

集微技术信息简报

2024 年第 **1** 期 (总第 58 期)

中国科学院文献情报中心

2024 年 1 月制

本期目录

政策计划

荷兰政府撤销 ASML 部分 DUV 光刻机出口许可证.....1

韩国拟建全球最大半导体产业集群1

美国能源部成立关键和新兴技术办公室2

欧洲创新理事会计划投资 12 亿欧元用于战略技术开发与规模扩大 ..3

产业洞察

美国 NIST 发布《半导体和微电子标准》报告.....5

美国国家科学院发布《数字孪生的基础研究需求和未来方向》报告 8

SEMI：全球半导体每月晶圆产能预计将在 2024 年创下新记录、突破 3000 万片.....13

前沿研究

美国宾夕法尼亚州立大学帕克分校首次演示基于大面积生长的二维材料的晶圆级三维集成芯片16

法国 CEA-Leti 开发出高性能、低成本、CMOS 兼容的 200 mm GaN-on-Si 工艺技术18

中美科学家研制出世界首个石墨烯半导体20

日本东京大学首次在光学系统中实现基于 GKP 量子比特的容错量子计算.....22

产业动态

美国苹果公司和 Amkor 公司扩大先进封装领域合作25

美国 Neurophos 公司融资 720 万美元用于超材料和光学 AI 芯片25

我国 DRAM 芯片制造商长鑫存储 GAA 技术进展引发业界关注.....27

DreamBig Semiconductor 公司推出开源小芯粒平台“MARS”28

荷兰设备巨头 Neways 收购 Sencio 公司以扩展智能传感和驱动应用先进封装业务.....29

政策计划

荷兰政府撤销 ASML 部分 DUV 光刻机出口许可证

据光刻机巨头 ASML 官网 2024 年 1 月 1 日报道，荷兰政府最近部分吊销了其 2023 年 NXT:2050i 和 NXT:2100i 光刻系统的出货许可证，影响了少数中国客户¹。

根据 ASML 官网消息，其浸没式 DUV 光刻机主要包括 NXT:2100i、NXT:2050i、NXT:2000i 和 NXT:1980Di²。此次荷兰政府部分撤销出口许可证的两种型号 DUV 光刻机，为其继 NXT:2000i 之后推出的两种最新的浸润式 DUV 光刻机。

ASML 预计，目前荷兰政府撤销的出口许可证或最新的美国出口管制限制不会对 2023 年财务前景产生重大影响。

ASML 还表示，在最近与美国政府的讨论中，ASML 进一步澄清了美国出口管制法规的范围和影响。美国最新的出口管制制度（2023 年 10 月 17 日公布）对 DUV 浸没光刻系统进行了限制，ASML 完全致力于遵守所有适用的法律法规。

（执笔：沈湘 王丽）

韩国拟建全球最大半导体产业集群

据官网 2024 年 1 月 16 日报道，韩国贸易、工业和能源部（MOTIE）与科学与信息通信技术部（MSIT）于 1 月 15 日举行了联合论坛，会上发布了培育全球最大半导体产业集群的实施计划³。

¹ <https://www.asml.com/en/news/press-releases/2023/statement-regarding-partial-revocation-export-license>

² <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems>

³

http://english.motie.go.kr/en/pc/pressreleases/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=1642&bbs_cd_n=2¤tPage=9&search_key_n=&search_val_v=&cate_n=

根据计划，通过韩国三星电子公司和 SK 海力士公司 622 万亿韩元（约 4650 亿美元）的共同投资，“拟建集群”到 2047 年将在现有的 19 个生产晶圆厂和 2 个研发晶圆厂基础上，新增 13 座生产厂和 3 座研发厂。计划到 2027 年首先建成 3 个生产厂和 2 个研发厂

到 2030 年，韩国将建成全球规模最大的半导体产业超级集群，占地 2100 万平方米，月产量达 770 万片晶圆。该超级集群汇集了半导体产业相关的材料、零部件和设备（MPE）制造商、公共芯片研发机构、无晶圆厂企业和多所大学。韩国政府和企业将培育高带宽存储器（HBM）和其他尖端芯片的生产线。这将为生产 2 nm 及以下制程芯片创造一个良好的半导体生态系统。

622 万亿韩元的半导体产业超级集群投资预计将直接和间接创造 346 万个新就业机会。韩国政府计划以这种方式加快建立半导体超级集群，以实现今年 1200 亿美元芯片出口总额和 60 万亿韩元（约 450 亿美元）的私人投资目标。

（执笔：沈湘 王丽）

美国能源部成立关键和新兴技术办公室

据 2023 年 12 月 12 日官网报道，美国能源部宣布成立关键和新兴技术（Critical and emerging technologies, CET）办公室，旨在充分利用能源部在人工智能、生物技术、量子计算和半导体等领域的广泛资产和专业知识，以加速美国在这些关键领域的进展¹。

CET 在能源部的应用广泛，涉及清洁能源、国防和流行病防范等多个方面。CET 的重要进展对国家经济和安全具有巨大的潜力，同时也伴随着重大风险。美能源部新成立的 CET 办公室将专注于解决关键的科技、能源和安全挑战。CET 办公室首任主任曾担任美国

¹ <https://www.energy.gov/articles/doe-launches-new-office-coordinate-critical-and-emerging-technology>

国家安全委员会技术与国家安全事务主任，并将兼任能源部首席人工智能监管官员。

美国能源部在其国家实验室和先进能源研究计划署等一系列研发项目办公室，拥有 CET 领域的世界级专业知识和能力。CET 办公室将汇集美国能源部下属的 17 个国家实验室和众多大学研发项目的力量，并向负责科学与创新部的副部长汇报。同时，该办公室将成为能源部在关键和新兴技术方面的唯一对外联络和宣传窗口，促进联邦政府与私营部门、学术界的合作，继续研究、开发和部署对美国竞争力和安全至关重要的创新技术。

继 2023 年 1 月 3 日美国国务院正式启动“关键和新兴技术”特使办公室后，这是美国联邦政府在关键和新兴技术领域管理组织的最新行动。

（执笔：沈湘 王丽）

欧洲创新理事会计划投资 12 亿欧元用于战略技术开发与规模扩大

据 2023 年 12 月 12 日官网报道，欧盟委员会通过了欧洲创新理事会（EIC）2024 年资助项目¹。EIC 将在 2024 年提供超过 12 亿欧元的资助基金，主要支持中小企业和初创企业在生成式人工智能、太空、关键原材料、半导体和量子技术等关键“深度技术”领域的开发和规模扩大。与此同时，欧盟委员会完成了 EIC 基金的重组，将其股份转让给欧洲投资银行，该基金将获得 5.85 亿欧元的资金注入，用于投资 EIC 选定的高价值公司，并带动超过 20 亿欧元的新投资。

