



他们手握“长缨”，开发首个二维-硅基混合架构芯片

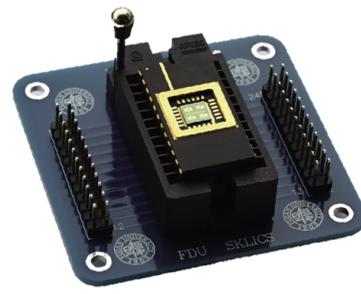
■本报见习记者 江庆龄

几个月前，复旦大学教授周鹏、研究员刘春森团队的研究论文在《自然》上线。团队研制的“破晓(PoX)”二维闪存原型器件，颠覆现有闪存技术路径，实现了400皮秒超高速非易失存储，是迄今最快的半导体电荷存储技术。

开心的同时，刘春森还牵挂着团队同步开展的另一项工作。他们提出二维-硅基混合架构“长缨(CY-01)”，通过将二维闪存器件直接融入成熟的互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺平台，加快这种新型器件的产业化。

彼时，《自然》编辑部已在回复邮件中给出意见：“您的稿件已被3位审稿人审阅，我们认为这项工作具有潜在研究价值，我们对此表示赞同。”

10月8日，这项上刘春森牵挂的研究在《自然》以“加速上线”的形式发表。《自然》同行评议称，该研究“有望引起商业公司高度关注”。



封装后的二维-硅基混合架构内存芯片。复旦大学供图

“从0到10”，面向未来

存储器是一个非常成熟的产业，人们早已习惯了易失性存储和非易失性存储两套系统共同工作的模式——前者以静态随机存取存储器(SRAM)、动态随机存取存储器(DRAM)为代表，操作速度快，但容量小、数据在断电后无法保存；后者以闪存为代表，容量大，无需电源即可保存数据，但运行速度较慢。

“过去几十年，国际上提出了多种新型存储技术路径，但始终没有颠覆现有存储芯片格局。”刘春森坦言，“以闪存为例，其结构简单，且运行稳定性高、价格便宜，很难被取代。”

突破现有存储技术困难重重，但这并未让周鹏和刘春森等科学家退缩。他们始终致力于开发能够满足未来人工智能(AI)应用需求的颠覆性存储技术。

刘春森解释：“AI大模型对数据存储有了读取速度快和高容量兼顾的需求，现有存储器无法满足此需求。可以说，存储器是制约AI发展的主要硬件瓶颈之一。”

过去10年间，团队聚焦二维超快闪存技术，从“0”起步，从底层物理原理出发，一步步向前迈进。2018年，他们报道了首个高速非易失闪存，2021年进一步发现辅助势垒隧穿增强机理，将读写速度提升至20纳秒的同时，确保了数据存储的非易失性。以上进展让他们意识到二维闪存器件有产业化价值，开始同步开展器件集成方面的研究。

“二维超快闪存技术是我们团队自主提出、国际上独一无二的技术路线，读写速度远超现有闪存技术。”刘春森说，“事实上，我们一直在深入研究二维超快闪存器件，在研究过程中，逐渐建立起向下游应用推进的信心。”

“从10到100”，拥抱产业

新型器件要想真正走向系统级应用，往往要经历一场漫长的马拉松。以集成电路发展为例，半导体晶体管诞生于1947年，之后历经美国贝尔实验室和一系列顶尖公司接力研发，才在24年后催生出全球第一个中央处理器(CPU)。

而对于一个专注于器件研发的团队而言，从基础研究到产业应用的“转型”更为不易。“颠覆性创新走向工程化应用，本质上是一条从‘0到10’的征途。而真正走向这条道路，离不开‘10到100’，即从未来应用的终点出发，倒推技术发展的正确路径。”周鹏表示。

顺着这个思路，团队意识到，二维闪存无需再走长达几十年的研发之路，完全可以“站在巨人的肩膀上”，缩短技术落地进程。

何不借助现有成熟硅基CMOS制造工艺这条“高速公路”，让二维存储器这一新型“交通工具”行驶得更快呢？由此，团队基于“长

缨”架构，攻克了新型二维信息器件工程化的关键难题，制备出全球首个二维-硅基混合架构芯片。测试结果显示，该新型存储芯片集成良率达94.3%，支持8比特指令操作、32比特高速并行操作与随机寻址。

其间，他们主要攻克了两大瓶颈问题。一方面，传统CMOS制造工艺与厚度达数百微米、具备金刚石结构的硅材料相适配，而二维材料厚度仅为1至3个原子，直接使用此工艺无疑会引入“材料损伤”。

