

史上最快存储速度,亚纳秒级闪存技术登Nature

集成电路与系统国家重点实验室、芯片与系统前沿技术研究院周鹏-刘春森团队研制“破晓(PoX)”皮秒闪存器件,其擦写速度可提升至亚1纳秒(400皮秒),相当于每秒可执行25亿次操作,是迄今为止世界上最快的半导体电荷存储技术。相关成果以《亚纳秒超注入闪存》(Subnanosecond flash memory enabled by 2D-enhanced hot-carrier injection)为题,4月16日在《自然》(Nature)期刊上发表

跑进亚纳秒级速度大关

如何突破信息存储速度极限,一直是集成电路领域最核心的基础性问题之一,也是制约AI算力上限的关键技术瓶颈。要实现大数据的高速存储,意味着与之匹配的存储器必须是在存储速度、能耗、容量上均表现优异的“六边形战士”。

然而,既有存储器的速度分级架构形如一座金字塔——位于塔上层的易失性存储器(如SRAM、DRAM)拥有纳秒级的高速存储,但其存储容量小、功耗大、制造成本高、断电后数据会丢失;而位于塔底的非易失性存储器(如闪存)则恰恰相反,虽克服了前者的种种劣势,但唯一的美中不足,便是百微秒级的存取速度不及前者十万分之一,遑论满足AI的计算需求。

既然闪存除了速度都是优点,有没有可能补齐它的速度短板?为此,周鹏-刘春森团队试

图重新定义存储的边界,找到一种“完美”的存储器。

作为闪存的基本存储单元,浮栅晶体管由源极、漏极和栅极所组成。当电子从源极顺着沟道“跑”向漏极的过程中,按下栅极这一“开关”,电子便可被拽入浮栅存储层,实现信息存储。但电子的“助跑”距离长、提速慢,令闪存存储速度无法突破注入极值点。

从存储器件的底层理论机制出发,团队提出一条全新的提速思路——通过结合二维狄拉克能带结构与弹道输运特性,调制二维沟道的高斯长度,从而实现沟道电荷向浮栅存储层的超注入。在超注入机制下,电子无需“助跑”就可以直接提至高速,而且可以无限注入,不再受注入极值点的限制。通过构建准二维泊松模型,团队成功在理论上预测了超注入现象,据此研制的皮秒闪存器件的擦写速度闯入亚1纳秒大关(400皮秒),相当于每秒可执行25亿次操作,性能超越同技术节点下世界最快的易失性存储SRAM技术。

该技术实现了存储、计算速度相当,在完成规模化集成后有望彻底颠覆现有的存储器架构。在该技术基础上,未来的个人电脑将不存在内存和外存的概念,无需分层存储,还能实现AI大模型的本地部署。

十年磨一剑的理论创新

给技术取名为“破晓”,寓意



周鹏-刘春森团队

打破既有存储速度分级架构,迎接一个全新的存储时代。朝着这一目标,团队聚焦闪存技术的速度问题,由浅入深研究长达十年。

2015年,复旦硕士在读的刘春森在导师周鹏指导下开展的第一项研究就是闪存器件。他们深知,面对高筑的技术壁垒,若想在闪存这一卡脖子领域取得重大突破,唯有另辟蹊径、持续创新。

2018年,团队利用多重二维材料构建二维半浮栅闪存结构,将存取速度提升至10纳秒量级,这是他们发表在纳米技术领域国际期刊Nature Nanotechnology上的第一篇闪存技术相关成果。不过,这项技术的器件结构仍较复杂,断电后,数据也只能保存十秒左右。

2021年,团队首次发现了双三角隧穿势垒超快电荷存储机

理,并研制出范德华异质结闪存,将存储速度提至20纳秒的同时确保了数据存储的非易失(数据保存可达10年),成果再登Nature Nanotechnology。

但这两项成果与团队期待的颠覆性创新仍有一定差距。时至今日,刘春森还时常会翻出1967年施敏博士(Simon Sze)和江大原(Dawon Kahng)在美国贝尔实验室提出浮栅晶体管概念所发表的论文,反复阅读这篇为闪存技术奠基的经典之作。

“60年过去了,如果还是沿着传统理论,或者靠换材料碰运气,很难做出颠覆性成果。我们一直在思考,能不能致敬前辈提出一个全新的闪存工作机制?”刘春森说。

团队决心从底层理论机制着手创新。2021年底,他们基于高

斯定理进行理论创新有了初步把握,最终在2024年构建起了准二维泊松模型,经过测试验证,迎来最终的“破晓”时刻。

推动原型器件集成落地

衔接起实验室成果与产业化需求,确保理论创新与应用转化能够“双腿并行”,是团队在研究中相互交织的两条主线。“如果不往下多挖一步,把原型器件做到集成,产业界也不会接手完成这一步。”刘春森认为。