2024 年 EIC 资助项目主要包括三项主要资助计划：

（1）探路者项目（EIC Pathfinder）：拨款 2.56 亿欧元，用于多

¹ https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_6531

学科研究团队进行有望实现技术突破的前瞻性研究，单项最高资助额为 400 万欧元。

(2) 成果转化项目 (EIC Transition)：拨款 9400 万欧元，用于研究成果的转移转化，适用于 EIC 探路者项目、欧洲研究委员会概念验证项目、地平线合作项目（支柱 2 社会挑战）的项目成果，单项最高资助额为 250 万欧元。

(3) 技术加速器项目 (EIC Accelerator)：拨款 6.75 亿欧元，用于支持初创企业和中小企业开发和规模化具有创造新市场或颠覆现有市场潜力的创新技术（单项资助额低于 250 万欧元、投资额 50-1500 万欧元不等）。其中，4.05 亿欧元专门由 EIC 基金管理用于投资，另外 1.8 亿欧元用于对以前 EIC 技术加速器项目中选定公司的后续支持。

(执笔：沈湘 王丽)

产业洞察

美国 NIST 发布《半导体和微电子标准》报告

2023 年 12 月 5 日，美国国家标准技术研究院（NIST）发布《半导体和微电子标准》报告¹。该报告由机构间标准政策委员会（Interagency Committee on Standards Policy, ICSP）下属的半导体和微电子工作小组完成。报告概述了美国联邦政府的半导体和微电子标准活动，面向 ICSP 提出的“战略标准优先领域”问题，列出了当前美国政府参与的半导体和微电子标准制定的相关组织，确定了半导体和微电子标准领域五个重点领域和优先事项，最后分析了美国当前的发展差距和发展机遇。

一、当前美国政府参与半导体和微电子标准制定相关的组织

目前，美国联邦政府参与半导体和微电标准制定相关的组织包括：

1. 电子器件工程联合委员会（Joint Electronic Device Engineering Council, JEDEC）；
2. 美国汽车工程师学会（Society of Automotive Engineers, SAE）；
3. 美国印刷电路协会（Institute of Printed Circuits, IPC）；
4. 国际电气与电子工程师协会（Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE）；
5. 美国静电放电协会（EOS/ESD Association, ESDA）；
6. 美国材料与试验协会（American Society for Testing and Materials (ASTM) International）；
7. 国际标准化组织（International Organization for Standardization,

¹ <https://www.nist.gov/publications/semiconductors-and-microelectronics-standards-report-semiconductors-and>

ISO)；

8. 国际电工委员会 (International Electrotechnical Commission, IEC)；

9. 国际半导体产业协会 (Semiconductor Equipment and Materials International, SEMI)；

10. 国际半导体技术路线图 (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)；

11. 美国国家标准学会 (American National Standards Institute, ANSI)。

二、半导体和微电子标准领域五个重点领域和优先事项

当前联邦政府认为与半导体和微电子标准相关的重要主题、重点领域和优先事项包括：

1. 供应链和安全。具体包括：

(1) **安全处理器**。安全处理器是添加了加密电路和密钥管理机制以保护数据和软件免遭未经授权访问的处理器，也可能是一个针对侧信道攻击和物理篡改而设计和强化的协处理器。

(2) **真品和赝品**。假冒半导体元件是指其原产地或质量被故意歪曲的电子零件。假冒半导体元件可能会侵犯合法生产商的商标权。由于假冒半导体元件的规格和/或质量往往较差，如果将其纳入关键系统，可能会带来危险。

(3) **可用性和稀缺性**。由于消费者对电子产品的使用需求不断增加，全球对半导体的需求正在快速增长。然而由于多种因素，目前半导体仍供不应求。

(4) **通用微电路仿真和高级微电路仿真**。通用微电路仿真负责生产制造，高级微电路仿真负责开发和集成以支持未来技术需求。

2. 芯粒 (Chipselets)。具体包括：

(1) **互连**。在封装内实现多个专用、小型半导体器件之间的连

接。

(2) **封装**。对于芯粒来说，封装是通过组合不同功能模块芯片来创建复杂集成电路的方法。

(3) **互操作性**。来自不同提供商的芯粒能够在系统内无缝协作。

3. 性能。具体包括：

(1) **设备或系统的运行特性**，例如速度、功耗和可靠性。

(2) **设备高效且有效地处理数据、执行计算和执行任务的能力**。

4. 计量与测量科学。具体包括：

(1) **材料纯度和性能**。需要新的计量方法来满足对半导体材料纯度、物理特性和来源日益严格的需求。

(2) **未来微电子制造**。未来的微电子制造涉及新的测量方法、数据、参考工件、模型和理论的开发，以实现更高的设备产量和可靠性、更低的成本、改进的制造工艺和性能。

(3) **先进封装**。先进封装是芯粒技术重点关注的领域。

5. 数字孪生。具体包括：

(1) **制造过程和设备管理**。制造过程和设备管理是利用物理制造过程的虚拟模型来分析生产绩效，其使用来自传感器和其他来源的实时数据。

(2) **质量控制**。质量控制是确保现实世界产品或服务的虚拟模型满足预期要求，其使用来自传感器和其他来源的实时数据来创建物理产品或服务的动态副本，以用于预防和检测缺陷、减少浪费并提高客户满意度。

(3) **供应链管理和保证**。供应链管理和保证是使用现实世界供应链及其流程的虚拟模型，其使用来自传感器和其他来源的实时数据来创建物理供应链及其组件的动态副本，以帮助提高供应链的可见性、可追溯性、安全性和可持续性。

三、发展差距和发展机遇

除了当前的标准战略优先领域外，还有一些可被视为发展差距或发展机遇的领域。在这些领域，美国联邦政府目前参与很少或者没有参与。具体包括：（1）Chiplet 开放标准和事实上的标准组织；（2）减少制造来源、解决材料短缺的问题；（3）政府-产业数据交换；（4）针对专用集成电路（ASIC）和现场可编程门阵列（FPGA）设计的第三方 IP 验证和校验。（5）微电子生命周期模型；（6）安全处理器标准；（7）资质认证，国防微电子学需要遵守比一般商业微电子学更高的标准；（8）过时产品，可以使用自下而上的真实数字模型来快速模拟和开发技术更新选项从而降低微电子组件过时的风险。

（执笔：沈湘 王丽）

美国国家科学院发布《数字孪生的基础研究需求和未来方向》报告

数字孪生在加速科学发现和行业变革方面具有巨大前景。2023 年 12 月 15 日，美国国家科学院（NAS）发布《数字孪生的基础研究差距和未来方向》报告¹，旨在向科研界、学术界、相关政府机构、数字孪生从业者以及相关行业人士介绍关于推进数字孪生的开放需求和需要克服的基础性差距。报告探讨了数字孪生技术的潜力以及如何支持其发展的基础研究和所需资源。报告强调了数字孪生在科学研究、工业实践和日常生活的多个领域中的应用潜力，并提出了未来研究的重点和一个跨学科的研究议程。此外，报告还讨论了如何最好地通过联邦机构和各个领域的研究人员合作来支持数字孪生技术的发展。根据报告，本文概述了数字孪生的定义，构成要素及其基础研究需求，并整理了推进数字孪生技术的未来发展建议。

