

7-20-2024

Deep integration of technological innovation and industrial innovation in modern industrial system: Inspiration from global new generation lithography systems

Jiang YU

School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, yujiang@casisd.cn

See next page for additional authors

Recommended Citation

YU, Jiang; CHEN, Feng; and GUO, Yue (2024) "Deep integration of technological innovation and industrial innovation in modern industrial system: Inspiration from global new generation lithography systems," *Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version)*: Vol. 39 : Iss. 7 , Article 26.
DOI: <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20240521003>
Available at: <https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol39/iss7/26>

This S&T Innovation Leads Modern Industrial System Construction is brought to you for free and open access by Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). It has been accepted for inclusion in Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version) by an authorized editor of Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version). For more information, please contact lcyang@cashq.ac.cn, yjwen@cashq.ac.cn.



Deep integration of technological innovation and industrial innovation in modern industrial system: Inspiration from global new generation lithography systems

Abstract

Utilizing technological innovation to lead the construction of a modern industrial system is a strategic choice for seizing the opportunities of the new round of technological revolution and industrial transformation. It is also a necessary step for winning the strategic initiative towards high-level self-reliance and self-improvement. Technological innovation is the intrinsic driving force behind industrial innovation, and industrial innovation is the value embodiment of technological innovation. The deep integration of technological innovation and industrial innovation is the key to constructing and improving a modern industrial system. Taking the global extreme ultra-violet (EUV) lithography system as an example, based on the perspective of the innovation chain, this study explores the breakthrough of EUV lithography system from four stages: applied basic research—applied research—pilot scale-up—large scale production. It refines the process of the formation of closely dynamic deep integration of technological innovation and industrial innovation from aspects such as diversified main bodies collaborating to strengthen application-oriented technological innovation supply to enhance the advancement of the technical system, leading enterprises leading to break through the industrial chain resources to promote the integrity of the supply system, and innovative institutional design ensuring the output transformation of achievements to enhance the dynamic nature of the innovation system. This provides theoretical and practical insights for China to seize the commanding heights of global science and technology and build modern industrial systems, as well as develop new quality productivity.

Keywords

modern industrial system; science and technology innovation; industrial innovation; deep integration; extreme ultra-violet (EUV) lithography

Authors

Jiang YU, Feng CHEN, and Yue GUO

引用格式：余江, 陈凤, 郭玥. 现代化产业体系中科技创新与产业创新的深度融合：全球新一代光刻系统的启示. 中国科学院院刊, 2024, 39(7): 1141-1152, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240521003.

Yu J, Chen F, Guo Y. Deep integration of technological innovation and industrial innovation in modern industrial system: Inspiration from global new generation lithography systems. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39(7): 1141-1152, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20240521003. (in Chinese)

现代化产业体系中科技创新与 产业创新的深度融合： 全球新一代光刻系统的启示

余江^{1,2} 陈凤^{1,2*} 郭玥²

1 中国科学院大学 公共政策与管理学院 北京 100049

2 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190

摘要 以科技创新引领现代化产业体系建设是把握新一轮科技革命和产业变革机遇的战略选择，也是面向高水平科技自立自强赢得战略主动的必然之举。科技创新是产业创新的内生动力，产业创新是科技创新的价值实现，构建和完善现代化产业体系关键在于实现科技创新和产业创新的深度融合。文章以全球极紫外（EUV）光刻系统为例，基于创新链视角，从“应用基础研究—应用研究—中试放大—大规模量产”4个阶段对EUV光刻系统的突破性创新历程进行梳理，从“多元主体协同加强应用导向科技供给提升技术体系先进性”“龙头企业引领打通全产业链资源促进供应体系完整性”和“制度设计创新保障成果产出转化增强创新体系能动性”3个层面提炼科技创新和产业创新的深度融合的关键机制，为我国抢占科技制高点，建设现代化产业体系和发展新质生产力提供理论和实践启示。

