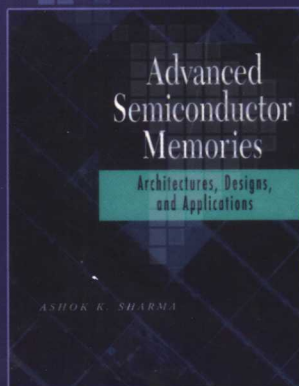


国外电子与通信教材系列

先进半导体存储器

—— 结构、设计与应用

Advanced Semiconductor Memories
Architectures, Designs, and Applications



[美] Ashok K. Sharma 著

曾莹 伍冬 等译
孙磊 任涛

朱钧 林发永 审校



WILEY



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

先进半导体存储器

——结构、设计与应用

Advanced Semiconductor Memories
Architectures, Designs, and Applications

[美] Ashok K. Sharma 著

曾莹 伍冬 孙磊 任涛 等译
朱钧 林发永 审校

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书深入介绍了先进半导体存储器的技术与发展,论述全面,涵盖了近年来的新技术成果。书中讲解了静态随机存取存储器技术、高性能的动态随机存取存储器、专用DRAM的结构和设计,先进的不挥发存储器的设计和技术、嵌入式存储器的设计,以及未来存储器的发展方向等。DRAM作为新一代半导体产品制造技术的推动者,除用于计算机领域之外,还用于汽车、航空、航天、电信以及无线工业等领域。近年来,新一代大容量、高性能的存储器结构得到了进一步发展,包括嵌入式存储器和不挥发快闪存储器在内的大容量存储设备得到了越来越广泛的应用。

本书适合作为大学微电子专业高年级本科生及研究生的教材,也可作为从事半导体制造与研究的工作人员参考用书。

Advanced Semiconductor Memories: Architectures, Designs, and Applications.

ISBN 0-471-20813-2

Copyright © 2003, The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons, Inc.

Simplified Chinese translation edition Copyright © 2005 by John Wiley & Sons, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

本书中文简体字翻译版由 John Wiley & Sons 授予电子工业出版社。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2002-6034

图书在版编目 (CIP) 数据

先进半导体存储器——结构、设计与应用 / (美) 沙玛 (Sharma, A. K.) 著; 曾莹等译.

北京: 电子工业出版社, 2005.1

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: Advanced Semiconductor Memories: Architectures, Designs, and Applications

ISBN 7-5053-9948-9

I. 先... II. ①沙... ②曾... III. 半导体存储器-教材 IV. TP333.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 126995 号

责任编辑: 陶淑毅

印 刷: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 29 字数: 742 千字

印 次: 2005 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 43.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入21世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入WTO后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在2000年至2001年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了40余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主 任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委 员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘 彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

译者序

以金属-氧化物-半导体(MOS)技术为基础,从20世纪60年代开始生产的半导体存储器,无论是在结构、性能方面,还是在存储密度方面,每一年都取得了突飞猛进的发展,已经成为最重要的集成电路产品类型之一。半导体存储器技术是数字系统和系统集成芯片的主要组成部分,而我国在这一方面的起步较晚,还迫切需要了解和借鉴国际上的最新技术。《先进半导体存储器——结构、设计与应用》一书则综合介绍了几乎所有近年来发展的半导体存储器技术,分析了它们的工作机理与结构、优点与存在的问题、实际应用,以及各国公司的典型产品和研发情况。在电子工业出版社的大力支持下,经过清华大学微电子学研究所多位教师的努力,这本书的中译本现在终于可以和大家见面了。

本书是由Ashok K.Sharma博士所著,原版由美国IEEE(电气与电子工程师学会)出版社出版。作者现在是美国NASA Goddard空间飞行中心可靠性工程部的经理,在半导体技术领域有丰富的经验。他也是1997年由IEEE出版社出版的“Semiconductor Memories: Technology, Test and Reliability”一书的作者。Sharma博士写作本书的目的不仅是对前一本书的内容进行补充,对人们感兴趣的另外三个方面(结构、设计与应用)也进行了讨论和评述。本书详细讲解和评价了SRAM、高性能DRAM、不挥发存储器技术、嵌入式存储器的设计与应用等重要领域当前的进展情况,以及未来半导体存储器的存储密度从千兆位向兆兆位发展的可能方向。所以,本书可以作为大学本科高年级学生和研究生教材,而且对于半导体制造与电子工业领域的从业人员,包括计算机、通信、汽车等领域的工程师、系统级设计师和经理们,也是一本很有价值的参考书。

