

集微技术信息简报

2024 年第 **6** 期 (总第 63 期)

中国科学院文献情报中心

2024 年 12 月制

本期目录

政策计划

美国商务部发布对华芯片出口管制新规 新增 140 家实体清单	1
美国国防部与美国小企业管理局宣布首个小企业关键技术投资计划 获批基金.....	2
美国 NIST 宣布投资 1500 万美元成立关键和新兴技术标准国际化卓越中心.....	3
美国政府宣布投资 8.25 亿美元建造 EUV 加速器	4
欧洲创新理事会宣布 2025 年 14 亿欧元投资计划.....	5
欧洲创新委员会资助五个量子技术项目	6
美国能源部宣布拨款 3000 万美元推动量子计算应用	7
美国政府将投资高达 1 亿美元加速可持续半导体材料的研发和人工智能技术.....	8
美国国防部与德国国防部达成供应链安全合作安排协议	8

产业洞察

美智库发布《半导体出口管制的双刃剑》报告	10
美智库发布《美盟友出口管制对美中半导体制造设备业的真正影响》 报告.....	17
美智库发布《IMEC：世界领先的微电子合作研发中心》报告	23
全球半导体专利申请量激增、中国尤为突出	27

前沿研究

中国科学院半导体研究所提出光学声子软化新理论	30
美国宾夕法尼亚州立大学研发出单片式三维异构集成近传感器计算 芯片.....	31
谷歌公司发布高量子纠错准确性解码器 AlphaQubit	33
IBM 在量子计算实用性和性能方面取得重大进展.....	35

D-Wave 完成 4400+量子比特 Advantage2 量子处理器校准.....	35
---	----

产业动态

楷登电子公司成功设计并制造出首个系统级小芯片	37
SK 海力士宣布量产业界首款 321 层 4D NAND 闪存	38
三星电子计划到 2030 年投资约 20 万亿韩元建设新型半导体研发综合体.....	38
美国商务部最终确定向台积电提供 66 亿美元补贴	39
美国商务部拟资助 Akash Systems 公司 1820 万美元建设先进半导体制造工厂	40
美国商务部拟资助 Wolfspeed 公司 7.5 亿美元建设碳化硅晶圆制造工厂	40
美国商务部拟资助英飞朗公司 9300 万美元支持半导体通信和国家安全技术发展.....	41

政策计划

美国商务部发布对华芯片出口管制新规 新增 140 家实体清单

2024 年 12 月 2 日，美国商务部工业与安全局（BIS）发布了两项重要的出口管制新规，即《补充外国直接生产规则以及修订先进计算和半导体制造物项管制措施》（简称“《暂行最终规则》”）和《实体清单的新增和修改及移出经验证最终用户》（简称“《最终规则》”）。这是美国政府自 2022 年 10 月以来出台的第三波对中国半导体行业大规模出口禁限措施，强调了其小院高墙战略，以限制中国关键技术能力，尤其是先进人工智能和本土半导体生态系统。

这些规则包括¹：1）对 24 种半导体制造设备和 3 种用于开发或生产半导体的软件工具的新管制措施，涵盖蚀刻、沉积、光刻、离子注入、退火、计量与检测、清洗等设备、以及提高先进机器生产率或允许较非先进机器生产先进芯片的软件。2）对高带宽内存（HBM）的新管制措施，控制具有特定“内存带宽密度”的 HBM 堆栈。3）解决合规和转移问题的 8 条新的预警指南；4）新增 140 个清单实体和修改 14 个，涉及中国工具制造商、半导体工厂和参与推进中国政府军事现代化的投资公司。新增 136 家中国实体和 4 家中国实体海外子公司，70% 以上为芯片制造设备公司。5）以及几项重要的规则变更，以提高之前管制措施有效性。其中：

通过两项新的外国直接产品规则（FDP）和相应的最低含量标准，扩大管辖权。1）半导体制造设备 FDP：在外国制造的半导体生产设备及其关联物品，拟出口至中国澳门或《出口管理条例》

¹ <https://www.bis.gov/press-release/commerce-strengthens-export-controls-restrict-chinas-capability-produce-advanced>

(EAR) 所列 D:5 组国家（其中包含中国），则必须严格遵守美国的出口管制法规。**2)** 用于标识特殊“军事最终用户”的“脚注 5”**FDP:** 针对被列入实体清单且标注“脚注 5”的实体，若外国生产的商品符合特定产品范围将受 EAR 管辖，出口、再出口或转让需许可证。**3)** 最低含量标准：当特定半导体生产设备含有美国原产的集成电路，并且被运往指定目的地时，无论美国技术的占比大小，均不享受豁免。

新增了 8 条新的预警指南，帮助相关企业识别合规风险。**1)** 非先进节点制造主体却订购先进节点 IC 生产设备；**2)** 订单中最终用途或最终用户信息模糊；**3)** 许可证历史记录存在不确定性；**4)** 出口后被第三方更改用于禁止的最终用途；**5)** 客户管理层或技术团队与实体清单上的企业存在人员重叠；**6)** 新客户与违禁用途关联；**7)** 遵守 FDP 规则与供应链尽职调查；**8)** 设备或技术的最终用户位置存在风险。

截止至 2025 年 1 月 31 日，相关方可对该新规的具体条款和实施方式向美国商务部提出意见或建议。

(执笔：王丽 沈湘)

美国国防部与美国小企业管理局宣布首个小企业关键技术投资计划获批基金

据官网 2024 年 10 月 22 日报道，美国国防部（DOD）与美国小企业管理局（SBA）宣布首个小企业关键技术投资（SBICCT）计划获批基金¹。SBICCT 计划主要目标是吸引和扩大私人投资进入对经济和国家安全至关重要的技术领域，获得相应许可的基金有资格获得 SBA 担保贷款，最多可提供 1.75 亿美元贷款。截至 2024 年 10 月

¹ <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3942474/department-of-defense-and-us-small-business-administration-announce-first-licen/>

22 日，经过 SBA 调查流程后，4 只基金获得了 SBA 许可，9 只基金获得了 SBA 批准筹集私人资本。美国国防部预计首批 13 家基金将在 14 类国防技术领域向 1700 多家小企业投资超 40 亿美元。

（执笔：沈湘）

美国 NIST 宣布投资 1500 万美元成立关键和新兴技术标准国际化卓越中心

据官网 2024 年 10 月 15 日报道，美国国家技术与标准研究院（NIST）宣布已拨款 1500 万美元设立一个卓越中心，加强人工智能、量子技术和生物技术等关键和新兴技术（CETs）的国际化标准建设¹。

该卓越中心将由美国材料与试验学会国际组织（ASTM International）²领导，与来自整个标准开发生态系统的多个伙伴合作建设。ASTM International 已确定的合作伙伴包括：美国国家标准协会（ANSI）、美国自动化推进协会（A3 Association for Advancing Automation）、美国机械工程师协会（ASME）、国际电气与电子工程师协会（IEEE）、UL Standards and Engagement、CSA Group、Accuris、Nexight Group 等。

NIST 将通过确定标准研究领域、召集利益相关者并提供技术和科学指导以及专业知识来帮助利益相关者群体达成共识，从而支持标准制定。美国广泛参与国际标准进程将支持美国产品和服务的全球市场准入。该卓越中心将重点关注四方面工作：

（1）技术标准化前的工作准备与引导，以鼓励和确保私营部门特别是中小企业等代表性不足的群体参与国际标准化工作。

¹ <https://www.nist.gov/news-events/news/2024/10/nist-awards-15-million-astm-international-establish-standardization-center>

² ASTM International 是当前世界上最大、最有影响力的国际标准组织之一，是一个独立的非政府、非盈利性标准化工作机构。

(2) 劳动力能力建设，以创建专业人才管道，特别是职业生涯早期到中期的专业标准化人才。

(3) 与 NIST 合作开展试点项目，以加快选定 CETs 所需的行业标准的发展。

(4) 创建一个信息和数据共享中心，作为标准化所有利益相关者的核心资源，并提供量身定制的信息和工具以满足特定 CETs 的具体需求和优先事项。

该卓越中心工作将与《美国政府关键和新兴技术国家标准战略》及其实施路线图保持一致，还将支持和补充美国国家标准协会发布的《美国标准战略》的更广泛目标，以确保美国在标准化工作中保持全球领先地位。

(执笔：沈湘 王丽)

美国政府宣布投资 8.25 亿美元建造 EUV 加速器

据官网 2024 年 10 月 31 日报道，美国商务部和国家半导体技术中心（NSTC）的运营商 Natcast 宣布了美国首个 CHIPS 研发旗舰设施极紫外（EUV）加速器的预期位置¹。这一重要设施预计将在纽约州的奥尔巴尼纳米技术中心投入运行，该中心由 NY CREATES（纽约研究、经济进步、技术、工程和科学中心）拥有并运营。同时，该设施得到了高达 8.25 亿美元的拟议联邦投资的支持。EUV 加速器将专注于推进最先进的 EUV 光刻及相关技术的研发，这对于 NSTC 实现其三个主要目标至关重要。通过这一设施，NSTC 将能够获得 EUV 光刻研发能力，进一步推动半导体技术的创新与发展。

Natcast 和 NY CREATES 是推进半导体研发和劳动力发展的非营利性公司，它们共同负责运营奥尔巴尼纳米技术中心（NSTC），并

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/10/biden-harris-administration-announces-ny-creates-albany-nanotech>

建立 EUV 加速器，旨在开展下一代半导体研发活动。这项重要的研发设施将于 2025 年投入使用，标志着 Natcast、NY CREATES 及 NSTC 成员将能够携手进行深度合作，共同推动创新半导体技术的研发。EUV 加速器的启用对于加快半导体技术的商业化进程以及巩固美国在全球技术领域的领先地位具有至关重要的作用。

EUV 加速器的关键能力预计包括：

1. 获得尖端的 EUV 光刻工具和下一代半导体研发能力，包括高数值孔径（NA）EUV 光刻系统，预计在 2025 年将拥有标准 NA EUV 光刻系统，2026 年则将进一步拥有高 NA EUV 光刻系统。
2. 召集行业、学术和政府合作伙伴并促进合作，共同推进技术创新。
3. 设立专门的 NSTC 现场办公室，为 Natcast 和 NSTC 成员研究人员提供必要的支持。
4. 支持并推动提供、培养和发展人才的计划。
5. 致力于增加 NSTC 成员的关系及其参与度，同时与所有 NSTC 设施携手，共同营造一个开放、协作的研发环境。