关键词 现代化产业体系，科技创新，产业创新，深度融合，极紫外光刻

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20240521003

CSTR 32128.14.CASbulletin.20240521003

高质量发展作为全面建设社会主义现代化国家的首要任务，其核心是建设现代化产业体系。党的十八

*通信作者

资助项目：国家自然科学基金（72334007、72204227、71834006），中国科学院战略性先导科技专项（XDA0380000），教育部哲学社会科学重大课题攻关项目（20JZD022）

修改稿收到日期：2024年7月5日

大以来，以习近平同志为核心的党中央强调要建设创新引领、协同发展的产业体系。2023年5月，习近平总书记主持召开的二十届中央财经委员会第一次会议强调，推进产业智能化、绿色化、融合化，建设具有完整性、先进性、安全性的现代化产业体系。2023年12月，中央经济工作会议进一步提出以科技创新引领现代化产业体系建设重点任务。

科技创新是产业创新的内生动力，产业创新是科技创新的价值实现。新一轮科技革命与产业变革下，深入实施创新驱动发展战略，加快构建现代化产业体系，必须充分发挥创新驱动引领作用；以科技创新推动产业创新，围绕产业链部署创新链，围绕创新链布局产业链，通过科技创新和产业创新的双向贯通和良性互动提升产业体系整体效能。

为了深化对现代化产业体系中科技创新和产业创新深度融合的规律性认识，本文以全球新一代光刻的代表——极紫外（EUV）光刻系统（也称为EUV光刻机或EUV光刻设备）为例，从创新链视角对EUV光刻系统的突破性创新历程进行梳理，归纳其科技创新和产业创新深度融合的关键机制，总结重要经验，提炼借鉴启示。一方面，光刻机是制造芯片最核心的装备，决定整个芯片制造技术的最先进水平。EUV光刻机作为当前已投入商用的最新一代芯片制造装备，是人类制造的最复杂的精密机器之一，被称为全球工业“皇冠上的明珠”。面向EUV光刻技术大规模商用目标，全球范围的科技界和产业界深入合作，科技创新与产业创新此起彼伏，创新伙伴群体不断演变，是现代化产业体系中科技创新与产业创新深度融合的生动体现。另一方面，自芯片制造向7 nm以下工艺节点发展以来，EUV光刻机成为全球新一代芯片制造的创新最前沿，也是当前国际对中国严格禁运的高端装备中的“重中之重”。在国际地缘政治和大国科技博弈背景下，EUV光刻机作为全球科技的制高点，具有“突破一点，震撼全局”的巨大战略影响力。因此，开展

EUV光刻系统相关研究对服务我国打赢关键核心技术攻坚战和实现高水平科技自立自强等重大战略需求具有重要现实意义^[1]。

1 创新链视角下的EUV光刻系统发展历程

EUV光刻系统的发展历程包括开展广泛的多学科交叉研究、解决一系列核心科学与工程问题、实现技术可行性的测试和验证、促进从样机到商用机的产品迭代并最终实现面向市场的大规模量产^[2,3]。基于创新链，EUV光刻系统发展大致分为实验室研究和工业化制造2个阶段，可进一步分解为重点开展前沿技术原始创新和技术路线选择的应用基础研究、重点开展原理验证和核心技术攻关的应用研究、重点开展分系统攻关与集成和用户创新的中试放大，以及重点开展成熟产品渐进迭代的大规模量产4个具体阶段。其中，创新链上的核心主体包括国立科研机构、高校、产业链上下游企业（整机厂商、部件供应商、领先用户）及部分企业研究机构等；创新主体通过合作关系连接成纵横合作创新网络，横向实现同一创新主体在创新链不同阶段的嵌入，纵向实现不同创新主体在创新链同一阶段的互动联通，整体实现从科学研究到产业化扩散的全过程创新协同。创新链视角下的EUV光刻系统发展关键事件、阶段、活动、标志和核心主体演变过程如图1所示。

1.1 应用基础研究阶段：原理构想、技术路线选择（20世纪80年代初—1993年）

该阶段涉及开展下一代光刻前沿技术原理的构想，以及下一代光刻技术路线选择等创新活动，核心主体包括高校、企业研究机构和国立科研机构等。

20世纪80年代初，业界开始探索下一代光刻技术，当时有3个备选波段：①准分子激光波段；②10—100 nm的EUV波段；③10 nm以下的软X射线波段。起初，在以国际商业机器公司（IBM）为代表的大量研发主体重点聚焦软X射线技术路线的同时，

