在的 $0.8\mu\text{m}$.1989年宣布的16Mb动态随机存取存储器采用 $0.5\mu\text{m}$ 的线宽,1991年第一次发表的64Mb DRAM则采用 $0.35\mu\text{m}$ 技术.目前在实验室已能获得 $0.25\mu\text{m}$ 水平的线宽,预计物理

到本世纪末将达到 $0.12\mu\text{m}$ 即深亚微米的水准.特征尺寸的变化情况见图6.

亚微米和深亚微米时所采用的工艺技术列于表3.可以看出,随着微细加工技术从亚微米到半微米,进而到深亚微米的发展,其他各种工艺技术都要发生变化,如硅片直径、隔离方案、

栅氧化层厚度、栅极材料、金属化方案、晶体管结构、沟道长度、结深、电源电压等都要采用新的技术。

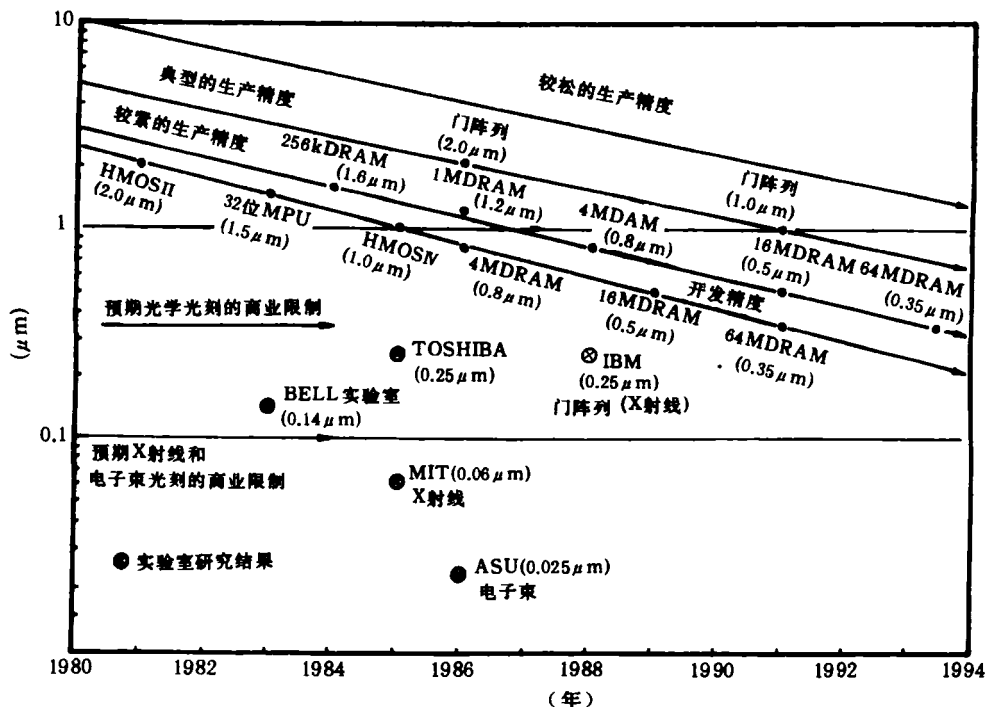


图6 特征尺寸(线宽)的变化(来源:INT/ICE)

特别是曝光和刻蚀这两项将是获得微细线条的关键技术.光刻的光源将从g线(436nm)改为i线(365nm),进而采用准分子激光的深紫外光源,如KrF(248nm)和ArF(193nm).而X射线和电子束直接扫描成形技术目前在技术上还有不少问题需要进一步解决.

为了在同一光源的光刻设备上提高光刻分辨率,近年来移相掩模技术重新崛起,并得到了初步应用.

移相掩模是由电路的掩模图层和与其相匹配的移相图层所组成的双层掩模结构.图7是移相掩模的基本原理.

采用移相掩模后,光通过移相时将产生180°的相位差,因而相邻孔将产生相消干涉,使隙缝之间的光强减弱,相消干涉抵消了一些衍射效应,因而提高了图形复制时的分辨率.移相掩模技术可能是生产64Mb DRAM的较为实用和经济的技术.当然该技术的真正实用化还有大量的问题亟待解决,如无缺陷掩模的制作

技术,怎样正确控制膜厚和折射率,以及移相掩模的CAD等.对各种光刻分辨率和对准精度,可能采用的光刻方法见表4.