（执笔：沈湘 王丽）

欧洲创新理事会宣布 2025 年 14 亿欧元投资计划

欧洲创新理事会（EIC）于 2024 年 10 月 29 日在其官网上宣布了 2025 年投资计划。根据该计划，EIC 预计将为欧洲深度技术研究和高潜力初创企业提供约 14 亿欧元（约 14.7 亿美元）的资金支持，这一数额相比 2024 年增加了近 2 亿欧元（约 2.1 亿美元）¹。除增加预算外，EIC 2025 年工作计划还引入了多项改进措施，其中包括通过欧洲战略技术平台（STEP）扩大计划，来更好地帮助企业获得股

¹ https://eic.ec.europa.eu/news/european-innovation-council-invest-eu14-billion-deep-tech-and-scale-strategic-technologies-2025-2024-10-29_en; https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_24_5386; <http://mkc.cmes.org/article-detail/135819/467249>

权融资。

重点投资计划涵盖了以下几个核心方面：（1）**EIC STEP Scale-up** 计划：这是一项斥资 3 亿欧元的重大举措，其目的在于为那些致力于将战略技术引入欧盟市场并力图拜托战略依赖的公司提供更多投资。通过 EIC 基金的助力，每个符合条件的公司将获得 1000-3000 万欧元（约 1051-3153 万美元）的投资。此外，该计划还将引入私人共同投资，以确保总投资至少达到 0.5-1.5 亿欧元（约 0.53-1.58 亿美元）。此计划尤为关注数字技术、清洁技术（包括净零排放）和生物技术等方面的投资与发展；（2）**EIC Challenges** 计划：预计投资总额将达到 1.2 亿欧元（约 1.26 亿美元），专项用于在自主机器人、气候适应性作物、废物转化型材料和医疗诊断等新兴技术的初创公司；同时，该计划还将划拨 2.5 亿欧元（约 2.6 亿美元），以扶持专注于生成式人工智能、新空间、农业技术和未来移动解决方案等特定目标技术的早期公司；（3）为提升来自研究和创新绩效水平较低国家的新兴公司的发展潜力，本计划将增加其获得商业加速服务的机会，助力这些公司实现快速成长；（4）对于在 **EIC Transition**、**EIC Accelerator** 等计划下表现优秀的项目，将颁发奖励，以获得补充和替代资金，进一步推动这些项目的创新与发展。

（执笔：沈湘）

欧洲创新委员会资助五个量子技术项目

据欧盟量子旗舰计划 2024 年 10 月 16 日报道¹，欧盟创新委员会将为五个量子技术项目提供资助，项目周期 3~4 年，项目金额约 300 万欧元（约 326 万美元）。五个项目的技术方向及承担机构具体为：

（1）**QOSiLICIOUS** 项目，由奥地利理工学院承担，聚焦硅基量子

¹ https://qt.eu/news/2024/2024-10-16_cic-pathfinder-open-call-funds-new-quantum-tech-projects

光学商业化；（2）QuSPARC 项目，由奥地利科学院承担，聚焦基于自旋光子架构的量子技术；（3）EQUSPACE 项目，由芬兰于韦斯屈莱大学承担，聚焦利用硅基自旋声学实现新的量子前沿技术；（4）ELEQUANT 项目，由法国国家科学研究中心承担，聚焦纠缠飞行电子量子技术；（5）QCEED 项目，由爱尔兰科克大学承担，聚焦量子点耦合工程。

（执笔：于杰平）

美国能源部宣布拨款 3000 万美元推动量子计算应用

2024 年 10 月 24 日¹，美国能源部高级研究计划局（ARPA-E）宣布为“量子计算在计算化学中的应用项目（QC3）”拨款 3000 万美元用于推动量子计算在化学和材料科学模拟中的应用。QC3 项目旨在开发量子算法，以变革能源研究的各个领域，例如，设计新型和可持续工业催化剂、发现新型超导体以实现更高效的电力传输、开发改进型电池化学。

ARPA-E 主任表示，化学和材料的计算机模拟推动了能源领域的研发，但是经典计算的算力有限，QC3 项目将利用量子计算的力量来超越算力限制，为研究人员提供新型工具。

QC3 项目致力于通过开发、优化和共同设计量子解决方案来解决能源领域的一些最紧迫的挑战，要求每个研究团队确定化学和材料科学中的特定问题，通过软件优化实现性能的突破性提升，与传统方法相比性能提升 100 倍或实现可扩展的方法并在计算机硬件上进行验证。

（执笔：于杰平）

¹ <https://arpa-e.energy.gov/news-and-media/press-releases/us-department-energy-announces-30-million-use-quantum-computing>

美国政府将投资高达 1 亿美元加速可持续半导体材料的研发和人工智能技术

据官网 2024 年 10 月 2 日报道，美国商务部宣布举行一场公开竞赛的意向通知（NOI），旨在展示人工智能在帮助开发满足行业需求的新的可持续半导体材料和工艺方面的应用，并在五年内完成设计和采用¹。此举是为了使美国半导体行业长期蓬勃发展，必须开发创新的、具有商业竞争力的技术，并以保护环境和当地社区的方式实现材料和制造芯片的可持续地生产。

为了实现这一目标，美国“芯片计划”（CHIPS for America）预计将投入 1 亿美元资金，用于资助在大学主导且行业知情的情况下，开展与可持续半导体制造相关的人工智能驱动的自主实验（AI/AE）合作研发项目。

AI/AE 作为一种潜在的改变游戏规则的方法，正在加速材料研究和开发领域的发展。通过将自动合成和表征工具与 AI“规划器”相结合，AI/AE 能够自动确定下一轮实验活动，从而大大加快了新材料的设计和材料数据的获取速度。这表明 AI/AE 在推动半导体等高科技领域的发展中发挥了重要作用。

（执笔：沈湘）

美国国防部与德国国防部达成供应链安全合作安排协议

据官网 2024 年 10 月 22 日报道，美国国防部与德国国防部签署了双边、不具约束力的供应链安全安排协议（SOSA）²。该协议将

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/10/biden-harris-administration-invest-100-million-accelerate-rd-and-ai>

² <https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3942126/dod-german-ministry-of-defence-enter-into-security-of-supply-arrangement/>

使美国和德国能够获得所需的工业资源，以快速满足国防需求、解决挑战国防能力的意外中断以及提高供应链韧性。

通过这一协议，美国和德国承诺支持彼此优先采购关键国防资源。美国将根据美国国防优先和分配制度向德国提供一些保证，项目由国防部决定，评级授权由商务部决定；德国将根据工业基础制定政府-工业行为准则，德国企业将自愿同意尽一切合理努力向美国提供优先支持。

德国是美国第 19 个 SOSA 合作伙伴。其他 SOSA 签署国包括澳大利亚、加拿大、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、印度、以色列、意大利、日本、拉脱维亚、立陶宛、荷兰、挪威、新加坡、西班牙、韩国、瑞典和英国。

（执笔：沈湘）

产业洞察

美智库发布《半导体出口管制的双刃剑》报告

2024 年 10 月，美国智库战略与国际研究中心（CSIS）发布了《半导体出口管制的双刃剑》报告¹，分析了自 2018 年以来中国应对美国半导体出口管制的策略，探讨了中国通过“去美化设计”和“规避设计”策略以减少对美国技术依赖的举措，特别是在先进封装技术领域的反制措施。该报告是系列报告中的第一篇，后续的三份报告将分别从半导体制造设备及其子系统和组件、电子设计自动化软件（EDA）、以及芯片设计与 IP 核等方面，阐述中国的反制策略。

一、自 2018 年以来中国应对美国半导体出口管制的反制策略

近年来，美国的经济安全战略发生了重大变化，出口管制已成为其中的核心工具。2018 年 4 月，特朗普总统对中兴通讯实施了严格的制裁，几乎将其推向破产边缘。尽管制裁后来有所缓和，但这一事件成为美国扩大出口管制的早期重要节点。2022 年，美国国家安全顾问杰克·沙利文（Jake Sullivan）在演讲中指出，美国必须“尽可能保持对中国的技术领先地位”，这标志着美国从长期奉行的“滑动比例”（代际差）措施转向更加严格的出口管制。在拜登政府的领导下，美国出台了两轮主要的半导体出口管制政策，主要针对先进半导体供应链，特别是中国等特定国家。

随着美国加强对全球半导体市场的控制，中国的官员和企业迅速做出反应，采用了各种策略应对美国的出口管制。中国的半导体生态系统主要通过两种途径减少对美国技术的依赖：正在采取“去美化设计”（Design out）和“规避设计”（Design around）。“去美化设计”是指寻找美国技术的替代来源，包括中国国内企业或第三国技术。

¹ <https://www.csis.org/analysis/double-edged-sword-semiconductor-export-controls>

“规避设计”则是开发新技术，绕过美国技术，甚至通过创新彻底消除供应链中对某些受控技术的依赖。

在“去美化设计”方面，中国政策制定者和半导体企业尽可能用替代产品替换美国供应商。非美国生产线正在通过两种方式建设。一方面，中国的中央及地方政府正投入数十亿美元，支持国内企业生产所需的设计、组件和工具。同时，政府对国内公司施加了压力，要求优先采购本土技术。另一方面，第三国的公司也正在填补美国技术退出后留下的市场空白。例如，在中国相关文件中的“Delete A”（即“去美化”或“去美国化”计划），旨在减少中国数字供应链对西方技术的依赖。

在“规避设计”方面，中国致力于开发新技术，寻找替代方案来实现先进芯片的性能，尤其是在先进封装技术的创新上。通过封装技术的突破，中国有望在这一领域占据市场主导地位。出口管制的加剧，反而加速了中国的技术研发，这不仅减少了供应链中对美国技术的依赖，还为中国企业在半导体技术领域的进一步崛起提供了潜在机会。

随着替代供应商和新技术的出现，美国如果不及时调整其出口管制政策，可能会面临出口收入下降和全球影响力削弱的风险。先进封装技术已成中国创新的关键领域，也是削弱美国出口管制影响的战略突破点。

