

集微技术信息简报

2023 年第 **2** 期 (总第 53 期)

中国科学院文献情报中心

2023 年 3 月制

本期目录

政策计划

美国政府发布“芯片法案激励计划”安全护栏拟议规则.....	1
美国国务院宣布 CHIPS 法案“国际技术安全和创新基金”实施计划 ...	3
日本解除对韩出口半导体材料限制	4

产业洞察

美国发布《微电子和先进封装技术路线图》	6
IMEC 发布先进制程芯片缩放路线图	10
美国智库发布《中美半导体对峙：压力下的供应链》报告	13
兰德公司发布《促进量子科技研发的国际合作》报告	15
英国智库发布《软件定义防御：战争中的算法》报告	20

前沿研究

北京大学提出基于混沌光梳的并行激光雷达架构攻克了激光雷达抗干扰和高精度并行探测难题	25
瑞士洛桑联邦理工学院和 IBM 开发出新型铈酸锂快速调谐激光器	27
日本产业技术综合研究所制造出高耐热性 n 型 MoS ₂ 晶体管	28
南京大学和清华大学合作开发出基于铁电场效应晶体管和原子薄 MoS ₂ 的双工器件结构通道	29

产业动态

韩国初创企业 Rebellions 推出自研人工智能芯片 ATOM.....	31
美国量子计算机公司 SEEQC 推出超低温数字芯片.....	31
日本 DNP 公司开发出用于下一代半导体封装的玻璃芯基板	33
台积电向学界开放使用业界最成功的 16nm FinFET 技术.....	34
英伟达公司推出软件加速库 cuLitho 可将计算光刻用时提速 40 倍 ..	35

政策计划

美国政府发布“芯片法案激励计划”安全护栏 拟议规则

2023年3月21日，美国商务部发布了关于“芯片法案激励计划”中包含的安全护栏（Security Guardrails）的拟议规则通知¹。安全护栏旨在确保由“芯片与科学法案”资助的技术和创新不会被敌对国家用于针对美国或其盟友和合作伙伴的恶意目的。拟议规则提供了适用于“法案”中包含的激励计划的国家安全措施的细化限制条件，限制资金接受者投资于“受关注国家”（中国、俄罗斯、伊朗和朝鲜）的半导体制造扩张。

拟议规则将：（1）制定标准以限制在“受关注国家”的先进设施扩张：将重大交易定义为基于10万美元的货币水平，并将实质性扩张定义为将工厂的生产能力提高5%。（2）限制在“受关注国家”扩建和新建成熟制程设施：禁止接受者添加新生产线或将设施的生产能力扩大超过10%，并且规定只有这些设施的产出主要服务于“受关注国”国内市场（至少85%的产能必须最终由“受关注国”市场消耗）时，资助接受者才能建造新的成熟制程设施，且必须通知美商务部。（3）对美国国家安全至关重要的半导体归类：将一系列半导体归类为重要国家安全项目，这些芯片不被视为成熟制程芯片，将受到更严格的限制，包括用于量子计算、强辐射环境和特定军事用途的当前和成熟制程芯片。（4）加强对华出口管制：将出口管制与CHIPS法案安全护栏之间的存储芯片技术限值统一起来，对

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2023/03/commerce-department-outlines-proposed-national-security-guardrails>

逻辑芯片实施比出口管制更严格的限制。(5) 详细说明与有关外国实体联合研究和技术许可证发放工作的限制：联合研究指由两人或多人进行的任何研究和开发；技术许可指向另一方提供专利、商业秘密或专有技术的协议。除了法规中概述的外国实体外，拟议规则还增加了 **BIS** 实体清单、财政部的中国军工复合体企业(**NS-CMIC**)清单，以及联邦通信委员会 (**FCC**) 安全和可信通信网络法中列出的构成国家安全风险的设备和服务提供商清单。拟议规则还详细说明了引起国家安全担忧或对国家安全至关重要的技术、产品和半导体，这些物项与美国出口管制一致，并且是在与国防部和美国情报界磋商后制定。

另外，美国财政部和国家税务局当天也发布“芯片法案”投资税收抵免指南，为半导体或半导体制造设备的投资调动关键的税收激励措施¹。拟议规则定义了税收抵免的关键条款，即合格纳税人对制造半导体或半导体制造设备的设施投资的 25%，并且是设施运营的关键部分。这些设施必须是在芯片法案颁布后（2022年8月9日）开始建设，并在 2022 年 12 月 31 日之后投入使用。拟议规则还包括一项要求，即如果纳税人（或附属公司）在申请税收抵免的 10 年内从事了一项重大交易从而实质性扩大了纳税人在相关外国“受关注国家”的半导体制造能力，则通常会收回之前所有年份申请的税收抵免金额。拟议规则规定了构成关注的外国实体的属性，以及美国国税局将收回税收抵免金额的情况。

（执笔：沈湘 王丽）

¹ <https://home.treasury.gov/news/press-releases/jy1353>

美国国务院宣布 CHIPS 法案“国际技术安全和创新基金”实施计划

2023 年 3 月 14 日，美国国务院宣布 CHIPS 法案“国际技术安全和创新基金”实施计划¹。此前 2022 年《CHIPS 法案》规定，将向美国国务院提供 5 亿美元建立“国际技术安全与创新基金”

(International Technology Security and Innovation Fund, ITSI)，从 2023 财年开始五年内每年 1 亿美元，通过与盟友和合作伙伴的新计划和新举措，实现稳定和扩大全球半导体制造业能力、保障半导体供应链安全以及开发和部署安全可靠的信息和通信技术网络和服务的目标。

在半导体方面，包括美国在内的任何一个国家都无法生产或在岸生产半导体供应链的每一部分，美国的领导地位和强有力的国际合作对于维持稳定、可靠的半导体供应链至关重要，以确保半导体供应链的上下游组件足够多样化、有弹性和安全。

在安全可靠的电信网络方面，美国政府与世界各地的合作伙伴和盟友将基于“数字连接和网络安全伙伴关系 (DCCP)”展开合作。ITSI 基金将支持三方面工作流程的项目：(1) 与各国合作制定政策和监管框架，确保安全是信息和通信技术采购的核心决策因素；(2) 利用融资、投资等工具，促进私营部门对安全信通技术网络的投资，包括开放和可互操作的网络架构；(3) 努力提供网络安全工具和服务，以提高伙伴国家防御、管理、应对和从网络安全威胁中恢复的能力。

(执笔：沈湘 王丽)

¹ <https://www.state.gov/department-of-state-announces-plans-to-implement-the-chips-act-international-technology-security-and-innovation-fund/>

日本解除对韩出口半导体材料限制

2023年3月14-16日¹⁻²，日本经济产业省（Ministry of Economy, Trade and Industry, METI）和韩国产业通商资源部（Korean Ministry of Trade, Industry and Energy, MOTIE）举行日韩出口管制政策对话，是双方三年来首次关于出口管制的对话。日本 METI 表示其对韩国当局出口管制政策的有效性进行了审查包括出口管制机构的组织及运行，以及氟化氢、氟聚酰亚胺、光刻胶三种物项监管框架的实施情况，并认为韩国出口管制当局在这些方面进行了改善。因此，日本 METI 决定暂停对这三种物项（氟化氢、氟聚酰亚胺、光刻胶）实施出口管制措施，恢复到 2019 年 7 月以前的状态。韩国政府决定撤回为应对出口管制措施而推进的世界贸易组织（WTO）争端解决程序。

据此前报道³，2018 年 10 月，韩国大法院（最高法院）判令日本涉案企业赔偿二战时期被强征的韩籍劳工受害者。日本政府于 2019 年 7 月采取反制措施，限制对韩出口高纯度氟化氢、氟聚酰亚胺、光致抗蚀剂三种关键半导体材料，同年 8 月还将韩国踢出适用简化出口程序国家白名单。对此，韩国于 2019 年 9 月将日本对韩采取出口限制一事诉诸世界贸易组织，两国关系迅速恶化。

一位业内消息人士表示：“韩国各行业公司已通过国内开发和供应来源多元化对日本的半导体材料禁令做出回应，一些不可替代的设备、材料和组件已作为禁令特例从日本供应，这意味着禁令的解除不太可能对韩国的半导体产业带来显著的积极变化。”

尽管如此，此次韩日两国首领峰会及随后声明预计将促进两国

¹ https://www.meti.go.jp/english/press/2023/0316_001.html

²

http://english.motie.go.kr/en/pc/pressreleases/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=1227&bbs_cd_n=2¤tPage=1&search_key_n=&search_val_v=&cate_n=

³ <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=111105>

之间的更多经济合作，将共同加强供应链并加大对彼此的投资。

(执笔：于杰平 沈湘)

