

集微技术信息简报

2022 年第 **4** 期 (总第 49 期)

中国科学院文献情报中心

2022 年 7 月制

本期目录

政策计划

韩国政府宣布未来五年将投资 1.02 万亿韩元发展 AI 半导体产业	1
西班牙将投资约 123 亿欧元发展本土微芯片产业	2
印度政府计划将芯片设计民主化 开创自由创新时代	3
英国商业能源和工业战略部委员会调查英国半导体行业和供应链的优势、劣势及机遇	4

产业洞察

美国发布《保持和发展美国半导体优势》报告	6
美国智库发布《中国军用 AI 芯片获取调查及管制建议》报告	10
美国智库分析俄乌冲突后对俄经济制裁	15
美国智库发布《回流先进半导体封装：创新、供应链安全和美国半导体领先地位》报告	21

前沿研究

美国麻省理工学院创建新的硬件加速器编程语言“Exo”	27
澳大利亚和中国合作研制出首款自校准光子芯片	28
美国研究人员开发出新型单模表面发射半导体激光器 BerkSELs.....	30
IMEC 开发出逻辑器件新架构 CFETs	31

产业动态

三星电子公司成立半导体封装工作组以加强与大型晶圆代工厂在先进封装领域的合作	33
CEA-Leti 和英特尔优化混合直接键合、自组装的 die to wafer 工艺	34
IMEC 和德州仪器公司等加紧行动解决半导体制造业的碳足迹问题	35
荷兰 SMART Photonics 公司和埃因霍温理工大学签署长期战略合作协议推进 InP 光子集成技术	36

英飞凌科技公司和 Oxford Ionics 公司合作开发基于离子阱制造技术的商用量子处理器37

政策计划

韩国政府宣布未来五年将投资 1.02 万亿韩元发展 AI 半导体产业

据韩国官媒等多家韩国媒体 2022 年 6 月 27 日报道¹⁻²，韩国科学和信息通信技术部（MSIT）部长在韩国科学技术院主持了“第一次人工智能（AI）半导体高层战略对话”，在会上发布了《AI 半导体产业发展扶持措施》报告。会后还揭牌成立了 PIM（存算一体）半导体设计研究中心（PIM HUB）。主要规划措施包括：

1. 确保 AI 半导体代差技术研发，扩大与领先国家的联合研究。韩国科技部和产业省等将在未来五年内投资 1.02 万亿韩元，支持 AI 半导体尖端技术研发项目，确保代差技术的研发，扩大美国等技术领先国家的联合研究。尖端技术包括：融合新元件和设计技术的下一代神经网络处理器（NPU）；集成计算和存储功能的 PIM（存算一体）半导体；最大化半导体性能的系统软件；结合 NPU 和 PIM 的优势将系统性能最大化的超级 AI 系统。

2. 创造国产 AI 半导体初级市场需求。韩国政府计划到 2023 年建立国内 AI 半导体数据中心，并免费为 AI 开发者提供算力；推进“AI+芯片”项目，在 AI 产品和服务中使用国产 AI 半导体并验证其性能；计划开展相关谈判以使国产芯片推广应用到智能闭路电视（CCTV）和智慧城市等部委和地方政府建设的公共项目。

3. 营造大型企业参与的产学研合作生态系统。韩国政府将加强与三星电子和 SK 海力士等大企业的合作，使大学和研究机构能够设

¹ <https://www.korea.kr/news/pressReleaseView.do?newsId=156513527>

² <https://www.yna.co.kr/view/AKR20220627051600017?section=news>

计出最适合尖端商业应用的半导体。三星电子和 SK 海力士将参与政府的 ICT 研发规划，提出对前景技术的需求并验证规划结果；在 PIM 半导体研发项目中，三星电子和 SK 海力士将为参与研究机构提供技术咨询，并将优秀研究成果应用于半导体生产工艺；在 NPU 研发项目中，经三星电子的合作伙伴验证后被评估为优秀的设计技术（IP），将被纳入其设计技术数据库。此外，韩国政府将推进 PIM 半导体设计研究中心和三星电子、SK 海力士之间的互相人力派遣及共同研究等，持续扩大研究开发和人力交流。

4. 培养 7,000 名以上 AI 半导体领域专业人才。韩国政府将在首尔大学、成均馆大学和崇实大学三所学校开设“AI 半导体联合专业（本科）”，由 AI 半导体相关的电子工程、计算机工程、物理学等多学科共同构成教学课程；到 2023 年还将设立三所“AI 半导体研究生院”，培养以研究为目的的硕士和博士高级人才，并将优秀硕士和博士派遣到海外进行短期（6 个月至 1 年）交流。

（执笔：沈湘）

西班牙将投资约 123 亿欧元发展本土微芯片产业

据 spainenglish 等外媒 5 月 25 日报道¹，西班牙政府计划到 2027 年之前投资约 123 亿欧元，将西班牙发展为微芯片的主要生产国，成为全球半导体价值链的关键参与者，帮助西班牙和欧盟减少对其他供应商的依赖并实现“欧洲提供全球 20% 产量”的共同目标。西班牙首相佩德罗·桑切斯上个月宣布该计划时，最初设定的投资规模为 110 亿欧元²。

西班牙首相已在瑞士达沃斯世界经济论坛上会见了主要科技公司英特尔（Intel）、思科（Cisco）、美光科技（Micron Technology）

¹ <https://www.spainenglish.com/2022/05/25/spain-is-to-invest-13-billion-to-build-its-microchip-industry/>;

² <https://www.techzine.eu/news/infrastructure/79796/spain-to-invest-12-25-billion-euros-on-microchip-industry/>

和高通（Qualcomm）公司的领导人，解释了该计划并寻求进一步投资。

汽车行业微芯片与西班牙的复苏、转型和恢复计划密切相关。微芯片对未来工业发展至关重要，并日益成为全球汽车制造技术驱动者，许多欧洲国家正在寻求减少对进口微芯片和相关技术的依赖。

西班牙的该项目资金主要来自欧盟疫情救助基金，将以数字经济增长为目标，并填补芯片短缺的缺口。其中，将有 93 亿欧元用于建设芯片制造工厂，在当地生产高端芯片（5 纳米以下制程工艺）及中端芯片（5nm 以上制程工艺）；还将提供 11 亿欧元作为芯片研发补贴以及 13 亿欧元专门用于芯片设计。此外，西班牙还将通过该计划支持本土公司在欧洲层面发展战略项目，设立一个 2 亿欧元的芯片基金，用于资助初创企业以及扩大西班牙的半导体行业。

（执笔：沈湘）

印度政府计划将芯片设计民主化 开创自由创新时代

据印度电子时报 5 月 26 日报道¹，印度电子和信息技术部正在通过一系列措施，组织印度 120 家顶级学术机构对半导体设计方法进行系统性改革，以开创一个自由创新时代，帮助所有具有天赋的人才能在印度开展芯片设计工作而不受物理环境限制，得以按照“印度设计和印度制造同等重要”理念实现芯片设计民主化的愿景。

认识到芯片设计的战略必要性后，印度电子和信息技术部早在 2021 年已在“芯片系统设计的特别劳动力发展计划（SMDP-C2SD）”中进行了试点部署。其中，印度高级计算开发中心（Centre for Development of Advanced Computing，简称 C-DAC）的集中设计设施

¹ <https://www.eetindia.co.in/india-democratizes-semiconductor-design/>

允许来自 60 个芯片设计学术机构的 5 万多名工程学生远程访问。为了在此基础上实现跨越式发展，印度电子和信息技术部目前计划在 C-DAC 进一步部署集中式芯片设计基础设施，在未来 5 年内为全国 120 所学术机构培训 8.5 万多名芯片设计领域的学士、硕士和博士。

C-DAC 是印度现有最大的基础设施之一，该中心提供了大量的设计流程。基于这一优势，几家学术初创公司有望在全国范围内迅速崛起，跨越最初的芯片设计入行壁垒，构建企业或初创公司主导的设计和创新生态系统，为印度和全世界制造本土 IP 核、芯片、片上系统（SOC）以及 5G、物联网、AI/ML、汽车和移动等不同应用领域的系统。

为了部署 C-DAC 芯片设计基础设施，印度正在与电子设计自动化（EDA）、电子计算机辅助设计（ECAD）、IP 核和设计解决方案行业的领先供应商洽谈合作方案，包括 EDA 行业巨头 Synopsys、Cadence Design Systems、Siemens EDA、Silvaco 等，以及一些 IP 和设计解决方案提供商和集成商。

在印度 C-DAC 的集中式芯片设计设施中，不仅包括整个芯片设计周期的最先进工具，如用于数字、模拟、射频和混合信号等电子产品的前端设计、后端设计、PCB 设计和分析，而且可进行 7 nm 或更先进节点的芯片设计，还将在未来五年内安排行业专业人士进行设计流程指导或在线培训。