团队针对性地研发了“原子芯片”系统集成方案。就像拼图高一样，他们通过模块化集成方案，将二维存储电路与成熟CMOS电路分离制造，最后与CMOS控制电路通过高密度单片互连技术实现完整芯片集成。

“这一集成的核心思路，是在时空上分割二维存储电路和CMOS电路的制造。”刘春森解释，“我们首先采用标准CMOS工艺制造CMOS控制电路，再利用支持原子尺度贴合的片上二维集成工艺进行二维电路的后续工艺集成，由此确保制造流程受到最小化影响。”

另一方面，二维存储器件的工作机制与标准CMOS不兼容。针对此问题，团队提出跨平台系统设计方法论，在二维存储电路和CMOS电路之间专门添加了“转译层”，并结合高密度单片互连技术，实现二维电路和CMOS电路软、硬件兼容性通信。

“由此，CMOS电路能够理解二维器件的工作模式，二维电路也能够理解从CMOS电路传递过来的控制信号。”刘春森说。

“从10到100”，拥抱产业

这项成果突破，离不开团队与工业界的深度合作。在项目开展之初，团队就决定只做擅长的，专注于二维存储器件部分，而芯片整体设计、控制和读出电路等则交由合作企业完成。

目前，团队正在着手建设中试线，预计未来3至5年内将完成器件量产，而芯片整体设计、控制和读出电路等则交由合作企业完成。目前，团队正在着手建设中试线，预计未来3至5年内将完成器件量产，而芯片整体设计、控制和读出电路等则交由合作企业完成。

届时，分级存储架构将被改变，一块存储芯片即可同时实现高读写速率、大容量及数据长期保存，有望将AI服务器部署在个人电脑甚至手机上，进一步推动AI应用和发展。此外，以垂直堆叠为特点的3D NAND闪存芯片制备工艺也有望实现颠覆性突破。

“以长缨为架构、硅基为内核的二维芯片是二维器件工程化里程碑，也为新一代颠覆性器件缩短应用化周期提供了范例。”周鹏说。

相关论文信息：
<http://doi.org/10.1038/41586-025-09621-8>

科学人生·光耀百年

卢佩章：我只是团队中的一个小兵

■本报记者 孙丹宁

1999年，一场由中共中央、国务院、中央军委共同举办的大会在京举行，目的是表彰为“两弹一星”事业作出卓越贡献的科技专家。

回忆起那段参与“两弹一星”研制工作的经历时，卢佩章言辞恳切地说：“我们只是小兵，绝对没有能力去制造原子弹，但我们有特长、能为原子能工业服务。要在国家重大项目中发挥关键作用，就要有一个坚强的集体。我只是集体中的一员，一个小兵，一个负责的小兵。”

自谦为“小兵”的卢佩章，是我国分析化学家、中国科学院院士。他研制出中国第一台气相色谱仪，攻克了腐蚀性气相色谱等多项国防分析技术难题，是中国色谱科学“从无到有”的奠基人。

而成绩背后，是他数十年如一日以国家需求为己任、勇攀科技高峰的决心。在他看来，中国科学家应该有一颗热爱祖国、热爱科学的心。“我不相信一个只追求个人名利的人，能在科学上作出更大贡献。”

10月7日是卢佩章的百岁诞辰。谨以此文，记述他那段始终与国家需要紧密相连、绚烂的“色谱人生”。

在色谱领域“摸着石头过河”

1925年10月7日，卢佩章出生于浙江杭州一个书香门第。他的父亲卢公恒早年曾留学日本。在家庭环境熏陶下，卢佩章自幼就立志献身科学、报效国家。

1938年，杭州沦陷，年仅13岁的卢佩章随家人辗转流亡至重庆。尽管生活颠沛流离，但他始终没有放弃对科学的向往，成功考入同济大学。

在大学期间，卢佩章不仅专注课堂学习，还活跃于各类学术社团，加入化学学会。1948年，卢佩章以优异的成绩毕业于同济大学化学系，并留校担任助教。

1949年，在新中国成立前夕，他作出了一个大胆的决定——奔赴正处于建设初期的东北，加入新成立的大连大学科学研究所(中国科学院大连化学物理研究所前身，以下简称大连化物所)。



卢佩章 大连化物所供图

起初，卢佩章的研究兴趣在催化领域，并取得初步成果。然而，面对国家建设的迫切需求，他毫不犹豫地转向了当时在中国还处于起步阶段的色谱研究领域。

彼时，很多人连“色谱”这个名字都未曾听过。卢佩章曾用通俗易懂的话解释道：“色谱，简单地说就是有颜色的谱带。比如，我们把胡萝卜汁倒进色谱柱中用溶剂冲洗，就会分出六七个有颜色的层带，每一层就是一种化合物。”