¹ <https://nap.nationalacademies.org/catalog/26894/foundational-research-gaps-and-future-directions-for-digital-twins>

一、数字孪生的定义和意义

数字孪生可以定义为一套虚拟信息结构，它模仿自然、工程或社会系统（或成体系系统）的结构、情景和行为。这套结构能够动态地用来自其物理对应物的数据进行更新，具备预测能力，并能提供对价值实现有益的决策信息。在数字孪生概念中，虚拟与物理之间的双向交互是核心特点，这使得虚拟模型不仅能够反映物理实体的状态和行为，还能影响这些状态和行为。这一定义广泛地描述了物理系统的数字孪生，强调了“预测能力”这一关键特征，表明数字孪生必须具备超越现有数据的预测能力来指导决策进而实现价值创造。定义特别指出了数字孪生中的双向交互能力，用于支持自动决策或人类参与的决策过程。

数字孪生作为工具正在各个领域被探索和实施，目的是为了更深入地了解自然、工程或社会系统的性能、行为和特征。数字孪生的应用场景多样且不断增长，涵盖了生物医学研究、工程、大气科学等多个领域，潜力巨大。通过模拟实时行为、监控性能以识别异常现象和异常条件，并实现预测性洞察和有效优化，数字孪生能够彻底改变科学研究、提高运营效率、优化生产策略、缩短产品上市时间，并为科学和工业的增长与创新开辟新途径。

二、数字孪生生态系统的构成要素

数字孪生超越传统模拟，它不仅仅是物理实体的高保真数字模拟，还是一个包括模型、数据和决策紧密集成的动态的、双向交互系统。它不断根据物理实体的变化更新，可以辅助人类进行决策或与人类共同进行决策，以支持实体的操作和优化。在人机交互中，人类在监督和精细调节数字孪生的运作中扮演着至关重要的角色。

数字孪生系统的构成的四个要素具体包括：物理对应物；虚拟表示；从物理到虚拟的反馈流；从虚拟到物理的反馈流，其中虚拟表示和双向交互最为关键。具体而言，（1）虚拟表示：通过建模和

仿真来创建物理对应物的虚拟模型。这涉及到使用人工智能，基于原理的、机理的以及经验的模型，并通过可视化来表现。（2）虚拟与物理之间的双向交互：双向交互形成了一个反馈回路，包括动态数据驱动模型更新（例如：传感器融合、反演、数据同化）和最优决策制定（例如：控制、传感器转向）。如图所示，信息在虚拟表示和物理对应物之间双向流动。这些信息流可能通过自动化过程、人为驱动的过程，或者两者的结合进行。

三、数字孪生技术发展的基础研究需求

1. 虚拟表示：基础研究需求和发展机遇

数字孪生面临的一个基本挑战是，其虚拟表示可能需要覆盖广泛的空间和时间尺度。在许多应用场景中，存在着可模拟尺度与实际可操作尺度之间的差距。另一个挑战是，随着更精细尺度的实现，并且随着给定模型在模拟物理对应物方面达到更高保真度，计算需求和数据存储与分析要求也相应增加。这限制了模型对于某些目标的适用性，如不确定性量化、概率预测、场景测试和可视化。

换句话说，数字孪生在不同应用中对建模的保真度、数据、精确度、准确性、可视化和响应时间提出了不同要求，但数字孪生的许多潜在用途目前难以仅凭现有计算资源来实现。因此，在制定推进数字孪生的基础和应用研究计划时，政府部门应创建机制，为数字孪生研究人员提供必要的计算资源，并认识到不同数字孪生系统间存在的巨大差距。

2. 物理对应物：基础研究需求和发展机遇

数字孪生依赖于对物理对应物的观察及建模，以为虚拟表示提供信息。在许多应用中，这些数据将是多模态的、来源多样且质量不一。

当前主要差距、研究需求和机遇包括：（1）具有较大时空变异性的复杂系统中，数据的欠采样是获取用于数字孪生开发所需数据

的重大挑战。理解和量化这种不确定性对于评估数字孪生的可靠性和局限性至关重要，尤其是在安全至关重要或高风险的应用场景中。（2）数据和元数据的处理和管理需要工具，以确保有效地收集、记录、存储和处理数据和元数据。（3）需要数学工具来评估数据质量、确定所有可用信息的恰当使用，以及理解数据质量如何影响数字孪生系统的性能。（4）标准和治理政策对于确保数据质量、准确性、安全性和完整性至关重要。这些框架为数据收集、管理和共享提供标准和指南，同时在维护数据安全和隐私方面发挥着重要作用。

3. 虚拟与物理之间的双向交互：基础研究需求和发展机遇

在数字孪生从物理到虚拟的反馈流程中，需要使用反演方法和数据同化方法，以严谨、系统和可扩展的方式将物理观测与虚拟模型结合起来。在虚拟到物理的反馈流程中，数字孪生用于驱动物理对应物本身的变化，或者通过自动控制器或人类来驱动与物理对应物相关的观测系统的变化。

在物理到虚拟和虚拟到物理反馈流程中的主要差距、研究需求和机遇包括：（1）需要方法将最先进的风险指标和极端事件特征融入数字孪生决策中。（2）需要数据同化方法及技术。（3）需要方法和工具，使敏感性信息更容易用于以模型为中心的数字孪生。

（4）需要可扩展方法来实现目标导向的传感器调整和最佳实验设计。（5）需要围绕数字孪生的实施性研究、以用户为中心的数字孪生设计、以及有效的人-数字孪生团队合作进行发展。（6）需要研究人与数字孪生交互的内容、背景和方式对最终决策的影响。

此外，数字孪生生态系统的每个发展阶段和每个要素中都需要积极考虑道德因素、保护个人隐私、数据治理和安全。

四、报告建议

报告认为，要实现数字孪生的潜力，需要一个综合的研究议程，以推进数字孪生的每一个关键要素。更重要的是，需要从整体角度看待它们的相互依赖性和交互作用。这一综合研究议程应包括跨越多个领域的基础性需求以及特定领域的特殊需求。

最后根据调查结果、结论，报告提出以下建议：

1. 美国国家科学基金会、美国能源部、美国国立卫生研究院和美国国防部等联邦机构应启动新的跨领域计划，以推进数字孪生的数学、统计和计算基础。同时确保跨机构合作的有效性，例如成立一个跨机构工作组可能有助于确保协调。

2. 联邦机构应确保在新的数字孪生计划中，验证、校验和不确定性量化是不可或缺的部分。

3. 在制定推进数字孪生基础和应用的研究项目时，联邦机构应创建机制为数字孪生研究者提供计算资源，认识到模拟与可操作尺度之间存在的巨大差距，以及高性能计算在不同应用领域的成熟度不同。