（执笔：沈湘）

英国商业能源和工业战略部委员会调查英国半导体行业和供应链的优势、劣势及机遇

在全球半导体持续短缺并导致供应链普遍中断的情况下，2022 年 5 月 25 日，英国商业能源和工业战略部委员会发起一项广泛调查，

提出了八方面问题，以了解英国半导体行业和半导体供应链的优势、劣势及机遇¹。调查回复可于 2022 年 6 月 14 日之前在网站提交。

八方面问题分别是：

1. 在英国和全球范围内，对使用半导体材料制造的常见产品（如计算机芯片）的当前和未来预期的需求是怎样的？
2. 英国的半导体供应链是怎样的？是否安全？如果不安全，如何改进？英国有哪些具体优势可以为区域或全球半导体供应链做出贡献？在全球半导体行业背景下，英国的竞争力如何？
3. 目前英国半导体行业的不同领域是否有加强的机会？为了满足未来电子设备制造的需求，英国半导体行业的潜在弱点和优势是什么？
4. 英国哪些行业没有端到端的半导体供应链？英国是否有机会填补这些供应链缺口？
5. 英国政府可以如何加强半导体研究和创新？当前政府的半导体创新战略有何不足之处？英国半导体生态系统中的各利益相关者之间是否能进行有效沟通？
6. 英国是否具备必要的技能、人才和多样性，以推动当前的半导体行业并应对未来的颠覆性发展？
7. 英国的半导体行业存在哪些潜在的国家安全问题或漏洞？英国应该如何与美国和欧盟合作？这对英国其他行业和更广泛的经济有什么影响？
8. 英国政府目前是否提供了实现半导体行业增长和安全所需的清晰度和方向？是否有合适的政府机构在致力于保障当前半导体行业的有效发展以实现未来蓬勃发展？

（执笔：沈湘）

¹ <https://committees.parliament.uk/work/6724/the-semiconductor-industry-in-the-uk/news/171064/inquiry-launched-into-the-semiconductor-industry-in-the-uk/>

产业洞察

美国发布《保持和发展美国半导体优势》报告

2022 年 6 月，美国安全和新兴技术中心（CSET）发布《保持和发展美国半导体优势》报告¹，结合其前期有关半导体领域的系列主题报告，针对保持和发展美国半导体优势，提出了研究见解和建议，以帮助美国决策者厘清未来挑战并确定前进道路。CSET 认为，中国正在通过自主创新和吸收引进来提高其国内先进芯片生产能力，同时不稳定的地缘政治影响美国先进半导体供应链的实体安全，因此，确保美国全球先进芯片领导地位，以及尽量减少供应链中断风险，是美国在半导体领域两个至关重要的目标。

美国及其盟友和合作伙伴在先进半导体领域拥有优势，如人工智能和先进计算芯片，然而这不能确保他们在与中国的战略竞争中获得未来优势。美国在半导体研究、设备、设计软件和 IP 方面具有优势，但缺乏本土半导体制造设施（晶圆厂）来生产先进芯片，这将影响美国芯片获取及其在先进半导体供应链中的领导地位。目前，美国主要依赖中国台湾和韩国制造商来生产先进逻辑芯片，这将为其带来地缘政治风险。中国则通过支持国内制造商以及增加对半导体供应链的投资来减少对国外先进芯片的长期依赖。为保持和发展美国半导体优势，美国应该朝着两个主要目标努力：（1）保护美国半导体制造设备（SME）优势并阻止中国生产先进芯片；（2）通过回流芯片产能减少美国半导体供应的潜在风险。

一、保持和发展美国半导体优势面临的形势分析

美中战略竞争和全球芯片短缺凸显了美国半导体领导地位所面

¹ <https://cset.georgetown.edu/publication/sustaining-and-growing-the-u-s-semiconductor-advantage-a-primer/>

面临的挑战。与美国、荷兰、韩国、中国台湾、英国等相比，中国大陆在先进半导体供应链方面仍然落后大约十年。然而，预计到 2030 年，中国大陆将成为世界上最大的半导体制造地（包括传统芯片）。目前，中国依赖美国及其盟友的半导体制造设备生产芯片。假以时日，无论从知识产权或经济角度来看，还是从实体供应链本身来看，中国将威胁美国在半导体供应链和制造方面的领导地位。

中国在引进国外半导体制造设备技术的同时也在提升半导体制造设备自主可控水平。如果中国生产先进芯片的能力能够自主可控，那么其将可以利用这些芯片发展人工智能、自主系统、先进高超音速等技术。美国应该阻止中国生产先进芯片的步伐，让其继续保持对外国的依赖。

潜在的地缘冲突将威胁到美国先进半导体供应链的实体安全。半导体供应链是高度全球化的，尽管美国在半导体制造设备、IP 和设计软件等关键领域处于领先地位，但中国大陆、中国台湾、韩国在芯片制造方面占主导地位。自 20 世纪 90 年代以来，世界上大部分的半导体制造都在东亚。中国台湾制造了大约 85% 的全球先进逻辑芯片，而中国大陆和中国台湾生产的传统逻辑芯片占全球的 63%。美国本土先进逻辑芯片产能基本为零，而传统逻辑芯片产能仅占全球的 8%。美国应该通过回流本土半导体制造能力，以确保美国能够获得关键半导体。

二、保持和发展美国半导体优势的建议

（一）使中国继续依赖外国半导体供应链

目前，中国每年进行大量投资以追赶先进芯片制造的领先地位。先进半导体制造需要半导体供应链中各种高度复杂的设备和材料，而它们由美国及其少数盟友生产。在某些情况下，美国及其盟友并不向中国或中国公司出售最先进的技术或产品，如荷兰目前禁止向

中国出口极紫外（EUV）光刻设备。

为了保持半导体优势，美国及其盟友应该采取“保护”和“促进”政策，以阻止中国迈入先进半导体制造领导者行列。

“保护”政策应该通过对软件，光刻掩膜和光刻胶等先进材料，以及先进半导体制造设备（尤其是 EUV 和氟化氩（ArF）浸没式光刻工具）的出口管制，使中国继续在“卡脖子”方面依赖外国进口。此外，应该监测先进芯片出口的最终用途和最终用户，以确保芯片的使用符合国际标准和规范，而不影响对华商用芯片销售。

“促进”政策应该确保供应链关键部分位于美国及其盟友。为实现这一目标，美国及其盟友可以：为公私合作伙伴关系提供资助，减少不必要的贸易壁垒，就反对中国半导体补贴进行磋商，以及甄别投资中不必要的技术转让风险。重要的是，与日本、荷兰、中国台湾、韩国、英国和德国合作将是成功的关键。

（二）回流先进芯片产能

1. 采取激励举措

《美国芯片法案》(CHIPS for America Act)是美国实现本土半导体产能回流目标的核心。国会已通过该法案，授权商务部管理 370 亿美元的激励资金，以鼓励芯片制造商在美国建立晶圆厂。

政策制定者需要在先进逻辑芯片、DRAM 和传统逻辑芯片等方面权衡资金支持力度，以最大限度地保护美国利益。

先进逻辑芯片制造应该获得最高额度的资金（230 亿美元）支持，这将有助于美国回流足够产能以满足美国到 2027 年的全部需求。这笔资金足以支持建立 4 家新晶圆厂，以满足美国对先进逻辑芯片的所有需求，其中支持英特尔和三星公司在美国各建 1 家晶圆厂，资金占比分别为 25%、20%，支持台积电建立 2 家晶圆厂，资金占比 55%。

先进 DRAM 制造应该获得次高额度的资金（50-100 亿美元）支持，这将有助于减少美国对韩国的依赖。通过这笔资金吸引一家公司在美国新建 1 座月产能达 10 万片（WPM）的 DRAM 晶圆厂，而美光公司作为唯一一家总部位于美国的 DRAM 制造商，将是一个强有力的候选者。

传统逻辑芯片制造应该获得剩余资金（40-90 亿美元）支持。虽然美国本土拥有部分传统逻辑芯片产能，但仍需要利用这笔资金建立 2 到 5 家传统逻辑芯片晶圆厂或升级现有晶圆厂和设备，以满足美国最敏感应用领域的需求。

2. 通过监管改革消除晶圆制造业障碍

美国需要广泛评估其监管环境，以探索更有利于晶圆厂发展的方法。目前，美国建设晶圆厂的速度远远低于竞争对手。中国大陆、日本、韩国和中国台湾提供大量的补贴和激励措施，吸引诸如美光公司和格罗方德等美国企业建立晶圆厂，这加剧了对美国的挑战。

美国联邦、州和地方各级政府在提供激励措施和进行监管改革方面，需要更好地与半导体生产商协作。具体做法包括：通过简化环境、卫生和安全法规条例，寻找并消除州和联邦政府之间对高科技设施的许可条例冗余。例如，美国国家环境保护局等联邦机构可以探索定制半导体行业特定的许可证，以帮助加快新晶圆厂的建设或现有晶圆厂的改造。监管改革措施应该辅以基础设施（公用事业、交通、供应链网络）投资，以吸引半导体制造商。

国际合作方面，美国应该与盟友和合作伙伴协作建立具有弹性的全球供应链，同时避免相互之间的恶性竞争，将有助于对抗中国的大量补贴。摸底中国台湾和韩国的本土补贴情况将是明确美国谈判立场的第一步。分析全球半导体供应链和量化关键投入需求，将有助于澄清竞争风险以共同应对，同时提高供应弹性以确保美国晶圆厂能够获得芯片制造所需的原材料。

3. 帮助企业满足人才新需求

《美国芯片法案》提供的资金预计在未来十年内可以为半导体制造创造约 27000 个新的就业机会。目前，美国的劳动力市场不能满足回流劳动力需求，需要引进国外劳动力、培养国内劳动力。因此，美国政府需要创造有利的监管环境，既可以激励企业落户美国，又便于它们获得所需劳动力。