二、先进封装技术的兴起

自半导体技术诞生以来，芯片制造商一直追求更高的计算能力和效率的双重目标。多年来，研究人员和工程师通过在芯片上集成更多的晶体管来实现这一目标，同时不断优化功耗（P）、性能（P）、芯片面积（A）与成本（C）之间的关键平衡，即所谓的 PPAC 范式。然而，近年来，晶体管尺寸的缩小速度已逐渐放缓，这对摩尔定律的持续实用性提出了挑战，也催生了对其它提升计算能力和效率策

略的需求。

自 2000 年代末以来，前沿制程节点的名称不再单纯表示芯片的最小特征尺寸。相反，这些节点名称象征着通过晶体管密度的整体提升来推动性能，而这种提升不再主要依赖于缩小晶体管尺寸，而是通过采用新的方法，如精简元件设计或缩短晶体管间间距来实现。然而，即使是这些新方法，在过去十年中也时常难以维持摩尔定律预测的技术进步速度。同时，随着晶体管密度提升，资本成本显著上升，给行业带来了巨大挑战。

先进封装技术通过提升晶体管密度、处理能力和整体效率，成为一种相较于继续缩小晶体管尺寸更具资本效率的替代方案。与传统封装主要集中在下游制造环节不同，先进封装贯穿了上游和下游制造环节，并逐步将更多封装工艺向上游推进。在此过程中，采用了与传统封装完全不同的工艺和技术，旨在通过优化输入/输出（I/O）性能、减少延迟（从发出指令到数据开始传输的等待时间）以及提升功率效率，重新设计芯片及其互连结构。

Chiplet 设计是先进封装领域的革命性创新之一，通过将多个具有独立功能的芯片集成到单一封装单元中，实现了异构集成。该封装方法不仅可以提升能效、加速数据传输，还能显著减少信号衰减。Chiplet 设计的主要优势在于其应用灵活性极强，可以将系统中需要频繁交互的半导体元件更紧密地布置在一起，从而减少延迟并降低能耗。最重要的是，Chiplet 技术使得在无需依赖最先进芯片制造工艺的情况下，开发出性能接近先进工艺芯片的微电子系统成为可能。

三、美国对先进封装技术的出口管制

对先进封装技术实施出口管制面临诸多挑战，因为这些技术通常依赖于广泛使用且相对容易获得的设备和材料。与纳米级别的半导体制造不同，先进封装工艺主要在微米级别进行，所需的技术设备相对不那么精密。然而，一些关键的技术投入仍然至关重要，比

如混合键合和先进基板，它们对于实现高性能的先进封装起到了决定性作用。

混合键合技术是推动先进封装创新的前沿技术之一，允许半导体晶圆进行垂直连接，从而实现 3D 晶圆堆叠，这对延续摩尔定律在功率和性能方面的进展至关重要。混合键合可以通过晶圆对晶圆（W2W）或晶粒对晶圆（D2W）的方式完成，这两种方法都需要专门的制造设备。荷兰公司 **Besi** 是混合键合领域的主要参与者之一，占据全球先进芯片贴装市场的主要份额。混合键合工艺主要在晶圆厂内完成，而非外包给半导体组装与测试（OSAT）厂商。主要的开发者包括台积电、三星、英特尔和 **SK 海力士** 等领先的芯片制造商，以及中国的中芯国际和长江存储技术公司。

先进基板在芯片制造和封装中扮演着至关重要的角色，它们不仅是微加工的基础表面，也是芯片计算单元与外部电气连接的关键接口。随着 5G、高性能计算和电动汽车等专业应用的快速增长，市场对能够承受高信号频率、温度及数据吞吐量的半导体需求不断增加。先进基板，尤其是基于砷化镓（GaAs）、氮化镓（GaN）和碳化硅（SiC）的基板，变得愈发重要。目前，全球先进基板的供应链主要集中在中国台湾地区、日本和韩国，这三个地区的公司占据了全球 88% 的市场份额。然而，中国通过深南电路和珠海越亚等新企业，积极扩展其在该领域的市场份额。美国也通过《芯片和科学法案》的政府补贴，寻求在这一市场中占据一席之地。

总体来看，尽管美国希望通过出口管制保持其在半导体领域的领先地位，但中国在先进封装领域的迅速发展，特别是在混合键合和先进基板方面的投资，可能会改变现有的全球供应链格局。这些技术的发展和运用，有可能进一步加速全球半导体领域的竞争和合作。

四、中国在先进封装技术方面的反制策略

美国的出口管制无意中激励了中国企业加快技术创新，从而对全球半导体市场的竞争格局构成潜在威胁。中国从过去以复制为主的商业模式转向创新，这种隐含的文化转变成为中美技术竞争中的重要变化。在美国开始对封装工具和先进基板等技术实施管制后，中国的“规避设计”策略引起了广泛的关注。

在“规避设计”策略下，中国正依托其传统的封装能力，构建先进的封装生态系统，以规避美国的出口管制。中国的 OSAT 厂商越来越多地转向先进的后道工艺，例如 Chiplet 技术。中国政府与民营企业共同支持先进封装技术的研发。例如，2023 年 8 月，中国科技部宣布将资助多达 30 个基于 Chiplet 技术的研究项目，总额超过 640 万美元。同时，无锡市承诺投资 1400 万美元打造“Chiplet Valley”，以此向硅谷致敬。

中国的代工厂和芯片设计公司也在将先进的封装方法融入其半导体制造业务。华为通过其子公司海思与封装设备供应商建立合作，并开始探索 3D 芯片堆叠设计，以绕过美国的制裁限制。中芯国际作为中国的先进代工厂，积极推动其他中国企业采用先进封装技术，并与华为合作开发芯片。

长江存储等中国企业也正在通过先进封装技术来规避美国的法规。长江存储采用先进的封装工艺开发了世界领先的存储芯片，吸引了包括苹果公司在内的国际客户。此外，中国中科声龙公司的 Jasminer X4 实现了异构集成的实际应用，成为行业内的一个标志性案例。虽然中国对 Chiplet 生态系统进行了巨额投资，但实现规模化生产仍是一个挑战。然而，鉴于美国在封装领域并不占据重要地位，中国在这个领域有望迅速赶上甚至超越美国。

在“去美化设计”策略方面，碳化硅（SiC）晶圆衬底市场是一个显著的例子。中国长期以来一直致力于扩大 SiC 市场，并在其“十四五”规划中明确提出对 SiC 的支持，展示了政府主导的战略。通过公

私合作，中国企业与中国科学院等主要科研机构合作，助力中国成为 SiC 专利领域的领先者。与此同时，电动汽车巨头比亚迪和蔚来等公司的大量私人资本投资也推动了 TanKeBlue、SICC 和三安等新兴企业的崛起。这种“全供应链”方法表明，中国正在通过创新来逐步摆脱对美国技术的依赖，并在全球半导体市场中争取更大的自主性和影响力。尽管美国公司在 SiC 市场仍占据主导地位，但中国企业在政府支持下的迅速崛起，预计将在未来对美国企业构成重大挑战。

五、先进封装技术现状

当前，全球半导体先进封装市场正处于关键时刻。尽管中国的政策制定者和企业正在优先推动封装技术的创新并取得了显著进展，但美国及其他国家也在采取类似的措施。其中包括私营部门增加在 Chiplet 和先进基板等领域的研发投入，以及通过产业政策进行投资，如美国的《芯片和科学法案》。正如前文所述，中国在某些方面具有优势，特别是在传统封装能力方面，以及在宽禁带半导体的下游应用制造领域（如电动汽车和太阳能电池板）处于领先地位。尽管如此，中国在先进封装领域并未掌握全部主动权，其在该领域的长期领导地位也尚未得到保证。

目前，中国台湾地区被广泛认为是先进封装领域的全球领导者，这主要归功于台积电领先的 CoWoS 技术以及中国台湾地区的设备和封装材料供应商生态系统。台积电的先进封装能力依赖于与美国无晶圆厂公司（如 Nvidia 和 AMD）在系统设计方面的紧密合作，Nvidia 的 Hopper H200 和 AMD 的 Ryzen-16 核心封装在市场中占据重要地位。在 OSAT 竞争方面，美国的 Amkor 和中国台湾地区的日月光在先进封装技术上仍领先于中国大陆地区的长电科技和通富微电子。随着中美关系的日益紧张，主要 OSAT 厂商也在将生产从中国逐步转移至东南亚等地区。

中外观察人士普遍认为，美国的出口管制加速了中国先进封装生态系统的创新步伐。中国对先进封装的投资力度显著，反映了政府对该领域的高度重视，这一趋势甚至在 2022 年 10 月美国加强出口管制之前就已显现。最值得关注的是，与全球半导体生态系统的大多数国家不同，美国和中国在先进封装技术领域几乎处于相同的“起跑线”。未来哪一方能够在封装行业实现长期领导地位，很大程度上取决于各国能否在广泛的参与者之间进行有效协调，包括 OSAT 厂商、集成设备制造商（IDM）、设计公司和 EDA 企业、代工厂和原始设备制造商（OEM）。在这方面，中国整个半导体（和电子制造）生态系统为应对美国出口管制所进行的日益紧密合作，可能成为其未来竞争中的一大优势。

六、美国先进封装出口管制建议

促进而非保护。据报道，针对先进封装技术的进一步管制措施正在考虑中，但可能难以取得显著成效。封装行业进入门槛较低、全球供应链分布广泛，且中国已有大量封装设施和技术积累。出口管制可能难以有效遏制中国企业的发展，反而对希望扩展业务的美国企业带来更多负面影响。因此，美国应对中国在封装技术领域进步的最有效策略，可能在于“促进”经济安全，而非单纯依赖技术“保护”。

提升美国国内封装能力。由于利润较低且劳动密集，传统封装行业长期以来缺乏对美国投资者的吸引力。然而，随着先进封装附加值增加以及工厂自动化的普及，这一情况正在转变。虽然美国提升封装技术的本土化不足以使其掌控该领域的关键瓶颈技术，但这一举措可以降低美国及盟国企业被中国超越的风险。通过加速本土化，美国还能阻止中国企业通过主导全球技术标准的制定，来锁定未来的封装领导地位，并影响先进封装技术的全球采用。

