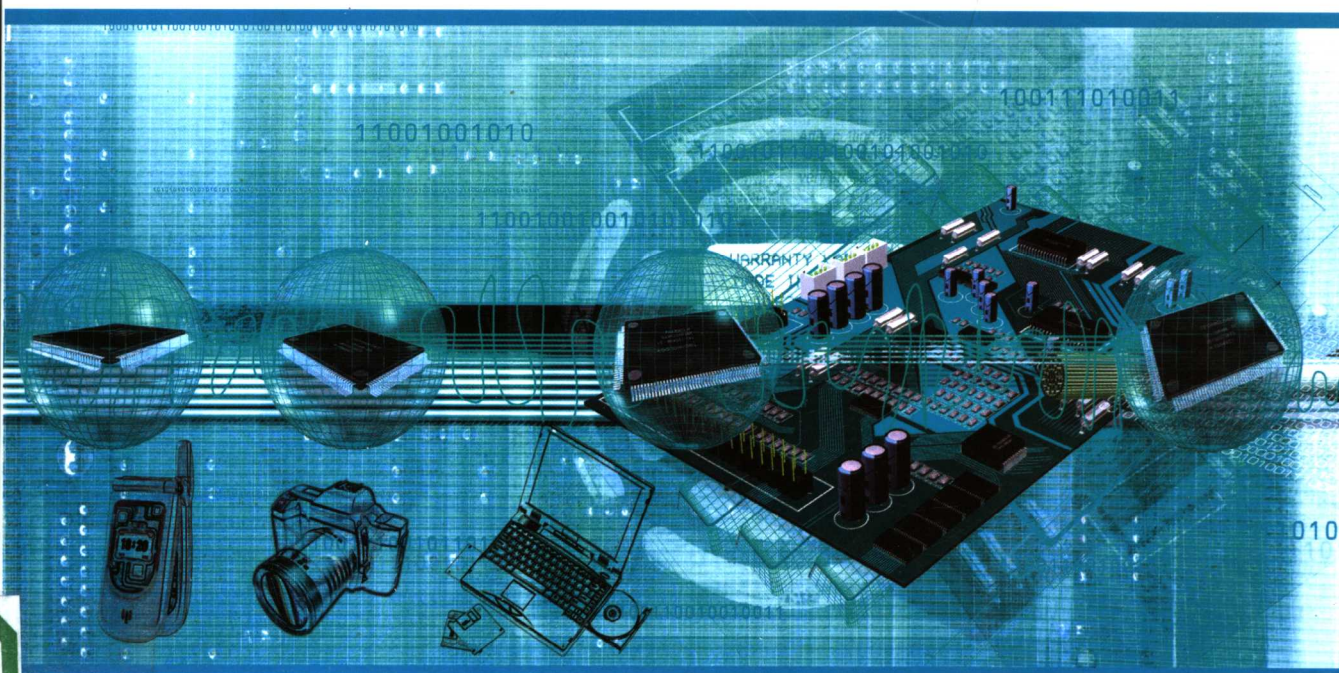


微电子设备与器件

封装加固技术

杨平 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

微电子设备与器件 封装加固技术

杨平 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书针对微电子设备与器件封装加固技术要求,对复杂恶劣环境电子设备与器件封装加固系统理论和技术进行了较全面深入地介绍;作者将电子信息学、电磁学、传热学、振动冲击理论、数理理论、计算机技术、控制理论、非线性科学、智能工程、化学、物理、微电子制造、通信学、数据结构、材料科学等紧密结合起来,着重介绍了电子设备与器件工作环境概论、减振抗冲原理与加固技术、热环境及热加固设计、电磁环境及抗电磁干扰加固技术、电子封装加固技术、微电子封装的评价、失效与加固设计、微电子设备与元件环境测试技术等专题。

本书适合大专院校机械电子工程类、机械工程及自动化类、计算机类、通信类、电子信息设备类、力学类、自动控制类、管理工程类、环境工程类等专业的高年级本科生和研究生阅读,同时可供相关研究所、厂矿企业的科技工作者学习、研究和设计参考。

图书在版编目(CIP)数据

微电子设备与器件封装加固技术/杨平编著. —北京:
国防工业出版社, 2005. 9
ISBN 7-118-04057-6

I. 微... II. 杨... III. 微电子技术—封装工艺
IV. TN405. 94

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 084988 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 $\frac{3}{4}$ 560 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数: 1—3000 册 定价: 38.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

信息产业是国民经济的先导产业,微电子技术是信息产业的核⼼。微电子技术的迅猛发展,现在已进入了巨大规模集成电路(GLSI)时代,即单个芯片可集成数十亿个元器件的集成规模,它使人类进入了高度信息化时代。

高可靠性的微电子设备是信息产业高速发展的必要条件,复杂的环境会对微电子设备的安⼼可靠性产生巨大威胁,例如现代战争使用的作战装备中微电子设备失效率的95%~98%是由于恶劣环境引起的,因此具有高加固性能的微电子设备软硬环境(微电子设备及信息软件)是必不可少的。

微电子设备和器件大多在复杂的环境中工作,因此对其工作性能的要求越来越高。为使这些设备和产品安⼼可靠地工作,其系统或器件必须具有良好的抗恶劣环境特性。当前,为了提高我国微电子设备和器件产品软硬系统在国际市场中的竞争能力,保证产品的高性能、高质量和低成本,微电子设备与器件加固理论的技术研究和应用开发,已成为科技人员需要迫切了解和掌握的设计制造与防护手段,也是我国21世纪需着重发展的工程科学技术。