解决美国半导体行业劳动力问题的途径主要分为三个：（1）引进外国高技能人才，以满足短期需求。这部分人才的需求量约 3500 名，而拥有在台积电、三星公司等类似企业工作经验的人才将最符合需求，他们将为美国先进芯片制造带来隐形知识和技能，并能够将其中一些知识传授给美国工人。（2）雇佣取得半导体及相关领域硕博学位的高技能本土人才。短期内，解决这类人才需求具有挑战性。此外，从工程服务业或航空航天业等相关人才库抽调工程师，可能会影响他们为国家安全相关领域的服务。经过集训的美国硕博生，可以帮助解决此类半导体劳动力需求。（3）雇佣美国其它相关行业的不同技能水平的本土工人和硕博生。例如，检查员、测试员等低技能工人。

总之，为解决半导体人才需求问题：在短期内，美国应该为中国台湾和韩国人才创建高技能工作签证计划，以解决劳动力急需问题；长期来看，美国应该在半导体相关领域，特别是在 STEM 教育和工程研究生学习方面，对本土人才进行持续投资。

（执笔：于杰平 王丽）

美国智库发布《中国军用 AI 芯片获取调查及管制建议》报告

2022 年 6 月，美国安全和新兴技术中心（CSET）发布《中国军

用 AI 芯片获取调查及管制建议》报告¹。报告指出，在过去五年里，中国人民解放军（PLA）在采用 AI 进行作战和支援方面取得了重大进展。未来 PLA 在 AI 及相关技术方面的进步，将很大程度上取决于能否继续使用 AI 芯片²训练先进的机器学习系统。基于 2020 年 PLA 和国有国防企业的公开采购记录，报告分析了 PLA 的 AI 芯片订购情况以及美国实施 AI 芯片出口管制存在的障碍，并总结了目前美国加强对华军用 AI 芯片管控的三种思想流派，最后针对更有效实施对华军用 AI 芯片管控向美国政策制定者提出了建议。

一、PLA 的 AI 芯片订购情况分析

1. CSET 汇集了 2020 年 3 月 30 日至 12 月 1 日 PLA 发布的 66321 份中国军事采购招标公告，其中 21088 份公告有关向 PLA 提供软件和电子元件等设备，323 份合同与芯片相关（其中 24 份合同关于 AI 芯片（含 GPU、FPGA 或 AI ASIC））。根据其中少数有型号和数量记录的信息，PLA 共订购了 97 个 AI 芯片，这个数据样本非常小，因为高端机器学习系统通常需要在数百或数千个 AI 芯片阵列上训练。一种可能原因是，PLA 更愿意从私营部门购买商业化的 AI 系统整机，而不是购买单个部件进行组装。

2. 尽管特朗普政府和拜登政府采取了更严厉的措施限制向中国军方出口先进技术，但 PLA 仍在订购由美国公司设计、由中国台湾地区、韩国和日本制造的 AI 芯片。这些高端 AI 芯片几乎都是由英伟达（Nvidia）、赛灵思（Xilinx（AMD 子公司））、英特尔（Intel）或美高森美半导体（Microsemi）等美国公司设计，而不是由海思（HiSilicon）、曙光（Sugon）、神威（Sunway）、海光（Hygon）或飞腾（Phytium）、景嘉微电子（Jingjia Microelectronics）等中国企业设计。

¹ <https://cset.georgetown.edu/publication/silicon-twist>

² 报告中的人工智能芯片指 GPU、FPGA 和 AI ASIC 三种芯片。

3. **PLA** 和国有国防公司都将美国设计芯片的合同授予了中国的中介公司，其中一些中间商是美国半导体设计公司的官方授权经销商，如 Nvidia 公司在中国的官方授权分销商思腾合力（天津）有限公司（SITONHOLY）。一些证据还表明，中国军方还利用幌子公司从美国公司购买 AI 芯片。例如，2020 年 8 月，北京衡声科技有限公司向中国航天科技集团公司下属的专门从事智能处理器和高性能计算的子公司——北京青翼凌云科技有限公司（TSINGETECH）供应 Nvidia TX1 和 Xilinx Virtex7 处理器。

4. **PLA** 的中间供应商很少出现在美国的出口管制清单（美国商务部的实体名单或军事最终用户名单）上，如北京蓝耘企服科技有限公司、北京衡声科技有限公司、思腾合力（天津）有限公司、西安丽科创新信息技术有限公司、杭州昶晖电子科技有限公司、郑州宏安通讯科技有限公司、联众集群（北京）科技有限公司。

二、美国对中国 AI 芯片实施出口管制存在的障碍

1. 对于“AI 芯片”的定义还没有达成共识，规范 AI 芯片出口比较难。很多 AI 芯片类型是全球消费品和商业解决方案中的通用商品，不仅能用于训练 AI 系统，也能用于游戏、复杂仿真、建模和图像处理等应用。例如，中国军方主要采购 GPUAI 芯片，但 GPU 并不是一种出口管制商品，可以很容易在阿里巴巴、亚马逊和 eBay 等第三方网站上买到。另外，随着技术进步，训练高级机器学习算法所需的特定芯片类型也在不断衍变中。

2. 美国政府限制向中国特定最终用户销售 AI 芯片的能力有限。美国采取的军事最终用户出口控制战略可能不足以限制中国军方获得 AI 芯片或者 AI 相关技术。美国的“军事最终用途”规则不适用于从美国境外运来的外国制造半导体，即使它们是在美国设计的。除了多边出口管制制度所涵盖的某些类型的 FPGA 之外，其他国家没有专门监管向中国出口的半导体。跟踪 AI 芯片的相关困难和潜在供应

商的多样性，将使美国监管机构难以对 PLA 的中间芯片供应商展开有针对性的打击。PLA 经常从中国的学术机构和私营公司购买商业化的 AI 系统整机，这些机构和私营公司也购买美国设计的芯片且不容易受美国“军事最终用户清单”限制。在某些情况下，美国半导体公司可能没有意识到他们的产品最终将被中国军方使用。

三、美国加强对华军用 AI 芯片管控的三种思想流派

随着美中两国之间的技术安全竞争不断演变，关于美国应该如何最好地对中国军用 AI 芯片实施管控，目前有三种思想流派：

1. 对中间供应商进行针对性且持久性打击（即“打地鼠”策略）。

通过采取更加积极且有针对性的出口管制措施，美国既可以向 PLA 和重要的军事最终用户限制芯片销售，也能保留完整的民用和商用 AI 研究以及美中之间的大部分 AI 芯片贸易。特朗普政府建立了新的管制措施并被拜登政府沿用，旨在限制向中国军事最终用户的技术出口。特朗普政府尤其扩大了针对中国的“军事最终用途”规则，使其适用于半导体元件、半导体生产设备、消费电子产品、民用飞机零部件以及其他出于“反恐”原因而受到控制的物项。然而，新的“军事最终用户”规则并不适用于在美国境外生产的产品，即使这些产品是使用美国技术或软件制造或设计的，如 AI 芯片。理论上，美国可以更多地利用现有管制措施来阻止 PLA 购买美国设计的芯片。例如，美国商务部可以将 GPU 列入“商务控制清单”，要求每年向中国出口数百万 GPU 的美国公司获得许可证；扩大《国家安全外国直接产品规则》的适用范围，禁止台积电或三星公司生产的芯片向中国军方出口；尽快更新中国军事公司清单。为了实现这些目标，美国国会需要大幅增加监管和执法机构等资源，并使商务部与情报界步调一致。

2. 对美国和中国的芯片销售施加广泛而直接的限制（即“扣动扳机”策略）。

美国政策制定者可能倾向于采取严厉措施限制 AI 芯片向

中国销售。目前美国已经与中国台湾地区和韩国政府协调，防止中国芯片设计公司通过台积电和三星公司获得制造许可。在极端情况下，美国商务部可以对所有在海外制造并运往中国大陆的美国设计的 AI 芯片（最好定义为 12 纳米节点以下）援引“外国直接产品规则”，不管它们的预期应用或最终用户如何。对此专家意见不一，而且此举可能会对美国在中国台湾地区和韩国的伙伴关系产生负面影响，因为这损害了它们的经济和政治利益。此外，选择“扣动扳机”的最佳时机至关重要，过早实施禁运将使中国军方找到采购的替代方法并提升本土芯片制造能力，过晚实施禁运则对美国安全利益无效或适得其反。

3. 继续目前芯片出口政策（即“保持不变”策略）。鉴于针对性打击中间商的物流问题以及实施禁运的政治和经济成本，美国更有可能继续目前芯片出口政策。虽然有违常理且专家看法不一，但美国政府可能希望继续允许中国军方购买先进的 AI 芯片，奉行“漏水的水龙头战略”，以否决向中国本土芯片产业投入更多资金的提议，同时也能对中国国防工业结构获得一些边缘见解。其次，在中美关系恶化的背景下，半导体仍然是美国为数不多的影响力来源之一。美国高层领导人可能会以禁止向中国出售 AI 芯片为威胁，以期阻止中国南海的军事行动或类似破坏性活动。

四、报告的建议

报告认为，上述三种方法都有不同的风险，不太可能有效抑制中国在 AI 方面的军事进步。如果美国政策制定者希望更有效地管控 PLA 获取 AI 芯片的途径，需要从根本上重新思考支撑美国出口管制和情报收集的法律和态度。

首先，限制中国军方获取 AI 芯片需要创造性的新出口管制方法，其适用范围将超出目前可见的最终用途和最终用户。美国 2018 年的《出口管制改革法案》（ECRA）要求商务部确定并控制对美国国家