产业洞察

美国发布《微电子和先进封装技术路线图》

2023年3月1日，美国半导体研究联盟（Semiconductor Research Corporation, SRC）在美国商务部国家标准与技术研究院（NIST）资助下编制并发布《微电子和先进封装技术路线图》（以下简称“MAPT 路线图”）临时报告，从生态系统、系统架构和应用、系统集成和基础微电子四个层面，规划并梳理关键核心技术和培育专业队伍所需的步骤，以确保未来美国在设计、开发和制造异质集成系统级封装（SiP）方面的创新能力¹。MAPT 路线图以 2021 年版《半导体十年计划》和《异构集成路线图》为基础进行构建，提出了一个新的全面的 3D 半导体路线图，以指导即将到来的微电子革命。

MAPT 路线图仍在开发，临时报告旨在广泛征集公众意见以实现高质量的最终路线图。MAPT 路线图共包含 12 章。第一章为 MAPT 路线图报告概况，其余 11 章具体包括：

1. 可持续发展与能源效率。根据《半导体十年计划》，现阶段计算解决方案不可持续，随着计算需求的增加，计算的能源需求将超过市场上的可用能源。如果未来十年能源效率没有实现 1,000 倍的提高，2040 年后没有实现 1,000,000 倍的提高，计算将处于能源受限状态，不会增长，无法驱动新市场或刺激全球 GDP 增长。此外，由于全球半导体需求日益增长，以及美国《芯片法案》目标，预计未来几年美国的芯片制造将会增加。同时，从环境和人类健康的角度

¹ <https://srcmapt.org/chapter1/>

来看，芯片制造和先进封装所涉及的化学品、材料和工艺以及产品设计本身都必须尽可能可持续。**可持续发展与能源效率的跨领域需求包括：**（1）提高计算中的能源效率；（2）在半导体器件和系统的全生命周期中（如：设计、开发、制造、使用、产品使用寿命期后废弃管理）提高环境可持续性和效率；（3）随着社会需求的变化，可持续解决方案和系统创新所需的劳动力的发展。

2. 材料、衬底、供应链。本章聚焦微电子封装供应链生态的输入端，材料的来源、环境因素、成本等都会影响封装供应链的韧性和可持续性。MAPT 路线图旨在确定未来几代先进电子封装结构中将使用的材料和化学品，重点考虑因素包括：高可靠性材料、新工艺材料、电气性能材料、机械性能/工艺可操作性材料、热管理材料、可靠性/温度/湿度性能优越材料和环境可持续材料。

3. 设计、建模、测试和标准。本章涉及未来的设计自动化组合和行业标准开发。这些设计工具和标准将有效帮助芯片和系统设计者探索和优化不同设计领域以及性能、功耗/能源、面积/体积、保密性和安全性等指标，并将成为半导体行业的关键推动者。

4. 制造和工艺开发测量。本章涵盖了半导体材料和器件研究、开发和制造等各个方面的测量。“表征和计量”可离线、在线和线上使用，包括物理和电气测量的所有方面。“表征和计量”涵盖了从原子尺度到宏观尺度的测量。对新材料和新结构的探索是表征密集型的，而且随着工艺技术的日益成熟，晶圆厂内计量（in-fab metrology）的使用也在增加。本章描述了 MAPT 路线图所有领域的表征和计量，从材料和器件到先进封装和异构集成以及系统。

5. 安全和隐私。本章确定了新出现的安全和隐私挑战，并概述了解决这些挑战的方法。本章对整个技术堆栈进行了全面分析，但重点强调了对制造和封装技术的影响。本章是对 2019 年 IEEE 发布的《异构集成路线图》（Heterogeneous Integration Roadmap）安全章

节的补充。本章的主要主题包括：（1）异构集成中潜在的硬件安全漏洞；（2）确定 SiP 安全内容的可行策略，以及定义合理指标以评估安全弹性实施的可行策略；（3）针对特定应用的攻击预测和防御机制。

6. 劳动力发展。本章概述了未来十年 MAPT 领域劳动力的需求。美国上下一致认为，目前的人才库以及创建和支持美国国内 MAPT 劳动力的途径都远远达不到预期需求，并已成为关系美国经济和国家安全的关键点。目前，从技术认证师、专科学位操作员、维护工程师到硕士和博士工程师，MAPT 领域不同教育水平的工人在数量、知识、技能和能力方面都不足以满足未来的需求。本章内容主要包括：（1）微电子劳动力需求的预测/时间表；（2）全国“赢得人心”运动的路线图；（3）整个 MAPT 生态系统的整体、有效的劳动力发展框架。

7. 应用驱动因素和系统要求。本章描述了各种应用领域的影响及其对 MAPT 路线图所涵盖的关键使能技术方向的影响，并具体讨论了数据中心和高性能计算、移动通信和基础设施、边缘计算和物联网、汽车、生物应用和健康、安全和隐私、以及防御和恶劣环境等应用实例。每一个应用领域都将以不同方式发展，并需要领域特定的系统来实现更高水平性能。

8. 先进封装与异构集成。本章重点介绍了微电子芯片的先进封装和异构集成的各个方面。由于使用更精细的晶体管（低于 20nm）微缩芯片的成本优势正在减弱，因此有必要采用一种新方法，即将单个晶粒分解为更小芯粒（chiplet）并在适当的技术制程上进行经济有效地制造。为了通过芯粒和无源元件的异构集成实现功能“缩放”，封装必须从“芯片载体”过渡到“集成平台”。随着微电子行业朝着为每个应用定制更高性能、更低功耗的解决方案发展，芯粒数量将继续增加。下一代封装技术需要支持这种异构集成的爆炸

式增长，实现可以容纳极细间距 I/O 芯片和极细间距电路系统的互连。

9. 数字处理。本章重点介绍了已经渗透到现代社会各个方面的数字处理技术和基础设施。如今，产率问题、散热设计功耗（TDP）的实际限制、先进技术节点的高设计和制造成本对实现终端用户期望构成威胁。与此同时，人工智能/机器学习相关应用、高级认知需求、区块链等方面都要求处理不断增加的数据集，并执行越来越复杂的计算。单芯片封装解决方案不再适配数据密集型或高性能处理需求。此外，数据处理成本现在主要由将数据移动的能耗决定，包括在处理数据的微芯片内移动数据的能耗。将不同的未封装芯粒进行单片异构集成从而形成 SiP，已成为解决这些挑战的重要方案。

10. 模拟和混合信号处理。模拟和混合信号处理驱动着模拟硬件的新兴应用和趋势，本章概述了该领域的短期、中期和长期前景。模拟元件对于世界-机器接口、传感、感知、通信和推理系统，以及所有类型的电气系统的电力分配、输送和管理至关重要。模拟信号处理或“模拟边缘”处理有助于减少必要的数字处理数量。本章的主要主题包括：（1）模拟和混合信号电路及处理；（2）功率转换和管理；（3）智能传感接口；（4）射频到太赫兹器件、电路和系统。

11. 光子学和微机电系统（MEMS）。本章阐述了存储器、计算、传感、通信等所必需的重要配套技术。本章是对 2021 年荷兰 PhotonDelta 联盟和麻省理工学院微光子学研究中心发布的《国际集成光子学系统路线图》（Integrated Photonics System Roadmap – International, IPSR-I）的补充。本章的主要主题包括：（1）基于 MEMS 和光子学的传感器和执行器；（2）用于通信的集成光子学；（3）用于存储器和计算的光子 I/O；（4）材料和加工；（5）设计和建模支持。

（执笔：沈湘 王丽）

IMEC 发布半导体先进制程技术演进路线图

2023年2月2日，比利时微电子研究中心（IMEC）发布《芯片缩放路线图：更小、更好、更快》，揭示了IMEC未来15-20年半导体先进制程技术路线图的关键信息¹。该路线图指出，由于数字应用和数据处理的迅速兴起，计算能力需求呈爆炸式增长。随着人工智能越来越多地被应用于应对全球性挑战，例如气候变化或粮食短缺，从现在开始，计算需求量预计每六个月就会翻一番。为了以可持续的方式处理呈指数级增长的数据量，需要改进高性能半导体技术。为了实现这一目标，我们需要同时应对五个挑战。虽然世界上没有一家公司可以单独完成这一目标，但整个半导体生态系统的共同创新和协作将使摩尔定律得以延续。IMEC认为，从长远来看，半导体行业面临范式转变，冯诺依曼架构需要彻底改革。冯·诺依曼架构将数字计算机视为一个具有输入、中央处理器和输出的系统，但未来需要向特定领域和应用程序相关的架构发展，实现可与人脑的工作方式相媲美的大规模并行化²。

（一）延续摩尔定律需要应对的五个挑战

1. 缩放墙：纯光刻支持的缩放正在放缓。由于微芯片和晶体管的单个结构正在接近原子的大小，量子效应开始干扰微芯片的运行，缩放变得越来越困难。

2. 内存墙：系统性能面临内核和内存之间的数据路径限制。目前内存带宽已跟不上处理器性能。我们每秒有更多的浮点运算次数（FLOPS）而不是每秒千兆字节。

3. 功耗墙：为芯片供电和芯片散热变得越来越具有挑战性，因此必须开发改进的功率传输和冷却概念。

¹ <https://www.imec-int.com/en/articles/smaller-better-faster-imec-presents-chip-scaling-roadmap>