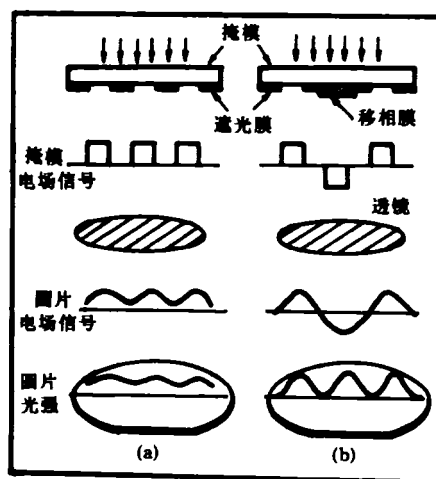


图7 移相掩模原理

(a)普通掩模;(b)移相掩模

对于0.6—0.7 μm 线条的刻蚀,较好的技术方案是采用电子回旋共振(ECR)型反应离子

表3 工艺技术的变化

年份	直至1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000和
开发	0.7 μ m, 4M	0.5 μ m, 16M	0.3 μ m, 64M						0.2 μ m, 256M			0.13 μ m, 1G
批量生产	1M, 1.0 μ m		4M, 0.7 μ m			16M, 0.5 μ m				64M, 0.3 μ m		
硅圆片尺寸	6"					8"						10"
隔离	等平面					改进等平面				沟槽		
电容器电介质	ONO, 90Å		NO, 70Å			NO, 60Å				Ta ₂ O ₅ , 35Å		高介电常数, 20Å
单元结构	平面/堆叠		堆叠/沟槽			三维						
栅氧化层	250Å		200Å			150Å				120Å		80Å
栅材料	多晶硅化物		金属/多晶硅化物							难熔金属		
金属化	Al+Si		AlSiCu+Barr			多层金属						
工艺类型	CMOS									BiCMOS		
晶体管	N沟, 源漏轻掺杂		N沟和P沟, 源漏轻掺杂			自对准多晶硅/硅化物						垂直型漏区
沟道长度	1 μ m		0.7 μ m			0.5 μ m				0.3 μ m		0.15 μ m
结深	0.35 μ m		0.25 μ m			0.15 μ m				0.1 μ m		0.08 μ m
电源-外部	5V					5V				3.3V		1.5V
-内部	5V					3V				1.5V		1.5V
腐蚀	等离子体, 反应离子刻蚀		电子回旋共振			低温电子回旋共振						
光刻	g线 436		i线 365			相移				准分子激光 248		X射线/电子束

刻蚀方法,其优点是能获得高各向异性的图形,且均匀性好和损伤少.对于 $0.5\mu\text{m}$ 线条的刻蚀,可能采用低温 ECR 技术.

表 4 可能采用的光刻方案

产 品	分辨率(μm)	对准精度(μm)	方 法
4Mb DRAM	0.8—0.7	0.15—0.125	g 线 i 线
16Mb DRAM	0.6—0.5	0.125—0.1	i 线 i 线+相移
64Mb DRAM	0.4—0.3	0.1—0.08	i 线+相移 准分子激光
256Mb DRAM	0.3—0.2	0.08—0.06	深紫外 X 射线 电子束

在图形微细化的同时,另一方面是硅片尺寸的大面积化.

硅片尺寸的增加会使可能获得的芯片数增加.现以 8in 硅圆片与 6in 硅圆片相比,其面积比为 1.78 倍,在生产 16Mb DRAM 时可能获得的芯片数比为 1.95 倍,即几乎增加一倍.但由于硅片尺寸的增加会引起生产率的下降,此外因设备费用的增加及占用净化面积的加大,因而实际产生的优值约为 1.39 倍.

硅片尺寸的增大会带来一系列技术问题,如大面积的高平整度、硅片的机械强度、缺陷密度、瞬态温度变化和温度不均匀分布所造成的位错、滑移和变形、应力的集中引起表面微裂缝等.硅片尺寸增大已引起工艺设备的变化,如水平的扩散炉已改变为垂直型.

在工艺类型中,CMOS(互补金属-氧化物-硅)仍是主流,BiCMOS(双极型与互补金属-氧化物-硅型兼容工艺)将会逐年增加.双极型工艺则将主要用于模拟电路.

总之,集成技术有两个明显的发展趋势:一是从亚微米、半微米到深亚微米,继续不断地发展微细加工技术并在此基础上开发超高集成度和超高速度的集成电路;另一是利用已成熟的工艺、设计、封装和测试技术发展各种专用集成电路(ASIC)和专用标准产品(ASSP),以及专用集成系统(或子系统)(ASIS).