微电子设备与器件封装加固理论和技术的研究内容,其理论性和应用性都非常强,而且是一门交叉性极强的科学,它涉及微电子学、电磁学、信息学、传热学、振动冲击理论、数力理论、计算机技术、控制理论、非线性科学、智能工程、化学、物理、微电子制造、通信学、数据结构、材料科学和技术等学科。本书针对微电子设备与器件封装加固技术要求,对复杂恶劣环境微电子设备与器件封装加固系统理论和技术进行了较全面深入的研究;着重介绍了微电子设备与器件工作环境概论、减振抗冲击原理与加固技术、热环境及热加固技术、电磁环境及抗电磁干扰加固技术、微电子封装加固、环境测试技术概论等专题。

本书的出版将使有关大专院校机械工程及自动化类、机械⼦⼦程类、计算机类、通信类、自动控制类、⼦⼦息⼦⼦备类、力学类、管理⼦⼦程类、环境⼦⼦程类等专业的研究生和本科生,获得一本导向性极好的理论教材或教学参考书;同时本书将使相关研究院所、厂矿企业科技工作者,获得一本指导性强的⼦⼦⼦⼦备与器件加固理论和技术在设计制造方面的参考书籍。

微电子技术是一个知识密集、资金密集、人才密集的技术领域。微电子设计制造技术竞争涉及到国防安⼦⼦和经济安⼦⼦。发达国家都以数百亿元资金投入,研发有自己知识产权的微电子设计制造技术。同样我国也正在集中⼦⼦力和财力研发有自己知识产权的亚微米与纳米的微电子设计制造技术,目前发展动向是:半导体分立器件西移(从东南亚向中国大陆)和IC制造东移(由西方发达国家移向中国大陆),因此我国微电子⼦⼦程迅速发展,将急需培养高层次微电子⼦⼦程人才。基于微电子设备与器件加固理论和技术已成为信息产业一个不可缺少的部分,本人提出了微电子设备与器件封装加固的新概念,并开始了新教材的编著工作。近年来与微电子技术相关的文献、资料较多,技术领域越来越宽;但有关微电子设备系统技术基础著作很少,这就使得许多有心钻研此领域的大专院校⼦⼦⼦⼦、⼦⼦程技术人员,苦于没有一本系统的专业书籍可供在教学、科研、产业化中参考。本书是一本系统的微电子设备与器件加固理论和技术方面的专著,本书将各国学者在此方面的研究成果整理出来,希望能起到抛砖引玉的作用。

全书共分7章,其中第1章介绍国内外微电子设备与器件封装加固理论和技术的研究进展与动态及本书研究的问题和目的;第2章介绍微电子设备振动冲击环境与加固技术;第3章介绍微电子设备热环境及热加固技术;第4章介绍微电子设备电磁环境及抗电磁干扰加固技术;第5章与第6章分别介绍微电子封装与加固技术;第7章介绍微电子设备与器件可靠性及环境测试技术。

作者首先要感谢父母的养育之恩,感谢家人的支持和关心,感谢所有培养过作者的师长,如硕士导师袁盛治教授、肖铁英教授,博士导师钟毅芳教授、周济院士等。多年来,导师们无论是在学习上还是研究工作中都给予了极大的帮助和鼓励,导师们渊博的学识,敏锐的判断和卓越的远见,使作者深受启迪。导师们严谨、务实、勇于创新的工作作风,将永远激励作者在科学的道路上奋发向上、探索创新,在此谨向导师们致以最诚挚的感谢!

江苏大学图书馆罗丹梅同志承担了本书的信息资料收集和整理、文字输入及校对等工作,提出了许多建设性意见,为本书完成做出了贡献,在此表示诚挚的感谢。

与本著作相关的研究课题是1996年开始的,在近10年来的课题研究特别是在近5年的科研工作中,江苏大学微纳米研究中心、桂林电子工业学院先进设计与制造技术研究所的同志们与本人形成了一个团结奋进的科研团队,他们为本著作及项目的完成给予了全力的协助。在多年的学习和研究工作中,作者很多朋友和同学给予多方面的支持和帮助。另外我的研究生校对了全部书稿,在此表示诚挚的谢意。

最后作者要感谢本书的责任编辑刘萍老师,她专心细致的工作使作者获益匪浅。

作者
2005年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信息技术的发展趋势	1
1.2 微电子设备与电子元器件的发展	2
1.2.1 电子元器件的发展	2
1.2.2 一代器件,一代整机,一代装备	4
1.2.3 微电子技术新领域	6
1.3 微电子设备与信息封装加固防护技术的研究任务、内容和对象	10
1.4 微电子设备与器件抗振动冲击加固防护技术	11
1.5 抗高低温环境加固理论和技术	12
1.5.1 电子设备热控制目的	12
1.5.2 电子设备的热环境	12
1.5.3 电子设备热控制基本原则	13
1.5.4 电子设备热控制方法	15
1.6 抗电磁干扰(电磁兼容)环境加固理论和技术	16
1.6.1 电磁兼容设计的目的	16
1.6.2 电磁兼容设计的基本内容	21
1.7 微电子设备封装加固理论和技术	21
1.7.1 微电子设备封装技术的演变	21
1.7.2 微电子设备封装技术的发展趋势	23
1.7.3 发展微电子设备封装技术应采取的对策	24
第 2 章 抗振动冲击加固防护理论技术	25
2.1 设备动力环境与抗振动冲击设计基础概述	25
2.1.1 设备动力环境描述	25
2.1.2 抗振动冲击基本原理和方法	26
2.2 阻尼产生及耗能机理	29
2.2.1 流体阻尼产生及耗能机理	29
2.2.2 其他阻尼简介	32
2.2.3 阻尼耗能的数学分析	33
2.3 线性隔振设计基础	34
2.3.1 电子设备受激励时线性阻尼振动系统	34
2.3.2 基础激励时线性阻尼振动系统	39
2.4 非线性抗振动冲击理论与技术基础	43