²

<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=b9754e9e4cbc9d28d784d22a723a6fd8&recommendId=119384&controlType=>

4. 可持续性墙：半导体设备的制造导致环境足迹不断增加，包括温室气体和水、自然资源和电力消耗。

5. 成本墙：显然，芯片制造成本可能会随着复杂性的增加以及设计和工艺开发成本的增加而激增。

（二）应对摩尔定律挑战的技术途径

IMEC 为芯片技术的未来提出了一条替代路径，在架构、材料、晶体管的新基本结构以及范式转变方面进行了根本性的改变。到 2036 年，IMEC 路线图将使半导体先进制程从 7nm 微缩到 0.2nm，并保持两到两年半的技术发展速度。

首先，光刻技术的不断进步将是进一步缩小尺寸的关键。EUV 把微芯片尺寸从 5nm 制程带到 2nm 制程。为了使制程变得更小，需要 EUV 的更新版本 High NA EUV，以及更大的镜头——直径为 1 米、精度为 20 皮米。由 ASML 开发的第一个 High NA EUV 原型将于 2023 年上市，预计在 2025 年或 2026 年投入大批量制造。

同时，需要创新晶体管架构。如今，几乎所有芯片制造商都使用 FinFET 晶体管制造微芯片。然而，进入 3nm 制程时，FinFET 受到的量子干扰导致微芯片运行中断。接下来是环栅晶体管（GAA）或纳米片晶体管，它将提升性能和改善短沟道效应。从 2nm 开始，这种架构将是必不可少的。三星、英特尔和台积电等主要芯片制造商已经宣布，他们将在 3nm 或 2nm 节点中引入 GAA 晶体管。forksheet 晶体管是 IMEC 的发明，在负通道和正通道之间引入屏障使通道更加靠近，甚至比 nanosheet 晶体管更密集，该架构有望使单元尺寸缩小 20%，并将 GAA 概念扩展到 1nm 一代。

通过将负通道和正通道相互叠加可以实现进一步的缩放，称为互补 FET(CFET)晶体管，是将不同导电沟道类型的 GAA 器件在垂直方向进行高密度三维单片集成。CFET 显著提高了密度，但以增加工艺复杂性为代价，尤其是晶体管的源极和漏极触点。随着时间推移，

CFET 晶体管将采用原子厚度的新型超薄二维单层材料，如二硫化钨（WS₂）或钼。二维器件路线图与光刻路线图相结合，将带领微芯片进入埃米（ångström）时代。

这些亚 2nm 晶体管的系统级产品还面临着另外两个挑战。内存带宽跟不上 CPU 性能。处理器的运行速度不能超过从内存中获取数据和指令的速度。要推倒这堵“内存墙”，内存必须离芯片更近。拆除内存墙的一种有趣方法是 3D 片上系统（3D SOC）集成，它超越了现在流行的小芯粒（chiplet）方法。按照这种异构集成方法，系统被划分为独立的芯片，这些芯片在三维空间中同时设计和互连。例如，它将允许在核心逻辑器件上为 level-1-Cash 堆叠一个静态随机存取存储器（Static Random-Access Memory, SRAM）内存层，从而实现内存与逻辑的快速交互。为了实现极高带宽的模块外连接，业界正在开发光互连、光子中介层（photonics interposers）集成技术。

至于与系统相关的挑战，芯片的足额供配电以及散热变得更加困难。然而，一个解决方案就在眼前：现在的配电从晶圆顶部经过十多个金属层到达晶体管。IMEC 目前正在研究从晶圆背面配电的解决方案，将电源轨沉入晶圆中，并使用更宽、电阻更小的纳米硅通孔将它们连接到晶圆背面。这种方法将功率传输网络与信号网络分离，提高整体功率传输性能，减少路由拥塞，并最终允许标准单元进一步高度缩放。

最后，半导体制造是有代价的，它需要大量的能源和水，并产生危险的废物。整个供应链需要致力于解决这个问题，而生态系统方法将是必不可少的。去年，IMEC 启动了“可持续半导体技术和系统（SSTS）”研究计划，汇集了半导体价值链的利益相关者——从亚马逊、苹果和微软等大型系统公司到 ASM、ASML、KURITA、SCREEN、和东京电子等供应商，目标是减少整个行业的碳足迹。该计划评估新技术对环境的影响，识别高影响问题，并在技术开发

的早期定义更环保的半导体制造解决方案。

(执笔：沈湘 王丽)

美国智库发布《中美半导体对峙：压力下的供应链》报告

2023年2月23日，美国智库大西洋理事会发布《中美半导体对峙：压力下的供应链》报告¹，指出美国持续升级对中国芯片产业的封锁背离全球化趋势，其通过“脱钩断链”阻遏中国芯片产业发展面临系列挑战。此外，报告重点剖析了世界半导体强国或地区在全球半导体供应链中的作用，以更清楚地了解各地政府和企业面临的挑战。

一、美国通过“脱钩断链”阻遏中国芯片产业发展面临系列挑战

对美国自身而言，一方面美国可能损害其本土公司的竞争力，尤其像高通、Qorvo、德州仪器、博通等严重依赖中国市场的半导体公司，这些公司大约一半的收入来自中国大陆；另一方面，如果美国对中国的半导体销售额降至零，美国半导体公司的收入将下降，美国就业岗位将流失，美国可用于半导体研发的收入也将下降，同时美国可能面临通货膨胀和供应链中断的风险。

在美国让其盟友跟随美国对中国实施同样制裁方面面临的挑战包括：（1）欧洲、日本、韩国的半导体公司深深依赖中国市场，它们很难舍弃这一重要收入来源，同时这些公司可以抢占美国公司舍弃的中国市场；（2）荷兰和日本将加入美国的行列，限制向中国销售先进半导体设备，这一成功进展经历了四个月的艰苦谈判，是否可以成为未来遏制中国技术发展的合作模式尚不清楚，相关协议内容尚未公布；（3）美国盟友对其设置贸易壁垒越来越不满，比如欧

¹ <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/issue-brief/united-states-china-semiconductor-standoff-a-supply-chain-under-stress/>

盟对美国签署《通胀削减法案》这一贸易保护主义行为进行批评。

二、世界半导体强国或地区在全球半导体供应链中的作用

（一）中国大陆

中国大陆是很多外国公司的半导体进口地和生产地，其半导体生产能力正在崛起，在全球芯片组装、封装和测试（APT）方面发挥着举足轻重的作用，在全球半导体供应链中扮演着核心角色。

目前美国对中国芯片产业的制裁措施可能损害多方企业的利益，例如，美国应用材料公司和泛林公司在中国大陆的销售额均超过30%，韩国三星公司在西安建有 NAND 闪存芯片厂、SK 海士力公司在无锡建有 DRAM 芯片厂，业务占比较大。

（二）中国台湾

中国台湾拥有领先半导体制造商台积电，世界上大部分最先进的芯片都由台积电生产。中国台湾半数以上的半导体产品销往中国大陆，美国对中国的出口管制使台积电对中国大陆的出口减半，随着美国对华出口管制趋严，台积电取消了更多与中国大陆的合同。除了台积电，中国台湾一些严重依赖中国大陆企业的半导体设计公司可能会受到更大的打击，同时许多在中国大陆企业工作的台湾籍工程师也受到美国对华制裁的影响。面对美国的威逼利诱，台积电在美国亚利桑那州建造晶圆厂，中国台湾加入“芯片四方联盟”。

（三）韩国

韩国是存储强国，将大约 60% 的芯片出口到中国大陆，对中国大陆的依赖更大。韩国公司更容易受到美国贸易制裁的影响，例如，SK 海士力公司一半的 DRAM 芯片生产来自无锡工厂，三星公司在西安的 NAND 芯片工厂供应全球 40% 的 NAND 芯片。韩国在加入“芯片四方”联盟过程中一直持谨慎态度。面对美国对华开启全面芯片制裁，SK 海士力公司表示可能考虑出售其在中国大陆的业务，而三星公司的长期打算更倾向于加强其在美国的影响力，目前其在美

国得克萨斯州已经拥有一个芯片工厂，同时正在建立一个新的工厂，未来 20 年内还将追加投资 2000 亿美元。

（四）日本和荷兰

日本和荷兰在全球供应链的部分关键环节占有垄断地位，例如日本东京电子公司生产先进芯片必不可少的光刻胶、尼康公司生产各种关键的光刻机零部件等，荷兰 ASML 公司是唯一一家制造极紫外（EUV）光刻机（每台成本约 2 亿美元）的公司。美国对华芯片制裁对这些公司都造成了不利影响，例如，东京电子公司下调了盈利预测值（正常情况下约四分之一的收入来自中国大陆），ASML 公司持有美国绿卡或美国籍的公民与现有中国客户的互动已受到限制。

