



突破二维材料晶体管集成度瓶颈，“无极”来了

江庆龄

在复旦大学集成芯片与系统全国重点实验室的净化间里，身穿实验服的科研人员正向笔者展示手中的芯片。

复旦大学教授周鹏、研究员包文中联合团队突破了二维半导体电子学集成度瓶颈，完成了从材料到架构再到流片的全链条自主研发，成功研制出全球首款基于二维半导体材料的32位RISC-V架构微处理器。团队将之命名为“无极”(WUJI)，寓意从无到有、没有极限。

在32位输入指令的控制下，“无极”可以实现最大为42亿的数据间的加减运算，支持GB级数据存储和访问，以及最长达10亿条精简指令集的程序编写。

让晶体管“最终形态”走出实验室

“说起这项研究成果，要追溯到10年前。”包文中回忆道。2015年7月，包文中加入复旦大学微电子学院，一头扎进晶圆级二维半导体的可控生长及其实际应用研究中。

这一年，距离二维材料石墨烯的发现过去了11年，二硫化钼(MoS₂)等二维半导体材料也开始进入科学家的视野。

所谓二维(2D)，是指材料只在平面延展。厚度仅一到几个原子层，这一“超薄”特性使此类材料展现出非常独特的电子和光学性质，在纳米电子学、光电子学、柔性器件、传感器等领域具有潜在的应用价值。

MoS₂ 则是最热门的二维半导体材料之一，由于具有天然带隙且带隙类型可调节，其在晶体管和光电器件制造中独具优势。

包文中指出：“在纳米尺度下，硅材料并不是最好的沟道材料。面对摩尔定律逼近物理极限这一全球性挑战，二维半导体是目前国际公认的破局关键，可以认为是晶体管的‘最终形态’。”

然而，单个晶体管和能够使用的集成电路之间仍隔着万水千山。好比一位小提琴演奏家的独奏水平非常高，而几十个同样优秀的人组成一支交响乐团，需要排练

很长时间才能合奏出悦耳的曲子。倘若人数增加到上万人甚至上亿人，难度就呈指数级增长了。

因此，尽管 MoS₂ 做成的单个晶体管的“个人能力”已广受认可，但由于遭遇工艺精度与规模均匀性的协同良率控制等瓶颈，此前最高集成度仅停留在数百晶体管量级，始终未能跨越功能性微处理器的技术门槛。

“二维半导体材料到底能不能做成芯片，性能怎么样？我们就是想解答学术界和产业界的这个疑惑。”周鹏告诉笔者。

开辟芯片研制的新路

2021年，课题交到了复旦大学博士研究生敖明睿和周秀诚的手上。此前，团队已经在工艺生产上积累了丰富的经验，并利用化学气相沉积法，在工业界主流12英寸晶圆上实现了 MoS₂ 均匀和单层材料的快速生长。

所谓工欲善其事，必先利其器。工业界7纳米、2纳米级别的集成电路，离不开尖端的光刻机等设备。团队的目标是一个面向工业生产的集成电路系统，但所用大多为科研级别的仪器，在硬件不够给力的情况下，他们只能主动适应，不断从试错中积累经验。

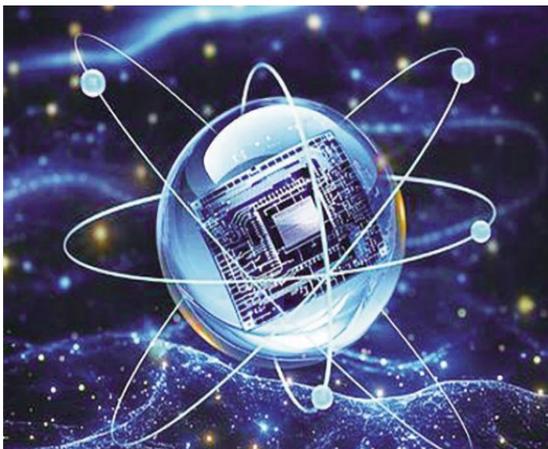
同时，二维半导体材料极薄的特点，给加工带来了极大的挑战。包文中用雕塑进行类比——如果说硅材料是一块大理石，可以用斧头和凿子把它雕刻成人像，二维半导体则是一块豆腐，轻轻一碰就会把人像的胳膊或腿破坏了，必须用特殊设备加工。