4. 联邦机构应各自对其数字孪生需求的主要用例进行评估，以维护和维持数据、软件、传感器和虚拟模型。

5. 各机构应以协作和协调的方式提供跨学科研讨会和场所，以促进识别数字孪生研发中将受益于共同方法的方面，以及哪些具体的研究主题是共享的。

6. 联邦机构应识别与其个体或集体使命相关的目标领域，在这些领域与工业界合作将促进研究和转化。

7. 在定义新的数字孪生研究工作时，联邦机构应在当前和未来任务优先事项的背景下，（1）建立论坛、（2）促进数据和模型的协作交换、（3）以及明确考虑国际合作和协调的作用。

8. 明年内，联邦机构应组织工业界和学术界参与者的共同研讨会，以找出障碍、探索潜在实施途径，并鼓励创建跨学科学士、硕士和博士学位。

（执笔：沈湘 王丽）

SEMI：全球半导体每月晶圆产能预计将在 2024 年创下新记录、突破 3000 万片

据国际半导体产业协会（SEMI）2024 年 1 月 2 日报道¹，在《世界晶圆厂预测报告》中显示，全球半导体产能在 2023 年增长 5.5%、每月晶圆（Wafers Per Month, WPM）产量达到 2960 万片后，预计在 2024 年还将进一步增长至 6.4%并首次突破 3000 万 WPM。这一增长主要得益于先进逻辑芯片和晶圆代工产能的增加，生成式人工智能、高性能计算等应用需求的增加，以及芯片终端需求的复苏²。半导体市场需求疲软以及由此导致的库存调整，导致 2023 年全球半导体产能扩张趋缓。

SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 认为，全球市场需求的复苏和政府激励措施的增加，推动了关键芯片制造地区晶圆厂投资的激增；半导体制造业对经济安全具有重要的战略意义，全球对该战略重要性的高度关注是导致这些趋势的关键催化剂。

根据《世界晶圆厂预测报告》，从 2022 年至 2024 年，全球半导体行业计划运营 82 个新晶圆厂，其中包括 2022 年的 29 个项目、2023 年的 11 个项目和 2024 年的 42 个项目，晶圆尺寸从 300 mm 到 100 mm 不等。

¹ <https://www.semi.org/en/news-media-press-releases/semi-press-releases/global-semiconductor-capacity-projected-to-reach-record-high-30-million-wafers-per-month-in-2024-semi-reports>

² <http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=85a942c8b7e9f173d549f5d8419e78d5&recommendId=137473&controlType=>



图 1 全球新建半导体晶圆厂数

一、中国引领半导体行业扩张

在政府资金和其他激励措施的推动下，中国预计将增加其在全球半导体产能中的份额。中国芯片制造商预计将在 2024 年开始运营 18 个晶圆厂，2023 年产能同比增长 12%、达到 760 万 WPM，2024 年产能同比增加 13%、达到 860 万 WPM。

中国台湾地区预计仍是全球半导体产能第二大地区，2023 年产能增长 5.6%至每月 540 万 WPM，2024 年将增长 4.2%至 570 万 WPM。中国台湾地区将在 2024 年开始运营 5 个晶圆厂。

韩国的芯片产能全球排名第三，2023 年为 490 万 WPM；随着 1 家晶圆厂的投产，2024 年将增长 5.4%、到 510 万 WPM。日本预计将在 2023 年和 2024 年分别以 460 万 WPM 和 470 万 WPM 的产量位居全球第四，随着 2024 年 4 家晶圆厂的投产，产能将增长 2%。

《世界晶圆厂预测报告》显示，2024 年美洲将新增 6 家晶圆厂，芯片产能同比增长 6%、达到 310 万 WPM。随着 4 家新晶圆厂的投产，欧洲和中东地区的产能预计将在 2024 年增长 3.6%、达到 270 万 WPM。随着 4 个新晶圆厂项目的启动，东南亚预计在 2024 年将产能提高 4%、达到 170 万 WPM。

二、晶圆代工业务持续强劲增长

晶圆代工服务供应商预计将成为最大的半导体设备买家，2023 年产能增加至 930 万 WPM，2024 年产能将达到创纪录的 1020 万 WPM。

由于个人电脑和智能手机等消费电子产品需求疲软，存储器领域在 2023 年放缓了产能扩张。DRAM 领域预计 2023 年产能将增长 2%、达到 380 万 WPM，2024 年产能将增长 5%、达到 400 万 WPM。3D NAND 的装机容量预计在 2023 年将保持不变、为 360 万 WPM，明年将增长 2%、达到 370 万 WPM。

在离散器件和模拟器件领域，车辆电气化仍然是产能扩张的关键驱动因素。离散器件产能预计 2023 年将增长 10%、达到 410 万 WPM，2024 年将增长 7%、达到 440 万 WPM；模拟器件产能预计 2023 年将增长 11%、达到 210 万 WPM，2024 年将增长 10%、达到 240 万 WPM。

（执笔：李国强 沈湘）

前沿研究

美国宾夕法尼亚州立大学帕克分校首次演示基于大面积生长的二维材料的晶圆级三维集成芯片

2024 年 1 月 10 日，美国宾夕法尼亚州立大学帕克分校研究团队在《自然》上发表了一项研究成果，首次演示了基于大面积生长的二维（2D）材料的晶圆级三维（3D）集成以及三层堆叠三维芯片，为大规模二维器件走向更复杂、高密集和多功能的三维集成电路奠定了基础¹。

在半导体领域，3D 集成不仅能够在单位面积内封装更多器件，实现“扩展摩尔定律”，还能为“超越摩尔定律”引入更多潜在技术。尽管硅基 3D 集成电路已实现商用，最新的鳍式场效应晶体管（FinFET）技术和全环绕栅极场效应晶体管（Gate-All-Around FET）技术预计将延续“摩尔定律”至 2030 年，但针对 2D 材料等新兴纳米材料的 3D 集成研究仍在初步阶段。3D 集成可以提供一个混合异质平台，用于在 3D 堆栈的不同层上集成基于新兴材料的非计算器件，从而“超越摩尔定律”。

全球知名芯片制造公司，如英特尔（Intel）、台积电公司（TSMC）和超威半导体公司（AMD），都认为 3D 集成提供了广泛可能性，并已经展示了在封装解决方案方面的进展，如 Intel 的 Foveros、TSMC 的 3D Fabric 和 AMD 的 3D V-Cache 等 3D 封装工艺。与 3D 封装相比，单片式 3D 集成可以提高互连密度并降低静电耦合。然而，对于硅基逻辑器件，约 450℃ 的工艺加工温度限制了单片式集

¹ Darsith Jayachandran, Rahul Pendurthi, Muhtasim Ul Karim Sadaf, et al. Three-dimensional integration of two-dimensional field-effect transistors[J]. Nature, 2024, 625:276–281. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06860-5>

成的发展。虽然引入如锗（Ge）和铟镓砷（InGaAs）等高迁移率沟道材料可以补偿性能，但会增加制造复杂性。此外，块材半导体（如体硅）在低于 3 纳米的沟道厚度下，由于沟道与介电层界面上的电荷载流子散射加剧，不适用于进一步缩放。

