



刘明,中国科学院院士,中国科学院微电子研究所研究员,主要研究方向为微电子存储器机理模型、材料结构、核心共性技术和集成电路的微纳加工等

# 半导体存储器技术

刘明

中国科学院微电子研究所,中国科学院微电子器件与集成技术重点实验室,北京 100029

**摘要** 半导体存储器是市场份额最大的单一集成电路产品,广泛应用于信息、航空/航天、军事/国防、新能源和科学研究等领域,有着巨大的市场。概述了 DRAM 和闪存、新型非易失存储器的的发展现状及课题组在存储器领域的相关进展。

**关键词** 易失存储器;非易失存储器;3D NAND;RRAM

## 1 主流存储器技术发展现状

半导体存储器可以简单分成易失性存储器和非易失性存储器,易失存储器在过去的几十年里没有特别大的变化,依然是以静态随机存取存储器(SRAM)、动态随机存取存储器(DRAM)为主,非易失存储器反而不断有新的技术出现。除了主流的电荷捕获(charge trap)存储器外,还有铁电存储器(FRAM)、相变存储器(PRAM)、磁存储器(MRAM)和阻变存储器(RRAM)。

铁电存储器与 DRAM 类似,是基于电荷存储机制,传统的铁电存储器由于存在微缩化的问题,仅仅在  $0.13 \mu\text{m}$  节点以上,在射频识别技术(RFID)、汽车电子等小众市场(niche market)中实现了产品化。

新型的非易失存储器 PRAM、MRAM 和 RRAM 主要通过器件电阻的变化来存储信息。

主流的存储器最重要市场份额有两大类:DRAM 和

NAND 闪存。图 1 给出了其市场的分布,目前 DRAM 行业基本上被 Samsung、SK Hynix 和 Micron 三家垄断,大概占了全球市场的 95%,NAND 市场的垄断情况更为严重,Samsung、Toshiba/SanDisk、Micron、SK Hynix 几乎垄断了整个 NAND 市场,占了全球市场的 99.2%。

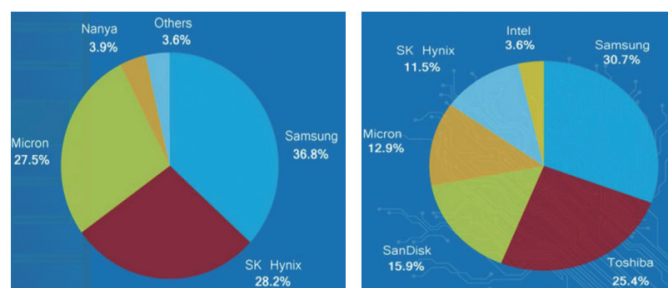


图 1 全球 DRAM、NAND 的市场份额分配

从技术的角度来看,在 DRAM 发展过程中,研究者做了很多其他尝试,例如尝试无电容(capacitor less)

DRAM,但遗憾的是均未获得成功,目前DRAM依然是一个选通晶体管加一个电容的结构。

在不断微缩的过程中,选通晶体管的微缩可以像逻辑工艺一样做,但电容的微缩非常难,所以目前DRAM在从1xnm向1ynm转变的过程遇到了非常大的挑战。

大容量、高带宽、低功耗、低成本是DRAM发展的一个趋势,可以考虑从模块封装的角度做一些尝试。长期以来国内在存储器领域投入不多,但目前已经有两家企业进入装机和试产的阶段:合肥睿力集成电路有限公司直接切入1xnm技术进入正面竞争;福建省晋华集成电路有限公司则主要面向小众市场,预计这两家公司在2019年会有少量的产品投放。

NAND技术发展现状主要有两个方面:(1) 2D NAND工艺已经迈入1znm阶段,Samsung 14 nm、Toshiba 12 nm、SK Hynix 13 nm、Micron 15 nm已于2015年宣布量产;(2) 由于2D NAND缩放受限,自2014年开始,3D NAND技术进入市场,目前Samsung和SanDisk均已量产64层/512 GB的3D NAND,计划量产96层3D NAND。