2.4.1	非线性耦合系统(器件)振动激励时响应求解研究	43
2.4.2	非线性耦合器件(系统)缓冲冲击特性	58
2.5	非线性(多介质)耦合系统(器件)抗振动冲击非线性性态研究	63
2.6	非线性耦合型减振抗冲击器件工程应用简介	70
2.6.1	几种典型非线性耦合抗振动冲击防护器件的物理设计及力学模型	70
2.6.2	非线性(多介质)耦合型减振抗冲击器件性能及样机简介	73
2.7	非线性(多介质)耦合型双级减振系统特性设计探讨	75
	复习与思考题	79
第3章	热特性及其加固技术	82
3.1	热设计基础	82
3.1.1	导热	82
3.1.2	对流换热	82
3.1.3	辐射换热	84
3.1.4	传热过程	85
3.2	电子信息设备及系统的热环境	85
3.3	冷却方法的选择与设计	87
3.3.1	电子设备的自然冷却	88
3.3.2	强迫通风冷却	93
3.3.3	冷板的设计	98
3.3.4	其他冷却方法	101
3.4	外部设备的热测试技术	103
3.4.1	温度测试	103
3.4.2	压力测量	105
3.4.3	流量(流速)测试	106
3.4.4	打印机及软盘驱动器的温度测试	107
	复习与思考题	109
第4章	电磁兼容性及加固设计	111
4.1	电磁兼容性概述	111
4.1.1	电磁兼容性定义	111
4.1.2	电磁兼容性研究的基本内容	111
4.1.3	电磁干扰三要素	112
4.1.4	电磁干扰的传播	115
4.1.5	电子设备电磁兼容性设计的基本要求	116
4.2	屏蔽加固	118
4.2.1	屏蔽效能	118
4.2.2	电屏蔽原理与结构	118
4.2.3	磁场干扰及其影响	123
4.2.4	低频磁屏蔽的原理与结构	124
4.2.5	减小磁场干扰的其他措施	127
4.2.6	电磁屏蔽原理	130

4.2.7	薄膜屏蔽	133
4.2.8	导电布、导电纤维与导电纸	135
4.2.9	双层屏蔽效能的计算	135
4.2.10	非实心型屏蔽	136
4.2.11	导电衬垫的特性及其应用	139
4.2.12	通风孔洞的屏蔽	140
4.2.13	实际屏蔽体的屏蔽效能及期望值	147
4.2.14	电磁屏蔽设计程序	149
4.3	电磁兼容性测试	150
4.3.1	测试目的	150
4.3.2	测试仪器与设施	150
4.3.3	屏蔽效能测试原理及电源变压器漏磁测试	158
4.3.4	屏蔽效能的测试	160
4.3.5	电子及电气设备电磁发射的测试	163
4.3.6	电子及电气设备电磁敏感度测量	166
4.3.7	静电放电试验	171
4.3.8	电磁发射和敏感度的自动测试简介	173
	复习与思考题	174
第5章	电子封装工程	175
5.1	电子封装工程概述	175
5.1.1	定义	175
5.1.2	范围	177
5.1.3	功能	180
5.1.4	分类	181
5.1.5	技术课题	193
5.1.6	国内外电子封装发展现状	200
5.1.7	工程问题	202
5.1.8	电子封装工程的发展趋势	204
5.1.9	应该高度重视电子封装产业	206
5.2	封装技术	207
5.2.1	封装的必要性	207
5.2.2	各种封装技术及其特征	208
5.2.3	封装模块的可靠性	231
5.2.4	封装技术要素及封装材料物性	233
5.3	超高密度封装技术	235
5.3.1	移动电话(手机)中采用的封装技术	235
5.3.2	数码摄像照相机中的封装技术	237
5.3.3	笔记本电脑中的封装技术	238
5.3.4	便携电子设备中的封装技术	241
5.3.5	超级计算机中的封装技术	241

5.3.6	高密度封装技术:ASIC+RA+MCM	248
5.4	极高密度的三维电子封装技术	250
第6章	微电子封装的评价、失效与加固设计	267
6.1	电子封装的分析、评价及设计	267
6.1.1	膜检测及评价技术	267
6.2	信号传输特性的分析技术	272
6.2.1	布线电气特性分析基础	272
6.2.2	各种实装形态及电气信号传输特性的比较	274
6.2.3	交叉噪声(串扰)分析	279
6.2.4	B ² it 多层板与 IVH 多层板电气特性的比较	283
6.3	热分析及散热设计技术	287
6.3.1	热分析及散热设计基础	287
6.3.2	搭载奔腾芯片的 MCM 定常热分析实例	289
6.3.3	MCM 非定常热分析实例	290
6.3.4	B ² it 多层板散热特性的分析实例	296
6.4	结构分析技术	297
6.4.1	结构分析基础及 BGA/CSP/FC 封装中的结构分析实例	297
6.4.2	带蓝宝石窗的 MCM 结构分析实例	302
6.5	电子元器件电极系统及封装失效机理	305
6.5.1	金属膜和金属化层的失效机理	305
6.5.2	金属的电迁移	310
6.5.3	引线键合的失效机理	316
6.5.4	电子元器件电极系统焊(压)接的失效	319
6.5.5	芯片贴装失效机理	321
6.5.6	电子元器件封装的可靠性	324
6.5.7	电极系统和封装的腐蚀	329
6.5.8	电子元器件的热应力失效	333
6.5.9	提高电极系统和封装可靠性的基本保证	335
	复习与思考题	341
第7章	微电子设备与元件环境测试技术	343
7.1	机械、环境试验概述	343
7.2	机械、环境试验分类	343
7.2.1	振动试验	344
7.2.2	冲击试验	348
7.2.3	离心加速度试验	349
7.2.4	温度试验	350
7.2.5	与外引线有关的试验	355
7.2.6	密封试验	359
7.2.7	湿热试验	365
7.2.8	粒子碰撞噪声检测多余物试验	368