全书共分7章,第1章综述了各种半导体存储器技术的发展现状和未来存储器技术的可能发展方向。第2章讨论了SRAM的基本结构和各种先进的SRAM技术。第3章详细评论了现代高性能DRAM的工艺技术进步、等比例缩小问题和未来的发展趋向。第4章讨论了专用DRAM存储器的结构和设计问题。第5章介绍了不挥发存储器的发展情况和各种不挥发存储器(包括EPROM/EEPROM、快闪存储器、铁电存储器等)的结构、设计、工艺技术和可靠性问题。第6章讨论了嵌入式存储器的设计 and 应用问题。第7章对未来半导体存储器从千兆位密度向兆兆位密度的发展进行了展望,介绍了目前正在研究和发展且将来可能有希望取代现有存储器的各类新型挥发和不挥发存储器,如磁阻存储器、单电子存储器、相变存储器等。

本书由清华大学多位老师和博士研究生翻译,其中前言、第1章和第7章由朱钧翻译,第2章由伍冬翻译,第3章由林发永翻译,第4章由任涛翻译,第5章由曾莹翻译,第6章由孙磊翻译。译本对原书中的一些印刷错误进行了订正,并以“译者注”标明。全书由朱钧、林发永、曾莹校订。尽管本书进行了反复校订,但由于译者水平所限,仍难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

前 言

在最近30年半导体存储器的显著发展过程中, DRAM已成为用做计算机主存的最大量生产的易失性存储器(也称为挥发性存储器),因为它具有高密度和每位低价格的优点。从技术上讲, SRAM的密度一般落后于DRAM一代。然而, SRAM具有低功耗和高性能的特点,这使它们成为DRAM的实际替代者。自从1970年引入浮空多晶硅栅为基础的可擦除可编程只读存储器(EPROM)以来,非易失性存储器(NVM,也称为不挥发性存储器)也得到了极大的发展。作为EPROM(或UVEEPROM)的替代品,已经发展了电可擦除PROM(EEPROM),它具有在系统内编程的灵活性,并在EPROM或EEPROM器件技术基础上发展了快闪存储器(Flash),这种存储器的全部存储器阵列单元的存储信息可以被同时擦除。现在,可以购买到8 Mb至512 Mb的快闪存储器,更高密度的快闪存储器则正在开发之中。

现在预计DRAM今后也同样会拥有存储器市场的最大销售额。2000年,它在快闪存储器市场已超过了SRAM,排名第二。DRAM和快闪存储器的市场份额预期至少在2005年前会继续有强劲增长。

空间的辐射环境对地球轨道卫星和行星间飞行的宇宙飞船上的所有电子元件都提出了明确的辐照风险问题。自然空间环境存在的带电粒子,如电子和质子,对半导体存储器造成的离化损伤的累积效应是非常严重的。对更高密度存储器不断增长的需求,产生了标准封装进一步的压缩方法,如混合制造及多模块封装技术,以及将二维平面封装技术扩展到三维封装概念,其中,三维封装中的存储器芯片在焊接互连引线前被垂直安装在基座上。

我早期写的一本书“Semiconductor Memories”中包括了以下所有的重要题目,如随机存取存储器(简称为随机存储器)技术(SRAM和DRAM)和它们的专门应用结构;非易失性技术,如只读存储器(ROM)、可编程只读存储器(PROM)和紫外光可擦除(UVPROM)与电可擦除(EEPROM)两种类型的可擦除PROM;存储器失效模型和试验;存储器可测性设计和失效容限;半导体存储器可靠性;半导体存储器辐照效应;先进存储器技术及高密度存储器封装技术。

本书的目的是补充“Semiconductor Memories”一书中已包括的某些内容,并详细论述以下内容:SRAM现在与将来的发展、高性能DRAM、专用DRAM的设计与结构、非易失性存储器技术、嵌入式存储器的设计与应用,以及将来的从千兆位(Gb)到兆兆位(Tb)存储器的发展方向。

本书详细评述了现代DRAM的技术进步、等比例缩小问题和未来的发展趋向。扩展数据输出(EDO)DRAM比传统的全页模式(FPM)DRAM更具优势,因为它在存储器单页中读出数据时可以有较短的页模式周期时间(或较快的数据率)。单数据率同步DRAM(SDRAM)和同步图像RAM(SGRAM)采用与EDO DRAM一样的基本存储器单元和字线驱动器。然而,它们的性能受到接口要求的限制,因此,引入了双数据率(DDR)SDRAM/SGRAM,它们加入了几个重要特性以增强存储器的结构。本书用几个已有的1 Gb SDRAM单元及结构的例子,