安全至关重要的“新兴和基础技术”，这些技术尚未纳入现有多边出口管制制度的管辖范围。根据 ECRA，商务部可以确定与 AI 系统训练有关的特定类型芯片（包括高端 GPU），并与合作伙伴协调，筛选预期的最终用户并防止其出口。同样，如果其他不受管控的芯片用于中国境内的 AI 相关研究或应用，美国商务部可以扩大“军事最终用户”规定并将其应用于这些芯片的出口。

第二，为了更好地了解和跟踪中国国防工业基地的商业关系，美国政府可以扩大对开源中文信息的收集和分析。一个解决办法是建立一个开放的翻译和分析中心，该中心将设在情报界之外，部分致力于研究中国的国防工业和更广泛的创新基地。另外，与美国的盟友和合作伙伴分享相关出口信息，以提高自身的情报获取能力。

（执笔：沈湘 王丽 于杰平）

美国智库分析俄乌冲突后对俄经济制裁

2022 年 6 月 16 日，美国智库“新美国安全中心”（CNAS）发布《细数俄乌冲突后对俄经济制裁》报告¹，概述了美国及其盟国在俄乌冲突后对俄罗斯采取的经济制裁行动，分析了俄罗斯经济中最受制裁影响的对象或产业、探讨了对俄联合制裁行动的潜在障碍。（制裁措施统计截止日：2022 年 5 月 11 日）。

一、联合制裁措施

俄乌冲突后，美国及其盟国以前所未有的力度和速度对俄罗斯采取了全面制裁措施，通过金融制裁、出口管制和进口禁令、资产冻结和扣押、债务和股权限制以及旅行禁令等一系列措施，旨在将世界第 11 大经济体与全球经济隔离开来，并削弱俄罗斯维持其军事行动的能力。

¹ <https://www.cnas.org/publications/reports/sanctions-by-the-numbers-economic-measures-against-russia-following-its-2021-invasion-of-ukraine>

联合制裁对俄罗斯经济造成了严重损害，导致大量资本外流和人才流失。联合经济措施阻止或推迟了俄罗斯的许多金融交易，国际金融研究所估计，今年俄罗斯 GDP 将收缩 15%。此外，外国公司正在大量退出，截至 5 月初，已有 750 多家公司关闭或缩减其在俄罗斯的业务。

随着俄乌冲突继续，美国及其盟国对俄制裁将加强，如加强对俄罗斯能源产业的有效制裁、更多实体和个人将被添加到各种指定名单或清单中，继续针对俄罗斯经济的关键领域进行金融和技术制裁，收紧债务支付和其他交易的豁免等。随着时间的推移，制裁对全球经济的连锁反应也可能加剧，能源市场趋紧，粮食供应受到的冲击将加剧发展中国家的粮食不安全问题，全球化贸易萎缩，通货膨胀加剧。

制裁时间表

针对俄乌冲突，美国及其盟友迅速实施了严厉的对俄经济制裁，每次联合制裁相继对俄罗斯政府和私营部门产生了乘数效应。

第一波：俄乌冲突前（2 月 21 日），针对俄罗斯承认顿涅茨克和卢甘斯克独立进行相关制裁；

第二波：俄乌冲突正式爆发（2 月 24 日），实施主要银行制裁和出口管制；

第三波：对普京和俄罗斯精英的个人制裁，对俄罗斯中央银行的制裁以及 SWIFT（环球银行金融电信协会）制裁（2 月 25 日至 3 月初）；

第四波：对白俄罗斯实施更多制裁，石油和天然气出口管制以及新实体名单（3 月 2 日及随后几日）；

第五波：对俄罗斯石油和天然气的禁令（3 月 8 日，美国 EO 14066 及随后其它国家的能源禁令）；

第六波：撤销俄罗斯在多边经济组织中的利益并进一步限制其

贸易和投资（3月11日，取消俄WTO最惠国待遇及随后其它相关措施）；

第七波：对俄罗斯国家杜马及成员的制裁（3月24日，美国对俄罗斯国家杜马328名代表实施制裁）；

第八波：对俄罗斯金融机构、投资、国有企业、精英和某些能源进口实施额外全面封锁制裁（4月6日，七国集团及欧盟对俄实施新一轮经济制裁）。

二、美国对俄制裁措施

美国已采取了1500多项独立制裁行动，包括传统的经济制裁和新的出口管制，充分利用了财政部和国务院（1032项）以及商务部（260项）等部门的制裁措施。此外，相关制裁实施部门还重新指定或扩大了对某些实体和个人的现有制裁。

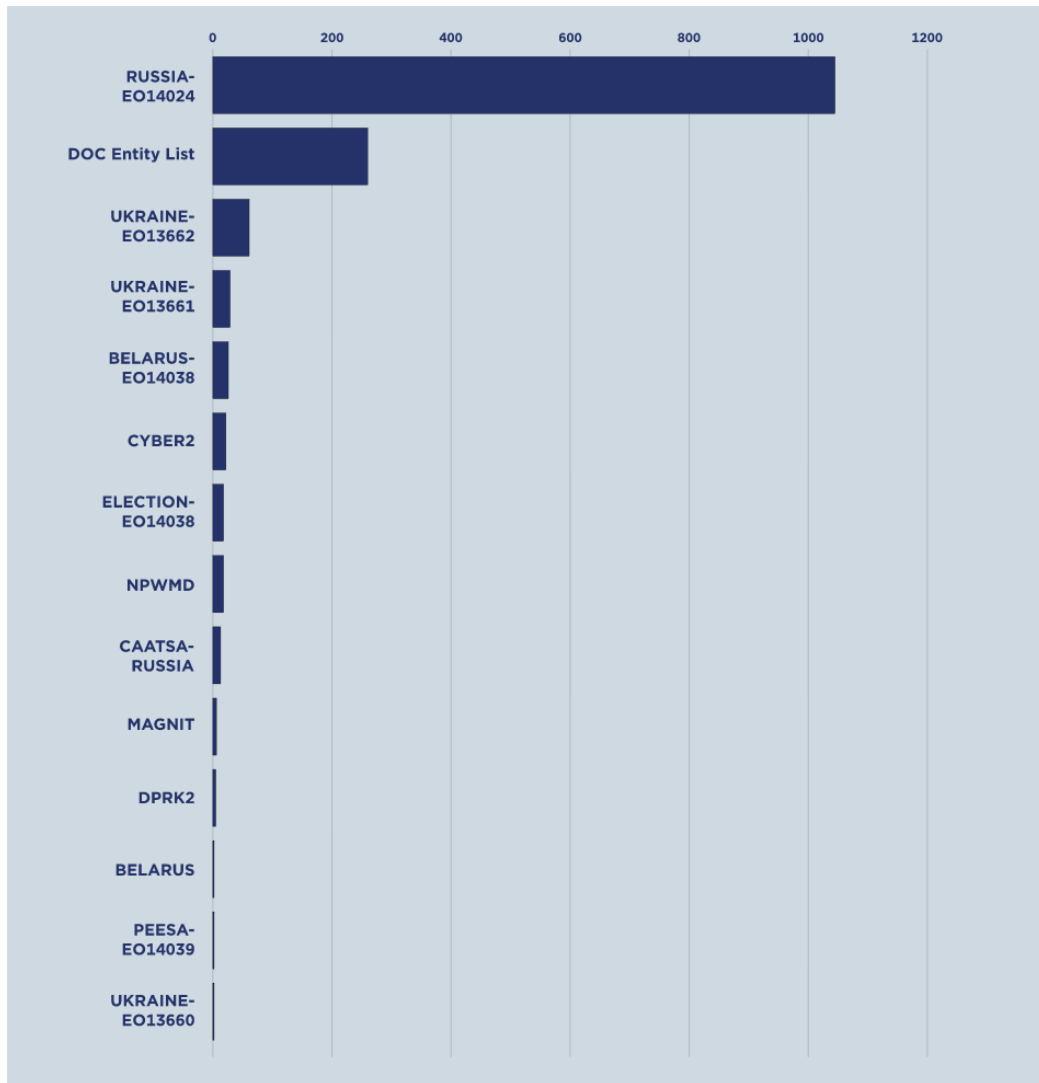


图 1 俄乌冲突后美国对俄采取的相关制裁行动

俄乌冲突后美国对俄采取的相关制裁行动：

RUSSIA-EO14024 被广泛用于指定俄罗斯银行、寡头、军事公司、船舶和飞机。制裁行动依据：俄罗斯从事有害的外国活动，包括破坏对美国国家安全至关重要的国家和地区的安全，以及违反国际法既定原则，包括尊重各国领土完整（EO 14024）。

UKRAINE-13660、UKRAINE-13661 和 UKRAINE-13662 制裁行动。制裁行动依据：破坏乌克兰民主进程并威胁其和平、安全、稳定、主权和领土完整的行动和政策，这些行动和政策曾是针对俄罗斯 2014 年吞并克里米亚而建立的（EO 13660、EO 13661、EO

13662)。

ELECTION-EO13848、CYBER2 和 NPWMD，与 EO 13722 和 EO 13687 一起，用以制裁与大规模杀伤性武器 DPRK2 计划有关的俄罗斯个人。制裁行动依据：干预美国选举（EO 13848）、非法网络活动（EO 13694）和大规模杀伤性武器（EO 13382），这些行政令主要用于与俄罗斯国家宣传机构有关的个人。

通过 PEESA-EO14039 实施的能源制裁。制裁行动依据：能源安全相关行政令，包括《保护欧洲能源安全法》（2019 PEESA），用于恢复与北溪 2 号相关的制裁以及对俄罗斯能源出口管道建设的相关实体制裁（EO 14039）。