三、今后十年的发展动向

1. 微细加工工艺向深亚微米发展

批量生产的特征线宽将从现在的 $0.8\mu\text{m}$ 缩小到 $0.3\mu\text{m}$. 开发研究工作的线宽将从 $0.25\mu\text{m}$ 缩小到 $0.12\mu\text{m}$. 为了获得这样的微细线条,可能选择的光刻技术方案有:(1)i 谱线(365nm)加移相技术可获 $0.35\mu\text{m}$ 线条;(2)KrF(284nm)准分子激光加移相,或 ArF(193nm)准分子激光加双层胶,或 X 射线接近式,可达 $0.25\mu\text{m}$ 线条;(3)ArF(193nm)加移相,或 X 射线接近式,可达 $0.18\mu\text{m}$ 线条;(4)X 射线接近式/投影式,或电子束接近/投影/直接曝光法,可达 $0.12\mu\text{m}$ 线条.

在这些技术中,深紫外移相光学光刻法和电子束光刻法可能列为优先发展的技术.对 X 射线接近式光刻则需首先突破套刻和掩模制造等关键技术.电子束直接成形必须解决扫描速度问题.在刻蚀工艺中将会采用电子回旋加速共振设备(ECR)或低温 ECR.

2. 集成度向 GSI 发展

动态随机存储器的单片存储容量将达到 10^3Mb ,集成度会超过 10^9 个元件而进入 GLSI(巨大规模集成)阶段.在 CPU(中央处理单元)方面将会出现内含 10^3 万个元件以上,具有 300MIPS(百万条指令/秒)处理速度的 MPU.在专用集成电路方面,估计会有 130 万门以上 ASIC 芯片出现.

3. 超净环境和工艺装备将发生重大变革

对微污染的控制将提出更高的要求,这包括洁净室的设施、材料纯度要求和水的净化等.净化的粒径标准将改为 $0.1\mu\text{m}$,洁净度要求每立方英尺小于 1 个微粒($0.1\mu\text{m}$ 微粒 1 级的要求).清洗后的污染度要求能达到 $<1 \times 10^6\text{Fe}/\text{cm}^2$.硅片尺寸将从 8in 增大到 10in 直至 12in.工艺装备将逐步向单片多工艺模式发展,因而出现各类集群式结构的设备.根据以往的经验,设施与设备费用第五年约增加 2.5 倍,因而到 2000 年,一家每月能生产 1 万片、直径为

300mm 晶片的新工厂,其建造费用预计将高达 20 亿美元,所以开发专门面向小而灵活的生产线使用的加工制造系统,建立新的工厂模型,改进工厂设计将成为一个重要课题。

4. 微电子封装的革新

有人预测到 90 年代末,ASIC 的最高封装管腿数可达 1200 条以上,工作频率高达 500MHz 以上,而芯片功耗可超过 30W. 因而要求封装结构、材料及组装技术有一个新的改革. 带载自动键合(TAB)封装、表面安装技术(SMT)封装将成为主流. 此外,大规模并行计算机系统需要采用多个芯片,因此多芯片模块(MCM)封装将成为重点的研究内容。

5. 设计方法学和工艺 CAD(计算机辅助设计)的创新

面对一种高性能、高复杂度的芯片,如何进行设计将成为集电路技术发展中的一个瓶颈. 设计人员必须在低层次上花费较少的时间,而把精力集中于高层次即系统设计方面的问题. 预计层次式结构化的定制设计方法将得到重视. 在设计工具方面除建立一种高速、并行的设计环境外,将集中开发行为级设计的描述语言和行为级模拟软件、结构级功能划分软件、结构级综合软件、传输级综合软件、门级综合优化软件、功能块的综合器和编译器等,在这同时将进行新的布局布线及优化算法的探讨。

工艺 CAD 将集中解决亚微米及深亚微米级的器件模型,包括点缺陷模型和热电子效应模型等. 此外要建立新的工艺设备模型,特别是在等离子腐蚀中应引入复杂的电磁效应. 此外当器件尺寸越来越小,制造工艺越来越复杂时,工艺结果与工艺设备的配置、工艺条件的变化之间的关系越来越大,因而优化、统计、诊断和控制的任務将变得非常突出. 建立一个标准的 TCAD(工艺计算机辅助设计)框架结构(framework)的要求也将特别迫切。

研究器件的三维效应的任务已提到日程,为了模拟一个具有百万个网格(grid)的器件,必须用计算速率为千兆级的并行计算机,甚至需要兆兆级(10^{12})的并行计算,因而如何解决物理

