



東北大學 悉尼智能科技学院  
Sydney Smart Technology College  
NORTHEASTERN UNIVERSITY

## 计算机组成大作业

### 存储科技的革新： 新型存储器技术的演进与展望

专业名称	计算机科学与技术 2201
班级学号	202219102
学生姓名	况小媛颖
班级序号	23
设计时间	2024 年 12 月 10 日—2024 年 12 月 17 日

## 存储科技的革新：新型存储器技术的演进与展望

### 摘 要

本文探讨了新型存储器技术的发展及其在存储科技革新中的作用。分析了从集中式到分布式存储架构的演进，以及多级存储器策略和存储墙问题。重点讨论了相变存储器（PCM）、磁阻存储器（MRAM）和阻变存储器（RRAM）的技术特点和产业化现状，展望了新型存储器技术的未来机遇。

This article explores the development of emerging memory technologies and their role in the revolution of storage technology. It examines the evolution from centralized to distributed storage architectures, as well as multi-level memory strategies and the storage wall issue. The discussion focuses on the technical characteristics and industrialization status of Phase-Change Memory (PCM), Magnetoresistive Random-Access Memory (MRAM), and Resistive Random-Access Memory (RRAM). Additionally, it highlights the future opportunities of emerging memory technologies.

## 目 录

1 引 言 .....	4
2 存储器创新发展的背景 .....	4
2.1 演进的存储架构 .....	4
2.1.1 从集中式存储到分布式存储架构 .....	4
2.1.2 分布式存储架构中的潜在性能瓶颈 .....	4
2.2 优化的多级存储器策略与存储墙 .....	5
3 新型存储器技术的发展 .....	7
3.1 相变存储器 (PCM) .....	7
3.1.1 硬件技术与工作原理 .....	7
3.1.2 PCM 的主要特点 .....	7
3.2 磁阻存储器 (MRAM) .....	7
3.2.1 硬件技术与工作原理 .....	7
3.2.2 MRAM 的主要特点 .....	8
3.3 阻变存储器 (RRAM) .....	8
3.3.1 硬件技术与工作原理 .....	8
3.3.2 RRAM 的主要特点 .....	9
4 新型存储器产业化发展现状 .....	10
4.1 PCM .....	10
4.2 MRAM .....	10
4.3 RRAM .....	11
5 新型存储器的未来机遇 .....	12
参考文献 .....	13

# 1 引言

随着信息技术的迅速发展，数据存储需求不断增长，存储技术也在持续演进。传统的集中式存储模式逐渐向分布式存储转变，以应对大规模数据存储与访问的需求。同时，多级存储器架构逐步成为主流。在这一背景下，传统存储器逐渐暴露出瓶颈，新型存储器技术应运而生，为多级存储架构提供了更为高效的支持。

## 2 存储器创新发展的背景

### 2.1 演进的存储架构

#### 2.1.1 从集中式存储到分布式存储架构

集中式存储（**Centralized Storage**）是一种传统的存储方式，通过中央服务器统一管理一个或少量大型存储设备中的数据。<sup>[1]</sup>由于数据都保存在一个中心位置，早期的 IT 团队可以很轻松地对所有的数据进行统一的管理和维护，将存储资源高度整合和优化，从而提升硬件的利用率。

然而，随着存储处理信息量的不断增长，集中式存储架构逐渐在性能和拓展性方面呈现颓势，促使业界逐渐转向更为灵活、高效的分布式存储解决方案。<sup>[2]</sup>分布式存储系统（**Distributed Storage System, DSS**）通过集群架构和软件定义存储技术，实现数据的分布式存储与管理。DSS 的实现依赖于数据分片、冗余存储、负载均衡、网络通信优化等多项关键技术，确保数据在多个节点间高效分布与可靠存储。<sup>[3]</sup>