中国过去几十年在存储器领域虽然没有太多的投入,但在近几年有大量的布局,国家投入的企业有福建省晋华集成电路有限公司、合肥长鑫集成电路有限公司,而Samsung将投资数十亿美元用于扩大西安工厂3D NAND芯片的生产。国家在存储器领域投入最大的一笔资金是支持长江存储科技有限责任公司3D NAND的量产。

## 2 新型存储器技术发展现状

### 2.1 磁存储器(MRAM)

所有的新型存储器都是从凝聚态物理基础研究演变而来。磁存储器(magnetic random access memory, MRAM)最早是由巨磁阻效应发展而来,磁科学家研究发现可以在很薄的一个磁性隧道结里展现出磁阻效应,并且在很小的磁场下会有一个巨大的电阻变化。基本原理如下:存在一个固定层,自旋方向是固定的,中间是隧穿层,如果自由层的自旋方向与固定层一致,整个隧道结磁阻就比较小,反之磁阻就大,外加电场撤掉后,状态依然维持,所以可以用于非易失存储。

磁存储器有其他存储器无法抗衡的优点:疲劳特

性好、速度快,当然也存在一些问题,例如传统的MRAM需要一个特别大的磁场。由磁场驱动转向更高性能的电流驱动(STT-MRAM),临界电流密度和功耗仍需进一步降低,电控磁化反转是目前研究热点。目前全球工业界给予MRAM很多关注,美国、欧洲、日本和韩国等政府及公司巨资投入开发,并依靠工艺突破保持技术领先,包括IBM、Seagate、SanDisk、Headway、TDK、Toshiba、Samsung、Honeywell、Sony、Toshiba等公司。

### 2.2 相变存储器(PRAM)

相变存储器(phase-change random access memory, PRAM),是一种新兴的非易失性存储器技术。相变存储材料在加热的情况下可以在晶态和非晶态之间转变,实现在高阻态和低阻态的可逆转变,工业界对该项技术也投入了很大的力量,但非常遗憾,在平面的独立式存储上没有获得成功。

2015年,Intel和Micron推出的3D Xpoint技术为PRAM的量产带来了新的生机,被誉为20年来存储器领域革命性的新技术,揭开了存储器层次架构演变的新篇章,对于计算机系统的重构与优化具有深远的影响。与DRAM相比,3D Xpoint不需要刷新,另外DRAM的读取过程是破坏性的,电荷会丢失,在读操作后需要重新写入数据,但3D Xpoint不需要,虽然速度慢一些,但比NAND快很多,同时其密度又比DRAM大,几乎可以与NAND相抗衡。

遗憾的是,3D Xpoint采用平面堆叠的方式,区别于3D NAND的垂直堆叠架构,随之带来的就是高成本,这也是3D Xpoint技术进一步发展的局限性。另外,相变材料基本的原理,就是要在热的作用下发生晶态和非晶态的转变,所以它对温度非常敏感,在高温环境中的可靠性问题是一个挑战。

### 2.3 阻变式存储器(RRAM)

阻变式存储器(resistive random access memory, RRAM)在首次被提出时但并没有引起太多关注。2000年,Hughes公司将一个相关专利转让给了Sharp,也由此引发RRAM研究热潮,随后学术界和工业界在这方面开展了广泛的研究工作,RRAM技术得到了快速发展。

目前RRAM作为嵌入式存储器已经在一些领域得到应用,特别是到22 nm节点以后,eFlash在嵌入式应用面临挑战,基于后段工艺集成的新型存储器RRAM、MRAM将成为嵌入式存储的主要技术方案。2017年,台积电公司宣布2019年开始在嵌入式应用里试产