避免扩大出口管制范围。中国在先进封装方面的目标及成就是

围绕美国对先进芯片和相关制造设备的管制而制定的。由于美国本身并不是封装领域的主要领导者，因此难以有效遏制中国在这一行业的崛起。美国在半导体出口管制上曾采用“滑动比例”措施，成功抑制了相关国家耗费大量时间和资源去超越美国及其盟国。然而，美国当前实施的“硬上限”出口管制措施，反而激励受影响国家和企业加速技术创新，以减少对美国及其盟国的技术依赖。

重视多边合作。在当前政治环境下，恢复“滑动比例”策略可能不可行，且难以修复对美国行业已造成的损害。当前出口管制的影响主要体现在中国产业和政府对外国技术（尤其是美国技术）的信任度下降，因其供应链容易受到管控。美国逐渐将经济安全和国家安全混为一谈，这使得尖端关键技术容易受到出口管制的影响，进而降低了其对中国买家的吸引力。为应对这一局面，美国应加强与盟国和合作伙伴的合作，协调国家主导的投资、制造扩展和联合研发项目，并通过更积极的贸易政策拓展全球市场，以抵消在中国市场失去的商业机会。

（执笔：王丽）

美智库发布《美盟友出口管制对美中半导体制造设备的真正影响》报告

2024 年 11 月 26 日，美国智库战略与国际研究中心（CSIS）发布《美盟友出口管制对美中半导体设备制造业的真正影响》报告¹。本次报告是“Scholl 主席系列报告”的第二份，重点分析了半导体制造设备。该报告通过分析中国政策文件以及中国、美国、日本和荷兰领先半导体设备公司的财务和市场数据，为美国及其盟友分析半导体设备制造业的出口管制影响提供了十个循证型分析结论。以下是

¹ <https://www.csis.org/analysis/true-impact-allied-export-controls-us-and-chinese-semiconductor-manufacturing-equipment>

本报告作者分析得出的 10 个关键判断。

1. 早在美国扩大技术出口管制之前，中国就已开始寻求减少对外国半导体制造设备的依赖。

对美国出口管制持批评态度的第一个且最重要论点是，美国的出口管制鼓励中国从其半导体供应链中淘汰美国技术，从而削弱了美国的技术领导地位。普遍认为，特朗普政府 2018 年 4 月限制向中国电信公司中兴通讯（ZTE）销售美国设计的芯片开启了半导体出口管制新时代。然而，中国政府在 2015 年 9 月发布的“《中国制造 2025》重点领域技术路线图”中，就提出了半导体等行业“用中国制造替代进口”等目标；在 2006 年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》中明确提出了“半导体技术自给自足”的目标要求，并启动了大型项目来推动实施。简而言之，在美国对中国芯片制造能力实施有意义的出口管制之前，中国的半导体设备国产化目标及强有力的政策支持就已经存在。

2. 出口管制与中国的技术进步速度之间不是简单的关系，中国最大的技术进步来自于没有出口管制的领域（太阳能电池和电动汽车）。

中国实现半导体技术自给自足的进展速度最好通过每个半导体细分市场的市场状况和技术复杂性来预测，而不是通过出口管制的实施程度来预测。太阳能电池和电动汽车是中国取得最大进展、甚至投入最多资源的领域，但并不是美国实施出口管制最有力的领域。中国在太阳能电池和电动汽车领域取得巨大成功而在半导体制造设备领域受阻，关键不在于是否存在出口管制，而在于生产半导体制造设备的技术复杂性极高。美国及其盟友不应过分依赖粗略的轶事证据来得出关于出口管制何时有效或无效以及如果实施或不实施出口管制会产生什么影响的结论。出口管制与技术进步速度之间的关系，在很大程度上取决于全球市场格局的状况、受控技术的复杂性、

目标国家当前的技术复杂程度、出口管制法规的设计以及管制实施和执行的稳健性，需要进行详细具体的分析。

3. 迄今为止实施的半导体出口管制在不同时间、以不同方式帮助和阻碍中国企业发展。

尽管存在出口管制，全球主要半导体制造设备供应商仍在支持中国在半导体领域的发展，至少在2022年10月美国的出口管制政策变化之前，它们以协助设施规划、安装、维修和设备的操作故障排除等方式来支持中国先进芯片制造业务。

当然，美国早期的出口管制也有意义地阻碍了中国半导体行业某些领域的进展，例如 NAND 存储器制造和智能手机芯片设计。最近的出口管制也在很多方面让中国半导体设备公司的日子变得更加艰难，无法再合法获得美国的零部件或技术专业知识。

因此，出口管制总是会加速中国的技术本土化，而让美国公司更容易出口总是会减缓中国的本土化，这是完全错误的。出口管制确实会增加中国政府和中国企业提高本土半导体能力的愿望，但这并不是说出口管制导致加速本土化。

4. 拜登政府2022年出口管制强化了第一届特朗普政府于2019年开始实施的半导体设备出口管制政策。

与芯片出口管制一样，第一届特朗普政府推出了美国政府对半导体制造设备出口管制的现代方法。2022年10月，拜登政府显著加强了美国对半导体制造设备的出口管制，不仅包括实体清单和最终用途限制，还包括一些适用于整个中国范围的出口管制（包括使用美国人规则）。同样重要的是，拜登政府使其中一些控制措施变得更加多边化，促使日本和荷兰彻底改革对先进半导体制造设备的出口管制政策。尽管这些管制与美国的管制并不完全一致，但重要的是要确保荷兰和日本的公司不会向中国提供美国不再愿意出售的物品的替代来源。

5. 中国半导体设备公司起步规模很小，但发展迅速。然而，规模的快速增长发生在出口管制前后，并且在中国设备需求大幅增长时期。

长期以来，中国本土半导体设备制造产业规模较小，技术水平落后于全球先进水平。过去 15 年里，中国已成长为半导体制造设备的供应商和买家。中国企业在全球供应中所占的份额总体上有所增加，但与外国企业相比，规模仍然很小，仅占全球供应量的 3.2%。中国设备供应商占据中国国内市场份额（又称中国自给自足率）的 9.6%或 15%¹，中国公司销售的半导体设备几乎完全局限于传统节点，远远落后于全球最先进水平。与全球领先供应商销售的传统节点制造设备相比，中国设备的竞争力有所增强。

6. 中国半导体企业的研发支出呈爆发式增长，但增速自 2021 年以来有所下降。

根据 CSIS 收集的中国八家最大的上市半导体设备公司²的研发支出数据来看，中国半导体设备制造业起步时研发投入相对较低，但中国政府自 2015 年实施“中国制造 2025”政策以来，中国半导体设备制造业的研发投入呈现出超常增长。在过去两年中，虽然中国半导体设备制造业研发投入相对增速有所放缓，但绝对增长量仍然非常高。对这个数据的一种可能合理解释是，2018-2020 年美国 and 荷兰的出口管制增加了中国政府和中國设备客户加强本土半导体设备制造业的愿望。但是，出口管制并没有让中国设备制造商的处境变得更加困难，中国企业甚至可以仍然从美国专家和设备零部件供应商那里获得帮助。2022 年和 2023 年的出口管制可能会进一步增加中国政府和中國设备客户的研发兴趣，但这种研发兴趣和有效吸收额外投资的能力已经接近最大化。然而，2022 年和 2023 年的出口管制采

¹ 不同来源的统计数据

² 中微半导体设备（上海）公司、北方华创科技集团、安姆科（上海）公司、拓荆科技公司、沈阳芯源微电子设备公司、深圳中科飞测科技公司、江苏微导纳米科技公司、至纯科技集团

取了广泛的措施（例如，广泛适用的外国直接产品规则 and 美国人规则、管制的多边化），使中国企业更难获得外国帮助来提高其技术的可靠性和竞争力。因此，中国设备提供商的收入和研发支出增长速度有所放缓（但绝对值仍然较高）。值得重点说明的是，华为半导体设备子公司的研发支出及其为秘密芯片制造商生产的半导体设备没有被纳入本报告的数据来源。有证据表明，华为正在对极紫外光刻设备进行重大投资。

7. 2016-2024 年，在美国对中国实施日益严格的出口管制后，美国和国际领先的半导体设备公司在中国的收入增长依然强劲。

根据 CSIS 收集的全球营收规模最大的六家半导体设备提供商¹的营收数据显示，在美国开始对半导体制造设备实施出口管制前后，这些公司在中国的收入都有所增长；2016-2024 年，这些公司每年在中国的收入增长都超过世界其他地区的增长。对此最可能的解释是，中国半导体制造商提前进行了国际设备采购，通过增加库存囤货量来应对不久的将来将实施的出口管制举措。许多已销往中国的半导体设备仍可能处于等待安装、未使用状态。

8. 出口管制在技术上（在中国降低了需求的复杂性）和地理上（将更多需求转移到中国境外）改变了半导体设备需求的结构，但可能没有改变总体需求轨迹。

在现代半导体出口管制举措实施之前，美国的对华半导体制造设备的出口管制政策目标是限制盟友和合作伙伴像其出售先进设备，但允许向中国出售较老、不太先进的设备。特朗普政府和拜登政府都没有从根本上改变高层的这种做法。两国政府继续允许销售传统设备，而加强先进设备的出口限制。拜登政府还表达了结束“滑动比例（sliding scale）”方法的意图，允许向中国出口先进设备，但与全

¹ 美国排名前三的半导体制造设备供应商应用材料公司、泛林集团和科磊半导体公司以及荷兰的 ASML 公司、日本的东京电子公司和爱德万测试（Advantest）公司。

球最先进水平相比要滞后多年。现阶段，中国仍然是一个庞大且不断增长的半导体制造设备出口市场。中国企业已经将半导体产业发展重点从最先进的制程节点竞争转向最大限度地实现国内自给自足和全球传统芯片生产领导地位，购买了更多的传统半导体制造设备。由于担心中国产能过剩，许多外国企业对投资传统制程节点持谨慎态度。此外，如果中国无法购买先进设备，那么采购和生产就会在中国境外进行，原本销往中国的先进工具将销往美国、中国台湾地区、韩国、日本、欧洲等。