国家建设的紧迫需求与色谱技术的研究魅力，深深吸引了卢佩章。恰巧研究所将攻关目标定在新中国急需的石油产品上，卢佩章就承担了石油样品分析任务，向色谱技术发起挑战。

没有经验可循、没有系统资料，一切只能“摸着石头过河”。卢佩章一头扎进图书馆，广泛查阅国内外期刊，反复推演理论方法，在无数个日夜中默默探索。

1954年，正值我国第一个五年计划期间，卢佩章与团队成功研制出中国第一台气相色谱仪。这块在河道中摸到的“石头”让他们兴奋不已。这项突破将石油样品分析时长从30多个小时大幅缩短至1小时以内，且所需样品量仅为原来的千分之一，为新中

国石油工业发展提供了高效、精准的分析手段。很快，该色谱技术被全国多家石化企业推广应用，极大推动了石油化工行业的进步。

1956年，中国科学院学部委员会成立大会现场人声鼎沸。30多岁的卢佩章在大会上作了中国第一个气相色谱研究的学术报告，其成果后来被编入苏联学者撰写的色谱学专著，后被译成德文发表。

自此，卢佩章在色谱研究领域崭露头角。

为科学事业奉献的“勃勃雄心”

20世纪60年代初，在色谱研究工作得“风生水起”的卢佩章，再次响应国家号召，转向国防工业领域。对他而言，这并非首次——1953年抗美援朝期间，他就曾协助鞍钢焦化厂制取甲苯，为前线TNT炸药生产作出关键贡献。随后，卢佩章又接受高纯液氢及稀有气体制备任务，成功研制出新型105脱氧分子筛吸附剂，利用吸附浓缩净化方法制备了99.999%以上的超纯氢、氮、氩等气体，为火箭推进剂的研制作出巨大贡献。

而这一次，任务更为艰巨。卢佩章后来回忆：“当时国家推进‘两弹一星’工程，苏联专家撤走，原子弹研制陷入困境。”其中最棘手的难题之一是检测金属中痕量氙的含量。即便只有极微量，痕量氙也能够直接影响原子弹的引爆效果。

卢佩章迅速投身这一重大课题，指导团队完成了“六氟化铀生产中UF₆、F₂、HF、N₂组分”的分析方法与仪器研制，还研发出包括腐蚀性气相色谱在内的一系列国防分析技术与装备。这些成果有力支撑了国防急需，为我国第一颗原子弹的成功爆炸作出贡献。

随后，在“两弹一星”工程中，卢佩章带领团队主要负责浓缩铀及扩散分离过程中的气体分析这一核心技术项目，在10多年时间里，他几乎没有休息过。“卢佩章是当时课题组的负责人，我们的主心骨。”大连化物所研究员朱道乾回忆那段岁月，依旧十分感慨：“为取得高浓度氟气，我们当时3个人连续倒班一个多月，干得腿发软，吃的是大饼子加白菜萝卜，却能产生这么大的干劲儿。”

(下转第2版)



10月6日，2025中国大学生飞行器设计大赛在浙江湖州莫干山通用机场开赛。赛事涵盖固定翼、旋翼、火箭等多个类别，吸引了全国150余所高校的近4000名大学生同场竞技。

美国政府“停摆”对科学意味着什么

员中裁减30万人。

与此同时，联邦政府已停止非必要运作。科学机构的工作人员被遣返家中，相关研究暂停。美国国立卫生研究院(NIH)曾计划停止内部的基础研究，并暂停接收新患者。若停摆持续数日以上，将波及非政府机构研究人员——美国国家科学基金会(NSF)和美国环境保护署(EPA)都将停止拨款。

美国科学促进会政府关系主管 Joanne Padrón Carney 指出，政府停摆“可能对科研事业产生重大影响，具体影响很大程度上取决于停摆的时间长短”。

美国政府停摆多久尚不明确。特朗普首个任期(2017年至2021年)内曾出现长达35天的政府停摆，创下美国历史最长纪录，造成约50亿美元损失，并导致美国多数科研机构运作中断。

尽管许多科学家担忧政府停摆的影响，但包括部分联邦研究人员在内的一些人则认为，

这是国会阻挠特朗普团队行动的契机。9月29日，在华盛顿特区的一场公众抗议活动中，联邦雇员公开反对特朗普政府。“美国科学正在被摧毁。”NIH的神经科学家 Mark Histed 说，“国会拥有一个罕见的制衡机会来遏制特朗普的行政越权，必须挺身而出履行职责。”

