中国科学: 信息科学 2023 年 第 53 卷 第 11 期: 2301–2302
SCIENTIA SINICA Informationis
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

刊讯

后摩尔时代新器件基础研究重大研究计划进展专题简介

黄如[1,2*], 郝跃[3*], 王润声[1*], 黎明[1*], 韩根全[3*]

1. 北京大学, 北京 100871
2. 东南大学, 南京 211189
3. 西安电子科技大学, 西安 710071
* 通信作者. E-mail: ruhuang@pku.edu.cn, yhao@xidian.edu.cn, wrs@pku.edu.cn, liming.ime@pku.edu.cn, gqhan@xidian.edu.cn

随着集成电路技术进入 “后摩尔定律时代”(简称后摩尔时代), 为了突破 “算力瓶颈”, 学术界与工业界认识到, 必须在底层的材料、工艺和器件, 顶层的系统、架构和电路, 以及共性的 EDA 等多个层面共同发力. 为了促进我国芯片研究水平的提升, 支撑我国在后摩尔时代的科技创新, 面向芯片自主发展的国家重大战略需求, 国家自然科学基金委员会于 2019 年立项, 资助了 “后摩尔时代新器件基础研究” 重大研究计划 (简称后摩尔重大计划), 执行期 8 年. 该计划以芯片的基础问题为核心, 旨在发展后摩尔时代新器件和计算架构, 突破芯片算力瓶颈.

后摩尔重大计划的具体目标包括: 面向未来芯片算力问题, 聚焦芯片领域发展前沿, 拟通过信息、数理、材料、工程、生命等多学科的交叉融合, 在超低能耗信息处理新机理、载流子近似弹道输运新机理、具有高迁移率与高态密度的新材料、高密度集成新方法、非冯计算新架构方面取得突破, 研制出 1 fJ 以下开关能耗的超低功耗器件和超越硅基 CMOS 载流子输运速度极限的高性能器件, 实现算力提升 2 个数量级以上的非冯架构芯片. 促进变革型基础器件、集成方法和计算架构的诞生, 培养一支有国际影响力的研究队伍, 提升我国在芯片领域的自主创新能力和国际地位.

目前后摩尔重大计划已经推进到了中期阶段, 产出了一系列成果. *SCIENCE CHINA Information Sciences*在 2023 年 66 卷第 10 期组织出版了 “后摩尔时代新器件基础研究重大研究计划进展专题”(Special Topic: Recent Progress of Fundamental Research on Post-Moore Novel Devices) 介绍该计划的部分成果, 专题收录了 10 篇文章, 包含评述 6 篇, 进展 3 篇, 研究论文 1 篇.

在后摩尔时代新器件及工艺研究方面, 共有 4 篇文章, 包括 2 篇铁电器件相关文章, 分别为: 面向先进集成电路应用的铪基铁电器件最新进展、基于非晶介质的金属 – 绝缘体 – 金属的类铁电特性, 1 篇 IGZO 晶体管相关文章, 为 IGZO 晶体管在高密度 2T0C 动态随机存取存储器应用领域的进展, 1 篇工艺相关文章, 为面向纳米线电子器件的三维一体化生长集成技术. 具体文章简介如下文所述.

殷华湘等的评述 “Recent progress of hafnium-oxide based ferroelectric devices for advanced circuit applications” 梳理了铪基铁电器件在面向先进电路应用中的基础材料问题及器件实现机制和电路实现方法与技术途径. 文章从 4 个方面进行论述: 氧化铪基薄膜材料铁电物理机制探究及特性优化, 氧化铪基铁电超陡开关器件模型及工艺集成, 氧化铪基铁电存内逻辑器件机制及电路实现, 氧化铪基铁电类脑智能计算电路构造及应用.

韩根全、刘艳等的研究论文 “Ferroelectric-like behaviors of metal-insulator-metal with amorphous di-

引用格式: 黄如, 郝跃, 王润声, 等. 后摩尔时代新器件基础研究重大研究计划进展专题简介. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 2301–2302, doi: 10.1360/SSI-2023-0306

© 2023《中国科学》杂志社

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSI-2023-0306

electrics" 基于非晶 ZrO2 介质系统地研究了 ZrO2 MIM 电容的类铁电特性与频率和温度的相关性, 并通过基于离子漂移 – 扩散模型的数值仿真计算, 论证了非晶铁电薄膜的类铁电特性来自可移动离子的迁移.