兆量级的并行计算问题是 TCAD 所面临的重要课题。

6. 测试方法的改革

目前对于复杂的芯片,进行 100%故障覆盖率的功能正确性实时测试,仍是一个未能解决的课题. 现在采用的硬件仿真办法仍是一种补充手段. 如何提出一些根本性的对策将是对测试方法学和测试工具的严重挑战。

7. 专用集成电路向专用集成系统(ASIS)发展

到 90 年代末, 10^8 — 10^9 的集成度已足以把一个实际的电子系统集成到一个芯片上,因而专用集成系统将成为可能. 为此,需要在硅技术的基础上把集成电路与传感器集成在一起,把数字和模拟电路结合在一起,并大力发展 Bipolar 和 MOS 兼容的 BiCMOS 工艺技术。

目前已出现了把半导体激光器、光开关、光调制和光检波等光器件集成在一个衬底上的光集成电路. 下一世纪将会出现把光和电集成在一起的光电集成电路(或系统)。

8. 微电子系统基本处理方式的变革

80 年代已对神经网络式的平行和分布处理,模糊决策方法等作了大量研究,并取得了明显进展. 如何采用 ULSI(特大规模集成电路)技术来实现类似于人脑所具有的柔性失效,自修复和学习能力,联想和追忆本领,模糊但高速的决策等新的“计算”方式,已成为微电子集成系统所追求的目标,并将形成一种新的处理方式和结构。

9. 新型器件原理和器件结构的出现

GaAs, GeSi 及其他 III-V 族化合物异质结,超晶格和其他量子效应器件的出现和发展将会促进微电子技术的发展,有可能利用这些新器件制作新一代微电子芯片。

10. 对“边缘”新学科的推动

例如微机械学就是由硅微细加工技术衍生出来的一门新学科. 在实验室中已可制造出几十微米量级大小的各种微型电动机和微型机械. 这些微机械可与电子信息处理单元集成在一个硅芯片上,组成一种微电子机械系统(MEMS)。

再如医学微电子学也是一门新学科.利用含有集成传感器的微芯片送入或植入人体内,从而对人体进行各种实时监控和测定,以及记录和显示.预计这一新学科在 90 年代会得到蓬

勃发展.

毫无疑问,在十年后的今天,微电子将以新的面貌出现在世界,同时微电子技术作为一种巨大推动力将改变世界的面貌.

孤立子与生命活动^①

庞小峰^②

(西南民族学院物理系,成都 610041)

介绍了孤立子概念和它的奇妙特性,着重叙述了近 20 多年来科学工作者(包括作者本人在内)利用这个概念研究生命体中一个极其重要的问题,即在生物大分子——蛋白质和 DNA 中传递生物能量、物质和信息的孤立子的形成机制、特点和生物功能与当前研究状况及今后前景,给出了一些令人寻味的重要结果.对于人们认识生命的特性,揭示生物的奥秘有极大的作用.

Abstract

First, the concept of soliton and some of its marvellous features are introduced. Then the properties and the biological functions of solitons, such as transporting biological energies, masses and information in protein and DNA molecules in organisms are described. The above results obtained by the author and other scientists show that solitons in living beings play an important role in their lives. Some of the results may be inspiring and helpful to explain the nature of life and reveal the profound mystery in it.

一、妙趣横生的新型准粒子

现在提起“孤立子”,和十多年前大不相同了.当时,只能为少数科学家所掌握,用来解决为数不多的具体问题的一种数学手段.给“孤立子”概念蒙上了一层神秘色彩.如今,很多人都熟悉它,已将它看成一种客观存在的物质,并成为人们解决自然现象和社会活动中非线性问题的强有力的手段.

但是,要认清孤立子^[1],还得提到离现在 100 多年前的英国科学家 Russell 在 1834 年观察到的在水渠中出现的奇妙现象:“由两匹马拉

着在水渠中急速行进的船,突然停下来,在船前激起一个孤立的水波峰,保持巨大速度和原来形状滚滚向前行进了大约 1—2km”.他将观察到的这一现象在英国第 14 届科学促进会议上作了生动的描述.但由于当时科学技术的限制,没有人对这一问题从理论上和实验上作进一步探索.直到 60 年后的 1895 年, Kortewey de Vries 才从理论上推导出了描述这种孤立水波的运动方程,即 KdV 方程式.但人们怀疑 KdV 方程的解是否稳定,而把它放在一边,长期埋没下来.

救活这一工作的是本世纪 50 年代的 Fermi, Pasta 和 Vlam 等人所研究的 FPU 问题.他

① 得到中国科学院国际材料物理中心(ICMP)的资助.

② 中国科学院国际材料物理中心和中国高等科学技术中心成员.