

新型存储材料与器件: 铁电与氧化物半导体专题简介

黄芊芊^{1*}, 吴燕庆¹, 龚萧²

1. 北京大学, 北京 100084, 中国

2. National University of Singapore, Singapore 119077, Singapore

* 通信作者. E-mail: hqq@pku.edu.cn

自 2011 年掺杂的氧化铪 (HfO_2) 材料中发现铁电性以来, 铪基铁电存储器件得到了学术界和工业界的广泛关注. 与传统的钙钛矿型铁电材料相比, 铪基铁电材料可以通过 ALD 工艺沉积、具有 CMOS 工艺兼容、可微缩性好、可 3D 集成以及在纳米尺度下仍具备稳定铁电性等优势. 同时, 氧化物半导体材料也随着 IGZO 等材料的突破而迅速发展. 近年来, 超薄氧化物半导体由于其低热预算和优异的电学性能在硅后端工艺兼容的逻辑和存储器应用中显示出巨大的潜力. 铁电和氧化物半导体已成为当前新型存储材料和器件研发的核心前沿领域和重要发展方向. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2025 年 68 卷第 6 期组织出版了“新型存储材料与器件: 铁电与氧化物半导体专题” (Special Topic: Novel Memory Materials and Devices: Ferroelectrics and Oxide Semiconductors), 共收录了 1 篇综述、1 篇观点、5 篇研究论文和 3 篇快报, 涵盖了从材料到器件及应用等多个角度.

西安电子科技大学韩根全教授团队联合国内十余家高校/研究所的专家合作撰写了综述文章“Ferroelectric materials, devices, and chips technologies for advanced computing and memory applications: development and challenges”, 系统梳理了 HfO_2 基铁电材料的铁电性起源、关键机制、

器件实现及其在芯片级的典型应用. 文章深入探讨了包括掺杂策略、应力工程和氧空位调控等在内的材料优化路径, 及其对 FeRAM, FeFET, FTJ 等器件性能的影响, 揭示了器件在快速切换、低功耗及多级存储等方面的优势, 并进一步延伸到类脑计算、存内计算和低温电子系统等应用前沿. 同时, 文章还综述了 ZrO_2 基反铁电、wurtzite 结构的 AlScN 以及铁电畴壁器件等新型铁电体系在性能潜力和可集成性方面的最新进展, 指出它们在提高极化强度、增强器件耐久性等方面对 HfO_2 体系形成有力补充. 与以往局限于材料或器件单一层面的综述不同, 本综述从材料机理 – 器件结构 – 系统应用的全链条视角出发, 提出了当前铁电技术的关键挑战与发展趋势, 旨在为实现基于新型铁电技术的高能效、可扩展的下一代计算存储融合架构、芯片和应用提供理论基础和工程指导.

东京大学的 Shinichi Takagi 教授撰写了观点文章“Prospects and challenges of HfO_2 -based ferroelectric devices”, 系统梳理了氧化铪基铁电材料的铁电性起源、材料优势以及面临的可靠性问题, 并指出了 FeRAM, FeFET, FTJ 等典型铁电器件在存储和新型智能计算领域的潜在应用. 针对 FeRAM 铁电存储器的可靠性问题, 尤其是最关键的读写耐久性, 指出需要创新的策略. 而对于 FeFET, 如何设计栅叠层以实现存储窗口、保持和

引用格式: 黄芊芊, 吴燕庆, 龚萧. 新型存储材料与器件: 铁电与氧化物半导体专题简介. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 1550–1552, doi: 10.1360/SSI-2025-0276

Huang Q Q, Wu Y Q, Gong X. Special topic: novel memory materials and devices: ferroelectrics and oxide semiconductors. *Sci Sin Inform*, 2025, 55: 1550–1552, doi: 10.1360/SSI-2025-0276

疲劳等特性之间的平衡是至关重要的,还需要更好了解陷阱特性和产生机制,以及多晶材料对于小尺寸器件的影响.此外,持续探索和利用铅基铁电材料的独特性质,将为新兴存储技术在人工智能计算应用领域提供新的解决思路.