“二维半导体的生产工艺是环环相扣的，不仅前一个步骤会影响后一个步骤，后一个步骤也会影响前面的步骤。”包文中说。

这几年，敖明睿和周秀诚日复一日做实验，耐心打磨细节，一点点调参数、控制实验室环境、优化工艺步骤。

“我们曾在某一个步骤停了很长时间，最后分析才发现是前面某一个工艺有问题导致的。所以每完成一步工艺，我们都要做相应的测试，如果有问题就及时调整。”周秀诚补充道。

值得一提的是，结合团队以往积累的



研究艺术效果图
复旦大学

大量材料和工艺数据以及复旦大学在人工智能(AI)方面的布局，团队开发了AI驱动的一贯式协同工艺优化技术，通过“原子级界面精准调控+全流程AI算法优化”双引擎，实现了从材料生长到集成工艺的精准控制。“利用AI算法推荐的组合，我们能够更高效地在实验室里把芯片做出来。”包文中表示。

于是，在成员共同努力以及新技术的加持下，团队最终破解了二维材料一接触一栅介质一后道工艺的精确耦合调控难题，并利用原子级精度的加工和表征技术，验证了规模化的数字电路。

“这并不是一个颠覆性的整体变化。就像建造一栋办公楼，地基和主体都和原来一样，只是中间有几层被用作商场而不是办公室，需要专门设计。”包文中介绍，“无极”的集成工艺中有70%左右可直接沿用现有硅基产线成熟技术，其余核心的二维特色工艺，则结合了团队自主设计的专用工艺设备和体系，包含20余项工艺发明专利。

一个个测试数据都表明，“无极”的集成工艺优化和规模化电路程度，均达到国际同期最优水平。包文中自信地说：“我们利用国产半导体设备和开源RISC-V架构，不依赖先进的EUV光刻机，而是融合了自主研发的二维半导体全套集成工艺，为开辟一条我国全新的芯片自主研发之

路奠定了基础。”

二维半导体不会取代硅

“正如地铁出现以后，公交车依然有价值，二维半导体芯片和硅基芯片是互补的关系。”周鹏表示，“‘无极’采用微米级工艺，其功耗和纳米级芯片功耗相当，如果采用更好的光刻机设备，功耗将进一步降低，将来在对低功耗有更高要求的设备上更具优势。”

周鹏同时强调：“‘无极’只是概念验证原型，整体性能和目前的商用芯片仍存在一定距离，当前并不具备市场优势。”

目前，团队正为“无极”的转化落地努力。一方面，他们将进一步提升二维电子器件的性能和集成度，突破当前晶体管集成度瓶颈，使其在更多应用场景中具备更强的竞争力。另一方面，在产业化进程上，团队加强与现有硅基产线技术的结合，推动核心二维特色工艺的产业化应用，并与相关企业和合作机构合作，使其尽快在实际产品中发挥作用。

包文中表示，过去几十年间，集成电路的发展为二维半导体芯片的产业化发展积累了丰富经验。“有理由相信，二维半导体芯片性能可以在较短时间内追上硅基芯片，最终形成和硅基芯片长期共存、应用互补的局面。”

潮汐力显著影响地震波速变化

近日，中国科学技术大学教授姚华建团队通过对青藏高原东南缘安宁河断裂带区域的地震波速时间变化进行监测，发现潮汐力对断层破碎带的地震波速变化有显著影响。相关研究成果近日发表于《国家科学评论》。