9. 更严格的半导体设备出口管制可能导致美国设备公司确保对中国的销售不会从美国发货或在美国境外制造。

2016 年尤其是 2019 年以来，美国企业向中国销售的美国设备越来越多地从非美国国家出口。换言之，过去对中国的出口额和对中国的销售额几乎相同，但 2020 年后销售额的增长压倒性地超过了出口额。这一变化源于美国采取了更为严格的出口管制，而美国公司寻求合法地避免出口管制，在没有严格使用《外国直接产品规则》的情况下，严格的管制仅适用于美国本土的出口。也就是说，不严格实施和执行《外国直接产品规则》或《美国人规则》的出口管制可能会激励美国公司将生产转移到海外，从而导致美国制造业就业机会减少。近年来，美国半导体设备制造公司加倍努力并扩大了其在美国以外的制造业务。美国和国际半导体设备公司都被中国客户要求将所有美国公民从其供应链中剔除，并在向中国销售产品时从美国境外发货。一名日本企业高管也指出，其公司将“开发重复的供应链——一个为美国领导的集团，一个为中国领导的集团。”这表明，执行一半的出口管制措施几乎招致了激进出口管制政策的所有成本，包括激励美国公司外包、外国替代和中国本土投资，而带来的战略利益却相对较少。

10. 美国及其盟友的政策没有变，也无法说服中国政府及其企业

放弃半导体设备去美国化和脱钩努力。但是，美国可以采取这些措施使这些努力变得更加困难，并在半导体和人工智能竞争中获取更多战略利益。

出口管制的批评者经常提出两个论点。首先，来自中国的收入可以再投资于研发，从而有助于提高美国的技术竞争力，包括针对中国企业的竞争力；其次，禁止出口增加了中国企业和中国政府投资美国企业竞争对手的意愿，从而降低了美国的技术竞争力。这些论点假设中国政府和中国企业的战略方针完全或主要取决于美国的行动。然而，目前美国根本没有任何政策可以说服中国放弃半导体设备领域的去美国化和脱钩目标。当美国及其盟友考虑改革半导体设备出口管制时，应该少关注如何改变中国的目标，而应更多地关注如何使中国实现目标的成本尽可能高且复杂。

这是 CSIS 系列报告中第二篇，后续还将针对电子设计自动化软件（EDA）以及芯片设计与 IP 核等技术的出口管制影响进行分析。

（执笔：沈湘、于杰平）

美智库发布《IMEC：世界领先的微电子合作研发中心》报告

2024 年 10 月，美国智库战略与国际研究中心（CSIS）发布《IMEC：世界领先的微电子合作研发中心》报告¹。报告认为，作为全球领先的合作研究机构之一，比利时微电子研究中心（IMEC）为当今的半导体生态系统做出了卓越贡献，扩大与 IMEC 的合作有助于加速美国半导体研究项目进展、加强跨大西洋联盟以及减少对半导体研究项目和基础设施不必要的重复、昂贵投资。报告分析了 IMEC 的起源、商业模式、关键的双边伙伴、初创企业的支持和投资

¹ <https://www.csis.org/analysis/imec-world-leading-cooperative-research-center-microelectronics>;
<https://mp.weixin.qq.com/s/hTlhggwHy3I2Ya7y7IVCeQ>

部门、国际伙伴关系和足迹，旨在为美国国家半导体技术中心及其非营利性运营商 Natcast 的发展提供了重要经验。

一、IMEC 的商业模式

世界上大多数主要的微电子研发中心都位于拥有大型半导体公司的地区，而且由于政治和经济原因，这些微电子研发中心倾向于直接或间接地支持当地的生产商。比利时没有大型芯片公司，微电子领域缺乏群聚效应，因此建立一个全球化、中立的微电子行业合作伙伴网络成为了 IMEC 的成立初衷和独特优势。

1. 国际化产业合作伙伴。IMEC 业务的主要重点是与行业合作伙伴开展联合研发项目，以开发用于未来几代半导体产品和工艺的竞争前技术。这种联合合作模式通过汇集资源和减轻新技术不断增加的开发成本来加速创新。截至 2021 年，IMEC 拥有 600 多个行业合作伙伴，这些合作伙伴为联合项目贡献专业知识库、专家、资金和材料等资源。他们可能会共享竞争前技术的知识产权，或使用 IMEC 的制造服务进行自己的专有研究，包括原型设计和小批量制造。行业合作伙伴可以签约单个 IMEC 项目和计划，而无需承诺其他项目和计划。公司还可以与 IMEC 进行双边合作，进行私人研究、开发或服务，同时确保其知识产权。例如，IMEC 帮助 ASML 为其 EUV 光刻系统制造高质量的传感器芯片。行业合作伙伴还可以与 IMEC 合作，在联盟内开发新的研究单元（units）和设施。例如，2010 年，IMEC 和英特尔达成协议，建立一个专门用于 E 级超级计算机的新实验室，包括开发工具和应用程序。

2. 持续的政府公共资源支持。IMEC 成立于 1984 年，最初由地方政府投资约 7200 万美元。尽管地方政府每年为可持续研究项目提供至关重要的资助，但 IMEC 从一开始就设定了一个目标，即从非政府来源获得 50% 的收入。20 世纪 90 年代中期，IMEC 实现了这一目标，并在随后的每一年都超过了这一目标。2023 年，IMEC 的年

收入总计 9.41 亿欧元（约 9.9 亿美元）：75% 来自行业合作伙伴，16% 来自地方政府，6% 来自欧盟，3% 来自其他政府项目。

3. 领先的鲁汶技术集群。IMEC 是当地技术集群的主要中心，体现了地方政府、私营部门和 IMEC 数十年的投资。除了附近五所优秀的研究型大学外，鲁汶还拥有许多其他世界领先的研究机构。

4. 庞大的知识产权。鉴于拥有庞大的研究人员和专业知识库，IMEC 可为任何研究合作带来了非常丰富的知识（其中一些已获得专利）（即“前景知识产权（Foreground IP）”）。行业合作伙伴可以付费加入一个或多个 IMEC 的工业联盟计划，IMEC 将分享适用于其特定研究领域的“前景知识产权”。行业合作伙伴可以根据意愿带走合作产生的知识产权，具体条款视具体谈判情况而定。

5. 先进的基础设施。IMEC 成立之初就能为合作伙伴提供进行尖端研究所需的先进设备，这吸引了公司和学术界研究人员。IMEC 目前拥有 8,000 平方米的 300 毫米洁净室空间和 5,200 平方米的 200 毫米洁净室空间。IMEC 还拥有大量专门的实验室，致力于研究硅和有机光伏、封装和测试设备、光子学、氮化镓处理、设计方法、生物传感器、DNA 研究、成像等。

6. 多元化的劳动力。IMEC 的员工人数从成立之初的约 70 人增加到 5,500 多人，其中约 10% 拥有博士学位。2023 年 11 月，IMEC 预测将到 2035 年增加近 2,000 名新员工。研究人员来自比利时和许多其他国家的大学合作伙伴，员工可以在这些机构担任双重职务。该模式的一个重要优势是，允许行业合作伙伴指派自己的员工到 IMEC 工作，从而带来前沿的、具有商业意义的见解，以及通过熟悉实际生产过程而获得隐性知识。

二、IMEC 关键的双边伙伴

IMEC 已与荷兰 ASML 进行了长达三十年的高成本、高风险研发合作并取得了成功。它们的合作创造了一个生态系统，用于验证、

测试和调试 ASML 新开发工具并将其集成到生产线中。在 IMEC 的支持下，ASML 取得了技术突破，例如开发了 EUV 光刻工具。2023 年 6 月，IMEC 与 ASML 签署了一份谅解备忘录，以安装和维修其“位于鲁汶的 IMEC 试验生产线上的全套先进光刻和计量设备”，包括 0.55 和 0.33 数值孔径（NA）EUV 光刻机。

IMEC 关键的双边伙伴还包括台积电和日本 Rapidus 公司。为了体现其国际化战略，IMEC 于 2022 年底与 Rapidus 达成合作。Rapidus 是由八家日本公司组成的集团，旨在重塑日本芯片产业。

三、IMEC 衍生的初创企业

鲁汶拥有 300 多家高科技公司，其中许多都是鲁汶天主教大学和 IMEC 的衍生公司。IMEC 不仅为成熟的高科技公司提供服务，而且还创建了大量新公司。IMEC 开展的风险投资活动专注于“深度技术”——需要长期研发才能商业化但有望带来巨大回报的基础技术，将“颠覆性技术转变为颠覆性公司”。IMEC 通过多种方式激励这种做法，包括：通过 IMEC 研究人员领导的衍生公司、技术加速器（IMEC.istart）以及通过其独立管理的风险投资基金（IMEC.xpand）等。

特别是，衍生公司代表了一种方式，让 IMEC 帮助将其开发的知识产权商业化，并获得创新的潜在增值份额。IMEC 网站列出了其在 1986-2023 年期间的 72 家衍生公司，其中大多数仍在运营或已被其他公司收购。在 2016 年 iMinds 与 IMEC 合并之前，还有 68 家 iMinds 的衍生公司。

IMEC.istart 于 2011 年推出，是一个数字技术业务加速器，用于支持提供可行概念验证的初创企业，为初创企业提供 IMEC 设施、早期融资、指导、免费办公空间和技术社区介绍等福利。

IMEC.xpand 成立于 2017 年，是一家风险投资基金，投资纳米技术硬件初创企业和衍生公司。该基金由 IMEC、政府实体和私营公司

（其中一些是 IMEC 成员）独立管理和共同出资。IMEC.xpand 迄今已投资 23 家公司（包括两家独角兽公司），共筹集了近 15 亿欧元（约 15.8 亿美元）资金。

四、IMEC 的国际伙伴关系

1. IMEC 美国研究中心。除了与许多美国公司建立研究伙伴关系外，IMEC 还在美国运营了三个卓越中心，这些中心可轻松与当地研究型大学合作。值得注意的研究中心和合作伙伴关系包括美国佛罗里达 IMEC 研究中心、美国伯克利 IMEC 研究中心、美国圣何塞 IMEC 研究中心，IMEC 与普渡大学联合研究，以及由 IMEC、密歇根大学、沃什特瑙社区学院、通用汽车、科磊公司和密歇根经济发展公司签署的谅解备忘录。