RRAM和MRAM。

## 2.4 非易失存储器发展趋势

传统的闪存技术获得巨大成功,但随着器件尺寸的不断缩小,隧穿层厚度难以同步减小。如图2所示,未来非易失存储器有以下两种不同的技术发展路线。

1) 将导电的多晶硅存储层换成分布式的存储介质,这样可以降低对阻挡层厚度的要求,能够把电子禁锢在存储层里,这种技术称为电荷俘获存储。

2) 抛弃原有结构,采用两端器件作为基本存储单元。

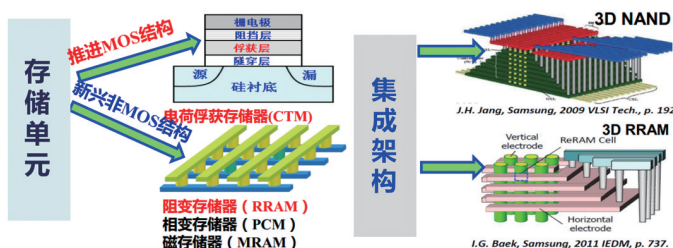


图2 非易失存储器基本存储器单元和集成架构的发展趋势

而在集成架构方面,独立式存储如果无法实现三维集成,集成密度将无法提升。电荷俘获存储器是3D NAND的基础器件,实现了三维集成。同样的道理,新型存储器如果无法实现三维集成将很难在独立市场上得到应用,三维集成是高密度存储器发展的主要方向。

## 3 中国科学院微电子研究所存储器相关研发工作

### 3.1 电荷俘获存储器

1) 从能带工程出发,引入新材料/结构,综合优化CTM隧穿层/俘获层/阻挡层,实现低压、高速、长数据保持和多值存储。包括采用 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等优化阻挡层;TiW等金属纳米晶、Au- $\text{Al}_2\text{O}_3$ 核壳纳米晶、纳米石墨烯等作为电荷俘获材料,并结合 $\text{ZrO}_2$ 、 $\text{HfO}_2$ 、 $\text{HfAlO}$ 、HAH等优化高K介质俘获层; $\text{SiO}_2/\text{HfO}_2$ 等优化高K介质隧穿层。

2) 在实验室工作的基础上,2008年开始与产业界合作研发纳米晶闪存,在生产平台上首次完成纳米晶存储器系统研究;获得自主知识产权纳米晶存储技术整体解决方案,解决了纳米晶存储材料分布均匀、存储器物理模型仿真、集成工艺、可靠性及芯片集成等技术难题;完成了单管结构(1 T)、分裂栅结构(1.5 T)、存储管+选择管结构(2 T)三款存储器件IP研发(图3)。

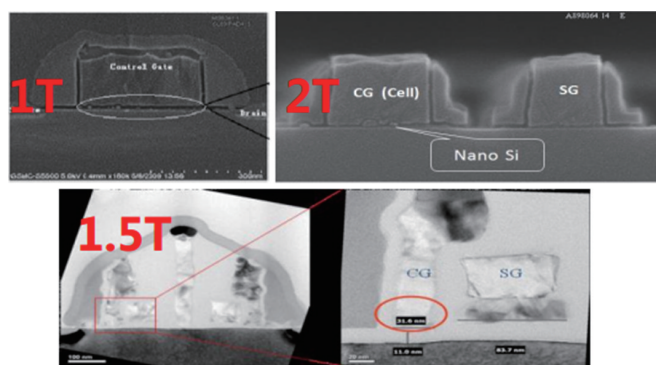


图3 三款存储器件示意

3) 与中芯国际集成电路制造有限公司(简称中芯国际)合作研制大容量闪存芯片,突破了设计的关键技术瓶颈,掌握了核心设计技术,完成了128 Mbit和1 Gbit两款芯片的设计、流片和验证。与中芯国际共同完善了闪存芯片的设计规则,并帮助优化了中芯国际的65 nm浮栅闪存关键工艺开发与可靠性。在闪存芯片设计与制造技术开发的基础上,后续与国内的设计公司联合进行闪存产品设计。

4) 合作开发3D NAND技术。2014年10月,中国科学院微电子研究所与武汉新芯集成电路制造有限公司(以下简称武芯)签署了“关于先进存储器合作开发协议”,双方共同组建了“中科新芯三维存储器研发中心”。在前期中国科学院微电子研究所派出20名成员的团队双跨到武芯,作为核心成员直接参与3D NAND技术研发。中国科学院微电子所在存储器领域许可的相关专利和技术是武芯存储器产品自主研发的初始来源和主要基础,这是国内高端集成电路产品研发首次采用自主技术。