（执笔：于杰平）

兰德公司发布《促进量子科技研发的国际合作》报告

2023 年 2 月 22 日，美国知名智库兰德公司发布《促进量子科技研发的国际合作》报告¹，概述了美国与其盟友及伙伴开展量子科技研发领域国际合作战略重要性，重点从人才流动、标准制定、供应链、出口管制、技术方法多样化五个方面进行论述。

量子技术的人才和关键零部件分布在全球，美国目前不具备在量子技术的各方面都领先全球的能力。强化量子科技的国际合作也是美国加强与盟友及伙伴合作关系举措的一部分。目前，美国已与日本、韩国、英国、澳大利亚、芬兰、瑞典、丹麦、瑞士、法国政府签署了量子科技合作的联合声明，美国、澳大利亚、印度、日本四方对话也宣布共同关注量子技术，澳大利亚、英国、美国签署国防技术合作协议中提出加速提升下一代量子技术能力。

¹ <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PEA1874-1.html>

（一）人才和研发资金的国际流动

如果没有国际研究人员，美国在量子科技领域的研究能力将明显被削弱。在美国，量子相关学科的大多数博士生都是外国学生，甚至大多数博士后也是外国的研究人员。据统计，量子领域 72% 的外国研究生（其中中国的研究生占 90%）毕业十年后仍留在美国。然而，据美国政府评估，即使有这些外国研究人员，美国量子科技领域的人才仍然短缺。人才流动不是单向的，很多美国研究人员也到其他国家学习并在返回美国之前获得了宝贵的技能。

在人才流动的同时，美国认为其他国家一直在努力获取美国的新兴技术知识产权，而量子科技是目标领域之一。为此，美国启动“保护科学”倡议，同时权衡在美国培养量子科技领域的国外人才的利弊，提出开放与适当保护相结合的人才战略。美国认为中国是对其知识产权构成最大威胁的国家，保护知识产权的措施需要在多大程度上针对中国是一个值得研究的问题。过去几年，美国已经采取措施专门针对中国，但以失败告终，让美国意识到在应对知识产权风险时仅关注单个国家不可行。鉴于美国量子技术研究的外国学生巨多，任何限制教授招收外国研究生的尝试都将面临来自学术界的巨大阻力。同时，大多数学术研究成果都是公开发表的，从这个方面着手保护知识产权的效果有限。相反，美国政府资助机构更加重视申请资助者披露其承担的其他资助项目，这将有助于政府监控知识产权流向，可能比实际执法更具效果。

量子研发资金和人才从美国流出和流入美国，以及美国政府资助友好国家的量子研究是加强美国与其他国家联系和促进专业知识交流的有效机制。此外，进一步加强美国与其他国家联系可以通过建立正式的双边研究人员交流机制，让美国量子科技领域的研究人员在其他国家的研究机构工作一段时间。

（二）标准制定

技术标准制定已成为地缘政治竞争的一个重要方面，美国越来越担心其竞争对手试图影响国际标准制定，尤其担心中国。近年来，中国积极参与新兴技术国际标准制定，例如 5G 通信领域，美国认为这将使中国企业在关键使能技术方面具有垄断地位，甚至可能会造成网络安全漏洞。大多数标准制定机构是由私营部门组成的联盟，政府决策者对它们的直接影响有限，例如政府没有权利禁止任何国家参与标准制定过程。目前，大多数量子技术尚未成熟到可以实现标准化的程度。但是，美国政策决策者应该提前规划标准化进程，特别是为中国或其他竞争对手尝试影响标准制定过程做好准备，并制定相应的应对策略。

量子传感、量子计算、量子通信都需要广泛的技术标准，但他们的标准制定过程尚不同步。量子传感器的用户有限可能降低互操作性标准的重要性。量子计算机需要广泛的输入输出格式标准和高级量子编程语言。开启量子传感器和计算机的标准化工作可能还为时过早。量子通信就其本质而言是电信系统，而所有的电信系统都依赖通用标准。量子密钥分发是除原子钟之外最成熟的量子技术，欧盟已宣布到 2029 年建立一个国际量子密钥分发网络，中国已部署世界上最大的量子密钥分发网络。虽然美国政府对量子密钥分发的实用性表示怀疑，但量子通信的应用终会出现，需要复杂的技术标准，欧盟和中国可以利用其在量子密钥分发网络部署方面的经验率先制定相关标准。量子通信领域的标准制定关乎美国国家利益，决策者需要努力解决这一挑战性问题。

美国希望通过后量子密码（post-quantum cryptography）应对量子计算机对现有密码学的威胁，这与量子密钥分发完全不同。后量子密码被认为能够抵抗量子计算对现有密码算法的攻击。与其他通信系统类似，后量子密码需要精确的技术标准，美国政府将遵循美国正在制定的后量子密码标准。美国国家标准与技术研究院（NIST）

计划 2024 年发布一套完整的后量子密码加密标准。NIST 的最终标准有望成为后量子密码加密的全球事实标准，但很多其他国际标准组织将需要制定相应标准以实施 NIST 的后量子密码加密标准。向后量子密码的全球过渡不是一蹴而就的，可能耗时几十年，并且需要与其他国家进行广泛协作。政策制定者需要在国际协作中发挥重要作用，尤其涉及到军事通信系统。为了向后量子密码过渡，国际协调应该在新算法被采用之前开始，美国政府应该将此作为高度优先事项和国际合作的具体行动。美国、英国、法国政府已经公开表示将采用后量子密码而不采用量子密钥分发以应对量子解密威胁，尤其在国家安全系统方面。但美国的其他盟国并没有明确表明关于采用后量子密码或量子密钥分发的立场，美国政策制定者可以考虑督促其盟国表明立场。

（三）供应链

提升供应链弹性已成为美国政府日益迫切的优先事项，随着量子技术越来越成熟，量子技术的供应链将成为一个越来越重要的政策问题。量子技术的供应链评估异常困难，例如，量子计算的不同物理实现路径所需的关键量子材料和零部件大不相同。量子技术的供应链复杂且变化迅速，虽然尚未发现美国在该领域依赖中国或俄罗斯，但美国从小公司采购相关量子材料和零部件，缺乏供应链监控和风险管理，无法排除美国已经严重依赖竞争对手的可能性。

美国独立建立量子技术供应链几乎不可能，政策制定者需要确定依赖盟国或合作伙伴的接受程度。理论上，多个国家可以通过谈判达成正式的自上而下的协议以维持各个国家在不同关键量子零部件方面的竞争力，但不可行。供应链协调国际论坛（类似“芯片四方联盟”）的模式更为可行，但仍然面临着严峻的内部挑战。此外，更可行的一种方法是美国政府确定量子技术领域的一些关键零部件，并通过小企业创新研究或小企业技术转移转化项目确保这些关键零

部件的本土生产能力。美国政策制定者也可以通过战略的引领作用加强量子技术供应链，例如 2018 年的国家量子倡议法案授权建立量子经济发展联盟（QED-C），目标之一就是建立稳健的美国量子技术供应链。未来，QED-C 有望成为美国与其友好国家非正式外交和产业合作的有效渠道，美国的一些盟国已经建立类似的国家量子技术产业联盟，它们可以共同发挥协调作用。

（四）出口管制

出口管制正在成为管理国际技术竞争的常用外国政策工具，美国在量子领域已经对中国和俄罗斯实施一些出口管制措施，例如 2020 年美国白宫将量子信息科学列入 20 项关键和新兴技术，2021 年美国商务部将中国的三家量子公司加入实体清单，2022 年美国财政部禁止向俄罗斯境内的任何人提供量子服务等。美国正在考虑扩大对中国量子计算的出口管制。

出口管制也可能失效或者起到适得其反的作用，量子技术的出口管制措施的制定更具挑战性。量子技术供应链存在高度的不确定性，而且许多量子技术仍处于科学研究阶段，出口管制可能会阻碍量子技术的进步。此外，目前许多成立的量子科技初创公司财务状况并不稳定，出口管制可能会进一步加剧它们的经济压力。

量子传感、量子计算和量子通信的出口管制差别较大，例如量子传感器的出口管制更有效，其国家安全应用更为明确，而量子计算机尚无实际应用，对其实施出口管制可能效力不明显。