与传统集中式存储系统相比，DSS 在性能、数据重平衡和成本等方面具有显著优势。其线性扩展能力支持通过增加节点灵活扩展存储容量和性能，满足大规模数据需求。冗余存储技术确保数据高可靠性，依赖邻居节点恢复，增强系统容错性。<sup>[4]</sup>此外，基于廉价通用硬件构建，显著降低了单位存储成本。在需要弹性扩展和高可用性的现代应用中，DSS 因其成本效益和灵活性成为理想选择。

#### 2.1.2 分布式存储架构中的潜在性能瓶颈

分布式存储架构的应用既带来性能挑战，也提供发展机遇。首先，随着数据量增长，存储系统需满足高并发、低延迟的实时处理需求。其次，架构需支持 PB 至 EB 级数据处理，并实现大规模存储集群的无缝扩展。最后，可靠性和容错性是基础要求，存储系统必须具备高容错能力、数据冗余及快速恢复机制，确保在硬件故障或网络中断时的数据完整性与可用性。

## 2.2 优化的多级存储器策略与存储墙

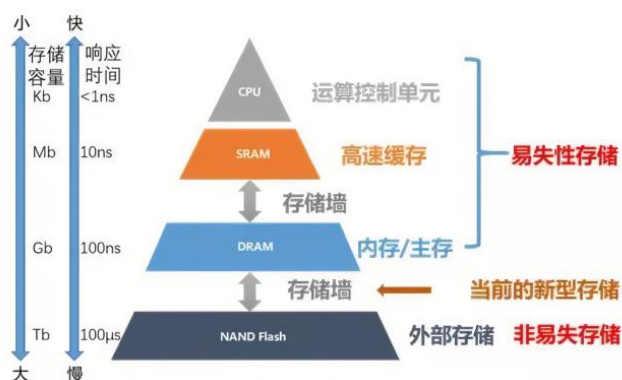


图 2.2 多级存储结构示意图

多级存储器策略作为优化计算机性能的补充设计方案，将数据存储分为多个层次，每一层次的存储设备有不同的速度、容量和成本特性，从而根据不同需求平衡性能和成本。

CPU 位于存储架构顶端，具备最高处理速度和响应能力，但容量极小，仅数千字节，依靠寄存器与 L1 缓存存储高频访问数据。次层为 SRAM，响应时间约 10 纳秒，容量为 KB 至 MB，速度快但成本较高。DRAM 作为主存，容量达 GB，响应时间约 100 纳秒，具有较高存储密度和较低成本，但相较前者速度偏慢。底层为 NAND Flash，容量可达 TB，响应时间约 100 微秒，广泛用于 SSD 等设备，并支持断电后数据保留。

尽管多级存储架构能平衡性能和容量，存储墙问题依然存在。存储墙是指各层存储之间速度差异导致的数据传输瓶颈，尤其是在 CPU 性能不断提升的情况下，DRAM 的速度未能同步增长，从而造成 CPU 等待数据时的空闲周期，影响系统整体效率。<sup>[5]</sup>

---

为应对存储墙问题，新型存储器需具备更高速度以减少 CPU 数据等待，同时需提供更大容量以适应数据增长需求。非易失性特性亦愈发重要，以保障断电情况下的数据完整性。

## 3 新型存储器技术的发展

为有效适应和解决性能瓶颈及存储墙问题，新型存储器应运而生。新型存储器在传统存储器技术基础上，采用新型材料、结构技术以提升存储性能、密度等特性，有效推动数据存储技术的革新。

以下将从新型存储器的三条成熟的技术路线，对存储器最新的硬件发展展开分析：

### 3.1 相变存储器（PCM）

相变存储器（PCM）是一种基于物质相态变化实现数据存储的新型非易失性存储技术，以硫族化合物为核心材料，通过非晶态与晶态的电学特性差异存储信息。

#### 3.1.1 硬件技术与工作原理

PCM 依赖硫族化合物的相态切换特性。通过施加电脉冲，材料在非晶态（高电阻）和晶态（低电阻）间快速切换以写入和读取数据。在 SET 操作中，低宽脉冲电流使材料升温至晶化温度（ $T_x$ ）以上但低于熔点温度（ $T_m$ ），实现结晶；RESET 操作通过窄高脉冲升温至  $T_m$  以上并快速冷却（淬火）形成非晶态。切换过程在纳秒级完成，体积变化较小，兼具高性能和可靠性。<sup>[6]</sup>