通过监测断裂带的应力状态，科学家们希望揭示潜在的地震前兆，为防震减灾提供观测和理论依据。目前直接测量断裂带内的实际应力具有挑战性，而地震波速变化作为一个重要的地震学参数，能够反映断裂带应力状态的变化，因此波速时变监测成为一种重要的介质变化监测手段。

研究团队利用布设于青藏高原东南缘安宁河断裂带的密集地震台阵采集的连续噪声数据，通过地震干涉技术计算了安宁河断裂带区域地下介质的地震波速变化。结果显示，波速变化具有明显的日周期和半日周期特征，且在断层破碎带内这种周期性变化更为显著。此外，在去除环境因素后，断层破碎带内还呈现显著的月周期变化。研究人员将波速变化结果与理论潮汐应变进行比较，发现二者在日周期、半日周期和月周期成分上均表现出良好的相关性，这表明这种周期性变化主要受潮汐力影响。潮汐力通过引起地下介质中微小裂隙的周期性张开与闭合，进而影响地震波速变化。

该研究成功捕捉到潮汐力对断层破碎带结构的显著影响，为构建活动断裂带时变地球物理综合观测系统提供了重要手段。

王敏

新疆阿瓦提：140万亩棉花陆续开播



4月6日，在新疆阿克苏地区阿瓦提县三河镇琼库尔克乡艾肯棉田里，棉农驾驶播种机正在进行棉花播种作业。

包良廷

山西运城：高空组塔作业忙



4月3日，国网山西省电力运城供电公司组织施工人员在运城市平陆县张店镇开展组塔作业。平陆—夏县220千伏线路折单长度83.98千米，新建铁塔146基，途径平陆、夏县两个县5个乡镇。工程跨越中条山，采用两条单回路设计提高线路抗大风及覆冰能力，提升电网可靠性。

薛俊

四川内江：“创客空间”乐趣多



近日，四川省内江市东兴区外国语小学“创客空间”实验室，创客社团的学生正在操控无人机进行穿越障碍飞行。

兰自涛

苦苣苔科植物添新种

中国科学院华南植物园科研团队在粤北石灰岩地区发现并命名了一个苦苣苔科植物新种——南岭报春苣苔(*Primulina nanlingensis*)。该发现为南岭山地植物多样性宝库再添珍稀成员。

报春苣苔属是苦苣苔科植物，目前在中国超过220种，全球超过240种。我国南部至西南部的喀斯特地貌是报春苣苔属植物的多样性热点地区，其物种多为局限分布于孤立生境的特有种。其中，南岭山地复杂的地形与土壤异质性孕育了报春苣苔属高度的物种多样性和特有性。

2024年1月，中国科学院华南植物园研究员陈红锋团队与广东石门台国家级自然保护区高级工程师李远球等人开展调查时，发现一疑似报春苣苔属新种，随即采集标本和分子材料并引种回华南植物园开展进一步的形态学及物候学观察。他们通过对植物的形态解剖、标本比对和分子系统发育分析，确认其为新物种，并以发现地处于南岭山地核心位置而命名为南岭报春苣苔。

研究发现，南岭报春苣苔与多色报春苣苔(*P. versicolor*)和彭氏报春苣苔(*P. pengii*)较为相似。与多色报春苣苔相比，其叶片较大且边缘具较密的圆齿，单花序花量及总花序数较少，苞片卵状披针形并具浅锯齿，萼片每侧具1~3枚齿，花丝基部与顶端密被腺毛，雌蕊密被腺毛与短柔毛等；与彭氏报春苣苔不同，其花冠更长、花色呈淡黄色且苞片形态显著不同。分子系统学证据进一步支持其独立物种的系统发育位置。

南岭报春苣苔目前仅分布于广东石门台国家级自然保护区的两处石灰岩山体，种群规模较小。研究团队按照世界自然保护联盟标准评估其为近危，并建议加强栖息地保护。

朱汉斌



南岭报春苣苔形态
资料图

4.8亿年前“海底建筑师”以磷酸钙做骨



华南早奥陶纪层孔海绵礁复原图
资料图

近日，中国科学院南京地质古生物研究所(以下简称“南京古生物所”)早古生代研究团队等，在湖北省宜昌远安发现了4.8亿年前、迄今最古老的层孔海绵化石，因发现地及其微观结构与丝绸相似，将其命名为螺祖冠毛层孔海绵。