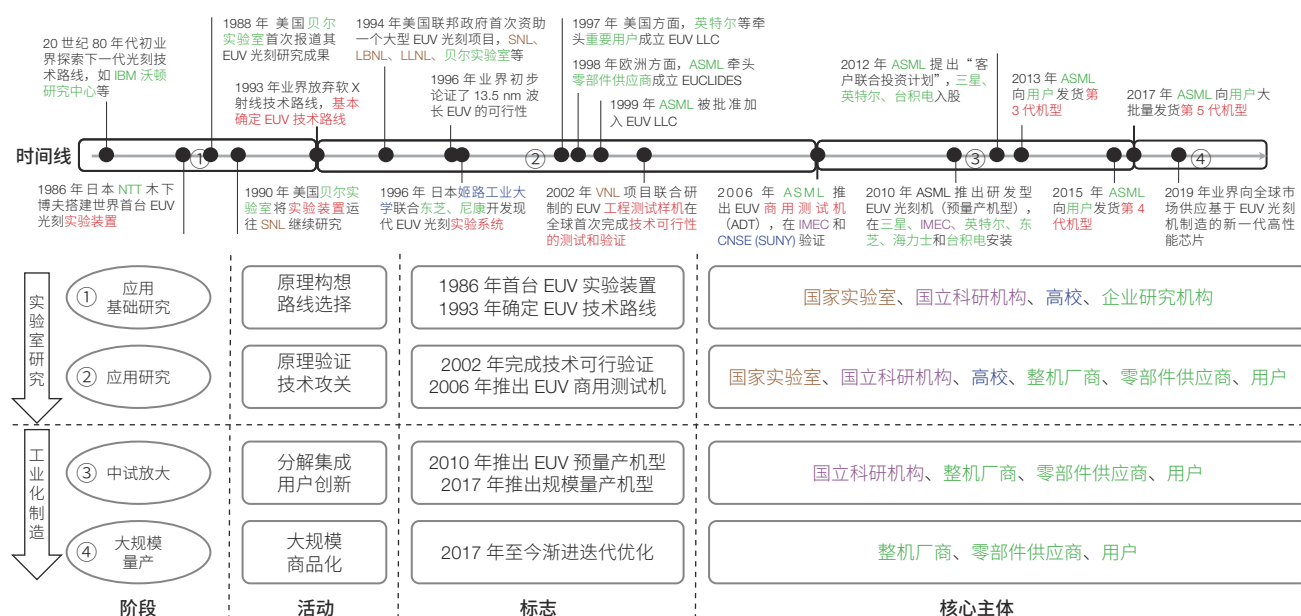


图1 创新链视角下EUV光刻系统发展的关键事件、阶段、活动、标志和核心主体演变图

Figure 1 Key events, stages, activities, symbols, and core subject evolution of EUV lithography system development from perspective of innovation chain

绿色文字代表企业主体或企业研究机构；棕色代表国立科研机构中的国家实验室，紫色代表除国家实验室之外的国立科研机构（如IMEC）；蓝色代表高校；红色为标志性创新活动或产品节点

Green text represents enterprise entities or research institutions, purple represents national research institutions, brown represents national laboratories, blue represents universities, and red represents iconic innovation activities or product nodes

日本电报电话公司（NTT）、尼康公司、佳能公司、贝尔实验室和若干美国国家实验室等研究机构在相对包容的创新环境下持续开展EUV光刻研究。1986年，时任日本电信巨头NTT研究员的木下博夫（Hiroo Kinoshita）搭建了世界首台EUV光刻实验装置并取得了扫描式曝光成果。1987年，苏联列别捷夫物理研究所公布了其EUV光刻相关研究成果。1988年，美国贝尔实验室也首次报道了其EUV光刻研究成果，并于1990年将实验装置运往国家实验室继续进行研究。1993年，随着软X射线技术路线因无法实现规模化应用而被放弃，业界基本确定了EUV波段的技术路线。