通过 CAATSA 制裁法打击美国的对手。

通过 MAGNIT 针对少数俄罗斯精英。制裁行动依据：人权相关法令，包括《2021 年谢尔盖·马格尼茨基法治与责任法》（2012 Magnitsky）。

对俄罗斯寡头及其家庭成员，以及俄罗斯和白俄罗斯政府相关官员的签证和旅行进行限制。制裁行动依据：《移民与国籍法》第 212(a)(3)(C)条、《2022 国务院、对外行动和相关项目拨款法》和 RUSSIA-EO14024 等。

拜登还签署了四项新的行政命令：EO 14065（禁止在所谓的顿涅茨克人民共和国（DNR）和卢甘斯克人民共和国（LNR）的所有贸易和投资）、EO 14066（禁止美国进口俄罗斯能源）、EO 14068（对与俄罗斯的贸易和投资实施进一步限制）、EO 14071（根据财政部和国务院的决定禁止向俄罗斯进行新的投资或提供服务），以扩大美国制裁权利。

此外，美国商务部还发布了《出口管理条例》的多套修正案，对俄罗斯以及白俄罗斯实施影响深远的出口管制。财政部后来扩大了这些管制，实施了与石油和天然气提炼设备、以及“奢侈品”相关

的新管制，并将多个实体添加到实体名单中。

三、对俄制裁的主要对象或产业

美国政府利用国务院、财政部和商务部制裁措施，打击俄罗斯经济中的主要产业或对象，包括：支持冲突行动的俄罗斯精英和寡头；提供武器和路线的国防和运输业；为军事行动提供资金或隐瞒受制裁对象金融资产的金融机构；生产和创新武器装备的技术公司；以及继续为普京及其政权提供财政支持的能源产业。

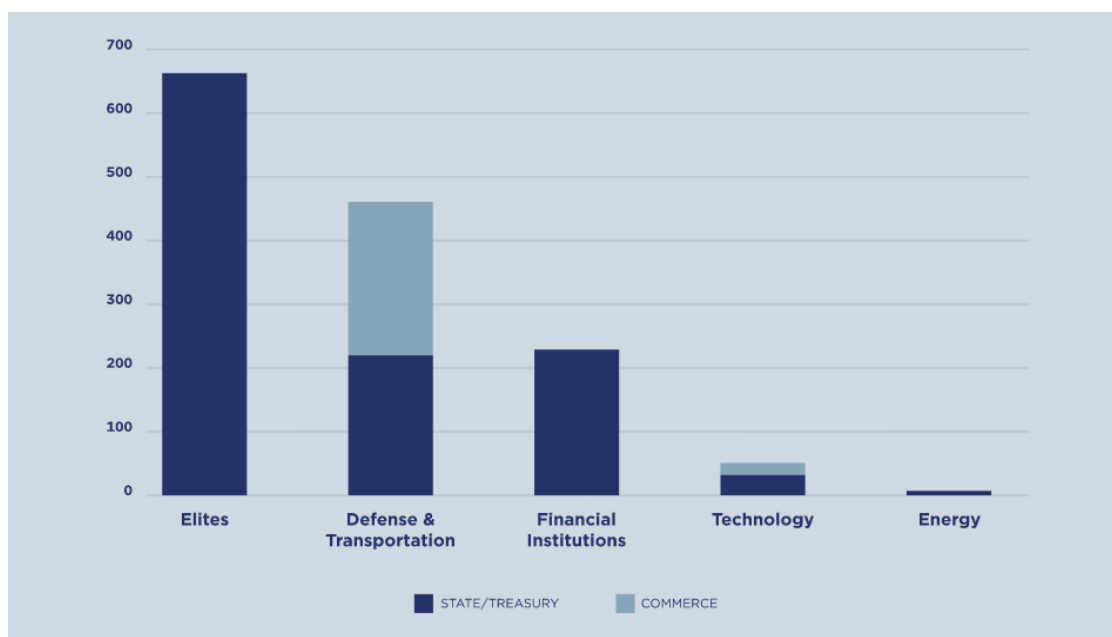


图 2 俄乌冲突后美国对俄相关制裁的对象或产业

俄乌冲突后美国对俄相关制裁的对象或产业：

精英和寡头（663）：美国制裁了 600 多名俄罗斯寡头和精英，其中包括 300 多名俄罗斯国家杜马成员；美国的盟国也对俄罗斯精英和寡头实施了制裁和经济措施。

国防和运输业（480）：俄乌冲突以来，美国商务部实体清单中已新增将近 190 个俄罗斯实体，现在俄罗斯实体总数已超过 450 个；国务院已指定 22 个与俄罗斯国防相关的实体。

金融基础设施和金融服务业（229）：自 2022 年 3 月以来，美国政府已对俄罗斯金融服务业实施了 200 多项经济制裁，涉及银行和

俄罗斯主要企业的金融部门。

能源（8）：能源行业是俄罗斯经济的主要外资来源，为俄罗斯带来了近 40% 的政府预算收入和 60% 的国家出口额。迄今为止，对俄能源制裁的重点是削弱俄罗斯能源产业的长期生存能力，以及减少其对欧洲的能源出口。

科技（32）：美国扩大了对俄罗斯科技产业的金融制裁，范围从国家支持的科技公司到俄罗斯银行支持的通信和金融科技公司，制裁对象包括微处理器和半导体等重要技术的关键供应商。

四、对俄制裁的执行情况

美国及其盟国正在采取执法行动，以防相关对象逃避制裁。美国及其盟国也正在向未参与制裁的国家施加外交压力，例如中国、印度、中东和其他中立国家，同时视中国为将俄孤立于全球金融体系和经济之外的主要潜在障碍。

此外，针对俄罗斯可能会尝试利用金融技术（即加密货币）来缓冲日益增长的金融制裁，美国及其盟国已经在该领域采取了具体的执法行动。自俄乌冲突以来，俄罗斯央行采取了有限的措施，如为俄罗斯联邦储蓄银行（Sberbank）等受制裁的某些银行发放数字资产许可证，但规模不足以让加密货币从整体上削弱制裁效果。

（执笔：王丽）

美国智库发布《回流先进半导体封装：创新、供应链安全和美国半导体领先地位》报告

2022 年 6 月，美国智库安全与新兴技术中心发布《回流先进半导体封装：创新、供应链安全和美国半导体领先地位》报告¹，认为有针对性的投资激励措施对提高美国的先进封装能力很重要。目前，

¹ <https://cset.georgetown.edu/publication/re-shoring-advanced-semiconductor-packaging/>

两个宏观趋势正在推动人们改变对封装的看法：（1）企业日益认识到封装对处理能力的重要性，特别是在摩尔定律放缓的情况下。因此，企业正在投入大量资本开发设备、材料和系统，以支持先进封装生态系统（2）先进封装创新将是决定其他新兴技术创新深度和广度。鉴于此，报告研究了先进半导体封装的重要性、美国关于先进封装的现有政策，最后给出了研究见解和建议。

一、先进封装的重要性

1. 先进封装的重要性日益增加

先进封装使用新技术和新材料来提高集成电路的性能、功率、模块化和耐久性。晶圆级封装、2.5D 集成电路、3D 集成电路等先进封装能够带来更低延迟、更高带宽、更高功率传输效率、以及更高输入/输出密度。

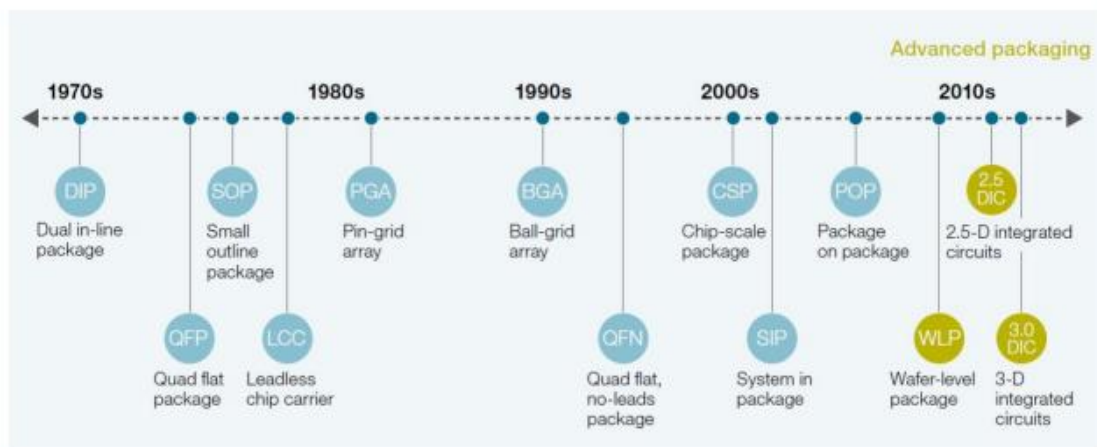


图 1 电子封装技术演进（1970s 至今）

先进封装市场的增长证明了它对消费者和半导体生产商日益重要。据 Yole Développement 数据显示，到 2024 年，整个封装市场价值将达到约 961 亿美元，其中先进封装将达 482 亿美元。据 Cision PR Newswire 数据显示，2019 年先进封装市场价值为 249 亿美元，到 2027 年将达到 733 亿美元（复合年增长率为 12.1%）。