7.2.9	老炼试验	369
7.2.10	盐雾试验	373
7.2.11	航天用电子元器件超期复验试验	374
7.2.12	内部水汽含量试验	380
7.2.13	辐射试验	382
7.2.14	键合强度试验	384
7.2.15	芯片附着强度试验	384
7.2.16	低气压试验(超高真空试验)	385
7.2.17	混响试验	387
7.2.18	无重力(微重力)试验	387
7.3	电子元器件通用基本可靠性试验的常用设备	388
	复习与思考题	395
附录		396
	附录 I	396
	附录 II	396
	附录 III	397
参考文献		398

第 1 章 绪 论

21 世纪是信息时代,信息是由语言、文字、符号、图形、图像、声音或情态等集合而成的,信息的作用是对事物的状态、存在的方式和相互间的联系进行表述。物质提供了信息,信息控制物质和能量的运行。物质、能量和信息是构成客观世界的三大要素。信息既非物质也非能量,却是构成世界的要素,这一点直到 20 世纪初才被人们认识到。随着人类社会的飞速发展,信息量急剧的增长,信息对社会发展的倍增效应日益显现。正确地利用信息可以极大地提高劳动生产率,因而人们坚信:信息是资源,信息是财富。特别是冷战结束后,世界发达国家争夺的重心已转移至信息领域。有了因特网的蓬勃发展,人们才有了在信息高速公路上驰骋的基础和条件。很多国家,特别是发达国家,当前都在制定信息高速公路的发展计划。在计划中,特别具体地规定了 21 世纪上半叶的目标。越来越多的人认识到 21 世纪将全面进入信息时代,对信息资源的争夺也将更加激烈。我国是发展中的大国,有雄厚的物质基础和人力资源,因而必须大力发展信息产业。当前信息的发展以多媒体化和数字化为主要特征。信息的多媒体化使人们需要处理的不仅是数据、文字,还有声音和图像等。在计算机中,信息的长短以字节(Byte)表示。一页 A4 文件约为 2KB(千字节);一张 A4 黑白照片约为 40KB;一张 A4 彩色照片约为 5MB;放 1min 的 VHS 质量的全活动图像(Full Motion Video, FMV)约为 10MB;放 1min 的广播级的 FMV 就约为 40MB,由此可见其信息量之巨大。我国近几年来因特网(Internet)用户和计算机产量迅猛增长,据不完全统计,到 2004 年 12 月我国上网人数已达 17950 万,计算机产量已达 20000 万台。图 1-1 显示了全球信息量的逐年增长情况,可以预测今后全球信息量的增长具有相同的趋向,而且速度还会更快。图 1-1 中的信息量是以拍字节(PB)计算,2000 年全球数字数据容量为 3×10^3 PB。

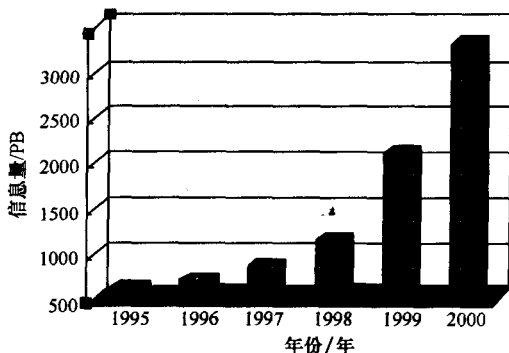


图 1-1 全球信息量增长趋势

由此可见,21 世纪人们要存储达太字节(TB)的超大容量的信息,要处理、传输太位每秒(Tb/s)的超高速信息流,以及频率响应达太赫(THz)的超高频信息。因此,人类的信息时代是进入了太位信息时代,有人称进入了 3T 时代。

1.1 信息技术的发展趋势

信息随着人类社会的出现而存在。电的发现和随后电报、电话的相继应用,使信息作为一种技术得以发展。从信息的获取、传输、存储、处理和显示等几个主要技术;在 20 世纪中叶第

二次世界大战期间获得了巨大发展。

从 1946 年世界上第一台(ENIAC 型)电子数字计算机诞生以来,计算机获得了惊人的发展,已从一种单纯的快速计算工具发展成为能高速处理数字、符号、文字、语音、图像乃至人工智能知识等的强大手段,其应用领域已全方位地覆盖整个社会。计算机科学技术特别是计算机辅助设计、计算机辅助制造等的广泛应用,已经成为人类社会巨大的生产力,相当于直接产生了几万亿个劳动力。计算机与通信的结合更深刻地影响与改善了人类的生产与生活方式,极大地促进了人类文明的进步。计算机、通信、显示和网络的有机结合,将使信息技术发展到新的高度。20 世纪以来,信息技术是依靠电子学和微电子学技术发展的,如通信是从长波到微波,存储是从磁心到半导体集成,运算使用的器件从电子管发展到大规模集成电路等。目前,谈到信息技术都称为电子信息技术。从技术发展阶段而言,人类正处于电子信息时代,其特征是信息的载体是电子。电子技术,特别是微电子学技术,仍然是当前信息技术的主要支撑技术。当代社会和经济发展中,信息的需求量与日俱增。随着大容量和高速度信息的发展,已显示出电子学和微电子学具有局限性。由于光子的速度比电子的速度快得多,光的频率比无线电(如微波)的频率高得多,所以为提高传输速度和载波密度,信息的载体必然由电子发展到光子,光子会使信息技术的发展产生突破。目前,信息的探测、传输、存储、显示、运算和处理已由光子和电子共同参与来完成,产生的光电子学技术已应用在信息领域。