这一发现不仅将造礁的层孔海绵的化石记录提前了约2000万年，还揭示了早期礁生态系统和生物矿化演化的独特机制，为未来研究早期地球环境与生物相互作用提供了新方向。

发现最古老的层孔海绵化石

与一般的海绵动物不同，大部分古生代层孔海绵没有骨针，而是具有钙质骨骼，这是一个重要特征。在北美大陆，由层孔海绵形成的生物礁是非常重要的油气储层。

层孔海绵作为古生代奥陶纪—泥盆纪标志性的浅海造礁动物之一，与珊瑚的生态地位和地理分布颇为类似。它

们共同成为礁生态系统的“主力军”。然而，这些“海底建筑师”最早何时出现？它们如何进化出坚硬的骨骼，如何成为礁生态系统的重要组成部分，如何在全球范围内几乎同时分布，并为礁生态系统作出贡献？

论文第一作者、韩国高丽大学的全胄完在南京古生物所就读博士期间，在论文共同通讯作者、南京古生物所研究员张元动的建议下，前往宜昌进行野外考察，发现了这次报道的化石。

“宜昌地区早奥陶世生物礁研究已经相当深入，因此这是一个出乎意料”的发现。“全胄完向记者介绍了该化石名称的由来，“化石发现地附近有螺祖镇。中国传说中螺祖发明了养蚕和丝绸，这种层孔海绵的微观结构与丝绸有相似之处，所以用‘螺祖’命名。”

“时装秀”上不走寻常路

在刚发现“螺祖”化石时，全胄完花了很长时间才理解它。此后，他在博士毕业后与多位学者持续合作研究，获得了一系列发现。

他们认为，螺祖冠毛层孔海绵通过氟磷酸钙构建骨骼，在整个海绵类中是独一无二的。

张元动表示：“就像厨师尝试新菜谱一样，早期动物在进化过程中‘尝试’用不同材料构建骨骼。以往研究中的海绵化石骨骼构建，要么是碳酸钙，要么是硅。”

而“螺祖”海绵选择由一种主要成分为磷酸钙的磷酸盐矿物——氟磷酸钙构建骨骼，表明海绵动物在奥陶纪早

期就已具备使用硅、碳酸钙、磷酸钙这3种生物矿物质建造骨骼的能力和机制，展示了早期生物适应环境的多样性，为科学家理解生命演化提供了新视角。这一新发现突破了此前已知的两种海绵骨骼材料：硅质(如玻璃质地)和碳酸钙质(如贝壳质地)，让海绵成为首个掌握了“3种造骨技能”的动物类群。

化石记录前推约2000万年

早期层孔海绵骨骼中磷酸钙的存在，拓展了人类对早期动物生物矿化能力的理解。这表明早期海绵可能已具备多样化生物矿化策略所需的遗传能力。

研究团队认为，“螺祖”海绵可能代表了磷酸盐生物矿化的早期“实验品”，后来在海洋化学变化的背景下，被基于碳酸盐的海绵所取代。这一发现强调了环境因素在塑造生物演化过程中的重要性。

不仅如此，“螺祖”海绵还形成复杂的礁结构，在框架构建和结合钙微生物、石松海绵、瓶管石、棘皮动物等其他造礁生物组方面，发挥了关键作用。

这些早期层孔海绵所建造的礁结构的复杂性，堪比后来的礁生态系统。这一发现将造礁层孔海绵的化石记录前推约2000万年。

这项研究的意义不仅在于填补了层孔海绵早期演化历史的空白，还为理解早期动物的生物矿化过程提供了新视角。它揭示了地球历史上关键时期礁生态系统的复杂性，以及生物如何适应和改变环境。

张楠