为了克服这些挑战，2D 半导体、碳纳米管和纳米线等纳米材料被视为有前景的候选材料。其中，2D 材料是一类具有独特的物理和化学性质的新兴材料，在许多领域展示出应用前景，不仅被广泛应用于高速、低功耗的晶体管制造，还可用作芯片中的存储介质，并用于制造光电器件和传感器。最近，2D 半导体还在晶圆级制备、器件性能和集成策略方面取得了显著进展，并被列入各个行业技术路线图。此外，2D 材料与硅基微芯片在 3D 异质集成方面的最新进展也展示了其在开发多功能处理器方面的潜力。

基于以上研究进展和发展挑战，美国宾夕法尼亚州立大学帕克分校研究人员展示了基于大面积生长的二硫化钼（MoS₂）和二硒化钨（WSe₂）的多功能 2D 场效应晶体（FETs）的晶圆级单片式 3D 集成¹。该研究主要取得了 4 方面突破性进展：（1）实现了 MoS₂ FETs 的晶圆级单片式双层 3D 集成，每层包含超过 10,000 个场效应晶体管；（2）实现了 MoS₂ FETs 和 WSe₂ FETs 的三层 3D 集成，第一、二、三层分别包含约 800 个、800 个和 450 个场效应晶体管；（3）实现了按比例缩放的 MoS₂ FETs 的双层 3D 集成，每层有 200 多个场效应晶体管、沟道长度（L_{CH}）为 45 nm；（4）基于 MoS₂ 的 3D 电路功能演示，实现传感和存储等功能。

¹ <http://portal.nstl.gov.cn/recommend/recommendInfo.htm?serverId=14&id=138810&redirect=by>

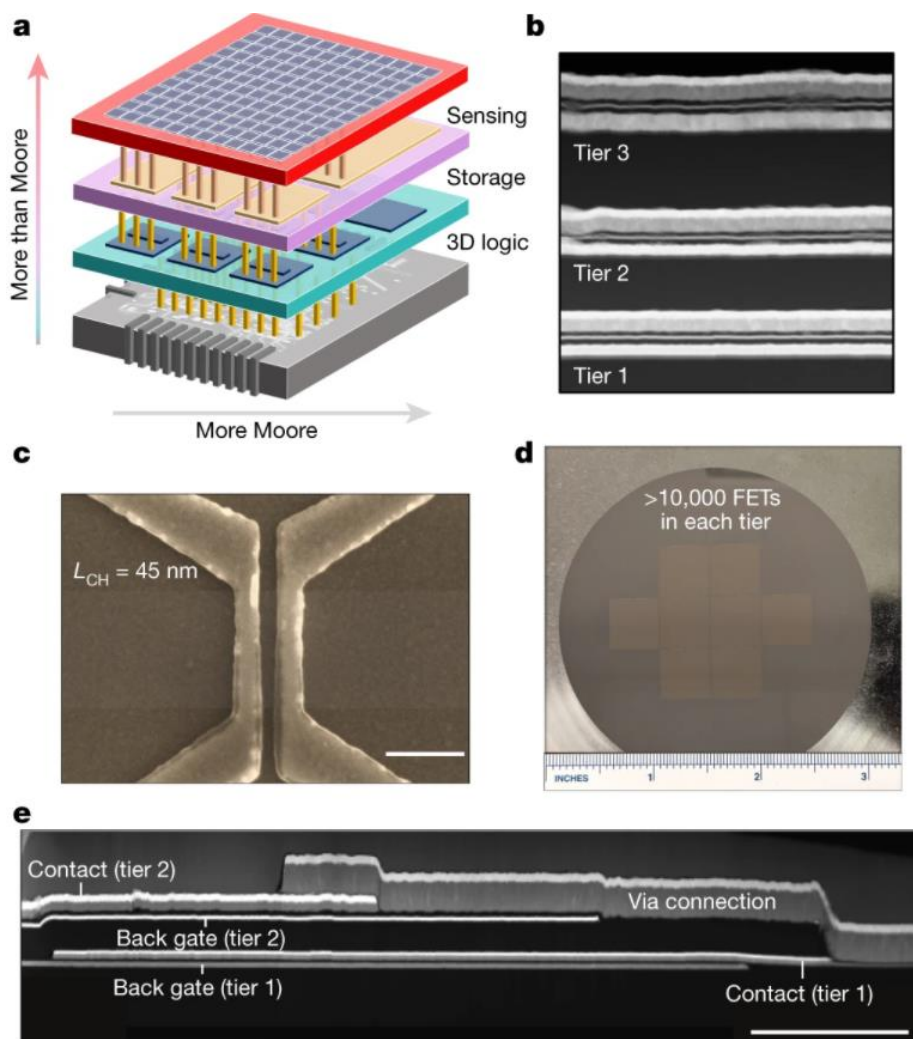


图 1 基于 2D 场效应晶体管的单片式 3D 集成示意图

随着人工智能、物联网等新兴技术的快速发展，对高性能、低功耗芯片的需求日益增加。此外，未来的芯片制造还需要更加注重集成度和功能性的提升，以满足新兴领域的发展需求。2D 场效应晶体管的 3D 集成方法有望促进未来芯片进一步实现小型化和集成化，为后摩尔时代的芯片发展开辟了新思路、提供了新机遇。

(执笔：沈湘 王丽)

法国 CEA-Leti 开发出高性能、低成本、CMOS 兼容的 200 mm GaN-on-Si 工艺技术

目前用于电信或雷达应用的 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT)

技术采用 SiC 衬底，而且需要在专用洁净室中进行处理。用于生长 GaN 层的高性能 SiC 衬底非常昂贵，只有相对较小的尺寸。

据官网 2023 年 12 月 15 日报道，法国研究实验室 CEA-Leti 已相继开发出兼容 CMOS 洁净室的 200 mm 和 300 mm 硅基氮化镓（GaN-on-Si）工艺技术¹。该技术既能保持半导体材料的高性能，又可以使成本低于现有的碳化硅基氮化镓（GaN-on-SiC）技术，有效解决了用于生长 GaN 层的衬底价格高昂、功率密度小的问题，并可以利用常规的高性能洁净室设施²。此研究成果发表在 2023 年第 69 届 IEEE 国际电子元件会议（IEDM）上。

在功率密度方面，CEA-Leti 的 GaN-on-Si 技术在 28 GHz 的性能正逐步超越 GaN-on-SiC 技术。该研究目标是通过与 CMOS 兼容的 200 mm GaN-on-Si 技术，在约 30 GHz 下达到现有最先进的 GaN HEMT 性能，并与 GaN-on-SiC 技术竞争。CEA-Leti 研究人员认为，与 CMOS 兼容的 200 mm 硅基 SiN/AlN/GaN HEMT 技术在 5G/6G 基础设施、卫星通信、无人机探测雷达或地球观测等应用中具有发展潜力。