针对2021年的理论成果,团队在2023年发表的论文中验证了修正后的理论在其他半导体材料的通用性,并在2024年实现了最大规模1Kb纳秒超快闪存阵列集成验证,成功研发出物理沟道尺寸8纳米的超快闪存器件。

依托这些前期完成的集成工作,此次研发的亚纳秒级原型器件得以向产业化落地加速推进。团队将“破晓”与CMOS结合,以此打造出的Kb级芯片目前已成功流片。

作为智能时代的核心基座,存储技术的速度边界拓宽或将引发应用场景指数级的革新,并成为我国在人工智能、云计算、通信工程等相关领域实现技术引领的“底气”之一。这场突破极限的挑战,未完待续。

论文链接:

<https://www.nature.com/articles/s41586-025-08839-w>

实习记者 王越
本报记者 殷梦昊

对外贸易及供应链波动指数发布

全球供应链研究中心团队4月14日发布《中国对外商品贸易及供应链波动指数》报告,从多个维度呈现了我国对外供应链波动的结构特征。该指数基于大规模数据的量化分析,力求较全面反映中国出口贸易与全球供应链的实时状态,为市场主体提供及时的数据支持与趋势判断。

团队基于约1800万条外贸和供应关系数据,构建了覆盖9个主要贸易伙伴和22类商品的波动指数。9个主要贸易伙伴根

据波动特征被划分为“发展型伙伴”、“动荡型伙伴”和“平稳型伙伴”。该指数体系具有三方面的特点:多维性,指数同时考察对外商品贸易与供应关系两个维度,通过贸易波动指数和供应关系波动指数的综合分析,衡量我国外向型供应链的整体变动情况;科学性,引入变点分析方法,能识别由外部重大事件或系统性变化引发的结构性波动,区别于由短期或偶发因素造成的一般性波动;灵活性,指数支持从

国家维度以及不同颗粒度的商品类别开展分析,适应多样化的监测和研判需求。

报告披露了22大类商品的贸易波动指数。在实际应用中,可根据需要实时监测特定子行业或细分品类的波动情况,为相关行业主管部门和企业决策提供更具针对性的信息支持。虽主要聚焦中国对外商品贸易的波动情况,但该指数体系也可根据需要拓展至其他国家为分析主体。

来源:管理学院

发现人工智能辅助安全高效阻燃剂

环境科学系方明亮教授团队以“Artificial Intelligence for the Discovery of Safe and Effective Flame Retardants”为题,在Environmental science & technology发表研究长文(Article)。

阻燃剂在保障消费品消防安全上至关重要,但传统卤化阻燃剂毒性强且持久,正逐步被淘汰。有机磷阻燃剂(OPFRs)因毒性较低、环境持久性弱,成为备受瞩目的替代品。然而,OPFRs的

毒性成分不可忽视。它们会通过多种途径进入环境,持续接触可能损害神经系统、内分泌系统等。为寻求新的安全有效有机磷阻燃剂,亟需建立高效的开发方法实现有机磷阻燃剂的阻燃和安全系统评估。

团队构建了包含128种OPFRs极限氧指数值等信息的数据集,定义了用于后续建模分析的关键参数和指标。综合考虑吸收性、降解性和毒性等因素,构建评

分系统,从多个维度评估化合物特性,优化筛选准确性。

开发阻燃预测模型,筛选有机磷阻燃剂,最终确定了6种候选化合物。经实验验证,化合物Z2表现出高阻燃性、易降解和低毒性的特点,有成为新型商业OPFR的潜力。

论文链接:

<https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.4c14787>

来源:环境科学系

在结晶动力学模型方面取得进展

物理学系/应用表面物理国家重点实验室谭鹏课题组与海外合作者展开深度合作,探究了强组分阻挫下的晶体生长模式。通过分析晶核的初始分布,对晶体生长动力学的初始行为建立了理论预测模型。相关研究以《Impact of impurities on crystal growth》为题,于4月15日在线发

表在《自然·物理》[Nat. Phys. (2025)]。

本研究揭示了高浓度杂质环境对晶体生长模式的影响,并为理解强组分阻挫下的结晶行为提供新视角。

论文链接: <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02870-4>

来源:物理学系

图片新闻

《卢卡奇著作集》译著首发



由马克思主义学院与中央编译出版社联合主办的“《卢卡奇著作集》第一批译著首发暨卢卡奇诞辰140周年学术研讨会”4月12日在我校举办。专家学者齐聚一堂庆祝译著出版,交流与探讨卢卡奇思想的深刻内涵及其当代价值。

来源:马克思主义学院