讨论了千兆 DRAM 等比例缩小的主要问题。同时还详细描述了特种存储器的结构与设计,例如,视频 RAM、SGRAM、DDR SGRAM、Rambus 技术、同步连接 DRAM (SLDRAM) 和 3-D RAM 等。

对于 DRAM 在光刻和形成电容器结构方面的技术需求,随着等比例缩小显然已变得更加迫切。一个关键问题是,随着单元尺寸不断缩小,要能应用高介电常数材料使每一单元有足够大的存储电容值。控制总的漏电流以维持合理的信息保持时间,也是很重要的。

一般来讲,快闪存储器可以分为两种主要类型:以 NOR 为基础的快闪存储器针对编程码/数据存储应用,NAND 为基础的快闪存储器适于大容量存储应用。本书论述了 EEPROM/Flash 单元与阵列结构的最新发展情况,并描述了四种主要的 Flash 结构:现在可购买到的代表性存储器 NOR、NAND、DINOR 和 AND。Flash 存储器的等比例缩小较复杂,因为需要相对较高电压的 NVM 结构必须和采用低电压的 CMOS 工艺相结合。

FRAM (或 FeRAM) 是以 RAM 为基础的一种器件,它用铁电 (FE) 效应作为电荷存储机理,即在没有外加电场的情况下,材料存储晶体结构内的电极化的能力是它的工作基础。应用最广泛的 FE 材料是 PZT ($\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$) 和 SBT ($\text{SrBi}_2\text{Ta}_2\text{O}_9$)。本书论述了以 FE 材料为基础的器件技术和设计。目前,FRAM 工艺技术还是落后于其他领先的存储器技术,FRAM 的等比例缩小问题更加复杂,因为铁电材料、缓冲材料及其工艺条件都仍需改进。

当微处理器的性能已从几百兆赫兹增加到一千兆赫兹或更高时,相对较慢的 DRAM 中的空闲等待时间就增加了,这导致了存储器和微处理器之间的性能差距。在先进半导体存储器领域中,成长最快的方向是嵌入式存储器的设计和应用。现在,开发嵌入式存储器的两个主要方式是以逻辑电路工艺为基础制造存储器和以 DRAM 工艺技术为基础制造逻辑电路。采用嵌入式存储器方案的关键优点是封装密度更高和能有效节省空间,而这正是笔记本电脑和手提式通信设备所需要的。嵌入式 Flash 存储器最流行的应用是 PLD、FPGA、DSP 和微控制器。本书评论了各种 Flash 卡技术,例如先进技术安装 (ATA)、小型的 Flash 卡技术、多媒体卡和单片 Flash 盘等。

现在,正在进行大量的探索各种存储器结构的研究,包括用电介质环绕的电荷绝缘、磁荷的存储、化学现象、相变材料,以及用库仑阻挡势垒保持电荷等。这些不同方法的主要目的是把新的存储元件合并入 CMOS 技术平台。

本书讨论了这些正处于研究和开发阶段的易失性和非易失性存储器技术,以及它们在未来从千兆位到兆兆位的等比例缩小过程中的发展方向和潜力。其中的一个例子是磁阻 RAM (MRAM),它是一种非易失磁存储器件,其原理是,一种材料的磁阻将由于磁场的存在而发生改变。谐振隧道二极管 (RTD) 包括一个发射区和一个收集区,以及一个双重隧道势垒结构,其中包含了一个量子阱。隧道二极管和 RTD 两者可揭示量子机理隧道电流的负微分电阻 (NDR) 的特性。对 RTD 的兴趣在于多状态及高密存储器和以隧道为基础的 SRAM (TSRAM) 单元设计及应用。单电子器件的工作原理依靠电子之间的库仑排斥力。预期这些器件即使在非常小的物理尺寸 (原子尺度) 和十分低的功耗下也能工作,使得特大规模的电路集成成为可能。

相变存储器技术利用某些薄膜合金结构相变来存储信息,一般采用周期表上第 VI 族的一个或多个元素,例如锗和锑。这些相变合金称为硫化物材料。相变技术利用热激发的合金结构快速并可逆的变化来存储信息。已经制作出采用硫化物的相变半导体存储器样品。