先进封装服务需求也在增加，移动消费电子市场一直是先进封装产品的主要消费者。据 Yole Développement 数据显示，2020 年，

移动电子消费占先进封装市场的 71%，其次是电信和基础设施（20%）以及汽车和运输（7%）。航空航天/国防和医疗/工业等对先进封装产品的需求也在逐渐增加。

从消费电子产品到汽车制造再到高性能计算等市场，各种公司越来越认识到先进封装的重要性。例如，苹果和 AMD 等公司与台积电的合作范围已扩大到先进封装服务。同样，特斯拉等汽车公司也与台积电合作来制造及封装自动驾驶芯片。台积电和英特尔不久将在高性能计算和人工智能加速器应用中使用先进封装工艺。

2. 封装服务商业模式

半导体企业可以分为 IDM（垂直整合制造）、Fabless（无晶圆厂）、Foundry（代工厂）、OSAT（封测）四类，封装服务的商业模式包括两种：（1）IDM 和 Foundry 企业提供的内部封测服务；（2）OSAT 企业为第三方客户提供封测服务，这些客户可以包括 IDM、Fabless 和 Foundry 三类企业。传统上，半导体封测被认为是劳动密集型、低附加值的业务，中国大陆和中国台湾在封测业务中占据主导地位。

3. 封装材料、设备及服务

封装材料主要包括基板、陶瓷封装、引线框架和引线键合，日本、韩国和中国台湾的企业处于领先地位。

封装设备方面，传统封装设备更容易被重新利用或改造，先进封装设备难以重新部署。此外，溅射和旋转涂覆机、电镀设备、回流炉等先进封装设备的交付和安装时间更长。

封装服务方面，总部位于中国台湾、美国、中国大陆、韩国和日本的企业占封装市场的绝大部分销售份额。从实体设施的地理位置来看，亚洲处于领先地位。2019 年，中国大陆拥有最多的封装设施（114 家），其次是中国台湾（106 家），亚太其他地区（65 家），

北美（35 家），日本（27 家）和欧洲（19 家）¹。据美国半导体行业协会数据显示，全球至少有 81% 的封测产能位于亚洲。

二、美国现有先进封装政策

美国半导体制造能力持续下降，封测产能也随之下降，北美仅拥有全球封测产能的 3%。总体而言，美国企业（英特尔除外）缺乏大批量的封装能力，同时生态系统不够完善，缺乏基板、晶圆凸块技术、相关封测设备等。

《美国芯片法案》包括一些与先进封装相关的条款，这是美国政府为建立和扩大本土先进封装生态系统采取的重大举措，其中许多条款是《美国创新与竞争法案》（USICA）的一部分。USICA 拨款 20 亿美元用于支持成熟节点半导体的制造和封测；2022-2026 财年每年提供 4 亿美元用于支持国防部微电子研发网络的建立和运营；2022 财年提供 20 亿美元支持国家半导体技术中心研发投资，25 亿美元支持国家先进封装制造计划，5 亿美元支持美国制造研究所进行先进封装等微电子研究。USICA 在 2023-2026 财年每年将提供 11-20 亿美元的补充资金。

三、回流先进封装产能

美国应该重点支持先进封装产能回流，相关政策应该侧重以下三个方面：

1. 增加美国的先进封装设施产能

新建晶圆厂的增加将需要更先进的封装能力和更广泛的封测能力来确保晶圆加工。OSAT、IDM、Foundry 等三种类型的企业都在考虑新建封测设施以满足更大需求，美国应该提供激励措施鼓励企业建立或扩大本土封测产能。

仅英特尔在美国拥有高产能的先进封装设施，美国需要考虑封

¹ <https://semiengineering.com/expanding-advanced-packaging-production-in-the-u-s/>

测产能建设成本，同时还应考虑劳动力和水电费等常规性成本，这些成本在亚洲和美国之间差异很大。

政策制定者应该：向计划在美国扩大半导体制造产能的 Foundry 和 IDM 企业提供激励，并优先将激励前端晶圆厂与后端封测设施（最好是先进的封装设施）设在一起的项目。大型 Foundry 和 IDM 企业已经倾向将先进封装与制造业务设在一起。此外，目前的先进封装技术多样，还未出现主导先进封装技术的方法，政策制定者应该为能够提供各种封装服务的企业进行激励，从晶圆级到 FC-BGA 封装。激励分配可以根据设施的产能来确定，以无尘室面积和晶圆尺寸为参考。

2. 增加美国的先进封装设备和材料生产，以降低供应链的脆弱性

集成电路基板对先进封装至关重要，通常被用于各种航空航天电子产品（尤其是军用），美国在该领域的企业及生产能力都非常有限。在先进封装供应链中，集成电路基板的短缺尤为严重。ABF 基板被用于高端 CPU、GPU 和 5G 网络芯片封装。台湾基板生产商发生火灾（2020 年 10 月和 2021 年 2 月）加剧了 ABF 基板的供应紧缺，导致一些基板的交付时间延长达 40 周。虽然目前已有供应商投资扩大 FC-BGA 基板产能，但乐观估计，到 2025 年仅能满足 78% 市场需求。因此，鉴于基板的重要性日益增加，美国应该提供资金支持企业间合资建厂，以增加本土集成电路基板生产。

3. 以支持先进封装创新的研究为目标

先进封装材料、设备和服务的创新对美国未来的半导体领导地位至关重要。美国应该优先考虑提高半导体性能的同时降低功耗、成本和减小尺寸。此外，美国应该优先考虑易于商业化、灵活和可扩展的创新。鉴于这些因素，美国应该资助与小芯片（chiplets）和异构集成、设备自动化、晶圆级封装等相关的先进封装创新。

四、建议

1. 利用《美国芯片法案》的资金来激励提高美国本土先进封装产能。《美国芯片法案》的多项条款支持但不要求将资金直接用于先进封装项目，政策制定者应该利用这一自由度，将资金用于提高美国本土的先进封装产能和研发工作。

2. 引导《美国芯片法案》投资同步先进封装的半导体制造项目。大型 Foundry 和 IDM 企业已经倾向将先进封装与制造业务设在一起，应进一步引导其在美国实践这样的作法。例如，台积电和三星公司分别在美国亚利桑那州和德克萨斯州建设的晶圆厂，但他们没有宣布增加先进封装设施的计划，美国政府应该鼓励他们增加先进封装设施。

3. 鼓励与领先的先进封装集成电路基板供应商合资在美国建厂。目前，美国无论在数量还是种类方面都没有足够的集成电路基板来满足先进封装需求。增加美国本土集成电路基本产能将有助于提高先进封装供应链的弹性，以及更广泛的半导体供应链弹性。

4. 激励至少一家领先 OSAT 企业在美国建立先进封装的设施，以提供商用 FC-BGA 封装服务。

5. 利用国家先进封装制造计划的资金来促进先进封装的创新。政策制定者应将研发资金用于支持能够提供各种封装服务的公司和财团，从晶圆级到 FC-BGA。

(执笔：于杰平 王丽)

前沿研究

美国麻省理工学院创建新的硬件加速器编程语言 “Exo”

麻省理工学院计算机科学与人工智能实验室（CSAIL）的科学家创建了一种名为“Exo”的新编程语言，用于在硬件加速器上编写高性能代码¹⁻²。Exo 帮助初级性能工程师将指定的简单程序转换为复杂程序以在加速芯片上运行，这些程序与规范执行相同的操作，但运行速度要提高几个数量级。

与其他编程语言和编译器不同，Exo 是围绕“Exocompilation”的概念构建的。传统上，很多研究都集中在为特定硬件进行自动优化。这对大多数程序员来说是好事，但对性能工程师来说，编译器经常妨碍工作。因为编译器的优化是自动的，当它运行错误没有好的方法可以修复，进而效率大打折扣。借助 Exocompilation，性能工程师可以选择应用哪些优化、何时以及以何种顺序应用。Exo 负责确保所有这些优化都是正确的。因此，性能工程师可以花时间提高性能，而不是调试复杂的优化代码。

Exocompilation 的另一个关键部分是性能工程师可以描述他们想要优化的新芯片，而无需修改编译器。传统上，硬件接口的定义由编译器开发人员维护，但对于大多数新的加速器芯片，硬件接口是专有的。公司必须维护自己的整个传统编译器的副本（fork），经过修改以支持特定芯片。除了性能工程师之外，这还需要雇用编译器

¹ <https://techxplore.com/news/2022-07-language-hardware.html>; Ikarashi YK, Louis Bernstein G., Reinking A, et al. Exocompilation for productive programming of hardware accelerators. Proceedings of the 43rd ACM SIGPLAN International Conference on Programming Language Design and Implementation. 2022:703–718.