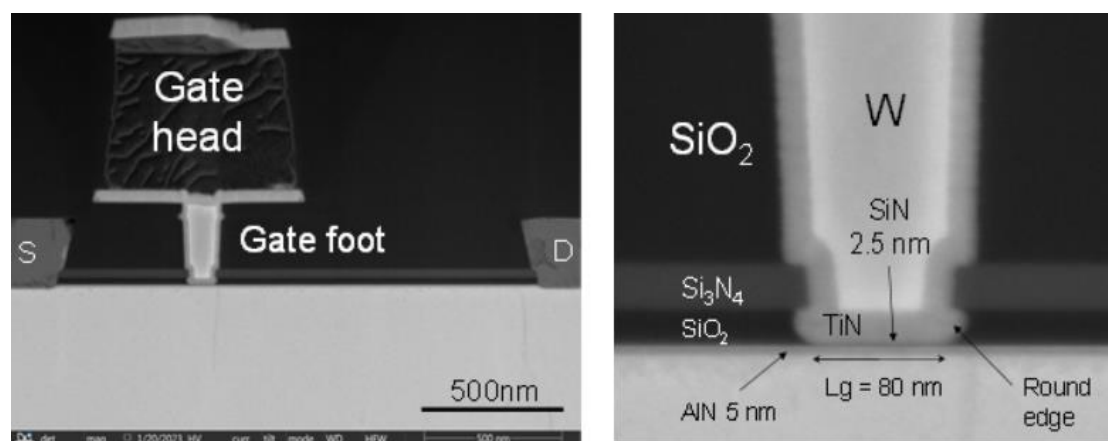


图 1 AlN/GaN MIS-HEMT 的扫描透射电子显微镜图

¹ <https://www.leti-cea.fr/cea-tech/leti/Pages/actualites/Communique%20de%20presse/iedm-gan.aspx>

² <http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=7ae8c7d08d970bf0d0b6804861a11315&recommendId=137753&controlType=>

虽然这项工艺技术的可靠性测试才刚刚开始，但 CEA-Leti 将在该领域持续开展研发工作，具体包括：提高 MIS-HEMT 晶体管的原始输出功率和效率、集成改进的工艺模块以提高器件性能并将工作频率提高到 100 GHz 以上、以及在 300 mm 硅晶片上实现 GaN/Si 芯片的 3D 集成。

（执笔：张冉冉 沈湘）

中美科学家研制出世界首个石墨烯半导体

自 2004 年英国曼彻斯特大学的两位物理学家首次从石墨中机械分离出石墨烯以来，石墨烯优异的光学、电学、力学特性在诸多领域展示出诱人的应用前景。特别是在微电子学领域，石墨烯被视为人类从“硅时代”转变为“碳时代”的关键。然而，要实现这一跨越还需要攻克许多关键技术难点，其中，石墨烯的“零带隙”问题便是其中一个至关重要的技术难点。在过去二十年里，通过量子限域或化学功能化改变带隙的研究探索，尚未能成功制备出半导体石墨烯¹。

天津大学和美国佐治亚理工学院的研究团队合作研制出世界上第一个功能性石墨烯半导体，成功突破了石墨烯“零带隙”特性，攻克了长期以来阻碍石墨烯电子学发展的关键技术难题²。研究团队创新性地采用准平衡退火方法，通过严格控制生长环境的温度、时间及气体流量，实现对外延石墨烯生长过程的精确调控，从而确保在碳化硅衬底上形成特定的高度有序结构，制备出一种带隙约 600 meV 的新型稳定的半导体石墨烯。该半导体石墨烯的室温迁移率为 $5500 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，高达硅半导体的 10 倍、其他二维半导体的 20 倍。以

¹

<http://portal.nstl.gov.cn/choice/getChoiceDetail.htm?serverId=14&uuid=7d1fa9dc7ad403366b48322def05e8d0&recommendId=139278&controlType=>

² Jian Zhao, Peixuan Ji, Yaqi Li, et al. Ultrahigh-mobility semiconducting epitaxial graphene on silicon carbide [J]. Nature, 2024, 625:60–65. <https://www.nature.com/articles/s41586-023-06811-0>

该半导体外延石墨烯制备的场效应晶体管开关比高达 10^4 ，基本满足了现在的工业化应用需求。相关研究成果发表于 *Nature* 期刊¹。

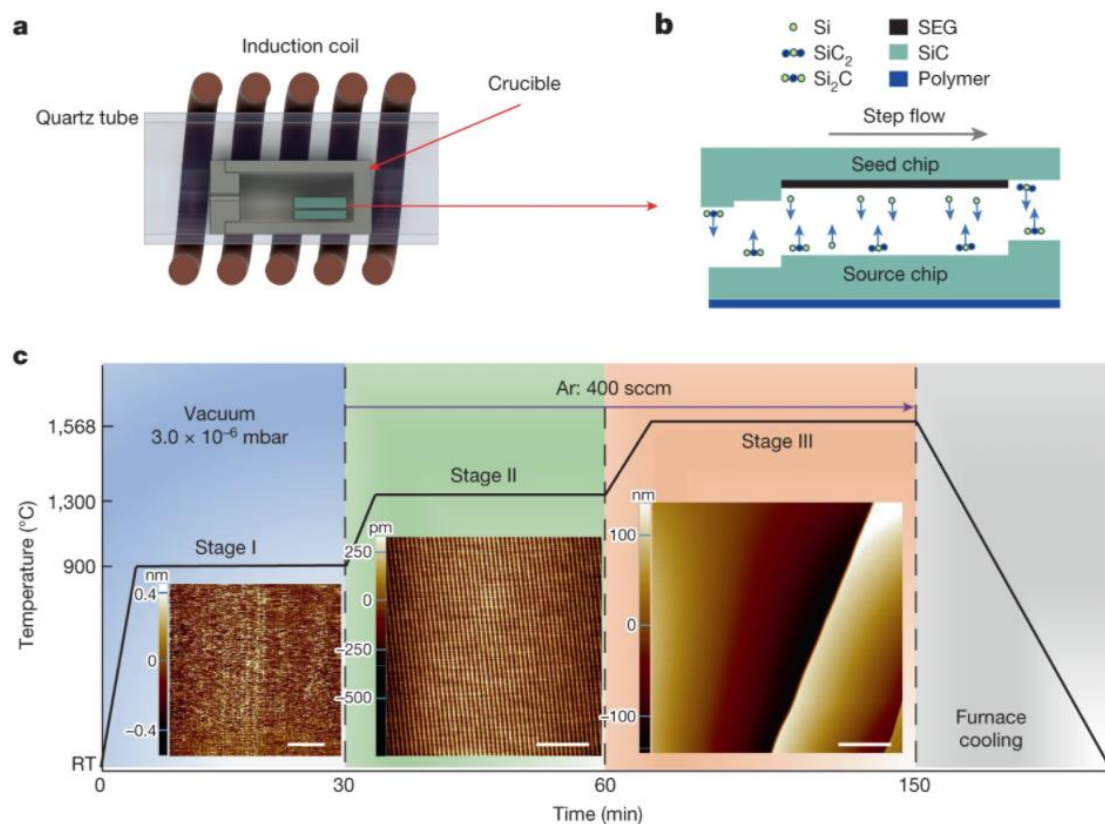


图 1 半导体石墨烯的制备方法

该研究成果的通讯作者之一、天津大学天津纳米颗粒与纳米系统国际研究中心马雷教授认为，如果能够实现半导体石墨烯单晶的大规模生产，将为人类从“硅时代”进入“碳时代”奠定重要基础。目前半导体石墨烯距离实际应用还比较遥远，要完全实现半导体石墨烯的工业应用，取决于其从毫米级单晶生长到英寸级单晶的进程，可能至少还需要持续研究 10-15 年。