这些新存储器技术发展的其他一些例子是: (a) 质子非易失性存储器的研究, 这基于观察到氢离子(质子)可以作为硅-氧化硅-硅($\text{Si-SiO}_2\text{-Si}$)器件中的信息基本载体, 产生存储器功能; (b) 一个集成的按内容编址的只读存储器(CAROM)数据存储系统, 它利用数据压缩算法, 可以无需移动部件, 以任意形式的数据包装来获得CD-ROM那样高的密度; (c) 纳米存储器, 如IBM的一个研究组报告的, 正在发展一种称为Millipede的样品, 它可以存储惊人的数据量(如 500 Gb/in^2 , $1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$), 在一个平坦的聚合物表面用原子力显微镜产生微刻痕, 这类似于唱针的工作; (d) 全息数据存储, 它被看成有希望实现随机存取立体存储的技术, 可达到比表面存储高几个数量级的密度。

此外, 许多激励人心的存储器技术发展报告一直在媒体上定期发布。例如, Nantero公司已经宣布它开发出了采用碳纳米管作为有效存储器元件的高密度非易失性随机存取存储器(NRAM), 该公司的目标是把这种工艺与标准CMOS工艺结合在一起。按照该公司的说法, 与相近尺寸的普通RAM相比, NRAM最多可存储其10倍的数据量, 而且速度更快, 消耗功率也更小。另外一家Rolltronics公司已经宣布开发了纳米薄膜存储器, 它将数据存储于分子大小的圆柱体上, 在掉电后仍能维持数据。根据该公司的说法, Rolltronics的NanoMEM技术的工作原理很简单, 数据存储于分子中, 这些分子在1微米厚的塑料薄片上自己组装成圆柱形堆栈。数据用低压光电过程写入, 使得一份电荷陷入塑料分子中。这种构造不需要化学变化, 比Flash简单得多, 使得它适合于卷到卷的制造。此项技术有潜力以接近分子级水平的密度存储数据。例如, 一个PC卡模块可以比现在以Flash为基础的PC卡多存储100倍的数据。从这些存储器研究发展的例子和其他的研究中, 我们很难预测今后5至10年, 在从千兆位到兆兆位等比例缩小的过程中, 哪一个将是市场的胜利者。

现在, 在市场上很少有论述半导体存储器的书, 而且其中所得到的信息也是不全面的, 并且在许多情况下是过时的。

“Semiconductor Memories”一书集中关注的三个领域是: 技术、测试和可靠性。本书则在另外三个领域: 结构、设计和应用方面, 通过提供详细而完整的内容对前者进行了补充。因此, 这两本书的结合将对在半导体制造和电子工业相关领域工作的读者, 包括工程师、系统级设计者, 以及在计算机、通信、汽车、商业卫星和军用航空电子领域的管理者, 大有裨益。

我特别要对美国John Wiley & Sons公司和IEEE出版社的所有编辑和技术审阅人员表示感谢, 感谢他们手稿评审、提供评注和对最后版本进行修改等方面的工作。我还要感谢Goddard Space飞行中心部门主任Darryl Lakins先生对我的鼓励, 感谢许多半导体存储器的制造商, 他们提供了产品说明书并允许再版他们的资料。

目 录

第 1 章 先进半导体存储器引论	1
1.1 半导体存储器综述	1
1.2 先进半导体存储器的发展	5
1.3 将来存储器的发展方向	10
参考文献	12
第 2 章 静态随机存取存储器技术	13
2.1 静态随机存取存储器的基本结构和单元结构	13
2.1.1 SRAM 的性能和时序	14
2.1.2 SRAM 的读写操作	16
2.2 选择 SRAM 时的考虑因素	18
2.3 高性能的 SRAM	22
2.3.1 直接模式的 SRAM	28
2.3.2 零总线转换 SRAM	29
2.3.3 四倍数据率 (QDR) SRAM	32
2.3.4 双数据率 (DDR) SRAM	34
2.3.5 无周转模式的 RAM	35
2.4 先进的 SRAM 结构	39
2.5 低压 SRAM	43
2.6 BiCMOS 工艺的 SRAM	52
2.7 SOI SRAM	56
2.8 特种 SRAM	63
2.8.1 多端口型的 RAM	63
2.8.2 先进先出 (FIFO) 型存储器	70
2.8.3 按内容编址存储器	76
参考文献	83
第 3 章 高性能的动态随机存取存储器	88
3.1 动态随机存取存储器技术和发展趋势	88
3.2 DRAM 时序规范和操作	90
3.2.1 总的时序规范	90
3.2.2 存储器读操作	92
3.2.3 存储器写操作	94
3.2.4 读改写操作	95
3.2.5 DRAM 刷新操作	96