研究集中于 Ge-Sb-Te（GST）合金体系，该材料因结晶速度快、热稳定性高被广泛应用。GST 材料的相变过程涉及亚稳态面心立方结构向六方结构转变，是性能优化的关键。通过掺杂氮、硅或银等元素，可提高结晶温度、抑制相态分离并增强热稳定性，从而拓展 PCM 的应用场景。<sup>[7]</sup>

#### 3.1.2 PCM 的主要特点

PCM 的显著优势体现在其非易失性、较低的静态功耗和高存储密度等方面。然而，该技术也存在写入延迟、写功耗较高及写入寿命有限等不足。改进策略包括写操作截断、预写操作降低能耗与延迟，以及通过 ECC 校验提升数据可靠性。<sup>[6]</sup>

### 3.2 磁阻存储器（MRAM）

磁阻式随机存取存储器（MRAM）是一种非挥发性电脑存储器技术。

#### 3.2.1 硬件技术与工作原理

MRAM 是一种先进的非挥发性存储技术，其原理基于隧道磁阻效应（TMR），核心结构为磁隧道结（MTJ）。MTJ 由固定磁矩层、自由磁矩层以及夹在两者之间的薄绝缘层构成，通过调控自由层磁矩的方向以表示数据“0”和“1”。在读取过程中，电流沿字线与位线流动，顶部位线的电流变化用于判断存储状态；写入操作则依赖电流产生的磁场来改变自由层的磁矩方向。<sup>[8]</sup>MRAM 借助磁致电阻效应和隧道磁阻效应，确保数据存储与读取的可靠性。为了进一步提升性能，自旋转矩（STT）技术通过自旋极化电子流直接切换自由层磁矩，有效减少能耗，而步进切换方式则通过逐步调整磁矩方向来降低误操作的概率。

### 3.2.2 MRAM 的主要特点

磁阻随机存取存储器（MRAM）因其非挥发性、高速读写能力和高可靠性而受到广泛关注。与传统存储技术相比，MRAM 在读写速度上与 SRAM 相当，且兼具 DRAM 的高密度与闪存的非易失性优势。此外，MRAM 的读写次数几乎没有限制，并且工作电压较低，这些独特的特性使其在存储器领域拥有广阔的应用前景。MRAM 技术的支持者认为，MRAM 最终将成为占主导地位的并取代其它所有类型的存储器，成为一个真正的‘通用存储器’。<sup>[8]</sup>

### 3.3 阻变存储器(RRAM)

电阻随机存取存储器（RRAM）是一种基于电阻变化实现数据存储的非易失性存储技术。

#### 3.3.1 硬件技术与工作原理

RRAM 采用金属—介质—金属的三明治结构，核心为电阻转变层。该层由薄膜材料构成，在外加电信号作用下，介质的化学成分和微观结构发生可逆变化，从而使电阻在高低状态之间切换。<sup>[9]</sup>电场作用下，离子迁移和反应引发电阻的可逆转变，这一现象称为电阻转变效应。

电阻转变机制主要有三种：电化学金属化（ECM）、化合价变化（VCM）和热化学机制（TCM）。<sup>[10]</sup>ECM 机制涉及金属电极间金属离子的迁移，常见于固态电解质型 RRAM；VCM 机制则与过渡金属氧化物中氧缺陷的电化学反应相关；TCM 机制主要解释单极电阻转变，涉及氧化物薄膜中缺陷的形成与断裂。