(执笔：沈湘 王丽)

¹ <http://www.tju.edu.cn/info/1182/8852.htm>

日本东京大学首次在光学系统中实现基于 GKP 量子比特的容错量子计算

量子计算机利用量子相干叠加原理，旨在实现超快的并行计算和模拟能力，是当今世界科技的前沿领域。目前，虽然中等规模的量子计算机已经问世并在特定任务中展示了超越经典系统的优势，但要真正发挥量子计算机的潜力，仍需克服一系列挑战。其中，如何将量子信息编码成适合量子纠错的逻辑状态，成为关键问题之一¹。研究界正在探索各种玻色子编码的使用，如二项式编码（binomial codes）、猫编码（cat codes）和 Gottesman-Kitaev-Preskill（GKP）编码。其中，GKP 量子比特是一个很有前途的候选者，因为所需的多量子比特操作在光学频率上很容易获得。然而，到目前为止，GKP 量子比特只在机械和微波频率下得到了证明。

日本东京大学和日本理化所研究团队基于猫态干涉成功在通信波长实现了 GKP 态，并通过无损耗校正的零差测量进行了验证，最终实现了基于通信波长光传播的量子计算容错逻辑状态。相关研究成果已于 2024 年 1 月 18 日在国际期刊《科学》上发表²。

¹

<http://portal.nstl.gov.cn/choice/detail/getChoiceDetail.htm?serverId=14&uuid=2689df663f0baeab06fe0c07d702520e&recommendId=139323&controlType=>

² Shunya Konno, Warit Asavanant, Fumiya Hanamura, et al. Logical states for fault-tolerant quantum computation with propagating light [J]. Science, 2024, 383(6680):289-293.
<https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.adk7560>

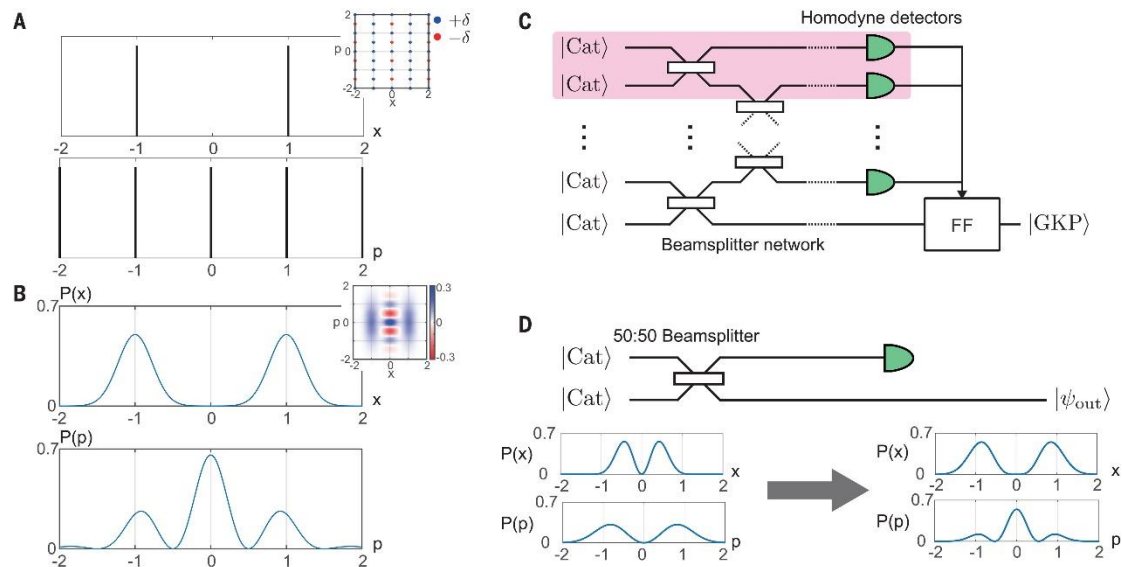


图 1 光学系统中的 GKP 态及其生成方法

该研究的创新点包括：（1）GKP 量子比特的创新实现：首次在通信波段光中实现了 GKP 量子比特。这一突破意味着在光学系统中利用 GKP 量子比特进行量子计算成为可能。（2）通信波段光中的量子状态操控：基于 1545.32 nm 的连续波激光器，通过精细控制和光学参数振荡器的应用实现了量子态操控。这一进展为量子信息的精确处理和量子计算提供了新的途径。（3）高保真度的量子态生成：实验生成了具有非经典性和非高斯性质的“猫态”。这些状态展示了 GKP 量子比特的典型特征，如三叉形的 GKP 态，为量子计算提供了高保真度的基础。（4）实用量子计算的潜力：展示了在光学系统中利用 GKP 量子比特进行容错量子计算的可行性。这不仅是理论上的突破，还为实用量子计算机的开发提供了关键技术。研究人员还提出了进一步改进的方向以实现更亮、多峰的 GKP 量子比特，为光学量子计算奠定基础。

此外，2024 年 1 月 9 日美国 QuEra 公司公布了一份其基于中性原子的纠错量子计算机的路线图。该路线图提出：2024 年推出一台具有 10 个逻辑量子比特和 256 个物理量子比特的量子计算机，2025 年推出具有 30 个逻辑量子比特和 3000 个物理量子比特的量子计算

机，2026 年推出具有 100 个逻辑量子比特和约 10000 个物理量子比特的纠错量子计算机¹。

(执笔：李国强 王丽)

¹ <https://www.hpcwire.com/2024/01/09/quera-debuts-3-year-roadmap-to-10000-physical-and-100-logical-qubits/>

产业动态

美国苹果公司和 Amkor 公司扩大先进封装领域合作

据苹果公司官网 2023 年 11 月 30 日报道，苹果公司宣布将成为芯片封装和设计公司 Amkor 在美国亚利桑那州皮奥里亚制造和封装工厂的第一个、也是最大的客户¹。据此前报道 Amkor 公司将为苹果芯片提供封装服务，该芯片由附近台积电晶圆厂生产。苹果公司也是台积电最大的客户之一。由此可见，这也是苹果公司、台积电和 Amkor 公司共同促进美国芯片供应链建设的一大举措²。

苹果公司首席运营官 Jeff Williams 表示，苹果公司坚定致力于美国制造业的未来，将继续扩大在美投资。

苹果公司和 Amkor 公司合作了十多年，由 Amkor 公司封装苹果公司产品中广泛使用的芯片。出于“美国制造”的共同愿望，苹果公司和 Amkor 公司制定了建造美国最大的外包先进封装工厂的计划。Amkor 公司将在该项目上投资约 20 亿美元，建成后将雇佣 2000 多名员工。