目前，多家联邦机构均未透露有关潜在裁员的信息，但科学类机构的大量联邦雇员已处于无薪休假状态。

根据停摆前公布的计划，NSF 计划让约75%的员工休假。美国国家海洋和大气管理局预计将让54%的员工休假，暂停大部分科研活动。美国国家航空航天局83%的员工被迫休假，仅保留少量人员维持在轨卫星的运行。

在EPA，86%的员工将被强制休假。NIH的应急计划规定78%的员工休假，仅保留现有患者护理等关键职能。美国疾病控制与预防中心将让64%的员工休假。(文乐乐)

全新有机晶体管 有望实现高性能低功耗应用

本报讯 苏州大学教授张晓宏、揭建群等团队研制出一种全新有机薄膜隧穿晶体管，突破了低电压有机薄膜晶体管的性能瓶颈。该器件具有突破理论极限的亚阈值摆幅和创纪录的信号放大效率，并且功耗较目前报道的有机晶体管下降了一个数量级以上。日前，相关研究成果发表于《自然-电子》。

新一代柔性电子应用的需求对有机薄膜晶体管的性能及功耗提出了更高要求。然而，如何在低工作电压下保持有机薄膜晶体管的优异电学性能，一直是该领域的核心挑战之一。该难题主要归因于传统有机薄膜晶体管中将工作电流开关一个量级所需电压的大小，即器件亚阈值摆幅，其通常由于玻尔兹曼热电子发射理论的限制，导致室温下薄膜晶体管亚阈值摆幅无法低于60毫伏每个量级。

全新有机薄膜隧穿晶体管打破了玻尔兹曼热电子发射理论对亚阈值摆幅的限制。该器件通过深导带的n-型金属氧化物与p-型有机半导体形成的源-沟道异质结，构建出空穴带隧穿通道。同时，为尽可能避免该异质界面处缺陷

态的产生，器件在界面处引入高电离能的分子解耦层，有效缓解了费米能级钉扎效应，并大幅降低了隧穿注入势垒。研究团队进一步构筑了基于有机薄膜隧穿晶体管的放大电路，在仅0.8纳瓦的低功耗下实现了超过537的信号放大增益，并成功驱动肌腱、脉搏等人体微弱生理信号进行了实时放大与监测，显示出其在柔性可穿戴健康电子、人机交互等方面的应用潜力。

张晓宏表示，在材料体系拓展方面，未来可进一步探索n-型有机半导体，开发n-型有机隧道晶体管，有望构建全有机隧穿逻辑电路，填补有机电子在低功耗逻辑电路中应用中的空白。在应用场景方面，可拓展至生物医学信号，如脑电、肌电的高精度放大；环境微弱信号，如微量气体、弱光的高灵敏度探测；以及物联网终端的低功耗信号处理模块。同时，通过发展高性能器件集成工艺，推动器件与柔性基板、传感器阵列的一体化设计，有望加速高性能、低功耗有机电子系统的产业化进程。(温才妃)

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/41928-025-01462-7>

弯折可超2万次，锂电池研究取得新突破

本报讯(记者张楠)中国科学院金属研究所的科研团队近日在固态锂电池领域取得突破，为解决固态电池界面阻抗大、离子传输效率低的关键难题提供了新路径。相关研究成果发表于《先进材料》。

固态锂电池因高安全性和高能量密度，被视为下一代储能技术的重要发展方向。然而，传统固态电池中电极与电解质之间的固-固界面接触不良，导致离子传输阻力大、效率低，严重制约其实际应用。

研究人员利用聚合物分子的设计灵活性，在主链上同时引入具有离子传导功能的乙氧

基团和具备电化学活性的短硫链，制备出在分子尺度上实现界面一体化的新型材料。该材料不仅具备高离子传输能力，还能在不同电位区间实现离子传输与存储行为的可控切换。

科研人员介绍，基于该材料构建的一体化柔性电池表现出优异的抗弯折性能，可承受超2万次反复弯折。当其作为复合正极中的聚合物电解质使用时，复合正极能量密度提升至86%。该研究为发展高性能、高安全性固态电池提供了新的材料设计思路与研究范式。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1002/adma.202513365>



寰球眼

本报讯 因国会参议院未能在联邦政府资金耗尽前通过新的临时拨款法案，美国东部时间10月1日零时起，美国联邦政府时隔近7年再度“停摆”。据《自然》报道，截至10月8日，参议院依旧未能通过临时拨款法案。

过去10年间，美国政府停摆的威胁已成常态，但此次有所不同——美国总统特朗普鼓励在资金中断期间大规模解雇联邦雇员，其中包括数万名科学家。