光通信、光存储和光电显示技术的兴起和它们近 20 年来的飞快发展,已使人们认识到光电子技术的重要性和它广阔的发展前景。今后将更注意光子的作用,继光电子学后,光子学技术正在崛起,如美国把电子和光子材料、微电子学和光电子学列为国家关键技术,认为“光子学在国家安全与经济竞争方面有着深远

的意义和潜力”,“通信及计算机研究与发展的未来属于光子学领域”。从电子学到光电子学和光子学的发展是跨世纪的发展(见图 1-2)。

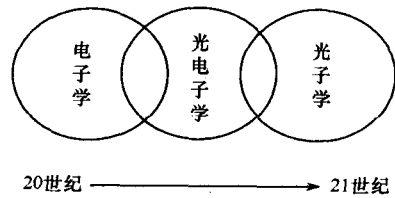


图 1-2 从电子学到光子学的发展

1.2 微电子设备与电子元器件的发展

1.2.1 电子元器件的发展

以大规模集成电路为基础的电子计算机技术仍是信息处理的主要技术,由于对电子计算机处理信息速度和容量的要求越来越高,因此对计算机处理器(CPU)的速度和内存的要求也愈来愈高,随之对芯片集成度的要求也愈来愈高。表 1-1 列举出随机动态存储器(DRAM)的发展情况。从表中看到,光刻线宽愈来愈小,已趋向纳米级。以硅材料为基础的集成电路,在过去 40 年里得到迅速发展,它占集成电路的 90% 以上。可以预见,在 21 世纪,它的核心地位仍不会动摇。自 1958 年问世以来,硅集成电路器件集成度提高了百万倍,单位价格下降为原来的百万分之一。这主要是靠光刻线宽缩小和成品率的提高而取得的,而单晶硅尺寸的增大和质量的提高,设计技术、制造工艺技术、测量与监控技术及各技术相应的软件和硬件的发展也起到了重要的作用。

目前大规模硅集成电路以 MOS 为主流技术。21 世纪已迎来深亚微米($<0.1\mu\text{m}$)硅微电

表 1-1 半导体动态随机存储器

时间/年	1998	1999	2000	2005	2010
容量/GB	0.064~0.128	0.256	1~4	10~20	256
光刻线宽/ μm	0.3~0.2	0.18	0.15	0.09	0.010
硅单晶直径/mm	200	300	350	400	450
缺陷尺寸/ μm	<0.12	<0.05	<0.03	<0.01	—
表面粗糙度/nm	<1	<0.5	<0.3	<0.2	—
含氧量/原子分数	$\leq 10^{10}$	$\leq 10^9$	$\leq 10^8$	$\leq 10^7$	—

子技术,器件最小沟道长度将缩小到 30nm~50nm,栅氧化层厚度为 2nm。目前,有代表性的研究为:2000 年 Intel 公司和 AMD 公司制作出栅长为 30nm 和 40nm 的 CMOS 电路;2001 年—2002 年 Intel 公司和 AMD 公司制作出栅长为 15nm 的 CMOS 电路。

1998 年出现了绝缘层上硅材料 SiO_2 (Silicon on Insulator),这种材料推动了微电子技术进一步发展。与常规硅材料及其器件相比较,由于避免了器件与绝缘层衬底间的寄生效应, SiO_2 具有许多优点,例如,高开关速度、高密度、抗辐射、无门锁效应等。相对于 CMOS 技术, SiO_2 技术使芯片的性能提高 35%。因此,世界各国都在争相发展有竞争力的 SiO_2 技术。

光信息处理和计算早已被提出,因为电子计算机电路中的电阻和电容使电信号的传递速度受到 RC 驰豫时间的限制,以及产生“时钟歪斜”、互相拥挤、电子信号容易自身干扰等问题。当计算机浮点运算速度高于百亿次以上时,就需考虑用光信息处理。光信息处理可充分发挥并行处理的优点,能高速处理信号。目前研制出的高密度对称反射式自电光效应(SR-SEED)无腔面的光双稳态开关集成面阵,可在光功耗极低($<10^{-15}\text{J}/\mu\text{m}^2$)的情况下对光信息进行多路和二维处理。它为光逻辑光源阵列、光学双稳态门阵列、全息衍射光栅和检测器阵列,并行通道可达 10^6 数量级。

信息技术产品中的元器件将更多地采用薄膜材料或多层膜结构制成。具有规模生产的信息元器件产业大致上可分为以集成电路为基础的微电子技术产业和以光通信、光存储、光电显示为基础的光电子技术产业。近年来,迅速发展的网络成为企业和个人获得各种信息的主要渠道,这就要求存储介质的容量更大。从 1997 年—2001 年全球数据存储市场将以 35% 速度增长。我国国内随着个人计算机(PC)和网络的普及,存储介质的需求不断上升,但是具有自主知识产权的产品基本上还是空白。国际厂商瞄准了中国这个巨大市场,唤起了中国人对信息存储的重视。不论家用信息显示(如电视机),还是专业用信息显示(计算机显示器),在 21 世纪初期 CRT 仍然是主要产品。