政策制定者在考虑对量子技术实施出口管制需要考虑许多挑战性问题：（1）对量子技术的零部件还是集成系统实施出口管制？

（2）出口管制如何适用于远程云访问？（3）出口管制如何适用于实际居住在美国的外国国民？（4）出口管制应该是多边还是单边？

制定出口管制政策时应该考虑私营部门的利益，听取它们的声音。总之，在实施广泛的出口管制措施之前，政策制定者应该提出

明确的目标并解决上述挑战。出口管制目标不当可能会损害国际关系、阻碍全球科学进步。

（五）技术方法多样化

目前，量子技术的发展仍然处在高度不确定性的早期阶段，全面发展比聚焦单一的技术方法更为重要。美国决策者应继续广泛地支持量子领域多种技术方法的发展。当前，没有任何一个国家能够在像量子技术这样复杂的领域做到各方面都领先全球，其他国家在量子领域的某些方面领先美国不可避免。美国与中国和俄罗斯相比，具有一个由技术联盟和合作伙伴组成的庞大网络，应该充分利用这一优势。随着量子技术的发展，美国政策决策者应该系统地跟踪主要候选技术方法和拥有某些最先进技术的国家。如果发现在某些关键技术方面，尤其是对国家安全和国家经济至关重要的关键技术，没有任何一个盟国处于领先优势，那么美国政策制定者需要考虑采取行动重点投资这类技术的本土研发能力。

美国与盟友和合作伙伴共享信息比正式的投资协调更易实现，同样具有效果，具体可以通过定期召开全球会议或者各个国家定期对其量子技术研发能力进行内部评估并共享。

技术方法多样化对于处于基础研究阶段的早期技术至关重要，同时由于国家政府通常是基础研究的主要资助者，他们对这些早期技术的状况比较成熟的技术有更好的认识。此外，政策制定者应该鼓励政府内部的技术专家更多参与国际学术和行业会议，促进他们对科学的理解，同时提高他们对其他国家技术发展现状的认识。

（执笔：于杰平 王丽）

英国智库发布《软件定义防御：战争中的算法》报告

2023年2月17日，英国智库国际战略研究所（IISS）发布《软

件定义防御：战争中的算法》报告¹。报告首先阐述了软件定义防御的概念基础，然后评估了国防软件和人工智能/机器学习（AI/ML）开发过程中的实践和流程并确定了反复出现的挑战，最后还分析了美国、中国、法国、德国以及英国在国防软件和 AI/ML 开发和采用方面的进展以及中美战略竞争。

一、软件定义防御的概念基础

报告将“软件定义防御”概念化为现代防御战略的广泛架构、组织和操作原则，具有以下四个特征：（1）产生军事优势的硬件和软件之间不断变化的关系；（2）以数据为中心的架构和部队；（3）软件作为模块化武器和网络设计的核心；（4）由人定义和以人为中心的设计方法。所有这些特征都强调了速度，尤其是开发速度和部署速度。

二、美、中、法、德、英的国家举措

1. 美国。在过去十年中，物联网革命和中国战略角色演变加速了美国防部对软件技术潜力的认识，同时意识到开发传统硬件系统和 AI 软件等先进通用技术组合的必要性。在此背景下，美国行政部门的国家安全官员和国会的立法者正在调整各自的战略以实现网络现代化。美国军方通过识别、采用和整合关键和新兴技术，更广泛地增强国家安全和经济竞争力。包括网络、自主系统、网络通信、增强现实和虚拟现实在内的大部分技术是基于软件的，而生物技术、超高音速、量子科学和微电子学等其他技术则需要特定的软件功能（如 AI）才能成熟。在军事背景下，美国防部通过孵化和转化这些技术而受益，并意识到最终的成功“不再属于首先开发新技术的国家，而是属于更好地整合新技术并适应其作战方式的国家”。为此，美国防部正在开发基于软件、软件定义硬件和对传统硬件平台进行

¹ <https://www.iiss.org/blogs/research-paper/2023/02/software-defined-defence>

软件增强的新作战概念。

2. 中国。在习近平总书记的领导下，中国旨在成为新兴和颠覆性技术的领导者，这也是中国从制造业中心向技术强国转型的战略内容。这项战略工作具有军事和民用双重意义，中国认为人工智能（AI）和机器学习（ML）是推动经济增长和国家竞争力的核心，计划到 2035 年全面建成现代化军队作战能力、到 2049 年全面建成世界一流军队。在军事上，中国政府已指示中国人民解放军在 2020-2049 年间发展成为一支信息化和智能化的军队，这将需要在军队组织和军事力量中整合数字化、信息化和智能技术。为此，中国政府发布了国家战略，并支持公共和私营部门的国家投资。通过国家级的军民融合战略，中国政府促进民用和军事工业之间的联系，旨在创造两类工业的协同效应，从而共同推动国家经济和军事发展。

3. 英国。在英国国防机构内部，坚信未来的战场优势将不再取决于卓越的硬件能力，而取决于人员、硬件和软件的结合；人员和硬件仍将是作战的工具，但软件将允许以适配的速度安全地处理、分析和利用数据。软件和数据有望为英国军队和决策者提供决策优势。军事软件和硬件的组合部署有望恢复英国武装部队丧失的规模和机动性。在防御俄罗斯和中国的战场上，算法作甚至可能提供不对称优势。

4. 法国。2019 年 9 月，法国成为第一个发布国防 AI 战略的欧洲国家，优先考虑数据和新技术（尤其是 AI 和量子）对未来战争的重要性。该战略明确规定了数据与 AI 之间的联系，建立了国防数据治理的新框架，并确定了 AI 用例的优先领域：在规划和执行中的决策支持、协同作战、网络防御和影响、物流、作战准备和支持、情报、机器人和自主性以及管理和健康。虽然具体的技术本身并不是目的，但法国武装部队寻求使用人工智能来“确保武装部队的决策过程具有必要的作战优势，使他们在面对多种类型的对手时占据上风”。

5. 德国。2018年，德国时任国防部长乌尔苏拉·冯德莱恩承认：“每一场“战役”，无论是陆上、海上还是空中，都同时是一场“信息力量”的争夺战。这就是为什么像德国联邦国防军这样的武装部队需要他们自己的网络和软件，既能发挥作用又具有弹性”。德国政要和军事精英普遍接受联邦政府和武装部队数字化的必要性以充分利用新兴和颠覆性技术。

三、研究结论

1. 用于开发和部署高级国防软件和 AI/ML 的流程仍然嵌入在几十年前的硬件驱动的瀑布开发模型中。在分析的五个国家/地区中，使用敏捷、迭代和 DevSecOps 框架的努力都处于初期阶段。由于架构、组织和运营方面等原因，正在进行的相关举措缓慢而繁琐。大多数先进的国防软件都嵌入在定制硬件中，需要进行修改才能添加新的软件功能并提高性能，而国防工业缺乏支持性的数字化基础设施和足够熟练的操作员。

2. 在软件定义防御实施方面，美国和中国领先于法国、德国和英国。英国和法国在武装部队数字化以及采用 AI 等先进技术来获得作战和信息优势方面树立了宏伟的目标；相比之下德国较为落后。随着中国在 AI/ML 和其他数字先进技术方面的努力和进展，美西方在软件定义防御方面的竞争优势正在削弱。

3. 软件定义防御的跨大西洋差距已经出现。与欧洲相比，美国在软件定义防御的技术、资金、规划、实验和理论方面更为先进，但是美国在国防领域采用 AI/ML 的挑战越来越大。从中期来看，软件定义防御的跨大西洋差距可能会被弥合，互操作性挑战也会得到缓解。这需要欧洲更大胆地拥抱敏捷、迭代的国防软件和 AI 解决方案，加速国防数字化，巩固国防开支和国防软件投资，并加速军事能力发展进程。

4. 中美战略竞争是当代国际体系的显著特征。中美战略竞争的

集微技术信息简报

加剧正在加速中美两国向软件定义防御的转变，AI/ML 领域的技术竞争牢牢占据了这场战略竞争的核心，在国防和更广泛的地缘经济问题上塑造了联盟结构和战略选择。

（执笔：沈湘 王丽）

前沿研究

北京大学提出基于混沌光梳的并行激光雷达架构攻克了激光雷达抗干扰和高精度并行探测难题

随着高级别自动驾驶的日益普及，确保行驶舒适安全的核心器件激光雷达在过去几年中取得了显著进步。高性能、小体积、低成本、低功耗、高安全的激光雷达是未来厂商竞相追逐的方向。

只有在宽视场和高成像分辨率下实时更新周围环境的三维信息，才能实现安全可靠的无人驾驶。为了实现这一目标，激光雷达的一个主要发展路线是并行化，通过同时进行多通道测量，仅需 1D 扫描即可实现 3D 成像，从而大幅提高捕获率和角度分辨率。此外，并行化还可以减轻对光束操纵机构的依赖。商用激光雷达目前可携带多达 128 个通道进行并行探测。然而，以前开发的并行激光雷达在信道拥塞方面都面临着严峻的挑战，光信道在时域或频域上的重叠致使很难区分有效回波信号和干扰。