### 3.3.2 RRAM 的主要特点

RRAM（电阻式随机存取存储器）因其简单结构、高速度和高存储密度，成为未来存储技术的热点之一。与传统浮栅闪存相比，RRAM 在器件结构、响应速度、可微缩性和三维集成潜力等方面具有明显优势。其与 CMOS 工艺的兼容性，结合快速转变速度、低功耗和高耐久性，满足了现代电子设备对高性能存储的需求，在集成电路中具有广泛的应用前景。此外，RRAM 的电阻切换过程展示了量子效应、磁电效应和光电效应等新奇物理现象，使其在新一代存储技术中的应用提供了更多可能性。

## 4 新型存储器产业化发展现状

### 4.1 PCM

相变存储器（PCM）作为新型存储技术，自 2000 年英特尔与 Ovonyx 启动研究以来，全球范围内的产业化进展显著。多家国际企业推动了该技术的商业化，并在存储性能、容量及耐用性等方面取得了重要突破。

在国际领域，英特尔与美光联合研发了 128 Gb 3D Xpoint 芯片，成为首个量产且具商业化价值的 PCM 产品。三星自 2008 年起，持续优化工艺，从 512Mb 芯片到 2012 年推出的 8Gb PCM 芯片，展现了其在存储密度和技术优化方面的优势。美光也于 2009 年推出了 1Gb PCM 芯片，进一步推动了 PCM 的商业应用。意法半导体则在 2009 年发布了 90nm 工艺的 4Mb 嵌入式 PCM 芯片，并在材料改性领域进行持续创新。

国内方面，中国科学院在硫族化合物材料和工艺开发上取得了重要进展，推动了贵金属硫族化合物纳米材料的普适性制备技术。中芯国际与 IBM 的合作，推动了 45nm 工艺下 1Gb PCM 芯片的研发，奠定了国内产业化基础。北京时代全芯科技作为国内首家量产 PCM 的企业，推出了 256Mb 和 1Gb PCM 芯片，并计划实现规模化生产，填补了中国在核心存储器自主研发上的空白。

### 4.2 MRAM

纵观国际国内，MRAM 正在成为新一代存储技术的焦点。国际上，Everspin Technologies 作为该领域的先驱，已推出包括 1Gb STT-MRAM 在内的多款产品，采用 28nm 工艺并支持多种封装，广泛应用于数据中心、云存储和工业控制等领域。英特尔宣布其 STT-MRAM 技术已具备大规模生产能力，而三星则专注于嵌入式 MRAM 的工艺优化，提升性能与可靠性。市场研究预测，全球 MRAM 市场规模将从 2024 年的 20.1 亿美元增至 2029 年的 225.8 亿美元，年均增长显著。<sup>[11]</sup>

国内市场亦呈现快速增长态势。2022 年，中国 MRAM 市场规模达 52.2 亿元人民币，并以年均 24.50% 的速度扩展。珠海兴芯存储率先推出符合 NV-RAM 标准的 MRAM 技术，计划实现量产以替代进口存储方案。亘存科技布局独立式 MRAM 存储芯片及嵌入式 MRAM 的 AI SoC 芯片，推动其在存储与计算一体化领域的应用。此外，中国科学院物理研究所开发了磁矩闭合型纳米环状磁性隧道结，为技术路线提供新选择。随着系统集成度的不断

提升，MRAM 嵌入式系统的应用领域将持续扩大。

### 4.3 RRAM

阻变存储器（RRAM）作为一种前沿的非易失性存储技术，正在逐步实现从实验室研究到实际产业应用的转化。国际方面，三星、IBM 和东芝等半导体巨头积极布局 RRAM 技术，推动其从实验室研究到商业化应用的转变。松下公司首度实现了 RRAM 的量产，并与富士通合作推出基于 180nm 工艺的第二代技术。与此同时，台积电也已成功量产 40nm 工艺的 RRAM，并计划将该技术推广至更先进的工艺节点。