1.2 应用研究阶段：原理验证、核心技术攻关（1993—2006年）

自1993年基本确定了EUV波段技术路线后，业界又利用3年，于1996年初步论证了13.5 nm波长的

EUV应用于下一代光刻机的可行性，并持续在实验室中开展EUV光刻相关原理验证和核心技术攻关。该阶段涉及国立科研机构、高校、企业研究机构、整机厂商、零部件供应商及光刻机领先用户的协同合作。

美国。1994年，美国联邦政府首次资助一个大型EUV光刻项目^[4]，美国能源部（DOE）所属桑迪亚国家实验室（SNL）、劳伦斯伯克利国家实验室（LBNL）和劳伦斯利弗莫尔国家实验室（LLNL），以及贝尔实验室、个别企业参与研究。20世纪90年代中后期，美国联邦政府削减了在半导体领域的研发预算。为应对科研经费短缺和科研进度滞缓的不利局面，DOE所属3个国家实验室与产业界联合组建协同创新主体——虚拟国家实验室（VNL），既发挥了各个国家实验室在科研方向和研发积累上的优势，又实现了多个国家实验室之间的高度协同，同时还与优势

产业伙伴深度协作，面向未来产业应用场景开展新一代集成电路核心技术攻关和内在原理突破，显著加强了产业界对集成电路未来核心工艺技术发展的信心。1997年，英特尔公司、IBM等先进集成电路制造商联合上述3家美国国家实验室及其他设备、材料等研发机构成立EUV有限责任公司（EUV LLC）联盟^[5]。在与VNL签订了联合研发协议（CRADA）后，该联盟为VNL针对EUV光刻的基础研发提供2.5亿美元预算^[6]。

欧洲。1998年，光刻机整机厂商阿斯麦公司（ASML）与长期合作伙伴卡尔·蔡司（Carl Zeiss）、牛津仪器（Oxford Instruments）等零部件供应商成立了名为EUCLIDES的欧洲工业研发联盟，还与包括德国国家计量研究所（PTB）和弗劳恩霍夫仪器公司（Fraunhofer-IWS）等其他供应商合作，一起开展EUV光刻关键技术研究。1999年，ASML被美国批准加入1997年成立的EUV LLC联盟，ASML及EUCLIDES与美国EUV LLC联盟开展深度合作。

日本。1996年，进入日本姬路工业大学的木下博夫联合东芝公司和尼康公司开发了接近现代EUV光刻的实验系统。但由于美国和日本在半导体领域激烈竞争等因素影响，光刻巨头尼康公司无法进入EUV LLC联盟；日本产业界则进一步通过其超先进电子技术协会（ASET）计划和后来的日本EUV光刻发展协会（EUVA）计划追求本土EUV技术的发展。

2002年3月，SNL宣布，VNL项目联合研制的现代光刻机原型EUV工程测试台完成全球首次技术可行性的测试和验证。在此基础上，ASML充分利用前期研发成果，继续与零部件供应商协作，于2006年推出EUV商用测试机Alpha Demo Tool（ADT）。