罗庆、 岳金山等的评述 "Recent Progress in InGaZnO FETs for high-density 2T0C DRAM applications" 梳理了 IGZO 晶体管在无电容动态随机存取存储器 (DRAM) 应用方面的最新进展. 文章较为全面地回顾了 IGZO FET 的机制、IGZO 晶体管的紧凑模型、IGZO 器件及工艺、IGZO 电路设计, 以及基于 IGZO 的存内计算和三维集成架构, 最后探讨了 IGZO 研究面临的挑战以及未来的发展趋势.

余林蔚、 胡瑞金等的评述 "Toward monolithic growth integration of nanowire electronics in 3D architecture: a review" 在总结集成电路前道工艺晶体管发展历程的基础上, 围绕纳米线催化生长技术, 从 VLS 和 IPSLS 等生长机制, 以及如何利用这些技术实现三维一体化集成应用这三个方面展开讨论和评述.

在后摩尔时代基于传统 CMOS 工艺的新架构方面, 共有 3 篇文章, 包括: 基于 SRAM 存内计算的宏单元和微架构研究进展、低功耗人工智能物联网芯片设计研究进展、通过 "感算共融" 架构打破智能感知应用的能量效率壁垒. 具体文章简介如下文所述.

杨军、司鑫等的评述 "From macro to microarchitecture: reviews and trends of SRAM-based compute-in-memory circuits" 阐述了基于 SRAM 存内计算的重要研究进展. 文章首先介绍了时域、电压/电流域、电荷域、数字域宏单元及其优劣势; 其次, 介绍了在 SRAM 存内计算设计中的挑战与权衡; 最后, 从宏单元和微架构两个层级总结了 SRAM 存内计算的发展前景.

黄如、叶乐等的进展文章 "Research progress on low-power artificial intelligent Internet of Things (AIoT) chip design" 介绍了智能物联网 (AIoT) 系统的研究挑战, 分别从系统架构、人工智能计算和数据采集电路的角度阐述了 AIoT 芯片的设计方法, 同时展示了团队 AIoT 芯片的研究进展.

乔飞等的进展文章 "Breaking the energy-efficiency barriers for smart sensing applications with 'sensing with computing' architectures" 总结了团队提出的 "感算共融" 架构及其用于智能感知应用的芯片设计, 该设计支持多模式感知信号处理以及多维扩展能力; 文章探讨了感知信号处理的模拟/混合信号电路设计和算法硬件代码设计方法, 并研究了新型传感器的多模式集成及其接口技术.

在后摩尔时代基于新器件的新架构研究方面, 共有 3 篇文章, 包括 2 篇忆阻器主题相关文章, 分别为: 忆阻器动力学赋能的类脑计算系统、基于忆阻器的存算一体芯片的架构 – 电路 – 工艺协同优化, 1 篇相变存储技术相关文章, 为基于相变存储器的高能效存内计算. 具体文章简介如下文所述.

黄如、杨玉超等的评述 "Memristive dynamics enabled neuromorphic computing systems" 回顾了忆阻器材料、器件、电路和系统的最新研究成果, 并分析、展望研究领域发展趋势, 为后续忆阻器与类脑智能计算系统的研究提供借鉴. 文章在总结多种忆阻器展现出的长/短时程可塑性、光敏阻值调控等动力学特性的基础上, 主要梳理了结合忆阻器的类脑计算系统设计相关的三方面内容, 包括: 基于忆阻器动力学特性的高效计算系统、基于新型忆阻器的感存算一体系统、面向忆阻器器件 – 电路跨层协同优化方法.

吴华强、高滨等的进展文章 "Architecture-circuit-technology co-optimization for resistive random access memory-based computation-in-memory chips" 介绍了团队在基于忆阻器的存算一体芯片的工作, 展示了基于忆阻器的存算一体系统的架构 – 电路 – 工艺协同优化方法、协同仿真器、存算一体编译器, 并进行了未来展望.

宋志棠、李喜等的评述 "In-memory computing based on phase change memory for high energy efficiency" 总结了相变存储技术在材料器件、电路芯片以及系统应用方面在存内计算领域的发展. 文章以团队研发的 C-GST 等出色相变材料体系的性能和机理为出发点, 详细介绍了百万级相变存储器集成芯片的多级存储、固有随机性、电导漂移等独特性能在存内计算领域的应用潜力; 对基于相变存储器的存内计算系统在人工智能领域的设计理念和研究成果进行了分类总结, 并对未来研究领域的趋势和潜在解决方案进行了展望.

以上为本期专题收录的全部文章, 衷心感谢为本专题撰稿的所有作者, 并向所有匿名审稿人给予的及时细致的评审工作致以诚挚的谢意.

https://engine.scichina.com/doi/10.1360/SSI-2023-0306