北京大学研究团队研制出一种全新的硅基片上多通道混沌光源，提出了一种基于混沌光梳的并行激光雷达架构，攻克了激光雷达抗干扰和高精度并行探测这两个难题¹。

¹ Ruixuan Chen, Haowen Shu, Bitao Shen, et al. Breaking the temporal and frequency congestion of LiDAR by parallel chaos[J]. Nature Photonics, 2023. <https://www.nature.com/articles/s41566-023-01158-4>

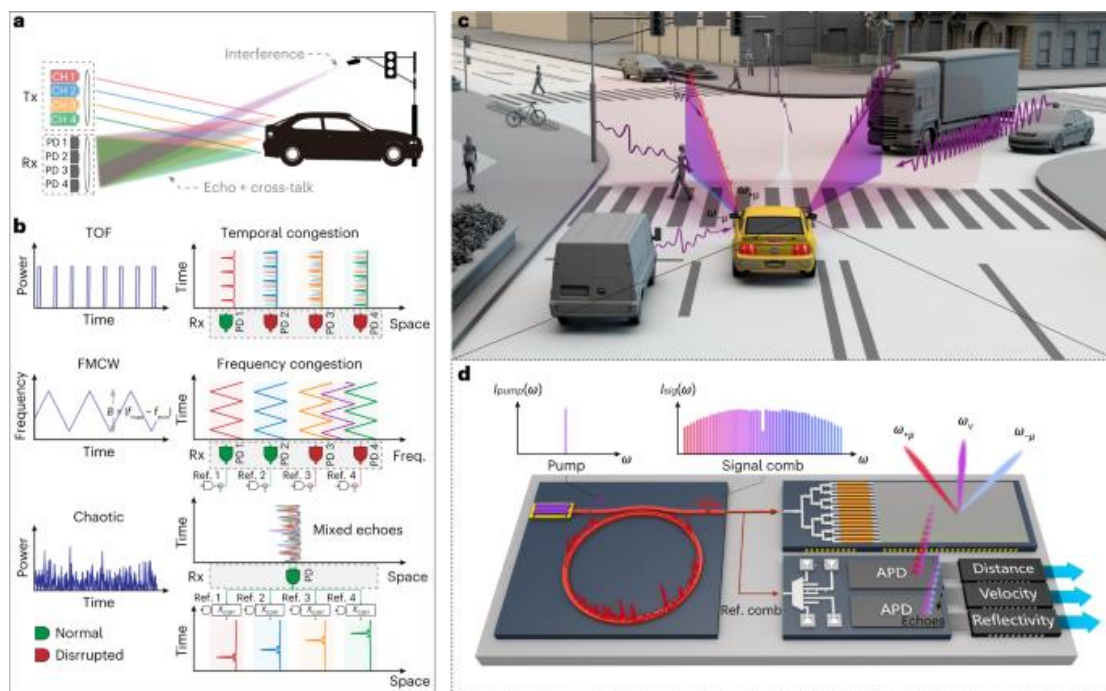


图 1 集成并行混沌激光雷达系统架构

研究团队通过集成微腔光梳的调制不稳定状态产生天然的多通道随机调制信号，其信号混沌带宽可超过 7GHz，且光梳的调制不稳定态在 18GHz 的失谐范围内展现出了良好的鲁棒性，能够应对外部泵浦光源的频率抖动¹。同时，材料的高非线性系数使产生的调制不稳定光梳的阈值功率相比其他材料平台低 1—2 个数量级，能够与片上 DFB 激光器共集成。在此基础上，研究团队搭建了并行激光雷达演示系统并对实物目标进行了高精度三维成像，验证了 10 通道规模的单像素成像，证明了各通道间良好的正交隔离性。此外，研究团队还对接收信号在不同信号干扰混叠下的抗噪功率抑制比进行了测试，实测可得在 3dB 阈值判据和 12.5 μ m 积分时间下，单路信号的功率动态范围接近 60dB，对调频连续波信号的抗噪功率抑制比接近 30dB，对自身随机调制信号的抗噪功率抑制比可达 22dB，展现出了良好的有源抗干扰能力。

(执笔：沈湘)

¹ <https://ele.pku.edu.cn/info/1012/2460.htm>

瑞士洛桑联邦理工学院和 IBM 开发出新型铌酸锂快速调谐激光器

铌酸锂 (LiNbO_3) 是一种用于电光器件的材料，非常有吸引力，已经被广泛研究了几十年。绝缘体上薄膜 LiNbO_3 的早期工作和最新进展已经实现了低损耗光子集成电路、良好半波电压的调制器、电光频率梳和片上电光器件，应用范围涉及微波光子学和微波光量子学。尽管近期进展已经证明了基于 LiNbO_3 的可调谐集成激光器，但其在频率捷变、窄线宽集成激光器方面的潜力尚未完全挖掘。

瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 和 IBM 的研究团队报道了一种基于混合氮化硅-铌酸锂 (Si_3N_4 - LiNbO_3) 光子平台的快速调谐激光器，并演示了其在激光测距中的应用¹。该研究团队在 EPFL 制造了基于氮化硅的光子集成电路，然后在 IBM 将其与铌酸锂晶圆结合。

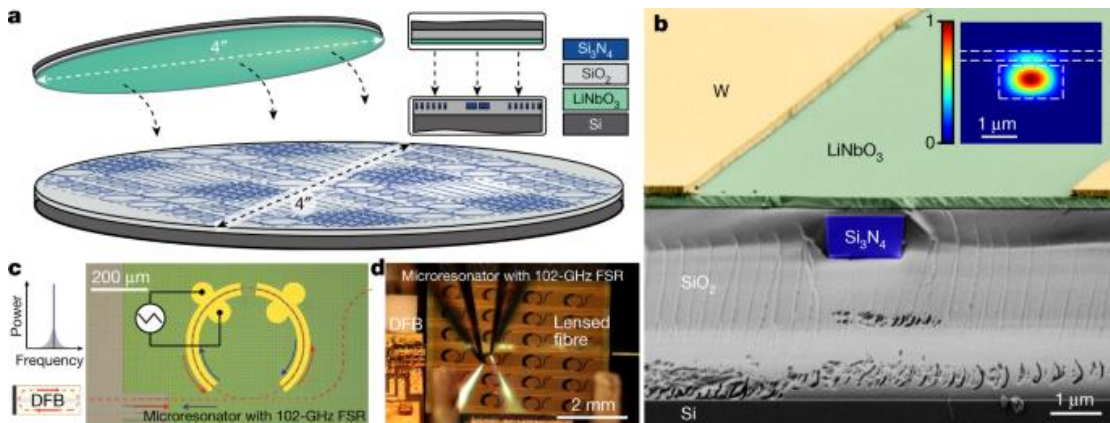


图 1 基于氮化硅-铌酸锂 (Si_3N_4 - LiNbO_3) 异构集成光子平台的快速调谐激光器

该光子平台基于超低损耗 Si_3N_4 光子集成电路与薄膜 LiNbO_3 的异质集成，通过晶圆级直接键合，与之前演示的小芯粒 (chiplet) 级集成相比，具有 8.5 分贝/米的低传播损耗，通过自注入锁定激光二极管实现窄线宽激光发射 (固有线宽为 3 千赫)。谐振器的混合模

¹ Viacheslav Snigirev, Annina Riedhauser, Grigory Lihachev, et al. Ultrafast tunable lasers using lithium niobate integrated photonics[J]. Nature, 2023, 615:411-417. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-05724-2>

式允许电光激光器以 12×10^{15} 赫兹/秒的速度进行电光激光频率调谐，具有高线性度和低迟滞的同时保留窄线宽。

该研究将 Si_3N_4 光子集成电路与 LiNbO_3 结合在一起，创造了一个将薄膜 LiNbO_3 与 Si_3N_4 两者的独特优势相结合的平台，显示出精密的光刻控制、成熟的制造工艺和超低损耗。

(执笔：沈湘)

日本产业技术综合研究所制造出高耐热性 n 型 MoS_2 晶体管

具有二维晶体结构的过渡金属二硫化物 (TMDC) 材料，由于其在原子级薄沟道的高载流子迁移率，在纳米电子器件中显示出巨大的潜力，作为下一代晶体管沟道的半导体材料受到关注¹。然而，由于 TMDC 和金属之间的费米能级钉扎效应 (Fermi-level pinning)，源极/漏极与 TMDC 沟道之间的高接触电阻阻碍了晶体管性能的提升，进一步影响了 TMDC 在超大规模集成电路 (VLSI) 领域的应用。

2023 年 2 月，日本产业技术综合研究所与东京都立大学通过使用超大规模集成电路兼容的物理气相沉积和退火工艺在单层 MoS_2 上热诱导结晶层状 Sb_2Te_3 电极来制造原子排列的范德华 (vdW) 结，成功在二硫化钼 (MoS_2) 上形成了高热稳定性的层状材料三碲化二锑 (Sb_2Te_3)， 450°C 退火后未观察到 $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{MoS}_2$ 界面的混合或 Sb_2Te_3 的结晶度退化，由此制造的 n 型 MoS_2 晶体管具有足够的耐热性以承受半导体制造过程²。