1.3 中试放大阶段：分系统攻关与集成、用户创新（2006—2017年）

该阶段涉及EUV光刻分系统攻关与集成等创新活动，在整机厂商、零部件供应商、国立科研机构和领

先用户的协作下，EUV光刻系统实现从样品到产品、从实验室到生产线的重大转变。

ASML的商用测试机分别安装在比利时微电子研究中心（IMEC）和美国纽约州立大学奥尔巴尼分校（SUNY）纳米科学与工程学院（College of Nanoscale Science & Engineering, CNSE），以更好地了解EUV光刻及该技术如何融入半导体制造过程，从而将实验室的样品实现中试放大。2010年起，ASML先后在三星、台积电、IMEC、英特尔、东芝和海力士等企业和研究机构安装预量产机型NXE:3100，以用于产品内部验证和工艺开发。为进一步整合资源，ASML于2012年提出“客户联合投资计划”^[7]。台积电、英特尔、三星3家集成电路制造巨头购买ASML的少数股权，以帮助ASML融资并分担研发投资的风险；同时，这3家企业被给予EUV光刻系统的优先供货权。同年，ASML在荷兰的Veldhoven开设了新工厂，为EUV光刻系统的批量供货奠定基础。此外，ASML持续通过战略性并购，如2007年收购Brion Technologies、2012年收购光源解决方案提供商Cymer、2016年收购保真度计量工具提供商HMI，以及2016年收购EUV高精密光学镜片部件及光学系统供应商蔡司半导体制造技术公司（Zeiss SMT）的部分股权等，不断增强其在整体光刻战略上的产品组合。2013年，ASML向用户发货每小时出片量约70片的第3代机型NXE:3300B。2015年起向用户发货每小时出片量约125片的第4代机型NXE:3350B。2017年，ASML向用户批量出货能够支持7 nm和5 nm芯片制造工艺节点的第5代机型NXE:3400B。

1.4 大规模量产阶段：成熟产品渐进迭代（2017年至今）

该阶段涉及EUV光刻系统的大规模商品化，在整机厂商、零部件供应商和领先用户的协作下，推动EUV光刻设备进入大规模量产。

自2017年推出第5代机型起，ASML的EUV光刻

系统达到大批量生产水平。2018年，EUV光刻机的用户开始在其晶圆厂中大力投资新技术。2019年，集成电路产业开始向全球市场提供7 nm的智能手机处理器和人工智能图形处理器等新一代高性能芯片，这标志着EUV光刻系统突破性创新的全面成功。

2 EUV光刻：科技创新和产业创新深度融合机制

EUV光刻机创新历程，是从松散式的科学原理探索研究，逐步形成面向未来产业愿景和产学研用多方协同攻关创新态势，不断打通产业链、创新链上的“断点”“堵点”，成功实现集科学新发现、技术新轨道和产业新方向于一体的“大纵深”整体突破。EUV光刻技术路线验证与商业成功的历史进程，是面向产业发展需求重大科技问题的共同凝练，是来自全球的产学研用主体的通力协作，全球范围高水平科技人才、工程师和企业家群体的广泛参与，以及政府部门和产业主体长期、高强度和接续资金投入等综合作用的结果，也是科技创新和产业创新的深度融合，以及产学研用深度协同的突出典范^[8]。EUV光刻科技创新与产业创新深度融合的关键路径如图2所示。

2.1 多元主体协同加强应用导向科技供给，提升产业技术体系先进性

在科技创新环节，产学研多元研发主体构建了开放式科技创新网络，凝聚全球EUV光刻研发资源，显著加强了应用导向科技供给，有力促进产业技术体系先进性的提升。

(1) 研发环境开放包容。在下一代光刻技术路线选择早期，日本、苏联、美国和欧盟等全球主要相关领域研究主体及光刻设备市场主体的集聚区，为本地开展相对独立的EUV光源和光刻工艺的研究提供了相对开放和包容的环境。例如，虽然日本NTT本身不看好EUV并重点投入了其他光刻技术，但并没有阻止其研究人员木下博夫针对EUV路线的研究。虽然美国科

技界和产业界不能确保EUV会成功，但在没有明显的致命不足（showstopper）的情况下，美国政府和相关创新主体依然持续推动本国EUV的研发。

(2) 政府部门战略牵引。在1993年业界基本确定了EUV波段的技术路线之后，美国DOE立刻启动了第1个EUV光刻技术研发项目，美国联邦政府提供预算，由DOE所属3个国家实验室、贝尔实验室和个别企业开展研究。

(3) 研发组织各抒所长。在技术路线验证和关键技术攻关过程中，国立科研机构充分发挥其在承担重大科技任务，以及开展原理探索性研究等方面的突出优势。例如，美国SNL和比利时IMEC等都有承担和实施大型科研项目的丰富经验，能够以重大需求的目标为牵引，通过科学系统的降维分解，识别EUV光刻所涉及的一系列核心科学技术难题，为重大创新突破提供新概念和新方向。此外，IMEC在促进商用测试机从样品到产品、从实验室到生产线的中试放大中也扮演了不可替代的作用^[9]。