² <http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=8b19edc9c6bd2d44f4f450a774ac12e4&recommendId=111898&controlType=>

开发人员团队。

Exo 语言是一种参数化的编译器，同一个编译器可以适应许多不同的硬件加速器。Exo 无需编写一堆杂乱的 C++ 代码来编译新的加速器，而是提供了一种抽象、统一的方式来编写目标硬件形状。用户可以复用现有的 Exo 编译器来适应新的描述，而不是从头开始编写全新的东西。如果硬件创新者无需考虑为每个新硬件开发新编译器，就可以尝试更多新创意，这种创新工作方式的潜在影响将是巨大的。

高性能计算机芯片通过加速器为科学计算和机器学习应用提供动力。而优化芯片的计算性能至关重要，Exo 语言则致力于此。未来，Exo 需要探索一种更高效的调度元语言，并扩展其语义以支持并行编程模型，从而将其应用于更多的加速器，包括 GPU。

（执笔：沈湘）

澳大利亚和中国合作研制出首款自校准光子芯片

光子集成电路（PIC）由密集的分立光学元件组成，提供超宽模拟带宽，可实现高达每秒数十 petabits 的数据传输速度。同时，受较长迭代周期（设计-晶圆制造-封装-测试）的影响，PIC 正在向可编程架构（与特定应用架构并行）发展，使各种信号处理功能能够在单个芯片内实现。因此，可编程 PIC 可以显著加快光子电路的发展，并实现广泛应用，如光通信、光信号处理和计算、量子计算和人工智能硬件。

PIC 的特性或系统功能由其传递函数（即相位和幅频响应）或时间脉冲响应定义。由于在制造过程中难以保持亚波长精度，因此需要对片上参数（如耦合器的功率分配比和相移）进行自适应后期调谐，以确保所需频率响应。随着 PIC 的复杂性增加，由于制造变化

和热串扰的动态性，巨大的编程难度限制了实用性。机器学习算法提供了减轻片上串扰复杂影响的途径。

澳大利亚莫纳什大学、北京邮电大学和以及皇家墨尔本理工大学的研究人员设计并演示了一种自校准可编程 PIC，在相位调谐元件之间存在热串扰的情况下，可以完全控制数百千兆赫兹（gigahertz）带宽上的复数脉冲响应¹⁻²。自校准通过以下方式实现：

（1）将一个参考光路径并入 PIC；（2）使用 Kramers–Kronig 关系从振幅测量中恢复相位响应；（3）采用一种快速收敛的自校准算法。这种方法提供了稳定而精确的大规模 PIC 控制，可满足通信网络重构、神经形态硬件加速器和量子计算机等应用需求。该方法在数据高速公路之间架起桥梁，彻底改变当前光学芯片的连接性，并用晶片薄硅片取代笨重的 3D 光学元件。

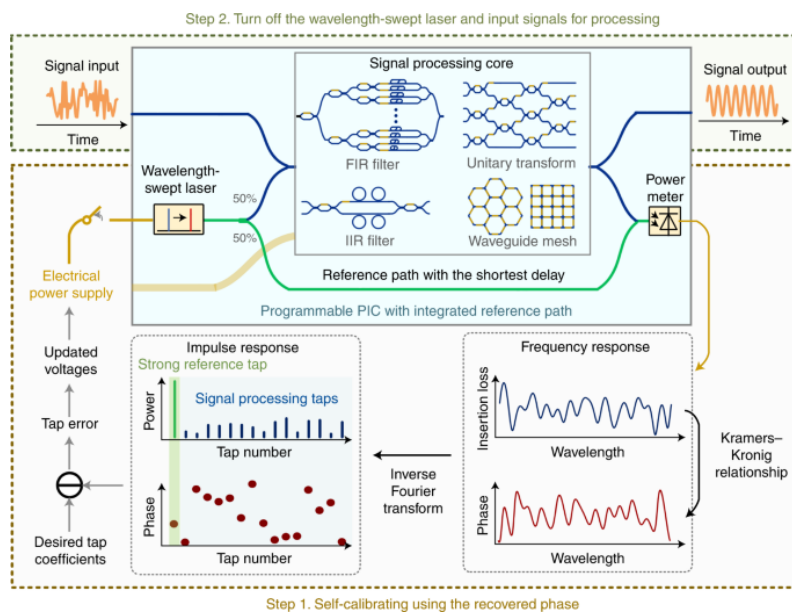


图 1 自校准集成宽带 PIC 原理图

（执笔：沈湘）

¹ Xu XY, Ren GH, Feleppa T, et al. Self-calibrating programmable photonic integrated circuits [J]. Nature Photonics, 2022, 16:595–602. <https://phys.org/news/2022-07-world-self-calibrated-photonic-chip-interchange.html>

² <http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=d8f9a03dc6016086eca1b232986782f4&recommendId=112377&controlType=>

美国研究人员开发出新型单模表面发射半导体激光器 BerkSELs

单孔腔是激光器的关键部件，用于单光模式的放大和发射。然而，自 60 年前激光器发明以来，随着腔尺寸的增加，高阶横模的出现阻碍了在保持单模运行的同时扩大腔尺寸的努力。目前尚未确定一种合适的物理机制，允许单模激光的同时保持腔尺寸的扩展。同步增加单模激光器的尺寸和功率一直是光学领域的一个挑战。

来自美国加州大学伯克利分校和劳伦斯伯克利国家实验室的研究团队开发出一种新型半导体激光器，在保持单模发射光的同时保持尺寸和功率的扩展¹⁻²。研发团队表示，这项工作表明尺寸不必以牺牲相干性为代价，这使得激光器在许多应用中更强大稳定，并覆盖更长的距离。

通过在 200 纳米厚的铟镓砷磷（InGaAsP）薄膜上用光刻法蚀刻规则性孔穴充当狄拉克点，研究团队提出并在实验上证明了具有线性色散的开放狄拉克电磁腔——在设备中通过以六边形排列的截断表面的光子晶体实现——在倒易空间中表现出非常规的损耗缩放，导致单模激光随着腔尺寸增大而保持不变。这种现象的物理根源在于开放狄拉克腔中自由光谱范围的复杂部分收敛到一个由不同布洛赫带（Bloch band）的损耗率控制的常数，而普通腔随着尺寸的增加收敛到零将导致不可避免的多模发射。研究团队将此类光源命名为伯克利表面发射激光器（Berkeley Surface Emission Laser, BerkSELs），可以通过调整设计规格（例如孔尺寸和半导体材料）来实现不同目标波长的输出。

¹ Contractor R, Noh W, Redjem W, et al. Scalable single-mode surface emitting laser via open-Dirac singularities[J]. Nature, 2022. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-05021-4>

²
<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=ce836bf8c01068f47f8dcf9804b957e2&recommendId=111477&controlType=>

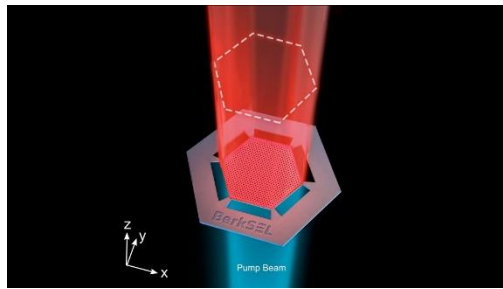


图 1 伯克利表面发射激光器（BerkSEL）示意图，蓝色为泵浦光束，红色为激光光束。

（执笔：沈湘）

IMEC 开发出逻辑器件新架构 CFETs

据 allaboutcircuits 网站 7 月 16 日报道¹，在 Forksheet 场效应晶体管（FET）中，nFET 和 pFET 被集成到相同结构中，并由绝缘壁隔开。这种方法导致金属间距的 n 区和 p 区之间的间距低至 16 nm，这对于具有低（4T）轨道高度的高性能单元设计来说太低了。

比利时微电子中心（IMEC）研究人员在 2022 年 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits（超大规模集成工艺与电路大会）中强调了这一挑战。为了最大化沟道宽度和驱动电流，IMEC 研究人员开发出一种互补 FET（CFET）架构²。

研究人员探索了两种可能的集成方案来实现垂直堆叠：单片和顺序。在 CFET 架构中，n 和 p 器件垂直堆叠在一起，消除了标准单元高度的 np 间距。

¹

<http://kjqb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=39e8856074fd9f7bdf1a98d091bba681&recommendId=112337&controlType=>

² Schuddinck P., Bufler F.M., Xiang Y., et al. PPAC of sheet-based CFET configurations for 4 track design with 16nm metal pitch. <https://imec-publications.be/bitstream/handle/20.500.12860/39613/2022020013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

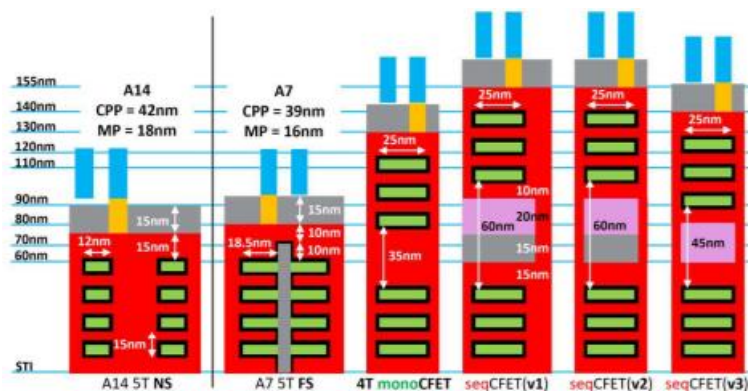


图 1 Nanosheet (NS)、Forksheet (FS) 和 CFET (单片和顺序) 的栅极横截面

单片 CFET 流程发生在三个部分：底部沟道的外延生长、中间层的沉积以及顶部沟道的外延生长。这种流程比顺序流程更复杂，因为它会产生高纵横比 (HAR) 垂直结构，需要进一步图案化。

在顺序制造流程中，底部器件被加工到触点。然后，使用晶圆对晶圆键合技术在其顶部形成半导体覆盖层。最后，对顶层器件进行集成。这个过程更简单，因为可以以二维方式单独处理顶层器件。

每一种工艺都有其优点和缺点。在 2022 年 VLSI 论文中，IMEC 研究人员对 4T 标准单元设计中单片 CFET 与顺序 CFET 进行了功率-性能-面积-成本 (PPAC) 评估，以及顺序 CFET 的不同层转移工艺评估。

(执笔：沈湘)