¹ https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230210/pr20230210.html

² Wen Hsin Chang, Shogo Hatayama, Yuta Saito, et al. $\text{Sb}_2\text{Te}_3/\text{MoS}_2$ Van der Waals Junctions with High Thermal Stability and Low Contact Resistance[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2023. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/aelm.202201091>

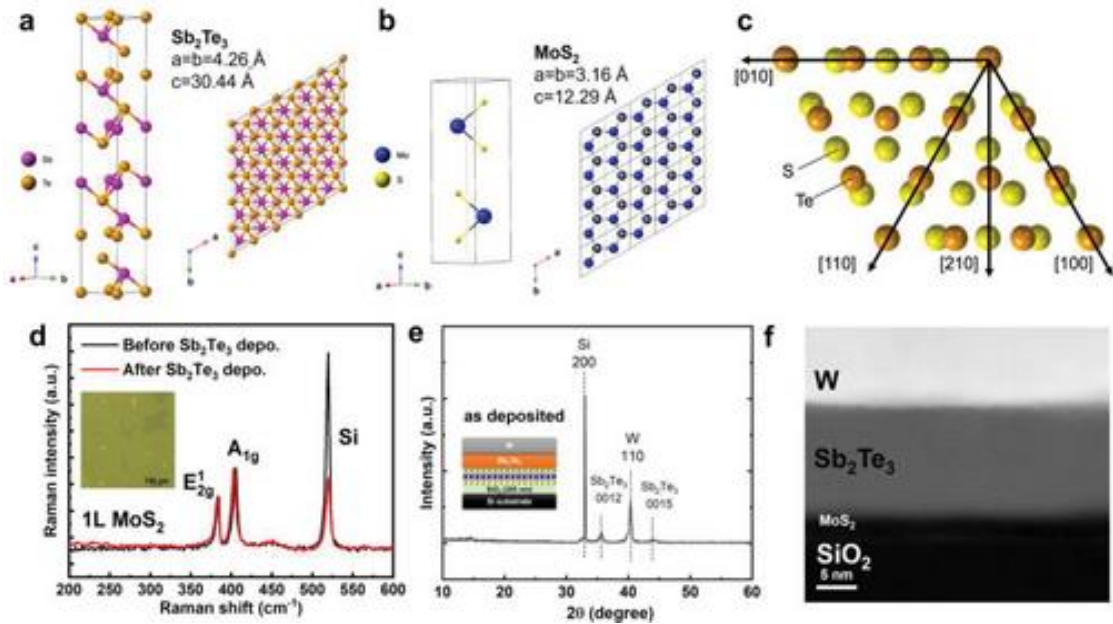


图 1 Sb_2Te_3 和 MoS_2 晶体结构的表征

该技术进展有望根本性解决 MoS_2 晶体管的高接触电阻的问题，有力推动了高性能二维材料晶体管作为下一代逻辑半导体的发展进程。

(执笔：沈湘)

南京大学和清华大学合作开发出基于铁电场效应晶体管 和原子薄 MoS_2 的双工器件结构通道

现代人工智能 (AI) 依靠中央云来处理边缘设备生成的数据，但这种云边缘分离模型并不节能。开发具有训练和推理合一 (Training-Inference-In-One, THO) 架构的原位机器学习硬件是边缘智能的最终目标。THO 提供了数据安全性、实时处理和带宽的优势，但由于边缘资源有限，它需要极高的能源和面积效率。最近，基于非易失性存储器 (NVM) 的内存计算已成为边缘智能有前途的解决方案。然而，使用单个 NVM 技术同时执行训练和推理一直具有挑战性，因为大多数 NVM 缺乏较大的内存可调性属性，从而阻止了同时满足训练和推理要求的通用内存计算架构的发展。

南京大学和清华大学合作报道了一种基于铁电场效应晶体管和原子薄 MoS₂ 的双工器件结构通道，并实现用于原位学习的通用内存计算架构¹。通过利用铁电能量的可调性，双工构建块表现出整体出色的性能，耐久性 (>10¹³)、保持力 (>10 年)、速度 (4.8 ns) 和能耗 (22.7 fJ bit⁻¹ μm⁻²)。

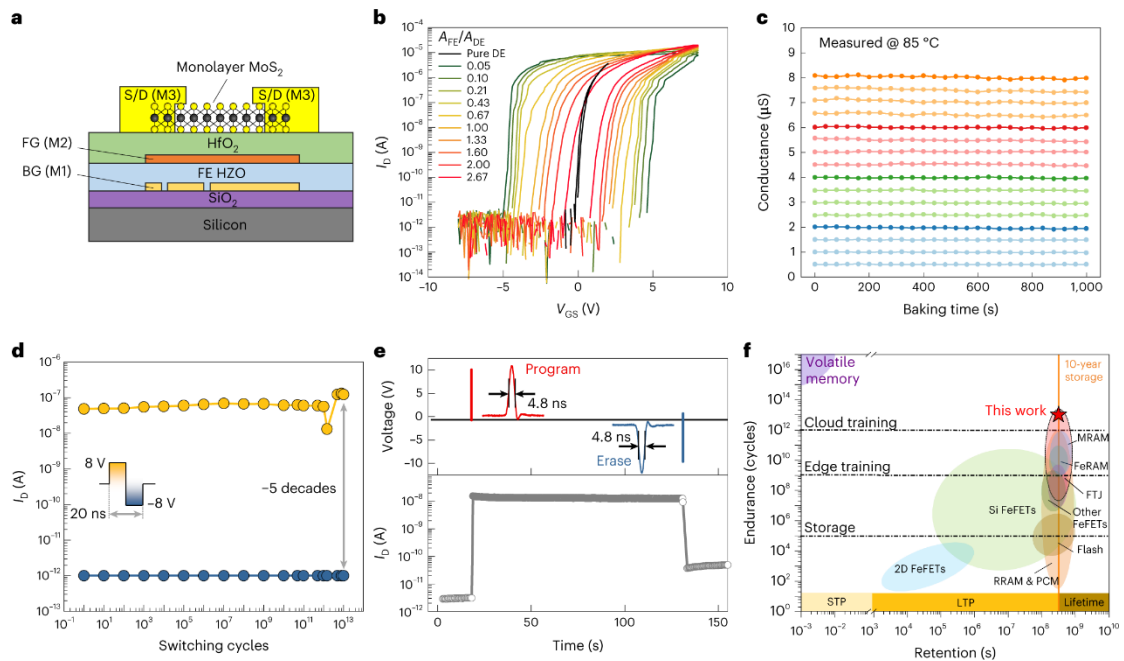


图 1 双工 FeFET 器件性能

研究团队使用双晶体管—双工铁电场效应晶体管单元阵列 (two-transistors-one-duplex ferroelectric field-effect transistor cells) 实现了硬件神经网络，并在原位训练权重的非线性定位任务中实现 99.86% 的准确率。仿真结果表明，在显著提高能效的情况下，所提出的器件架构可以达到与图形处理单元相同的性能水平。该器件核心还可以通过三维异构集成与硅电路相结合，为通用边缘智能提供硬件解决方案。

(执笔：沈湘)

¹ Hongkai Ning, Zhihao Yu, Qingtian Zhang, et al. An in-memory computing architecture based on a duplex two-dimensional material structure for in situ machine learning [J]. Nature Nanotechnology, 2023, <https://www.nature.com/articles/s41565-023-01343-0>

产业动态

韩国初创企业 Rebellions 推出自研人工智能芯片 ATOM

据外媒 2023 年 2 月 13 日报道¹，韩国初创企业 Rebellions 发布了一款新型自研人工智能芯片 ATOM，以期在 AI 竞赛中赢得政府合同。ATOM 是这家初创公司与美国芯片制造商英伟达（Nvidia）竞争的一次尝试，英伟达目前在人工智能芯片市场占据主导地位²。

据报道，ATOM 芯片由 Rebellions 公司设计、并由三星电子代工生产。这款芯片主要用于运行计算机视觉任务、以及人工智能聊天机器人应用程序。Rebellions 联合创始人兼首席执行官朴成铉说，由于这款芯片针对的是特定任务，而不是大范围的任务，所以在执行这些任务时，它的功耗只有英伟达 A100 芯片的 20% 左右。

Rebellions 得到了韩国最大的电信运营商之一韩国电信（KT）公司的支持，KT 既是 Rebellions 的投资者，也是其潜在客户。

（执笔：沈湘）

美国量子计算机公司 SEEQC 推出超低温数字芯片

据路透社等外媒 2023 年 3 月 15 日报道³，美国量子计算机初创公司超导节能量子计算（Superconducting Energy Efficient Quantum Computing, SEEQC）宣布开发出一种超低温数字芯片，可在比外

¹ <https://www.computerworld.com/article/3687989/south-korean-startup-rebellions-reportedly-launches-new-ai-chip.html>