(4) 产业力量深度参与。产业力量在研发阶段的深度参与是科技创新和产业创新贯通互动的重要体现。在应用基础研究阶段，贝尔实验室、IBM沃顿研究中心等具有世界影响力的企业研究机构开展系列前瞻探索。在应用研究阶段，13.5 nm波长的EUV用于下一代光刻可行性被初步论证后，产业力量自下而上迅速组成合力，形成以英特尔公司为代表的集成电路制造企业联合发起的EUV LLC联盟，以及ASML与战略合作伙伴联合发起的EUCLIDES等。以上举措让产业力量尽早介入科技研发项目，促进与研发资源和科技成果的对接。

(5) 跨界人才交叉融合。EUV光刻研发是一个庞大的原始创新工程，依托光学、数学、物理学、微电子学、材料学与精密机械及控制等多学科交叉的深度融合研究，需要解决光源、结构、器件、工艺及检测等领域一系列核心科学与工程问题，并阐释许多新机



图2 EUV光刻科技创新与产业创新深度融合关键路径

Figure 2 Summary of key paths for deep integration of EUV lithography technology innovation and industrial innovation

*, □所示研究机构为除国家实验室之外的国立科研机构或企业研究机构
*, Research institutions shown by □ are national research institutions or enterprise research institutions other than national laboratories

制和新机理。依托国立科研机构、企业研发机构，实现了科学、技术、工程和管理经营等多领域人才跨界汇聚，以及多学科人才交叉融合。例如，美国DOE所属3家国家实验室的100多名世界顶尖科学家为骨干开展多学科交叉融合研究和协同创新合作，突破了EUV系统在光学、器件、加工和检测等领域的基础科技难题。

2.2 龙头企业——ASML引领打通全产业链资源，促进产业供应体系完整性

EUV光刻系统产业体系的复杂性和挑战性不仅体现在关键核心技术攻关上，还表现在中试放大，以及建立全球零部件制造和供应网络的高质量管理体系上^[10]。光刻系统的整机性能是若干子系统（如EUV光源系统、高精度弧形反射镜光学系统、超高精度真空

双工件台等核心子系统)、广泛零部件和核心工艺协同配合、共同作用的综合结果。光刻系统组件本身又可以细分为成千上万个零部件^[11],每个零部件的设计、加工和装配都需要经过精密的工艺设计和严格的质量控制,以确保整个光刻系统的正常运行和性能稳定。为了EUV光刻系统的商用化,ASML作为EUV光刻系统的整机企业和整个产业链的龙头企业,与全球5 000多家供应商合作,保证高质量的零部件和材料供给;由于供应商分布于全球各地,涉及供应链物流、质量控制等方面的诸多复杂问题,ASML在促进产业供应体系完整性方面扮演了核心协调作用^[12]。

(1) **明确自身优势定位。**ASML将其有限的顶尖人才资源集中投入光刻系统整体层面的集成研发,并持续开展体系化和前瞻性关键技术开发,明确其在系统集成方面的突出优势并巩固提升。而在关键部件创新方面,ASML则主要通过与全球领先的零部件供应商深度合作。例如,在EUV光源方面,光刻机光源供应商Cymer为ASML所提供的EUV光源方案整合了3家德国公司的先进技术,包括ZEISS SMT全球领先的光学反射镜、弗劳恩霍夫光机所精确的镀膜,以及通快公司(Trumpf)的超高功率二氧化碳激光。在光学系统方面,ZEISS SMT于2010年研发全球第一套EUV光学系统并在EUV光刻领域形成绝对的技术壁垒,是ASML EUV光刻机镜头的唯一供应商。

(2) **构建体系化发展战略框架。**ASML建立了市场、产品、技术三大战略路线图,精准把握未来光刻机的核心特征和关键参数,并有效满足芯片制造厂商的前沿需求;然后,由其技术部门研究产品路线图中所需的技术,主导新的研发方向,从而实现了供需的贯通及前沿技术与成熟技术的协同。