在国内，RRAM 技术的研究与应用也取得了显著进展。中科院微电子所刘明院士团队经过二十年的深入研究，成功完成了从材料研发到系统集成的全流程技术创新，获得了自主知识产权，并将 28nm RRAM IP 应用于全球首款 28nm 先进显示芯片的量产。昕原半导体则在 Crossbar 技术基础上实现了技术升级，并建设了首条 RRAM 量产线，成功实现了 28nm RRAM 的规模化生产。当前，RRAM 研究者正致力于解决材料稳定性、器件一致性及制造成本等关键问题，以推动 RRAM 技术在大规模产业化中的应用。

## 5 新型存储器的未来机遇

随着信息技术的快速发展，新型存储器技术展现出巨大的潜力，但在推进过程中仍面临诸多瓶颈。例如，相变存储器（PCM）需要优化材料以提升写入速度和寿命；磁阻存储器（MRAM）需解决高温环境下的稳定性；阻变存储器（RRAM）则亟待改进一致性和可靠性。我认为，要突破这些技术障碍，必须依托跨学科研究，整合物理、化学、材料科学和计算机科学的前沿成果，为新型存储器的持续创新注入动力。

与此同时，新型存储器能否实现产业化，还取决于与现有半导体工艺和集成电路设计的兼容性。在性能与成本之间找到平衡，既要展示实验室的技术优势，又需在大规模生产中具备成本效益和工艺竞争力。这种平衡将直接决定技术能否广泛应用。

新型存储器的应用场景正在快速扩展，覆盖数据中心、云计算、物联网、人工智能和自动驾驶等领域。不同领域对存储器性能的要求各具特点，例如，数据中心更加关注能耗优化，而自动驾驶则强调存储的高速读取和高可靠性。在这些复杂需求驱动下，技术研发应更加注重针对性优化，以提升在多领域的适配能力。

此外，全球对低碳经济 and 环境保护的关注为新型存储器指明了方向。在我看来，低功耗技术和环保制造工艺的引入，不仅可减少数据中心的碳排放，还能降低资源消耗。同时，随着数据安全问题日益严峻，新型存储器需强化隐私保护和抗攻击能力，以应对复杂的网络威胁。

## 参考文献

- [1] 中国信息通信研究院云计算与大数据研究所. 下一代数据存储技术研究报告 (2021 年) [R]. 北京: 中国信息通信研究院, 2021.
- [2] 舒继武, 陈游旻, 汪庆, 等. 分离式数据中心的存储系统研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2023, 53(08): 1503-1528.
- [3] 卞伟. 监控分散式存储与集中式存储的探究[J]. 中国有线电视, 2018, (01): 94-97.
- [4] 金天骄. 分布式存储取代集中式存储可行性分析[J]. 邮电设计技术, 2019, (10): 84-87.
- [5] 胡维, 刘光明, 李琼, 蒋艳凰, 蔡桂林. 面向 E 级高性能计算存储墙问题研究[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2016, 17(11): 1154-1175.
- [6] 尹琦瑁, 陈冷. 相变存储器材料的研究进展和应用前景[J]. 新材料产业, 2016, (07): 56-62.
- [7] 冒伟, 刘景宁, 童薇, 等. 基于相变存储器的存储技术研究综述[J]. 计算机学报, 2015, 38(05): 944-960.
- [8] 吴晓薇, 郭子政. 磁阻随机存取存储器(MRAM)的原理与研究进展[J]. 信息记录材料, 2009, 10(02): 52-57. DOI:10.16009/j.cnki.cn13-1295/tq.2009.02.012.
- [9] 刘森, 刘琦. 阻变存储器发展现状[J]. 国防科技, 2016, 37(06): 4-8+30. DOI:10.13943/j.issn1671-4547.2016.06.02.
- [10] 龙世兵, 刘琦, 吕杭炳, 等. 阻变存储器研究进展[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(10): 145-171.
- [11] 黄阳棋. 新型存储器产业发展现状与展望[J]. 信息通信技术与政策, 2022, (05): 78-81.