光电子产业以光显示、光存储、光通信和输入/输出设备(或称硬拷贝)为支柱产业。我国光电子技术产业虽起步较晚,但近年来发展还比较快,1993 年的总销售只有 3 亿~4 亿元人民币,1995 年达 30 亿元人民币。随着家庭消费品的升温,如 CD、VCD 光盘及光盘机、音响视频设备等用量的剧增,1998 年达 500 亿元人民币(不包括电视机),2001 年达千亿元人民币。在我国,数字化信息产业的发展,除依靠国家信息基础设施建设外,民用消费市场也是很重要的一部分。预计在数字化信息产品中 PC 及外部设备、个人数字通信设备、数字化电视、数字化音视

设备将占优势。到 21 世纪初将均有千亿元人民币以上的市场,这也是目前电子元器件市场的发展方向。

1.2.2 一代器件,一代整机,一代装备

1. 历史回顾

20 世纪初半导体就得到应用,最早的收音机检波器采用的是由金属丝接触到方铅块或硅块上制成的点接触二极管。真空二极管(1902 年, Ambrose Flemming)和真空三极管(1907 年, Lee de Forest)的发明,以及它们具有的性能稳定、均匀和可控性之特点,使无线电收音机得到很大的发展。早在 20 世纪 20 年代中期,在电子领域中就使用了薄膜元件,如由碳化氢气体热分解制成的炭膜电阻器、铂化合物喷涂在玻璃棒上加热分解形成的铂金属膜电阻器;纸或聚合物介质淀积铝或锌膜制备的电容器等。到了 20 世纪 30 年代,半导体氧化亚铜和硒用做整流器。

第二次世界大战期间,由于对军事通信、导航、侦察和火力控制的迫切需求,使电子设备复杂而庞大,如在 B-29 轰炸机上约有一千多个真空管。武器装备的发展受到电子系统的体积、质量、复杂度和可靠性的严重制约。第二次世界大战期间和战后,美国国家标准局和中央实验室(Globe-Union Inc.)采用微型电子管和陶瓷衬底上有金属互连线的片状电容器构成固体元件,开创了混合电路的先例。后来又用网印淀积法进行批量生产,并取得成功,这就是厚膜技术的开始。

1946 年制造出具有 18000 个电子管、耗电 50kW、质量 30000kg、占地 300m²的人类第一台电子数字计算机,在如上的电子元器件的背景下诞生了。1946 年—1957 年是第一代电子管计算机的时代,虽然当时的计算机运算速度慢、存储量小、可靠性差、体积庞大、使用不便,而且能耗又高,但毕竟开创了计算机事业,打下了计算机技术的基础。

2. 晶体管时代

1947 年 11 月底美国 AT&T 公司贝尔实验室(Bell LAB)的巴丁(Bardeen)、布拉顿(Brat-tain)和肖克莱(Shockley)发明了点接触晶体管,之后又发明了结型双极晶体管和结型场效应晶体管。在短短的十几年间,晶体管电子学从幼年步入成熟,一些重大的发展相继出现:单晶硅(1952 年)、扩散晶体管(1955 年)、平面型晶体管(1959 年)、MOS 晶体管(1960 年)、肖特基势垒二极管(SBD 1960 年)。而 20 世纪 50 年代印刷电路的研制成功,使互联问题取得进展。在 1958 年—1964 年,是第二代晶体管计算机时代。第二代计算机比第一代计算机在速度、容量和可靠性等主要性能指标上都提高了一个数量级。

3. 中、小规模集成电路时代

1958 年,德克萨斯仪器公司(Texas Instruments)的杰克·基尔比(Jack Kilbey)采用了分布电容网络和一个触发器做出了第一块集成电路移相振荡器。1959 年,仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor)的诺伊斯(Robert Noyce)申请了硅集成电路专利,他是反偏 PN 结做成隔离区,在氧化硅表面用金属薄膜实现电路中元件间的电连接。新一代电子器件的诞生以后,其成长却是缓慢的。人们认为用一种硅材料制成的晶体管、电阻器和电容器性能不会最佳;元件越多,集成电路成品率越低;设计工作费用昂贵。在集成电路技术取得稳步进展,而且随着一种代替对新设备所需的上千种器件进行个别研制的系统设计方法提出,1961 年就开始进入中、小规模集成电路时代。这期间出现了晶体管—晶体管逻辑(TTL, 1962 年)、人幻 S 集成电路(1962 年)、CMOS 集成电路(1963 年)、线性集成电路(1964 年)、MOS 存储器(1968

年)、电荷耦合器件(CCD, 1969年)、MOS 计算器件(1970年)等多种新型集成电路。1965年—1971年是第三代计算机时代。第三代计算机就是中、小规模集成电路计算机。第三代计算机比第二代计算机在速度、处理量和可靠性等主要性能指标上又提高了一个数量级。当然软件也有了大的发展。1970年微处理机由 Intel 公司首先开发并推向市场。

4. 大规模集成电路时代

大规模集成电路(Large Scale Integration Circuit, LSIC)每个芯片上集成($2^{11} \sim 2^{16}$)个元器件,以 1KB DRAM(1970年)为进入 LSIC 的标志。超大规模集成电路(Very Large Scale Integration Circuit, VLSIC)每个芯片上集成($2^{16} \sim 2^{21}$)个元器件,以 64KB DRAM(1978年)为进入 VLSIC 的标志。特大规模集成电路(Ultra Large Scale Integration Circuit, ULSIC)每个芯片上集成($2^{21} \sim 2^{26}$)个元器件,以 4MB DRAM(1986年)为进入 ULSI 的标志。巨大规模集成电路(Gigantic Scale Integration Circuit, GSIC)每个芯片上集成($2^{26} \sim 2^{31}$)个元器件,以 256MB DRAM(1993年)为进入 GSI 的标志。