(3) **产品模块化分解。**ASML主要通过模块化外包和联合开发的方式获得核心原材料。ASML与广大供应商联系十分紧密,与分布于全球各地的5 000余家供应商和合作伙伴维持着长期、密切、透明的协作

关系,其中约800家供应商提供直接用于生产公司产品的材料、设备、零件和工具。荷兰本土仅提供其中的15%左右的组件,其余85%都需要从全球其他地方进口,再经过拼装最终成为一台EUV光刻机。模块化分解带来零部件的并行开发和制造,能够显著提高系统集成产品的创新效率,也有效降低了设备故障的维修成本。

(4) **战略性商业并购。**为避免关键零部件供给质量不足而导致整机系统竞争力下降,自2001年以来,ASML已累计在战略并购与股权收购光刻机产业链相关公司上支出超84.7亿美元。例如,2001年收购美国光刻机制造商硅谷集团(SVG)。2013年收购美国EUV光源制造商Cymer,取得EUV必需的主流激光等离子光源(LPP)。针对超高精密度和光滑度的反光镜这一EUV光刻机无可替代的核心零部件,ASML于2016年以10亿欧元现金收购半导体光学器件领军企业Zeiss SMT 24.9%的股权,保障EUV光刻光学系统这一关键子系统的研发和部件供给。ASML通过并购为其EUV光刻整机的持续迭代和核心子系统的稳定供应奠定了坚实基础。

(5) **坚持以用户为中心。**EUV光刻机是研发出来的,实际上更是用出来的。每一台EUV光刻机的出售,都需要几十名技术人员到用户处进行运行调试;在调试过程中,ASML的核心工作之一就是及时且高效地解决技术不足和用户的定制化需求。例如,领先用户台积电提出EUV光刻系统的商用化需要将全新光罩的原生缺陷降低90%,否则晶圆的良品率难以达到市场要求。针对该项重大技术瓶颈,ASML核心技术团队研发并推出了革命性的可移动光罩薄膜技术。正是用户在使用过程中对产品的定制化需求和高效率追求,以及ASML在此过程中始终坚持以用户为中心的商业承诺和高标兑现,才有力保障了ASML光刻产品的前沿技术更新迭代,显著提升了EUV光刻系统的性能和市场满意度。

2.3 制度设计创新保障成果产出转化，增强产业创新体系能动性

EUV光刻系统攻关时间长，参与主体多，如何通过制度设计，充分考虑创新参与方的利益诉求，促使众多创新伙伴形成面向科技前沿攻关和市场规模化推广的强大协同动力，互融共生、利益共享、释放潜能、实现价值，促进高质量科技成果的产出、转移、转化和应用，是提升产业创新体系能动性的关键。

(1) 国立科研机构体系有组织协同机制。在美国，国家实验室是深度参与EUV光刻机研发的主要国立科研机构。1995年，当DOE所属3个国家实验室LLNL、LBNL、SNL开展深度合作时，考虑到各个国家实验室在科研方向和研发积累上各有专长，则设计了VNL项目组织模式——以100多名世界顶尖科学家为骨干开展交叉融合研究。其中，由研发体量最大的SNL负责新光源系统研发、记录材料研究，以及整合EUV工程原型系统等开发任务；LBNL负责精确光学测量、多层镀膜检测系统等研发任务；LLNL负责关键的新光学器件设计以及掩模版系统研发等。1997—2003年，VNL合作项目团队面向未来集成电路光刻技术产业化的愿景，紧密系统协作；通过多学科交叉融合研究，高强度地开展了一系列新理论验证和基础技术探索，突破了EUV系统在光学、器件、加工和检测等领域的基础科技难题，取得了一系列前沿成果，申请了60多个高价值核心专利，并从系统机理上全面验证了EUV技术体系商用的先进性与可行性。在顺利达到预定研发战略目标后，3个国家实验室保持少数骨干团队继续跟踪相关前沿动态，并保证前期研究资源的有序退出。

(2) 产业界与科研资源和成果对接机制。自1996年业界初步论证了13.5 nm波长的EUV光刻路线的可行性后，来自产业界的研发力量自下而上地快速整合并与国家层面的研发力量实现对接。例如，由英特尔公司牵头成立的EUV LLC联盟与VNL签订了联合研