2. IMEC 欧洲 PREVAIL 联盟。2022 年底，欧洲四大领先的公共研究机构——IMEC、法国的 CEA-Leti、德国的弗劳恩霍夫协会和芬兰技术研究中心（VTT）——成立了“实现和验证人工智能硬件领导力的伙伴关系（PREVAIL）”联盟，以协调各自的 300 毫米研究设施，用于设计、评估、测试和制造实现人工智能所需的先进芯片。

3. IMEC 西班牙研究中心。2024 年 3 月，IMEC、西班牙政府和安达卢西亚大区政府签署了一份谅解备忘录，建立公私合作关系，建造一个名为 Fab 5 的 300 毫米研发设施。IMEC 将管理运营、提供必要的技术和运营支持，并向全球合作伙伴授予访问权限。据报道，目前双方仍在就公共支持水平进行谈判，还没有时间表或预算。

（执笔：沈湘、于杰平）

全球半导体专利申请量激增、中国尤为突出

据欧洲知名知识产权和法律事务所 Mathys & Squire 于 2024 年 10

月 22 日报道¹，全球半导体专利申请量从 2022 年 3 月到 2023 年 3 月增长了 22%，达到了 80892 件，较去年大幅上升，尤其是在中国的专利申请量。

2022 年 3 月到 2023 年 3 月期间，在中国提交的全球半导体专利申请量增长了 42%，达到 46591 件，高于前一年的 32840 件。相比之下，美国的半导体专利申请量增加了 9%、达到 21269 件。这表明，中国半导体相关专利申请数量激增，现阶段中国在申请数量上已远超美国。这一情况发生在中国半导体公司数量下降，以及美国及其盟国对中国微电子行业施加重大技术出口管制背景下。这可能表明美国和中国在半导体专利领域的竞争正在升温。

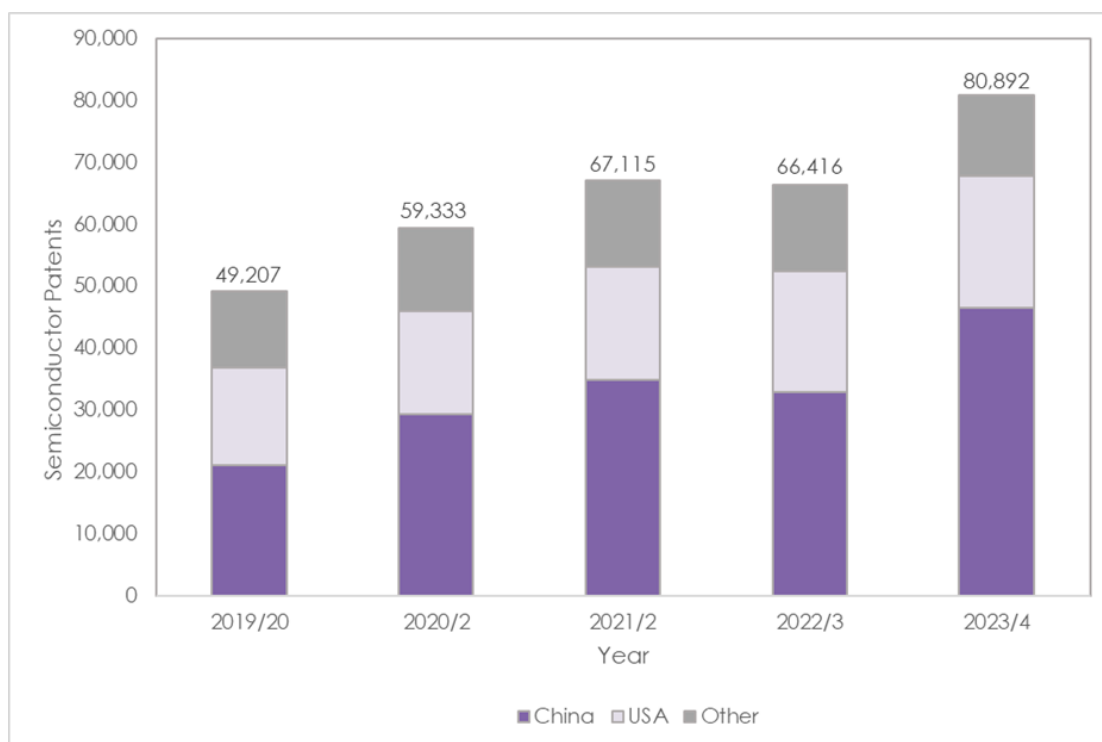


图 1 全球半导体专利申请量趋势分析（数据来源：WIPO）

Mathys & Squire 事务所的合伙人 Edd Cavanna 博士表示，人工智能行业的繁荣在一定程度上推动了该行业新发明的增加。这种繁荣也显著提高了台积电等芯片公司的市值。生成式人工智能是促进半

¹ <https://www.mathys-squire.com/insights-and-events/news/semiconductor-patent-applications-up-22-globally-to-81000-a-year/>

导体研发和专利申请量增加的最新技术。美国对中国部分半导体的出口限制，以及对未来可能宣布更多出口限制的担忧，这可能会鼓励中国半导体行业进行更多的投资和研发。中国半导体专利申请的大幅增加也表明了中国半导体行业对半导体市场的信心。

（执笔：沈湘）

前沿研究

中国科学院半导体研究所提出光学声子软化新理论

随着摩尔定律不断接近物理极限，晶体管功耗难以等比例降低成为集成电路主要发展瓶颈之一。为了进一步降低晶体管功耗，目前主要有两个途径：（1）寻找新型高 k 氧化物介电材料：目标是找到介电常数高于 HfO_2 且带隙更大的材料。在维持栅控能力的前提下，增加栅介电层厚度，可以有效遏制量子隧穿效应引起的栅极漏电流，从而降低功耗；（2）采用负电容晶体管：具体方法是采用铁电/电介质栅堆叠的负电容晶体管结构，以突破传统晶体管在室温下 60 mV/dec 的亚阈值摆幅限制，从而实现更低的工作电压和功耗。氧化物高 k 介电常数和铁电相变现象都源于光学声子软化¹。

中国科学院半导体研究所、宁波东方理工大学和英国剑桥大学在岩盐矿结构材料的研究中取得了重要进展。他们发现这类材料能同时拥有超高介电常数和超宽带隙，并揭示了这一反常机理。基于这一发现，研究人员创造性地提出了通过拉升原子键来降低化学键强度，从而实现光学声子软化的新理论。这一新方法具有显著的优势，能够有效避免传统铁电材料中长期存在的界面退极化效应问题。此外，研究团队还成功解释了硅基外延 HfO_2 和 ZrO_2 薄膜材料在厚度降低到 2-3 纳米时才展现出铁电性的“逆尺寸效应”，为相关领域的研究提供了新的视角和理论支持。

¹ http://www.semi.ac.cn/xwdt/zhxw/202410/t20241028_7408541.html

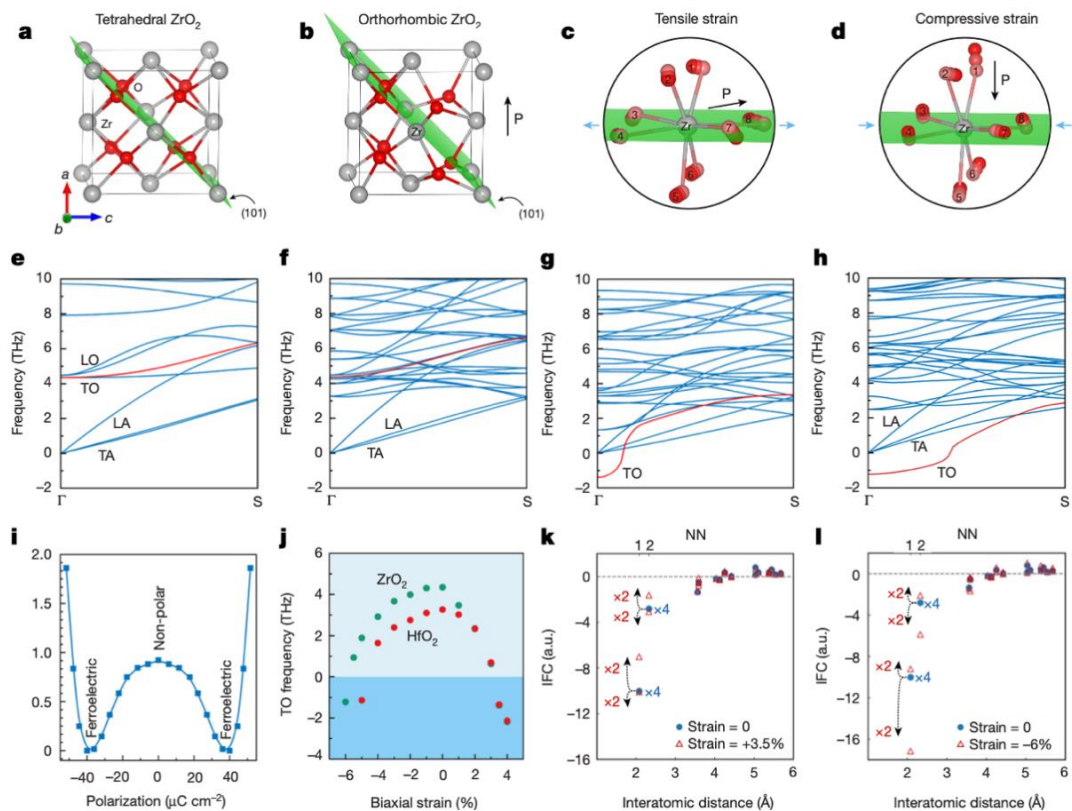


图 1 ZrO_2 在(101)平面双轴应变作用下的动力学特性

光学声子模软化是凝聚态物理中的高 k 介电材料、铁电材料、相变材料、热电材料和多铁材料性能的重要影响因素。该研究成果不仅为通过离子半径差异、应变、掺杂和晶格畸变等手段实现薄膜铁电相变提供了统一的理论框架，还为设计晶体管高 k 介电层和发展兼容 CMOS 工艺的超高密度铁电、相变存储等新原理器件提供了新思路。这一成果不仅深化了我们对材料物理特性的理解，也为未来电子器件的发展开辟了新的道路。