（执笔：沈湘）

美国 Neurophos 公司融资 720 万美元研发用于光学 AI 芯片的超材料制备工艺

据官网 2023 年 12 月 14 日报道，美国杜克大学和 Metaccept 公司的子公司 Neurophos 已筹集了 720 万美元种子轮资金，以寻求超材料

¹ <https://www.apple.com/newsroom/>

² <http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=778ba1d0b9326c3576cba4a86110a349&recommendId=136166&controlType=>

和光学人工智能（AI）推理芯片的技术突破¹。本轮融资由盖茨旗下风投公司盖茨前沿（Gates Frontier）领投，并得到 MetaVC Partners、Mana Ventures、AdAstral 等投资者支持。

尽管 GPU 在加速 AI 工作负载方面取得了巨大成功，但在功耗方面受到限制。光学计算技术的支持者认为光子学可以大幅降低功耗，从而提高计算速度并远远超过目前 GPU 极限。尽管 AI 光学计算领域最近被投入了大量资金，但该领域进展有限，主要原因是现有光学设备过于庞大和笨重，导致难以扩展。超材料为控制光的流动提供了新范式。

Neurophos 公司计划使用这笔种子资金为数据中心设计和生产光学超表面（metasurface），利用超表面的先进光学特性作为处理 AI 工作负载的超密集张量核心处理器。Neurophos 计划利用高速硅光子学来驱动基于超表面的内存处理器，使其能够进行快速、高效的 AI 计算。光学超表面将光学矩阵运算中的组件缩小到前所未有的大小，使得基于超材料的光调制器比标准代工厂 PDK（工艺设计套件）的光调制器小 1000 倍以上，能够提供超过 100 万 TOPS（每秒数万亿次运算）的性能。相比之下，英伟达公司目前的 GPU 芯片 H100 SMX5 最多可提供 4000 TOPS 的 DNN（深度神经网络）性能²。此外，光学架构与标准 CMOS 工艺兼容可以实现大规模制造，克服了光计算 AI 加速器所面临的商业可行性的关键障碍。

（执笔：张冉冉）

¹ <https://www.neurophos.com/press>

²

<http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=70837619a0b5b6e93bb0602d7a27d261&recommendId=137701&controlType=>

我国 DRAM 芯片制造商长鑫存储 GAA 技术进展引发业界关注

据韩国商业报 2023 年 12 月 15 日报道¹，我国 DRAM 芯片制造商长鑫存储（CXMT）在美国旧金山举办的第 69 届 IEEE 国际电子器件会议（IEDM）上发表了一篇论文，展示了环栅晶体管结构（Gate-All-Around, GAA）技术，其适用于 DRAM 的下一代晶体管结构。

三星电子公司首次将 GAA 技术应用于 3 nm 制造工艺，被认为是克服半导体小型化局限的突破性技术。目前三星电子公司也是唯一实现 GAA 技术商业化的企业。

长鑫存储发表声明表示该论文描述了 DRAM 结构和 4F2 设计可行性相关的基础研究，与长鑫存储当前的生产工艺无关，暗示该设计还无法成为可商业化的产品。长鑫存储目前还没有发布相关样品，但本次论文发布引起了业界对该公司下一代内存的广泛关注。

韩国商业报表示，这表明长鑫存储在面对美国封锁下，不断加强自主芯片开发能力。此类芯片技术通常受美国出口管制限制，但长鑫存储尚未在美国实体管制清单上。这一技术发展也引发了业界对中国半导体产业是否能在美国制裁情况下再次实现技术飞跃的关注²。

（执笔：沈湘）

¹ <https://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=207885>

² <http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=83f738568d0e1f084c6b4680014e3cab&recommendId=136339&controlType=>

DreamBig Semiconductor 公司推出开源小芯粒平台“MARS”

据欧洲电子资讯网 2024 年 1 月 8 日报道，DreamBig 半导体公司推出了世界领先的小芯粒平台“MARS”，旨在为大众市场提供基于开放标准小芯粒的新一代半导体产品¹。这个颠覆性的小芯粒平台将使初创公司或任何规模的公司能够以优化的性能和能效扩大生成式 AI、大语言模型、汽车、数据中心和边缘计算的解决方案。

DreamBig 半导体公司的“MARS”芯粒平台允许客户将投资重点放在硅芯片领域，从而可以提供差异化、有竞争优势的产品，并通过平台提供的开源标准，以更低成本更快将产品推向市场。这对于快速发展的人工智能训练和推理市场尤其重要。

“MARS”芯片平台解决了人工智能服务器和加速器硬件开发人员面临的两大技术挑战——扩大计算规模和扩大网络规模。通过 Silicon Box 公司建立的 3D HBM（高带宽存储器）的先进封装优势，“MARS”芯片平台还能以最低成本提供最高性能的产品，且不会出现困扰行业的产量和可用性问题，从而消除了规模化障碍。

官网信息显示，Dream Big Semiconductor 成立于 2019 年，由 Marvell 公司的创始人周秀文和戴伟立分别担任执行主席、执行副主席，致力于为数据中心和存储加速提供全面的低成本、低延迟和高吞吐量的智能网卡（SmartNIC）解决方案²。

（执笔：沈湘）

¹ <https://www.eenewseurope.com/en/open-chiplet-platform-enables-scaling-of-next-generation-llms-ai/>

² <http://portal.nstl.gov.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=22d101b9215a10a335096256d0f29bf3&recommendId=137788&controlType=>

荷兰设备巨头 Neways 收购 Sencio 公司以扩展智能传感和驱动应用先进封装业务

据官网 2024 年 1 月 17 日报道，荷兰知名设备制造商 Neways 宣布已成功收购 Sencio 公司¹。Sencio 公司专注于智能传感和驱动应用领域的先进封装技术，此次战略性收购将进一步强化 Neways 在微电子领域的市场地位，为客户提供更全面的集成服务。

随着电子系统不断实现更高程度的微型化和集成化，传感器系统的测试变得越来越复杂。不同于标准集成电路，传感器系统需要定制的封装和测试工艺，而且只能在生产线末端进行整个传感器系统的测试和校准。Sencio 公司开发的先进封装工艺可以满足传感器的精确度要求。Sencio 公司将以 Neways Advanced Microsystems 品牌继续运营，并在荷兰现有设施内进行技术生产。

Neways 在光电子领域拥有超过 30 年的经验，专注于光子元件和模块的集成，为自动驾驶、高速数据通信和医疗成像等领域提供光学传感和检测解决方案。通过整合 Sencio 公司的专业技术和经验，Neways 将进一步优化光学传感和检测解决方案，以满足不断发展的市场需求。

(执笔：李国强)

¹ <https://newayselectronics.com/neways-enhances-its-technology-position-in-advanced-microelectronics-through-acquisition-of-sencio/>

《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