²

<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=1885aa535bf2d5baa67aea8c368bd564&recommendId=118707&controlType=>

³ <https://www.reuters.com/technology/quantum-computer-startup-seeqc-unveils-digital-chip-that-operates-super-cold-2023-03-15/>; <https://www.electronicweekly.com/news/business/seeqc-develops-qubit-control-chips-2023-03/#respond>

太空更低温度下运行，从而能被用于低温环境下的量子处理器。SEEQC 的目标是通过构建经典计算机和超导计算机的混合联用以实现量子计算机的商业化。

量子处理器通常需要存储在接近-273.15 摄氏度的极冷温度下，而经典计算机则在相对温和的温度下运行，两者难以在相同温度下实现互联。因为量子处理器的信息是以波形测量的，对于控制和访问量子位的经典计算机来说，两者需要配对，量子处理器的信息必须数字化为 1 和 0。

据报道，SEEQC 目前还在开发另两种可适应不同低温情况的芯片。确切意义上，此类低温芯片属于量子调控芯片，是一种基于调控技术的专用低温测控芯片，用来操控量子计算芯片。低温区的量子调控芯片具有性能、集成度以及防漏热等方面的优势，但挑战也非常大，是目前全球技术公司正在攻克的难点。低温调控芯片主要有两种主要实现路径，一种是半导体行业成熟的金属氧化物半导体工艺 CMOS 技术，另一种是新兴的单磁通量子（Single Flux Quantum, SFQ）技术。SEEQC 使用的正是 SFQ 技术路径。业内认为，低温调控芯片与目前已经商业化的室温芯片组合集成是未来实现量子计算机广泛应用的一个重要途径¹。

SEEQC 这种基于硅晶片但不使用晶体管的数字芯片已在其位于埃尔姆斯福德（Elmsford）的制造工厂生产制造。SEEQC 已经成功地测试了其数字复用技术，该技术只需 2 根线就能控制 8 个量子比特模块，而控制多达 64 个量子比特的版本目前正在制造中。

SEEQC 还发布了第一代参考级全栈量子计算系统 SEEQC System Red，旨在衡量其新型 SFQ 芯片的性能和能力。SEEQC Red 的架构旨在模仿当前超导体量子计算系统，采用传统的室温模拟控

¹

<http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=03f611419f2a840479cbb5d84848588f&recommendId=119284&controlType=>

制和读出，使该公司能够和其基于数字 SFQ 芯片的下一代量子计算机进行直接 A-B 比较。通过 SEEQC Red，SEEQC 公司实现了 39 ns 的平均 2 量子比特门速度和 98.4% 的平均门保真度，这是在云上运行最好的公开量子系统之一。

SEEQC 成立于 2018 年，目前已筹集了总计 3000 万美元研发经费。

（执笔：沈湘）

日本 DNP 公司开发出用于下一代半导体封装的玻璃芯基板

2023 年 3 月 20 日，日本 Dai Nippon Printing (DNP) 公司发布了一种用于下一代半导体封装的玻璃芯基板 (GCS)¹。新产品用玻璃基板取代了传统的树脂基板（如：FC-BGA——倒装芯片球栅阵列），并通过使用高密度玻璃通孔 (TGV) 提供比传统基本更高性能的半导体封装²。此外，通过调整面板制造工艺，可以实现更高的效率和更大的面积。

新开发的 GCS 包括一个 TGV，用于电连接玻璃正面和背面配置的精细金属布线。它是一种保形型玻璃基板 (Conformal Type glass substrate)，其中金属层粘附在过孔的侧壁上。DNP 公司新的专有制造方法增强了玻璃和金属之间的粘附力，这是传统技术难以实现的，以实现精细的间距和高可靠性。具有高纵横比的 TGV 对于在有限的规模上进行高音量信号传输是必要的。新开发的玻璃基板具有 9 以上的纵横比，并保持足够的粘合质量来配置精细布线。由于所使用的玻璃基板的厚度几乎没有限制，因此在设计翘曲、刚度和平坦度

¹ https://www.global.dnp/news/detail/20169052_4126.html

²

<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=b562555eb3d7ad2efe04e0a762406daf&recommendId=119307&controlType=>

时可以提高自由度。通过调整面板制造工艺，新产品还可以支持高效率和大规模基板的需求。

DNP 公司将新开发的保形型玻璃基板扩展到 510 x 515mm 的面板尺寸。公司目标是在 2027 年前实现 50 亿日元的销售额。

(执笔：沈湘)

台积电向学界开放使用业界最成功的 16nm FinFET 技术

2023 年 2 月 3 日，台积电宣布推出“台积电大学 FinFET”项目 (TSMC University FinFET Program)，旨在培育未来半导体芯片设计人才并推动全球学术创新¹⁻²。

基于该项目，台积电将与亚洲、欧洲和北美的服务合作伙伴合作，为大学提供以下资源：(1) 为大学生、教师和学术研究人员提供广泛的教育机会，让其获得业界最成功的 16nm 鳍式场效应晶体管 (FinFET) 技术的工艺设计工具包 (PDK)，包括教育设计案例、训练资料、以及教学影片，将传统平面式晶体管结构设计学习体验提升到先进的 FinFET 水平。(2) 为大学院校领先的芯片研究人员提供使用基于 16nm (N16) 及 7nm (N7) 制程的多项目晶圆 (Multi-Project Wafer, MPW) 服务，包括逻辑、模拟和射频 (RF) 方面的研究设计，以将具有影响力的创新研究加速导入实际应用。

(执笔：沈湘)

¹ <https://pr.tsmc.com/schinese/news/2998>

²

<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=f986a08d61cb4116afb154c42b95c3f2&recommendId=119404&controlType=>

英伟达公司推出软件加速库 cuLitho 可将计算光刻用时提速 40 倍

2023 年 3 月 21 日，美国英伟达公司（NVIDIA）推出软件加速库 cuLitho，可将光刻技术中的计算光刻工序提速 40 倍¹。计算光刻是芯片光刻中制作光掩模的技术。掩膜是一种平面透明或半透明的光学元件，上面有芯片加工所需的图案，按照是否需要曝光可将图案转移到光刻胶层上。英伟达表示，此前计算光刻依赖于 CPU 服务器集群，而 cuLitho 在 GPU 上运行，相比目前的光刻技术，cuLitho 带来 40 倍的性能飞跃，大大加速了目前每年消耗数百亿 CPU 小时的巨大计算工作量。

cuLitho 使用 500 个 NVIDIA DGX H100 系统（包含 4000 颗 Hopper GPU）能够实现 40000 个 CPU 运算系统的工作量，并行运行计算光刻过程的所有部分，并有助于减少电源需求和潜在的环境影响。使用 cuLitho 的晶圆厂每天可以生产 3-5 倍的光掩模，但仅需要当前配置电力的九分之一，一个过去需要两周时间的光掩模现在可以在一夜之间进行处理。

台积电和新思科技（Synopsys）正在将 NVIDIA cuLitho 软件库集成到最新一代 NVIDIA Hopper 架构 GPU 的软件、制造流程和系统中。设备制造商 ASML 在 GPU 和 cuLitho 方面正与 NVIDIA 密切合作，并计划将 GPU 集成到其所有计算光刻软件产品中。

（执笔：沈湘）

¹ <https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-asml-tsmc-and-synopsys-set-foundation-for-next-generation-chip-manufacturing>

《集微技术信息简报》是由中国科学院文献情报中心情报研究部承担编辑的半导体、集成电路、微电子相关领域科技信息综合报道及专题分析简报（双月报），于2014年3月正式启动，2014年为季度发行的《光刻技术信息简报》，2015年更名《集微技术信息简报》双月发行，2017-2018年根据服务内容聚焦点更名《第三代半导体技术信息简报》。2019年起卷名恢复《集微技术信息简报》。按照“统筹规划、系统布局、分工负责、整体集成、长期积累、深度分析、协同服务、支撑科研”的发展思路，规划和部署《集微技术信息简报》。《集微技术信息简报》服务对象是集成电路、微电子领域的相关领导、科技战略研究专家和科研一线工作者。《集微技术信息简报》内容力图兼顾科技决策和管理者、科技战略专家和领域科学家的信息需求，报道集成电路、微电子领域的国际科技战略与规划、科技计划与预算、科技进展与动态、科技前沿与热点、重大科技研发与应用、重要科技政策与管理等方面的最新进展与发展动态，不定期提供半导体、集成电路、微电子领域热点方向的专题分析。

《集微技术信息简报》是内部资料，不公开出版发行；除了其所报道的专题分析报告代表相应作者的观点外，其所刊载报道的中文翻译信息、汇编信息等并不代表编译者及其所在单位的观点。

中国科学院文献情报中心
情报研究部 战略前沿科技团队
联系人：王丽
电话：010-82626611-6649
电子邮件：wangli@mail.las.ac.cn