(执笔：沈湘)

美国宾夕法尼亚州立大学研发出单片式三维异构集成近传感器计算芯片

单片式三维 (M3D) 集成越来越多地被半导体行业采用，以替

代传统硅通孔技术，提高堆叠、异质电子元件的密度。M3D 集成不仅能提供晶体管级分区，还能实现材料异质性，为半导体器件的设计带来了更多的灵活性和可能性。尽管 M3D 集成技术具有诸多优势，但目前使用非硅材料进行大面积 M3D 集成的实际演示案例仍然相对较少，这表明该技术在某些方面可能还面临挑战或需要进一步的研究与开发。

美国宾西法尼亚州立大学的研究团队在二维材料的异质三维（M3D）集成方面取得突破，成功研发出高度紧凑且性能显著提升的近传感器计算芯片¹。研究人员使用密集通孔间结构（inter-via structure）实现了二维材料的异构 M3D 集成，达到了每平方毫米 62500 个输入/输出（I/O）密度。M3D 堆栈包括第 2 层中基于石墨烯的化学传感器，以及第 1 层中基于二硫化钼（MoS₂）记忆晶体管的可编程电路，每层有 500 多个器件。该工艺可将传感器和计算元件之间的物理距离缩小到 50 nm，从而降低近传感器计算应用中的延迟。采用 M3D 集成制造工艺的关键优势还包括整个制造过程可以在 200℃ 的温度下进行，确保了与目前制造半导体器件的标准后道（BEOL）工艺的兼容性，为半导体技术的未来发展开辟了一条全新的路径。

¹ Subir Ghosh, Yikai Zheng, Zhiyu Zhang, et al. Monolithic and heterogeneous three-dimensional integration of two-dimensional materials with high-density vias [J]. Nature Electronics, 2024, 7:892–903.
<https://www.nature.com/articles/s41928-024-01251-8>

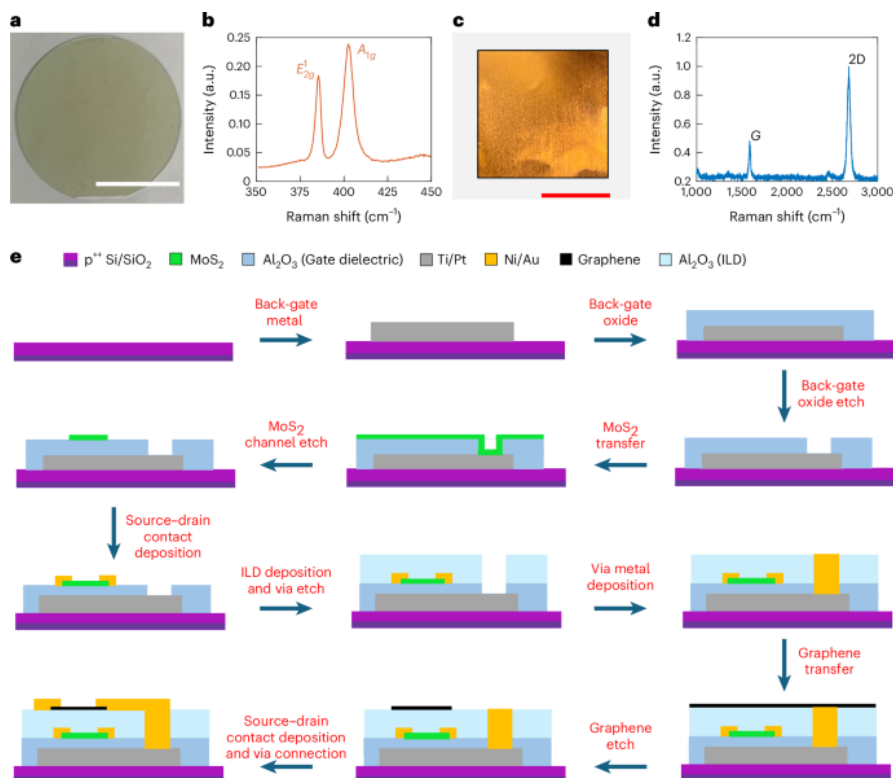


图 1 面向 M3D 集成的二维材料表征及制造工艺流程

(执笔：沈湘)

谷歌公司发布高量子纠错准确性解码器 AlphaQubit

量子计算机大规模执行长时间计算的关键是采用有效策略来纠正物理量子系统中出现的错误。而实现量子纠错的关键挑战是如何解码错误，即通过检测定位每一个物理比特究竟发生了什么错误。量子纠错码提供了一种通过将逻辑冗余信息编码到物理量子位中来实现量子纠错目标的方法。要实现量子纠错码，必须准确解码从冗余检查中提取的综合噪声信息，以获得正确的编码逻辑信息。

谷歌 DeepMind 与谷歌 Quantum AI 组成的研究团队基于机器学习开发了一种名为 AlphaQubit 的量子纠错解码器¹。与人类主导的方法不同，AlphaQubit 基于 transformer 神经网络架构，不依赖于错误

¹ Johannes Bausch, Andrew W. Senior, Francisco J. H. Heras, et al. Learning high-accuracy error decoding for quantum processors [J]. Nature, 2024, 635:834–840. <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08148-8>

发生的预定义模型，而是使用数据直接从量子系统中学习，适应现实环境中复杂且不可预测的噪声。通过使用机器学习，AlphaQubit 可以识别传统方法可能忽略的错误模式与关联，成为比现有方法更通用、更强大的解决方案。该研究展示了机器学习应用于量子技术中的巨大潜力，为开发大规模容错量子计算机开辟了新的研究途径。

研究团队的关键创新在于使用了软读出，这是一种从量子系统中提取模拟信息而不会过多干扰系统的方法。在传统的解码器中，测量读取值要么是 0，要么是 1，软读出则提供了关于量子比特状态的更细微的信息，这使得 AlphaQubit 能够对是否发生错误以及如何纠正错误做出更有依据的决定¹。

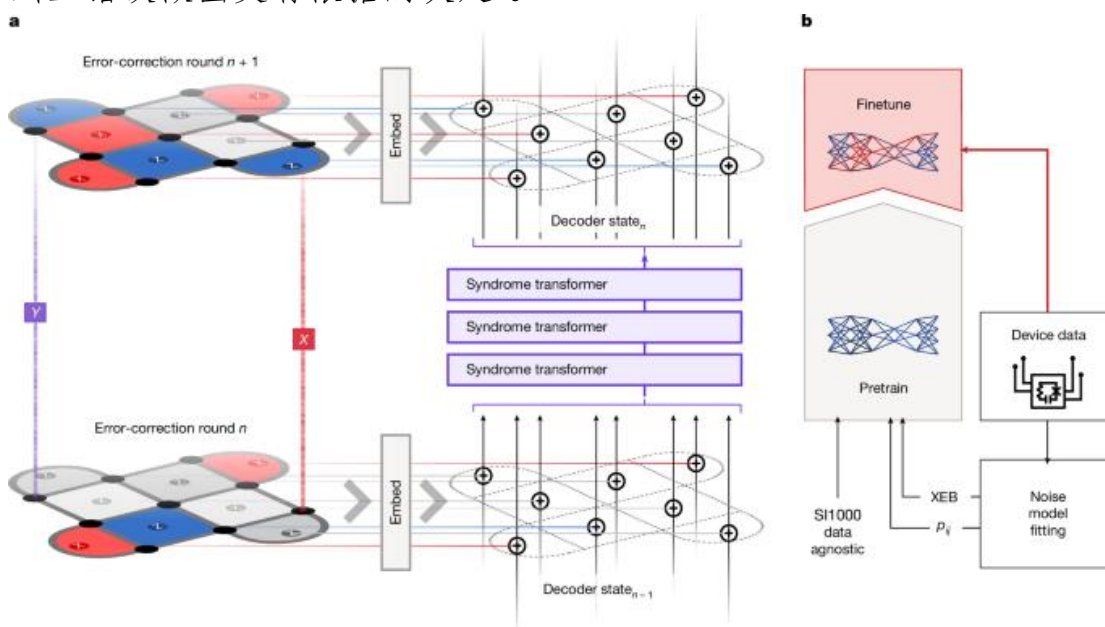


图 1 AlphaQubit 的纠错和训练

研究团队对 AlphaQubit 进行了两个阶段的训练：首先是在合成数据上的训练，这使得模型能够学习量子错误的基本结构；然后是在悬铃木量子处理器真实实验数据上的训练，第二阶段使模型能够适应实际硬件中遇到的特定噪声，从而提高其整体精度。

¹

https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI2NDIzMjYyMA==&mid=2247528488&idx=2&sn=4d79f57caff7dcda96f679541a9be6f8&chksm=ebabc9cf0ae7b84749e010fa4d9e8c8ffc01dbe4a47ecc3bf0fb38d98ea7e02a339c052f9fd&scene=27

(执笔：沈湘)

IBM 在量子计算实用性和性能方面取得重大进展

两年前，IBM 提出一项量子计算挑战——结合包含 100 个量子比特且门深度为 100 的量子电路开发一种量子算法，同时，IBM 将建造一台计算机，能够在一天内为这些电路返回准确的数值。2024 年 11 月 13 日¹，IBM 在首届开发者大会上宣布兑现了两年前的承诺，由 IBM 目前性能最高的量子处理器 Quantum Heron 2 支持，IBM 的量子计算机能够运行 5000 双量子比特门操作的量子电路。得益于 IBM 在量子硬件、中间件、软件的突破性进步，IBM Heron 能够利用具有 5000 个双量子比特门的量子电路进行精确计算。基于 IBM 的 Qiskit 软件堆栈和第三方合作伙伴提供的 Qiskit 函数，IBM 量子计算机和服务的用户可以获得上述计算能力。IBM 的这一成就标志着量子计算在实用性和性能方面取得重大进展。

(执笔：于杰平)

D-Wave 完成 4400+量子比特 Advantage2 量子处理器校准

2024 年 11 月 6 日²，D-Wave 公司宣布已经完成了对拥有 4400 多量子比特的 Advantage2 量子处理器的校准和测试，实现重要里程碑，标志着 D-Wave 的第六代量子退火计算系统开发工作向前迈出了重要一步。与 Advantage 系统相比，最新的 Advantage2 系