铅基氧化物铁电材料面临高矫顽场导致工作电压高以及击穿场强度不足导致耐久性有限的难题.减薄铁电层厚度虽能降低电压,但受到纳米级厚度下漏电流大、铁电晶相难形成的问题制约.因此研发兼具低电压、高极化、高可靠性的铁电电容器件成为亟须攻克的技术难题.北京大学吴燕庆教授团队的研究论文“Improvement with low operation voltage in ultrathin La-doped $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ ferroelectric capacitors”通过铁电层厚度微缩和镧元素掺杂优化铁电电容器件操作电压和可靠性.厚度微缩使器件在低电压下的两倍剩余极化强度(2Pr)提升,镧元素掺杂促进铁电相形成,抑制单斜相,让5 nm薄膜性能进一步提升.此外,镧掺杂抑制了漏电流,提升了电场耐受性和耐久性.这些结果体现了镧元素掺杂在铅基铁电器件性能优化上的优越性.

依托机器视觉技术赋能,智能体可以精准感知并解析周边环境信息.然而受制于光学镜头固有物理缺陷,采集到的图像普遍存在几何失真现象,导致测距精度产生系统性偏差.在诸多畸变校正算法中,多项式几何变换算法占据核心地位.然而,随着图像分辨率的持续提升,算法的计算复杂度将快速增长,这对边缘计算设备的处理性能与能效提出了严峻挑战.北京邮电大学黄善国教授和鲍霖副研究员团队的研究论文“Polynomial geometric transformation based on IGZO charge trapping RAM array for machine vision calibration”提出了一种基于IGZO的电荷捕获型随机存取存储器(CT-RAM)器件,该器件针对多项式几何变换算法中的三操作数乘法运算进行了专门优化.通过引入Pao-Sah电流电压方程建模,该创新方案支持CT-RAM器件实现3个无符号操作数的乘法运算,与传统CMOS解决方案相比,大幅降低了硬件开销.此外,研究团队设计了适用于有符号操作数的三操作数乘法单元和多项式变换处理模块,有效实现了能效和吞吐量的提升,为存内计算技术在机器视觉领域的广泛应用开辟了新路径.

目前已有大量关于新型存储材料应用于

NAND闪存架构中的研究,但多数仍面临着高工作电压与大存储窗口难以兼得的问题,特别是在利用存算融合解决“存储墙”瓶颈的背景下,高效存算构架需要在存储密度、操作速度、运行能耗等多方面进行协同设计.铅基铁电薄膜因其优异的铁电特性、尺寸缩放能力和CMOS工艺兼容性,成为突破这一瓶颈的关键存储材料.山东大学陈杰智团队在研究论文“Co-optimization of ferroelectric gate stacks on operation voltage and memory window for next-generation NAND flash”中提出 Al_2O_3 与 TiO_2 双插层的铅基铁电薄膜MIFIFIS栅堆栈结构,利用 TiO_2 的强氧空位调控能力与界面电场增强效应,实现了大于4 V的存储窗口,并在十万次循环磨损后依然能保持88%以上的存储裕度.该结构为实现高密度、低功耗的NAND闪存提供了一种新路径,适于构建低功耗、高集成度的存储系统及存算一体架构.

当前,基于 HfO_2 铁电材料的FeFET在低功耗、高集成非易失存储领域具有广泛应用前景,但其存储窗窄与耐久性差仍制约其规模应用,尤其是在采用氧化物沟道材料的器件中,界面质量的劣化成为关键瓶颈.针对这一挑战,复旦大学刘文俊教授与上海交通大学纪志罡教授团队联合开展研究,在研究论文“Enhanced memory window and reliability of α -IGZO FeFET enabled by atomic-layer-deposited HfO_2 interfacial layer”中提出在 α -IGZO FeFET中引入原子层沉积(ALD)制备的2 nm HfO_2 界面层.研究表明,该界面层能够有效优化电场分布与界面质量,显著提升了器件的存储窗口.相比无界面层的器件,本文设计的结构在保持超快写入速度的同时实现了超10年数据保持,展现出优异的综合性能.该工作为氧化物沟道FeFET的可靠性提升提供了新的工艺路径,有望推动其在高密度存内计算系统中的应用.