3.3	扩充数据输出动态随机存取存储器(EDO DRAM)	99
3.3.1	EDO DRAM (例子)	99
3.4	增强式动态随机存取存储器 (EDRAM)	100
3.5	同步的动态随机存取存储器 / 图像随机存取存储器结构	103
3.5.1	SDR SDRAM/SGRAM	103
3.5.2	DDR SDRAM/SGRAM 特点	103
3.5.3	256 M 位 DRAM 实例	105
3.6	增强式同步动态随机存取存储器 (ESDRAM)	112
3.7	高速缓存动态随机存取存储器 (CDRAM)	115
3.8	虚拟通道存储动态随机存取存储器 (VCM DRAM)	120
3.9	先进的 DRAM 工艺技术展望	121
3.9.1	存储器电容器单元的改进	124
3.9.2	64 Mb DRAM	131
3.9.3	256 Mb DRAM	136
3.10	千兆位 DRAM 等比例缩小问题和结构	140
3.11	多电平存储的动态随机存取存储器 (MLDRAM)	153
3.12	绝缘体基外延硅动态随机存取存储器 (SOI DRAM)	156
	参考文献	163
第 4 章	专用 DRAM 结构与设计	167
4.1	视频 RAM (VRAM)	169
4.2	同步显存 (SGRAM)	172
4.2.1	64 M 位的 DDR SGRAM	173
4.2.2	256 兆位的 DDR 快速周期 RAM (FCRAM)	178
4.3	Rambus 技术概述	181
4.3.1	直接 RDRAM 技术	186
4.3.2	以直接 Rambus 存储系统为基础的设计	193
4.4	同步链接 DRAM (SLDRAM)	194
4.4.1	SLDRAM 标准	195
4.4.2	SLDRAM 结构和功能总述	200
4.4.3	SLDRAM (举例)	202
4.5	3-D RAM	208
4.5.1	像素 ALU 操作	215
4.6	存储系统设计思路	219
	参考文献	223
第 5 章	先进的不挥发存储器设计与技术	225
5.1	不挥发存储器进展	225
5.1.1	介绍	225
5.1.2	串行 EEPROM	227
5.1.3	快闪存储器的发展	230

5.2	浮栅单元工作原理和操作	236
5.2.1	浮栅单元工作原理	236
5.2.2	电荷输运机制	239
5.3	不挥发存储器单元和阵列设计	247
5.3.1	UV-EPROM (或 EPROM) 单元	247
5.3.2	EEPROM 单元	249
5.3.3	快闪存储器单元	250
5.3.4	快闪存储器单元的基本操作和工艺	260
5.3.5	快闪 EEPROM 技术的发展	262
5.4	快闪存储器体系结构	266
5.4.1	NOR 快闪存储器	267
5.4.2	NAND 快闪存储器	277
5.4.3	DINOR 体系结构的快闪存储器	285
5.4.4	AND 体系结构的快闪存储器	290
5.4.5	特种快闪存储器	291
5.5	多电平不挥发存储器	292
5.5.1	多电平 NOR 快闪存储器	296
5.5.2	多电平 NAND 快闪存储器	302
5.5.3	多电平 AND 快闪存储器	305
5.6	快闪存储器的可靠性问题	306
5.6.1	EPROM/EEPROM 中一般的失效机制	306
5.6.2	快闪存储器的可靠性	309
5.7	铁电存储器	315
5.7.1	技术回顾	315
5.7.2	铁电材料和存储器设计	320
5.7.3	兆位级的 FRAM	323
5.7.4	链式 FRAM (Chain FRAM, CFRAM)	329
5.7.5	金属铁电半导体场效应晶体管	331
5.7.6	FRAM 的可靠性问题	332
	参考文献	333
第 6 章	嵌入式存储器的设计与应用	341
6.1	嵌入式存储器的发展	341
6.2	高速缓冲存储器的设计	347
6.2.1	DSP 中高速缓存体系结构的实现 (举例)	353
6.3	嵌入式 SRAM 和 DRAM 的设计	355
6.3.1	嵌入式 SRAM 宏单元	358
6.3.2	嵌入式 DRAM 宏单元	362
6.4	合并处理器的 DRAM 体系结构	369
6.5	采用嵌入式逻辑体系结构的 DRAM 工艺	373