上述的每次跨越不仅是数量的变化,而是在设计方法、模拟方法、布局布线方法、处理复杂系统的方法、制造技术和测试方法上有创新,是信息技术的一次飞跃。从 1972 年随着 LSIC 的出现而进入到第四代计算机时代。计算机也在集成电路的支持下不断发展,逐步进入网络时代。计算机本身主要向巨型化和微型化两个方向发展。就微型机而言,Intel 公司的 286, 386, 486, …… , 到现在的奔 IV, 都充分说明一代器件,一代整机的事实。

5. 一代器件,一代装备

武器装备不像计算机那样不断地展示在广大民众之中,它的威力和巨大的进步集中在战场上显现。从近代战争的历史看,武器装备的技术水平和质量水平在一定程度上决定了战争的态式和战争的进程。随着武器装备的提高,新技术含量的增加,信息化、电子化程度的提高,战争胜败的决定因素——人的作用现在更多的体现在武器装备上。地毯式的、成千百吨 TNT 轰炸,被精确制导攻击所取代。从被喻为“硅片打败钢铁”的海湾战争及 2003 年的美伊战争,更可以看出并验证了美国国防部关键技术报告中的观点:“现今,美国军事系统超过可能敌人的技术优势,电子元器件的贡献最大,可以说超过了所有其他技术。”

电子元器件是武器装备的重要基础和战略资源。由于电子元器件对武器装备的进步起着主要的作用,因而武器装备的性能、质量和可靠性就与电子元器件紧密相连。

6. 微电子设备与电子元器件的定义

微电子设备与电子元器件涵盖哪些方面,包括什么内容,在参考文献[2]中有系统的介绍,这里仅就电子元器件的定义加以引用和说明。图 1-3 为微电子设备与电子元器件的种类,随着信息技术的发展,微电子设备与电子元器件的品种也逐渐涵盖了光、机、电各个方面。所以电子元器件的定义和内涵也发生变化。

在美国军用标准 MIL-STD-1547A《航天器与运载器用电子元器件、材料和工艺》中,将电子元器件(Electronic part)定义为:“在本标准中‘电子’使用是广义的,包括电气、电磁、机电和光电元器件。这些元器件与电子组件如计算机、电源、导航仪器和航天器有关。电子元器件也包括连接器。”在欧洲 ESA 标准 ESAPSS-01-60(1988年11月)《ESA 空间系统的元器件选择、采购和控制》中将元器件(component)定义为:“完成某一电子、电气或机电功能,并由一个或几个部分构成且一般不会破坏的某个装置。术语元器件(component)可与单词元器件(part)互换。”国家军用标准 GJB4027-2000《军用电子元器件破坏性物理分析方法》中将元器件(component 或 part)定义为:“在电子线路或电子设备中执行电气、电子、电磁、机电和光电功能的

基本单元。该基本单元可由一个或多个零件组成,通常不破坏是指不能将其分解的。”这里元器件指的是电子元器件。我国将上述元器件一直统称为电子元器件。从 20 世纪 80 年代,美国军用标准和欧洲 ESA 标准将这些元器件称为:电气、电子和机电(Electrical electronic electromechanical)元器件(EEE Part,简称 3E 元器件)。

1.2.3 微电子技术新领域

微电子技术在 20 世纪获得了辉煌的成就,随着信息高速公路的实现,信息技术革命在 21 世纪已掀起新高潮。由于集成电路对各个产业的强烈渗透并奠定了坚实基础,目前,微电子技术已出现一些新的领域,最有挑战性的新技术包括微电子机械系统(Mico-electronic Machinery System, MEMS)、纳米电子技术、超导微电子技术和有机微电子技术等。

1. 微电子机械系统

MEMS 技术的目标是把信息获取、处理和执行一体化地集成在一起,使其成为真正的系统。因此,它对信息技术革命的意义便不言而喻了。MEMS 不仅为传统的机械尺寸领域打开了新的大门,也真正实现了机电一体化。因此,它被认为是微电子技术的又一次革命,对 21 世纪的技术、生产方式、人类生活都有深远影响。

1) MEMS 构造技术

最初, MEMS 的构造是基于硅微电子加工发展起来的,称为硅基 MEMS。后来,又发展了一系列有别于硅微电子加工技术的各种构造工艺,统称为非硅基 MEMS。硅具有较好的光电机械性能,例如较好的材料强度和硬度、较好的热导和热膨胀性能。硅对许多效应敏感,适合制造各种传感器。硅的这种特性使得 MEMS 和微电子加工技术兼容。因此,硅基 MEMS 构造技术是 MEMS 构造技术的主流。当前,硅基 MEMS 构造技术可分为表面微机械加工技术和体微机械加工技术。

表面微机械加工是把 MEMS 的机械部分,包括运动元件或传感器等,制作沉积在硅晶体的表面薄膜上。表面薄膜可以是多晶硅、二氧化硅、氮化硅等,然后使其局部与硅体部分分离,呈现可运动的机械。在微机械元件释放之前,可以制造有关电子器件部分。这样,最后的器件