氧化铅的铁电性源自正交相(o相)晶胞内氧原子的可逆迁移,深入理解氧原子及其相关缺陷在o相 HfO_2 体系中的行为机制至关重要.受限于氧原子及 V_o 的直接定量表征手段匮乏,学界对氧相关过程的物理解释仍存在争议.复旦大学微电子学院卢红亮教授团队和北京大学集成电路学院黎明教授团队共同合作的研究论文“Crystal orientation modulated ferroelectric and dielectric properties in $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ thin films”通过调控

ALD 工艺中氧等离子体剂量时间, 制备了不同氧剂量的 $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$ 铁电电容器, 系统分析了其铁电性与介电性能. 结合掠入射广角 X 射线散射 (GIWAXS) 晶相分析及第一性原理计算, 揭示了氧剂量通过调控晶粒取向 (而非单纯改变相比例) 影响器件性能的机制. 该发现为理解 HfO_2 基器件的氧调控机理提供了新视角, 并为优化其性能提供了可行策略.

目前, 氧化铪基铁电器件的可靠性机理及工艺优化问题已得到广泛研究, 降低功耗并实现后端工艺 (BEOL) 兼容是铪基铁电存储器走向实际应用的关键. 针对薄膜厚度缩放 (亚 5 nm) 与热预算降低情况下的性能调控与可靠性协同优化问题, 山东大学陈杰智团队的快报 “Temperature-dependent wakeup behavior in back-end-of-line compatible ultra-thin $\text{Hf}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_2$ ferroelectric film” 设计制备了厚度 4.6 nm、热预算 350°C 的 BEOL 兼容超薄 HZO 铁电电容器, 漏电流密度低至 $1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (@±0.5 V), 并详细研究了 70~400 K 宽温区范围内的唤醒行为, 全面揭示了 “低温环境下 HZO 铁电薄膜初始极化增强但唤醒行为受限” 的物理现象. 相较于已有研究报告, 该工作为超薄 HZO 器件的工艺优化和宽温高可靠性设计提供了新思路.

存算一体芯片为 AI 时代的计算需求提供了关键算力支撑, 其中铁电电容凭借零 IR 压降/漏电、高集成度及后端兼容性成为存算方案的理想候选. 但铁电器件非理想特性 (如开关比小、保持损耗、器件变化) 导致并行度低与稳定性差, 严重制约实际应用效能. 针对这一核心挑战, 西安电子科技大学杭州研究院韩根全团队的快报 “A parallel

computing-in-memory accelerator utilizing FeRAM array with retention loss correction”, 首次集成了带保持损失校正的高并行 FeRAM CIM 加速器芯片. 通过电荷复制抵消电路, 有效消除低开关比导致的偏移误差, 在保证计算精度的同时将阵列并行度推升至 256 列, 较最先进方案提升 15 倍. 独创保持损失校正方案, 在 10% 严重保持损耗下仍将推理精度提升 70%, 解决了系统长期稳定性瓶颈. 这项研究为突破铁电内存内计算系统的并行度限制并实现高可靠、高精度操作提供了核心解决方案.

基于非晶氧化物半导体的 2T0C DRAM 因其长数据保持时间及读写分离操作的低功耗特性被视为下一代 DRAM 的潜在候选者, 3D 堆叠的 2T0C DRAM 可进一步提升密度, 但面临尺寸微缩过程中的性能退化及阈值电压漂移等导致写入速度和数据保持时间的急剧退化. 北京大学吴燕庆团队的快报 “Scaled 3D-stacked 2T0C DRAM based on indium-tin-oxide transistors with long data retention and fast write speed of 10 ns” 成功制造出沟长微缩至 60 nm 的高性能 3D 堆叠 2T0C DRAM. 两层 ITO 晶体管均展现出高速驱动能力与低漏电特性. DRAM 存储节点电容可实现快速充电, 突破传统 3D 堆叠结构的速度瓶颈. 这一成果首次在亚百纳米沟长的非晶氧化物半导体 3D 堆叠 2T0C DRAM 中实现高速写入和长效数据保持, 证实了 ITO 晶体管在高密度 3D 集成 DRAM 中的巨大潜力.

以上是本期专题收录的全部文章, 衷心感谢所有为本专题撰稿的作者, 并诚挚感谢所有匿名审稿人对稿件及时且细致的评审工作.