6.5.1	嵌入 DRAM 核的模块	373
6.5.2	采用嵌入式 DRAM 的多媒体加速器	375
6.5.3	智能 RAM (IRAM)	376
6.5.4	计算 RAM	379
6.6	嵌入式 EEPROM 和 flash 存储器	381
6.7	存储器卡及其多媒体应用	383
6.7.1	存储器卡	383
6.7.2	单片 flash 盘	389
	参考文献	390
第 7 章	未来的存储器方向：兆字节到兆兆字节	393
7.1	将来的存储器发展	393
7.2	磁阻随机存取存储器 (MRAM)	394
7.2.1	MRAM 技术发展和权衡	394
7.2.2	MRAM 单元和结构	397
7.2.3	256 K/1 Mb GMRAM	404
7.2.4	多值 MRAM	407
7.3	谐振隧道二极管为基的存储器	408
7.3.1	谐振隧道二极管理论	408
7.3.2	隧道 SRAM(TSRAM)单元设计	409
7.3.3	RTD 为基的存储器系统 (例子)	413
7.4	单电子存储器	415
7.4.1	单电子器件理论	415
7.4.2	单电子存储器特性和结构	420
7.4.3	单电子器件制造技术	423
7.4.4	纳米晶体存储器器件	424
7.5	相变非易失性存储器	428
7.6	质子非易失性存储器	431
7.7	其他存储器技术的发展 (例子)	434
7.7.1	晶闸管为基的 SRAM (T-RAM)	435
7.7.2	按内容编址只读存储器 (CAROM)	436
7.7.3	纳米存储器	438
7.7.4	固态全息存储器	439
	参考文献	442

第1章 先进半导体存储器引论

1.1 半导体存储器综述

本书的目的是补充在“Semiconductor Memories”中已有的材料。早期的书中包括了如下题目：随机存取存储器（简称为随机存储器）技术（SRAM 和 DRAM）和它们在专门结构中的应用；非易失性（也称为不挥发性）技术，如只读存储器（ROM）、可编程只读存储器（PROM）、紫外线可擦（UV PROM）和电可擦（EEPROM）两种模式的可擦除 PROM；存储器失效模型和测试；存储器可测性和失效容差设计；半导体存储器可靠性；半导体存储器辐照效应；先进存储器技术和高密度存储器封装技术^[1]。这一节提供“Semiconductor Memories”一书涉及的半导体存储器内容的综述。

在最近30年半导体存储器显著发展的进程中，由于DRAM具有高密度和每位低价格的优点，已成为了生产最多的用于计算机主存的易失性存储器（也称为挥发性存储器）。SRAM的密度一般比DRAM要落后一代。然而，SRAM具有的低功耗和高性能的特点，使它们成为了DRAM的实际替代者。现今，大量用于商品的SRAM使用NMOS和CMOS技术制造（或者两种技术的结合，称为混合MOS）。

1995年半导体存储器的销售额占总IC市场的42%，但是，随着1995年的强劲增长，存储器的价格在接着的三年中急剧下降。到1998年存储器的销售额只占总IC市场的21%。在20世纪90年代半导体存储器的销售额平均约为IC总销售额的30%。曾经预测在2005年以前IC的总销售额中存储器的市场份额都将逐渐增加。图1.1显示了半导体存储器在总IC市场中的百分比^[2]。

在高密度和高速应用方面，正在采用双极型和MOS技术的各种结合。除了称为“体硅”技术的MOS和双极型存储器外，硅在绝缘层上（silicon-on-insulator, SOI）的技术也有了发展，可以用来改进抗辐照强度。

SRAM的密度和性能通常通过等比例缩小器件的几何形状来增强。已发展了具有亚微米尺寸的先进的4 Mb到16 Mb SRAM芯片的设计和系统结构，现在可以得到商业芯片。专用存储器设计包括先进先出（FIFO）高速缓冲存储器，其中数据输入和输出是串联进行的。双端口RAM允许两个独立器件同时对同一存储器读和写。这种按内容编址的存储器（CAM）设计用于较大VLSI芯片的嵌入式模块以及特殊系统应用的独立存储器。

DRAM发展中的主要改进是从三晶体管（3T）设计转变为单晶体管（1T）设计，使得可以生产采用3-D沟槽电容器和堆叠电容器的4 Mb到16 Mb密度的芯片。现在64 Mb到1 Gb的DRAM正在生产，几个Gb的芯片也在发展中。在几个Gb的DRAM方面的发展，产生了对特殊应用产品的更大需求，例如伪静态DRAM（PSRAM），它使用动态存储单元，但包含片上全部再刷新逻辑，使得它的功能类似于SRAM。视频DRAM（VDRAM）已经用来作为多通道图像高速缓冲器。其他一些高速DRAM的新结构包括同步DRAM（SDRAM）、高速缓冲存储器（CDRAM）和Rambus DRAM（RDRAM）等。