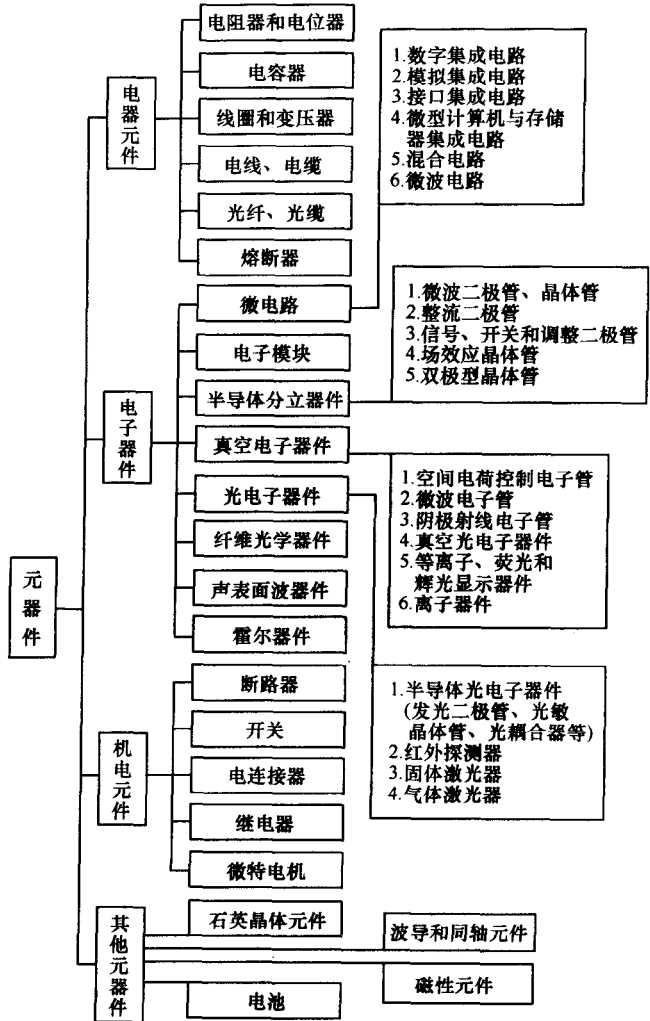


图 1-3 微电子设备与电子元器件的种类

便是微电子机械集成在一个芯片上。

体微机械加工有很多方法,其中最为常用的是利用硅刻蚀的各向异性。例如,各向异性刻蚀溶液对硅[100]、硅[111]面的刻蚀速度有极大差异。利用这一点,就可以在硅平面上刻蚀出梯形或锥形等立体结构,结构大小和形状,可以通过光刻技术加以控制。因为这里的机械运动元件制作在硅内,而又称为体硅微机械加工。

在非硅基 MEMS 的加工技术中,LIGA(Lithographic Galvanofornung and Abformung)技术是最重要的加工技术之一。它利用同步辐射的软 X 光为光源,对厚度达 1mm 的光刻胶图形进行曝光,接着刻蚀,制出高深宽比的立体微型结构;然后利用微电镀技术制出金属基膜;再用微塑铸出塑膜;用此塑膜,即可复制出相应的金属材料或其他材料结构。但它与硅微电子制造技术不易兼容,电子电路和机械元件集成在一起有较大难度。

MEMS 的装配和封装技术也是非常重要的。对于硅基 MEMS 常用硅硅直接键合、硅硼玻璃静电键合和胶黏等技术。对于非硅基 MEMS,微小零件的装配会带来很大难度,所以用这种技术制造的 MEMS,尺寸会较大。总的来说,MEMS 装配和封装技术比微电子的装配和封装要复杂和困难得多。

2) MEMS 初步应用

MEMS 的研制已取得很多成果。在微传感器方面,利用在压力腔体硅表面热变化而相应的电容、电阻变化采集信号,制备压力传感器;利用光电、热特性等制备温度传感器、光强传感器、生物传感器、化学传感器等技术已实用化。这些元器件因与集成电路结合在一起形成组件,因此又称灵巧传感器。在微执行器方面有微泵、微电机、微麦克风等技术。用微阀、微管道和微泵,已组成微化学系统和 DNA 反应室。此外,还有微型机动车、在磁场中可以飞行的小蝴蝶都已在实验室研究成功。但是,真正形成产业或将投入规模生产的 MEMS,仅有微加速度计、微陀螺和数字转镜器阵列(DMD)。用于汽车防撞的微加工速度计在两年前就已商品化。用类似加速度原理或用几个加速度计组合而形成的微陀螺,不久也将推向市场。数字转镜器阵列有上下两层结构,上层由 768×576 个铝镜组成阵列,每个镜可在 $\pm 10^\circ$ 内转动,下层为与上层对应的 CMOS 静态存储单元。铝镜偏转时,可将入射的激光束反射到屏幕上而加以显示。存储器的读时间小于 $1\mu\text{s}$,转镜偏转时间小于 $10\mu\text{s}$,所以屏幕上可以显示动态彩色图像,显然这是大屏幕彩色 TV 投影显示的优质器件。TI 公司的这种器件不久将推入市场。MEMS 的应用领域十分宽广,在信息技术、航空航天、科学仪器和医疗方面将起到分别采用机械和电子技术所不能实现的作用。

3) MEMS 展望

从 IC 到 MEMS,完全是市场推动牵引的必然结果。但迄今 MEMS 拥有的市场,仍只是一些传感器之类的初级产品,表明这一门学科还只处于技术发展的前期,远远没有成熟。MEMS 是一门独立学科,涉及机械物理、化学、电子等领域,且更为广泛。按结构尺寸而言,MEMS 虽未进入物质微观的范畴,但过去所讨论的宏观结构又很少进入 MEMS 的微小范畴。过去的常数、定律,在 MEMS 中是否仍然有效,均需要重新证实。例如:宏观物体的重力正比于 L^3 (L 为宏观物体的尺寸),而两个平行板间的静电与 L^0 成正比,但在微电子机械系统中,重力往往可以被忽略,而静电力与表面状态、界面状态却变得十分重要。又如已证实的,两个具有微小尺寸的物体相互接触,其摩擦系数(宏观力学定义)与接触面积无关的常数不再成立。类似这些问题,不研究清楚,要优化设计 MEMS 就会遇到很多困难。要促使 MEMS 早日成为一门成熟的技术,设计和测试及相应的开发工具必须加速进行。设计不同的 MEMS,就应有一