¹ <https://www.ibm.com/quantum/blog/qdc-2024>

² <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-achieves-significant-milestone-with-calibration-of-4-400-qubit-advantage2-processor/>

统在解决用户复杂计算问题（如优化、AI、材料科学等）方面表现出显著的性能提升。

与当前的 Advantage 系统相比，Advantage2 处理器的显著改进包括三个方面：（1）量子相干时间翻倍，加快了解决问题的时间；（2）能量规模增加 40%，提供更高质量的解决方案；（3）量子比特连接从 15 路提升到 20 路，从而能够解决更大的问题。性能基准测试表明，Advantage2 处理器比当前的 Advantage 系统计算能力更强，解决一系列问题（包括材料科学中常见的三维晶格问题）的速度提高了 25000 倍。在解决需要高精度的问题时，该处理器也能提供比目前快五倍的解决方案。此外，在 99% 的可满足性问题测试中，它都超过了当前的 Advantage 系统，这凸显了它在广泛量子应用中的能力。

（执笔：于杰平）

产业动态

楷登电子公司成功设计并制造出首个系统级小芯片

据楷登电子（Cadence）公司官网 2024 年 11 月 19 日报道，通过创新的小芯片架构、强大的 IP、EDA 技术以及与 ARM 等行业领导者的战略合作，Cadence 公司设计并制造出其首个系统级小芯片（Chiplet），成功实现了多个小芯片在单个封装内的无缝集成。这是一个重要行业里程碑事件，标志着小芯片技术实现的突破性进展，为汽车、高性能计算（HPC）和数据中心等行业开辟了新的可能性，为小芯片客户提供了高效、可扩展的尖端系统解决方案¹。

该系统级小芯片展示了处理器、系统 IP 和内存 IP 的集成，同一封装内的多个小芯片使用 UCIe 标准接口互连。该小芯片集成了系统处理器、安全管理处理器、用于 LPDDR5 和 UCIe 的 Cadence 控制器和 PHY IP，以及 Cadence Janus NoC 技术。它还作为一个动态平台展示了 Cadence 最新的 UCIe IP 和 LPDDR5 IP，UCIe IP 的峰值带宽高达 64GB/s，LPDDR5 IP 的峰值内存带宽高达 32GB/s。

Cadence 和 ARM 有着长期的合作关系，并合作打造了小芯片生态系统。2024 年 3 月，Cadence 和 ARM 宣布合作提供基于小芯片的设计和尖端软件开发平台。此次合作基于两家公司的创新优势，将 Cadence 强大的 IP 和 EDA 解决方案与 ARM 最先进的 IP 技术相结合。通过利用 ARM 小芯片生态系统的经验，Cadence 有望显著降低系统级小芯片的设计复杂性，缩短上市时间。

（执笔：沈湘 王丽）

¹ https://community.cadence.com/cadence_blogs_8/b/ip/posts/cadence-transforms-chiplet-technology-with-first-arm-based-system-chiplet

SK 海力士宣布量产业界首款 321 层 4D NAND 闪存

据官网 2024 年 11 月 21 日报道，韩国半导体巨头 SK 海力士宣布已开始量产业界首款、全球最高的 321 层 1Tb（太比特，Terabit）TLC（Triple Level Cell）4D NAND 闪存人工智能存储器，预计将于 2025 年上半年开始交货¹。

SK 海力士公司从 2023 年 6 月量产当前最高的 238 层 NAND 闪存产品，此次又突破了技术界限，率先推出了超过 300 层的 NAND 闪存。此次产品开发采用了高生产效率的“3-Plug”工艺技术，克服了堆叠局限。该技术分三次进行通孔工艺流程，随后使用优化的工艺将 3 个通孔进行电气连接。在其过程中开发出低变形材料，引进了通孔间自动排列（Alignment）矫正技术。SK 海力士公司技术团队也将上一代 238 层 NAND 闪存的开发平台应用于 321 层 NAND 闪存开发，最大限度地减少工艺变化，与上一代相比，其生产效率提升了 59%。

（执笔：沈湘）

三星电子计划到 2030 年投资约 20 万亿韩元建设新型半导体研发综合体

据官网 2024 年 11 月 18 日报道，三星电子计划到 2030 年投资约 20 万亿韩元（约 141 亿美元），在京畿道龙仁市 Giheung Campus（器兴园区）内建设新的半导体研发综合体（NRD-K）²，占地面积约 10.9 万平方米。该综合体还将包括一条研发专用生产线，计划于 2025 年中投入运营。

¹ <https://news.skhynix.com.cn/sk-hynix-starts-mass-production-of-world-first-321-high-nand/>

² <https://news.samsung.com/global/samsung-reaches-key-milestone-at-new-semiconductor-rd-complex>

NRD-K 于 2022 年开始动工，将成为三星存储器、系统整合芯片（system LSI）和代工半导体研发的重要研究基地。凭借其先进的基础设施，研究和产品级验证将能够在同一场所进行。

三星位于首尔南部的器兴园区是 1992 年世界上第一颗 64 兆位（Mb）DRAM 的诞生地，标志着该公司在半导体领域的领导地位的开始。新研发设施的建立将带来工艺技术和制造工具的最新发展，延续该基地的创新前沿传统。

NRD-K 将配备高 NA 极紫外（EUV）光刻设备和新材料沉积设备，旨在加速开发超过 1000 层的 3D DRAM 和 V-NAND 等下一代存储芯片。此外，还计划对接具有新型晶圆到晶圆键合功能的晶圆键合基础设施。

（执笔：沈湘 王丽）

美国商务部最终确定向台积电提供 66 亿美元补贴

据官网 2024 年 11 月 15 日报道，在美国“芯片激励计划（CHIPS Incentives Program）”对商业制造设施的资助支持下，美国商务部最终决定向台积电的美国亚利桑那州子公司提供 66 亿美元政府补助¹。台积电美国亚利桑那州子公司 2024 年 4 月与美国商务部签署一份不具约束力的初步备忘录，将根据《芯片与科学法》给台积电提供 66 亿美元直接资金，以支持台积电在亚利桑那州凤凰城的三家前沿晶圆厂生产先进制程芯片，并将刺激台积电投资超过 650 亿美元。根据协议，美国商务部将根据台积电亚利桑那州项目里程碑的完成情况分阶段发放。

（执笔：沈湘）

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/11/biden-harris-administration-announces-chips-incentives-award-tsmc>

美国商务部拟资助 Akash Systems 公司 1820 万美元 建设先进半导体制造工厂

据官网 2024 年 11 月 13 日报道，美国商务部和 Akash Systems 公司签署了一份不具约束力的初步条款备忘录（PMT），根据《芯片和科学法》提供 1820 万美元的拟议直接资金。该拟议资金将支持该公司在加州西奥克兰现有建筑内建设一个占地 4 万平方英尺的洁净室空间，用于先进半导体制造¹。拟议资金将与 Akash Systems 公司、风险投资公司和其他私人投资者的资金相结合，预计达到 1.21 亿美元，以大规模生产各种金刚石散热基板、设备和系统，为通信和国防工业基地等重要终端市场服务。

Akash Systems 公司使用其“金刚石散热技术”来提高极端环境中的半导体性能。这项由 Akash Systems 公司开创的新兴技术被证明可以改善半导体器件的散热，从而增强微电子系统的性能和可靠性。Akash Systems 公司正在利用其金刚石材料专业知识推出创新的 GPU 冷却技术，以改善以人工智能为重点的数据中心的热管理。

（执笔：沈湘）

美国商务部拟资助 Wolfspeed 公司 7.5 亿美元建设碳 化硅晶圆制造工厂

据官网 2024 年 10 月 15 日报道，美国商务部和 Wolfspeed 公司签署了一份不具约束力的初步条款备忘录（PMT），根据《芯片和科学法》提供高达 7.5 亿美元的拟议直接资金²。拟议资金不

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/11/biden-harris-administration-announces-preliminary-terms-akash-systems>

² <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/10/biden-harris-administration-announces-preliminary-terms-wolfspeed>

仅将支持 Wolfspeed 公司在北卡罗来纳州西勒市建设首个 200 mm 碳化硅晶圆制造工厂，还将促进其在纽约马西的设备制造工厂的扩张计划，以确保国内半导体供应。这是该公司先前宣布的 60 多亿美元产能扩张计划的一部分。

Wolfspeed 公司于 1987 年在北卡罗来纳州成立，是世界领先的碳化硅晶圆和器件制造商。Wolfspeed 公司制造的碳化硅器件为电动汽车和插电式混合动力车提供动力，使每次充电的行驶里程更长，充电时间更快，整体系统成本更低。除了电动汽车，Wolfspeed 公司的设备还可用于可再生能源系统、工业设备和人工智能应用。此外，Wolfspeed 公司还为美国军方提供用于国家安全应用的下一代碳化硅技术。

（执笔：沈湘）

美国商务部拟资助英飞朗公司 9300 万美元支持半导体通信和国家安全技术发展

据官网 2024 年 10 月 17 日报道，美国商务部和 Infinera（英飞朗）公司签署了一份不具约束力的初步条款备忘录（PMT），根据《芯片和科学法》提供 9300 万美元拟议直接资金¹。拟议资金将用于两处工厂建设：（1）在加利福尼亚州圣何塞建造一座新的晶圆厂：拥有超过 40000 平方英尺的洁净室空间，以增加其磷化铟基光子集成电路（InP PIC）制造，满足未来的产能需求。通过这一建设，英飞朗公司的产能预计可以提高 10 倍。（2）在宾夕法尼亚州伯利恒建造一个新的先进测试和封装设施，重点满足对 InP PIC 日益增长的需求。该设施将包括专门的研发空间，专注于更新的光学封装技术，如 2.5D 和 3D 封装以及共封装光学器件。

¹ <https://www.commerce.gov/news/press-releases/2024/10/biden-harris-administration-announces-preliminary-terms-infinera>

英飞朗公司是一家垂直整合的半导体和电信设备制造商。
PIC 和光模块是光网络通信中的关键组件。随着数据驱动导致能源消耗大幅增加，英飞凌的 InP PIC 越来越重要。

(执笔：沈湘)

《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