产业动态

三星电子公司成立半导体封装工作组以加强与大型晶圆代工厂在先进封装领域的合作

据韩国商业时报 7 月 4 日报道¹，为了进一步提升先进封装技术，三星电子公司的半导体事业暨装置解决方案业务（简称 DS）部门已于 6 月中旬成立了一个半导体封装工作组，该团队由 DS 部门 CEO Kyung Kye hyun 直接领导，意在加强与大型晶圆代工厂在封装领域的合作。

该团队由三星电子公司 DS 部门的测试与系统封装工程师、半导体研发中心的研究人员以及三星内存和代工部门的专家组成，旨在提出最新的先进封装解决方案，以加强客户合作。

随着前端工艺中电路小型化已达到极限，“3D 封装”或“小芯片或芯粒（Chiplet）”技术正在获得关注，该技术将芯片连接起来并使其以整体形式运行。

除三星电子公司外，英特尔和台积电等全球半导体巨头正在积极投资先进封装。根据市场研究公司 Yole Development 的数据，2022 年，英特尔和台积电分别占全球先进封装投资的 32% 和 27%。三星电子位列第四，位居中国台湾地区半导体后端服务供应商日月光集团（ASE Technology）之后。

（执笔：沈湘）

¹ <http://www.businesskorea.co.kr/news/articleView.html?idxno=95852>;
<http://kjgb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=11bd4d2947bc5da1474381244edc986f&recommendId=111545&controlType=>

CEA-Leti 和英特尔优化混合直接键合、自组装的 die to wafer 工艺

据欧洲电子资讯 6 月 2 日报道¹，法国研究机构 CEA Leti 和 Intel 公司优化了一种混合直接键合、自组装工艺，可以提高裸片到晶圆（die-to-wafer, D2W）键合封装技术。该技术利用了表面最小化原理产生的毛细管力（capillary forces）在目标晶圆上对准裸片，该工艺技术可以提高对准精度，并将每小时制造吞吐量提高数千个裸片。大多数液体的表面张力在 20-50 mN/m 之间，但水的表面张力为 72.1 mN/m，这使其成为使用亲水键的自组装过程的最佳候选。

D2W 混合键合工艺被视为在晶片基板上组合存储器、HPC 和光子芯片的关键，但它比晶圆到晶圆键合复杂得多，对准精度和裸片组装吞吐量较低。

几年来，CEA Leti 一直在开发一种自组装方法，其目标是大幅提高吞吐量和放置精度。CEA Leti 的 3D 集成项目经理 Emilie Bourjot 说：“D2W 自组装吞吐量提高至商业化规模克服了与裸片处理相关的两个主要挑战。如果将自组装过程与拾取和放置工具相结合，则可以通过减少对齐时间来提高吞吐量，因为精细对齐是通过液滴进行的。当自组装与集体裸片处理解决方案相结合时，由于所有裸片在同一时间粘合在一起，而无需在工艺流程的任何时间进行任何高精度放置，从而提高了产量。”

该研究成果发表在 2022 年电子元器件与技术会议（ECTC）上，论文题名“Collective Die-to-Wafer Self-Assembly for High Alignment Accuracy and High Throughput 3D Integration”。

（执笔：沈湘）

¹ <https://www.eenewseurope.com/en/cea-leti-intel-develop-self-assembly-die-to-wafer-technique/>;
<http://kjgb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=df32c588e78ce53f0c592ceab9839715&recommendId=110557&controlType=>

IMEC 和德州仪器公司等加紧行动解决半导体制造业的碳足迹问题

据 allaboutcircuits 网站 7 月 15 日报道¹，芯片制造商长期致力于在功率、性能和成本之间取得平衡，但是半导体制造通常会造成严重的环境损害：大量的水和电消耗以及产生危险废物的气体（来自原材料）。在过去几年中，为使供应链脱碳，可持续性也成为许多设施的关键优先事项，开始努力减少芯片生产对环境的影响。为缩小半导体制造业的碳足迹，比利时微电子研究中心（IMEC）、斯旺西大学（Swansea University）和德州仪器等公司和组织正在专注于减少用水、运输足迹和危险化学品的使用。

1. IMEC 成立“可持续半导体技术与系统”研究项目

2021，IMEC 成立了“可持续半导体技术与系统（SSTS）”研究项目。该项目评估新技术（尤其是 CMOS 技术）的环境影响，识别高影响问题，并确定潜在的解决方案。IMEC 的软件工具能够估计当前和未来技术的能源消耗、用水量和温室气体排放。通过从一开始就评估环境影响，企业可以对未来技术做出明智选择。

IMEC 希望 SSTS 项目能够激励人们采取相关行动，包括可再生能源的使用、回收利用、替代材料和工艺等。在 2022 年未来峰会（Future Summits 2022）上，IMEC 宣布 SSTS 项目成功将半导体价值链的各个利益相关者聚集在一起。

2. 斯旺西大学宣布“净零目标”

英国斯旺西大学的一个新研究和创新机构已收到近 270 万美元经费用于新项目“净零半导体创新（SIN-0）”。项目重点是利用半导体推进净零议程和社会脱碳。

¹ <https://www.allaboutcircuits.com/news/semiconductor-industry-eyes-sustainable-manufacturing-and-fabrication/>;
<http://kjgb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=a4236f690ef201f423ba9a28ad914d07&recommendId=112336&controlType=>

SIN-0 项目将设置于集成半导体材料中心（CISM）。CISM 的创立聚焦于创造先进的太阳能电池和高效电力电子等半导体技术。在新资金支持下，SIN-0 旨在部署和测试减排战略、能源生产和储存以及资源和废物流管理。

SIN-0 计划对先进的研究基础设施（如 CISM）进行脱碳。这只是英国大学致力于减少研究设施碳足迹的九个项目之一。

3. 德州仪器公司致力于新 300 毫米晶圆厂的能源与环境设计认证

德州仪器公司已开始在德克萨斯州谢尔曼建造其新的 300 毫米晶圆制造厂。这项 300 亿美元的投资包括四个晶圆厂建造计划，以帮助满足对模拟和嵌入式处理芯片的需求。由于德州仪器公司长期致力于可持续制造，新工厂的设计将达到能源与环境设计（LEED）金牌建筑评级。

LEED 是一个绿色建筑评级系统，帮助开发商达到全球可持续性标准，同时降低成本和提高效率。为了获得认证，项目可以在解决能源、水、废物、运输、材料等问题方面获得评分。凭借 LEED 金奖，德州仪器公司的谢尔曼晶圆厂旨在保护自然资源和促进可持续性。

（执笔：沈湘）

荷兰 SMART Photonics 公司和埃因霍温理工大学签署长期战略合作协议推进 InP 光子集成技术

据今日半导体网站 7 月 21 日报道¹，致力于进一步巩固荷兰及其光子学生态系统的强大地位，位于荷兰埃因霍温高科技园区的光

¹ http://www.semiconductor-today.com/news_items/2022/jul/smart-photonics-210722.shtml;
<http://kjgb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=394bcd64e092f6fd66c96f281ce2df4&recommendId=112308&controlType=>

子集成电路（PIC）代工厂 Smart Photonics 公司和埃因霍温理工大学（TU/e）签署了一项长期战略合作协议，旨在进一步加强磷化铟（InP）光子集成技术的发展，并为终端客户提供应用这些新技术的途径。

十年前，TU/e 成为 Smart Photonics 的创始合作伙伴之一。自此，Smart Photonics 发展迅速，并在去年跻身欧洲 50 家最具发展前景的公司之列。TU/e 和 SMART Photonics 一直密切合作，实现互利共赢。

随着此次合作协议正式确立，双方将共同加强 InP 光子集成的持续研发，为整个光子生态系统提供工业 PIC 生产能力，以应对快速增长的市场。双方的合作包括：为 Smart Photonics 的工艺设计套件开发新组件，开发未来更可持续的 PIC 生产工艺，以及其他下一代技术（如不同光子和电子平台的混合集成）。此外，Smart Photonics 将支持 TU/e 开展高端工程师培养活动，以造福整个荷兰 PhotonDelta 生态系统。

（执笔：沈湘）

英飞凌科技公司和 Oxford Ionics 公司合作开发基于离子阱制造技术的商用量子处理器

据欧洲电子资讯 7 月 6 日报道¹，德国英飞凌科技公司和英国 Oxford Ionics 公司宣布合作，将使用离子阱技术制造完全集成的量子处理器（QPU）。

Oxford Ionics 公司开发出一种独特的电子量子比特控制（EQC）技术，将为量子处理器在未来五年内拥有成百上千个量子比特奠定

¹ <https://www.eenewseurope.com/en/infineon-teams-for-commercial-ion-trap-quantum-processors/>;
<http://kjgb.las.ac.cn/choiceness/getChoicenessDetail.htm?serverId=14&uuid=e07ceef1e16b110341db34fb9c72b9d3&recommendId=111597&controlType=>

基础。此次合作目标是利用英飞凌成熟的商业制造技术，将量子计算技术从研究实验室转移到真正的工业设计中。

Oxford Ionics 联合创始人 Chris Ballance 说：“量子计算的巨大挑战在于提高性能的同时实现规模化生产。有些技术可以实现规模化生产，但性能欠佳；有些技术在性能方面符合要求，但无法实现规模化生产。我们的电子控制技术在这两方面都具有独特的优势。借助英飞凌成熟且灵活的半导体工艺，我们能够加快 QPU 的商用进程。由于我们市场领先的量子误差率，这些处理器解决问题所需的量子比特数比其他技术大幅减少。”

（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