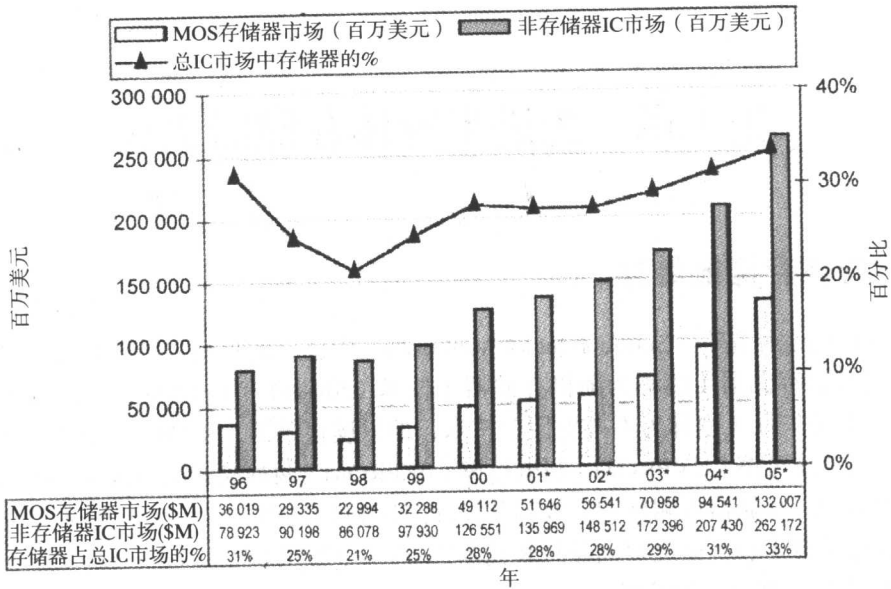


图 1.1 半导体存储器占总 IC 市场的百分比^[2]

非易失性存储器（也称为不挥发性存储器或 NVM）从 1970 年引入浮空多晶硅栅为基础的
可擦除编程只读存储器（EPROM）以来，也有了显著的改进，其中，热电子被注入进浮栅，用
紫外线产生的内部光发射，或用 Fowler-Nordheim 隧道效应去除电子。EPROM（也称为
UVEPROM）要从系统中取下，暴露于紫外光下擦除。EPROM（或 UVEPROM）的替代物是
后开发的电可擦除 PROM（EEPROM），它提供了电路中编程的灵活性。这种技术的几种变体
包括金属-氮化硅-氧化硅-半导体存储器（MNOS）、硅-氧化硅-氮化硅-氧化硅-半导体
（SONOS）、浮栅隧道氧化层（FLOTOX）和纹理化的多晶硅。FLOTOX 是最通用的 EEPROM
技术。一个让人感兴趣的 NVM 结构是非易失性 SRAM，EEPROM 和 SRAM 的结合，其中每
一个 SRAM 具有一个相应的“影子” EEPROM 单元。

快闪存储器建立于 EPROM 和 EEPROM 技术基础上，它的全部存储器阵列单元的存储信
息可以同时擦除，不像 EEPROM 每个单元有选择管允许单个字节的擦除。因此，快闪存储器
单元可以制成比浮栅 EEPROM 单元小 1/2 到 2/3。8 Mb 到 512 Mb 的快闪存储器作为生产器件
可以买到，更高密度的快闪存储器也在开发中。

DRAM 目前以销售额计是最大的存储器部分，预计今后一段时间也会是这样。快闪存储
器和 SRAM 是紧接 DRAM 之后的两个最大的存储器部分。在 2000 年快闪存储器市场超过了
SRAM 成为了第二大存储器市场。DRAM 和快闪存储器市场的份额预期到 2005 年以前都会有
持续增长，其中快闪存储器发展更快。其余的存储器分支所占的份额预期会维持稳定。

图 1.2（a）显示了预计到 2005 年以前不同 MOS 技术市场份额的比较^[2]。预测到 2005 年
DRAM 会占存储器技术市场的 60%，而快闪存储器销售额预期会占总存储器市场的 29%。
图 2.2（b）显示了每种 MOS 存储器预计在 2000 年和 2005 年会占总市场的百分比。