### 3.2 RRAM研发

课题组在阻变存储器(RRAM)研究工作基本与国际同步,选择了氧化钽和氧化铪这两种主要的阻变材料。研究初期发现很多材料都可以展现出阻变的特性,但基础的原理并不容易被阐明,有一些自相矛盾的现象。采用一些新型的表征手段进行了系统研究,例如电学的表征、原位TEM、热分析统计、第一性原理计算等。

在深入研究阻变机理的基础上,器件性能改善也是非常重要的方面,课题组进行了系列研究工作,包括掺杂改性、局域电场增强、双层结构设计、界面调控、编程方法优化等。

因为RRAM是一个两端器件,两端器件如何实现

集成也是一个关键问题,课题组先后实现了 1 kbit 到 64 Mbit 的原型芯片、自选通 RRAM 器件、三维垂直 RRAM 阵列等。

2015 年开始将平面集成工作推进到 RRAM 产业化应用上,与中芯国际合作,在工艺线上实现了 1 Mbit/28 nm RRAM 芯片。后续与国家电网合作研发搭载 RRAM 新一代电力芯片,中国科学院微电子研究所负责 RRAM 原型技术(包括材料、结构、集成方案、IP 设计等)SMIC 负责工艺开发、良率控制;国家电网(智芯)负责定义规

格需求、开发系统应用。

与此同时,课题组进一步探讨了阻变存储器三维集成,并成为国际上该领域最好的研究小组之一,2015、2017 年在中国科学院微电子研究所工艺线上分别实现了 RRAM 四层和八层垂直三维集成工艺。

表 1 列出了 3D V-RRAM、3D Xpoint 及 3D NAND 的技术对比。相比于 Intel 的 3D Xpoint 技术与主流的 3D NAND 技术,3D V-RRAM 在读写延迟、功耗、耐久性和可微缩性等方面具有明显的优势。

表 1 3D V-RRAM、3D Xpoint 及 3D NAND 的技术对比

器件	单元尺寸	单元读延迟	单元写延迟	功耗/pJ	耐久性	数据保持力	可微缩性
3D V-RRAM	4 F <sup>2</sup> /n	<10ns	10~100 ns	<10	10 <sup>9</sup> @120C	好	好
3D Xpoint	4 F <sup>2</sup> /n	~10ns	40~150 ns	100	10 <sup>9</sup> @RT	好	好
3D NAND Flash	4 F <sup>2</sup> /n	50μs	1.5 ms	1200	10 <sup>3</sup> @RT	一般	一般

与此同时,课题组也开展神经网络硬件架构设计的研究工作,从忆阻仿生器件及其集成、仿生神经元电路设计到存算一体神经网络架构设计,实现了器件、电路、架构 3 个层面逐层推进、协同设计,完成了从系统设计到物理实现的完整流程。工作也得到了华为公司的支持,设立了新型忆阻器计算阵列技术研究项目。

在解决实际应用方面,针对商业卫星主控 FPGA 开发出 MCP 存储芯片,具有以下特点:大容量(256 Mbit)、低成本、抗空间辐射(单粒子效应);支持商业卫星功能(FPGA 程序)实时在轨升级;支持 FPGA 主机程序多版本切换,可对在轨卫星功能模式进行灵活切换。成功开发出 3.3 V/64 Mbit 和 1.8 V/128 Mbit 两款军品 Flash,并通过 JB597B 检验,已经成功实现销售。

## 4 结论

存储器应用广泛,市场非常庞大,是国家战略性高技术产业。新的存储技术层出不穷,在新型存储器研究方面,国内的基础研究走在了前列,也希望基础研究的优势能够转化成未来产业发展的优势,抓住存储器技术发展多元化的新机遇及国家大力发展存储器产业的契机,实现突破。兼顾自主创新和国际合作,两者要有一个共赢的模式;同时在产业发展的新形势下更要注重原始创新;鼓励原始创新/技术突破,开展共性基础研究为产业自主发展奠定基础。中国最大的优势就是市场需求,面向中国市场需求是创新跨越的新机遇,实现存储器技术的跨越式发展。

(责任编辑 刘志远)