“Semiconductor Memories”一书讲述了各种存储器失效模式和机理、失效建模，以及电
学测试^[1]。最通用的失效模型是单发失效型（single-stuck-at fault, SSF），它也是经典的标准失
效模型。然而，针对瞬态失效（TF）、寻址失效（AF）、短路失效（BF）、耦合失效（CF）、图

形灵敏失效 (PSF) 和动态 (或延迟) 失效, 许多其他的失效模型也在发展中。在 IC 中发生的大部分物理失效可以认为是短路失效 (BF), 包括两个或多个单元、连线之间的短路。另一个重要的失效模型是可以造成 DRAM 单元功能出错的耦合失效或 PSF。

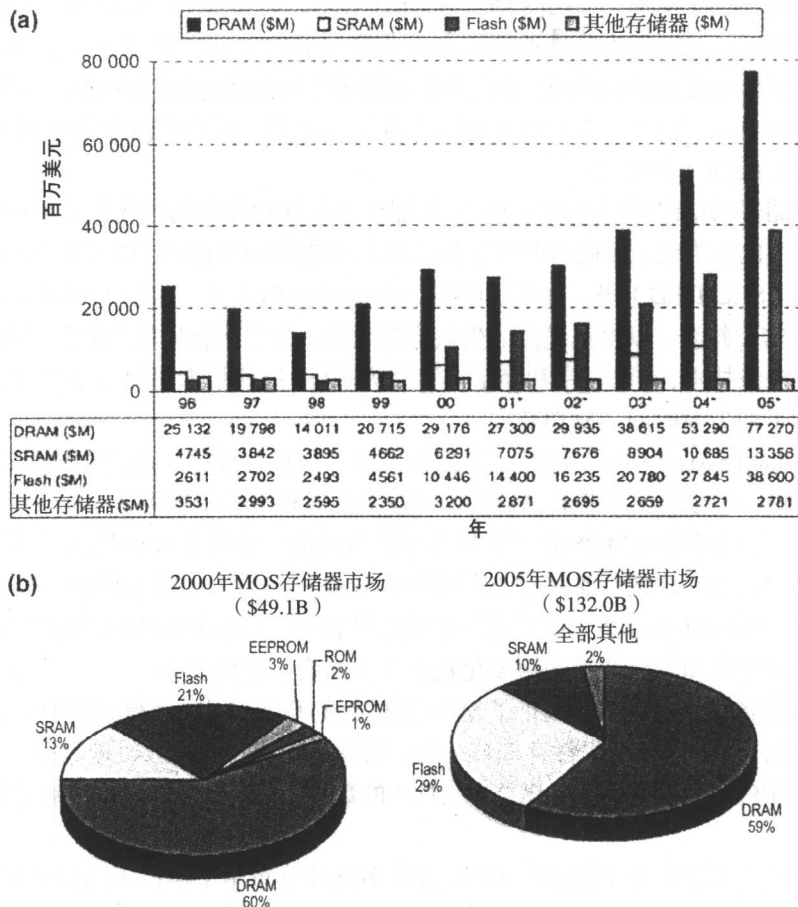


图 1.2 (a) 不同 MOS 存储器技术的市场份额比较; (b) 预测在 2000 年和 2005 年每种存储器技术所占的市场百分比^[2]

一般来说, 存储器电学测试包括直流和交流参数测试及功能测试。对于 RAM, 已发展了各种功能测试算法, 测试时间是存储器位数 (n) 和从 $O(n)$ 到 $O(n^2)$ 的复杂性级别的函数。对于给定 RAM, 一组具体测试图形的选择, 受到要检测的失效模型类别、影响测试时间的存储器位密度, 以及存储器自动测试设备 (ATE) 有效性的影响。

先进的兆位存储器结构已设计了专门的测试图形, 利用多位测试 (MBT)、线模式测试 (LMT)、内建自测试 (BIST) 等方法缩短测试时间。专用存储器, 如 FIFO、视频 RAM、同步静态和动态 RAM 及双高速缓冲存储器 (DBM), 具有复杂的时序要求和多设置模式 (需要复杂的测试硬件、可测性设计 (DFT) 和 BIST 方法的适当组合)。

总体来说, 存储器可测性是一些变量 (如电路复杂性和设计方法) 的函数。因此, DFT 技术、RAM 和 ROM BIST 系统结构、存储器误差检测和修正 (EDAC), 以及存储器失效容差都是重要的设计考虑因素。结构化设计技术基于提供一致设计的概念以增加可控性和可观察性。