发协议。EUV LLC联盟的企业通过提供相关研发预算、分享产业研发前景与应用经验，与VNL项目形成优势互补的合作研发模式，共同制定整体研究框架与年度研发行动计划^[13]。EUV LLC联盟一方面为VNL针对EUV光刻的基础研发提供2.5亿美元预算（含人员和设备费用），另一方面为VNL的基础研发提供几百项难题输入，增强VNL研发的应用导向。在VNL项目联合研制的EUV工程测试样机在全球首次完成技术可行性的测试和验证后，英特尔、IBM、ASML等产业合作伙伴通过VNL项目合作计划，分享了这3个国家实验室的系列突破性科研成果和高价值平台资源，极大地推动新一代光刻系统的突破进程。

(3) 高激励的知识产权分配机制。对于研究院所和高校等基础研究成果供应方，以及芯片制造商、子系统供应商、基础材料供应商和零部件供应商等不同的产业合作伙伴，为实现基础研究成果的高效转移转化，以及商用产品开发成本和风险共担，促进知识和成果共享，避免资源重复、分散投入，关键在于构建尊重知识产权（IP）归属和保护机制。以著名的比利时国立科研机构IMEC为例，其在有利于产业基础能力提升的知识产权高水平整合与积累和有利于竞争优势建立的知识产权保护与促进方面，探索出了全球公认的创新型知识产权运行机制。IMEC创新性地实施产业联合项目（Industrial Affiliation Program, IAP）这一多方合作模式，邀请企业、大学、研究机构等创新主体参与研发并签订IAP双边协议，明确各自研发领域、知识产权归属及付费项目^[14]。一方面，合作者将能够共享大量IAP实施前IMEC所积累的知识产权，促进合作者短期内基础能力的积累和快速提升。另一方面，IMEC将IAP实施过程中取得的知识产权进一步划分为不同权益类别，在有效促进产业上下游的合作伙伴高质量创新贡献持续投入的同时，也有力保障了对方的竞争优势。

(4) 高风险共担的联合创新机制。科技供给阶

段，特别是在竞争前技术研发过程中，政府部门的科研投入发挥了重要的牵引作用。同时，在政府投入不足的情况下，来自产业界的投入为EUV光刻的核心技术攻关提供了稳定的资金支持，也有力促进了科技创新对产业需求的积极响应。产业创新阶段，产业供需的深度绑定有力促进了该过程中创新主体的风险共担。2012年，ASML以“客户联合投资计划”的名义，引入英特尔、三星、台积电等全球半导体巨头作为战略合作方，并给予其优先供货权，从而结成紧密的利益共同体，降低新型光刻机的研发风险。通过这一计划，ASML获得了来自三星、台积电共计13.41亿欧元的股权投资及2.75亿欧元的研发支持，还获得了长期合作伙伴英特尔公司41亿美元的股权投资，以及10亿美元研发支持。以资本为纽带，通过高风险共担的联合创新机制，EUV光刻科技和产业创新主体形成牢固的利益共同体关系，共享成果、共同进步。

3 结论及启示

EUV光刻系统的突破性创新充分体现了科技创新和产业创新的深度融合，特别是在跨学科交叉、跨环节作用、多主体协同的复杂产品创新领域的成功，为我国面向高水平科技自立自强、构建现代化产业体系提供了重要借鉴。

(1) 充分认识我国科技创新与产业创新深度融合关键问题。当前，我国科技创新和产业创新深度融合的内生动力不足，对构建现代化产业体系的支撑力较弱。①我国在关键核心领域具有国际影响力的重大原创性成果偏少，对产业创新的驱动和支撑不足。②重大原始创新活动的组织和策源能力有待提升。各类创新主体在一些跨学科跨领域的大协作中呈现彼此分割、各自为战的状态。一方面，企业参加产学研合作或技术创新联盟意愿不高，对依托产学研合作获得产业技术突破的信心和积极性不足；另一方面，高校、科研机构和企业研发活动缺乏互动。

(2) 体系化促进高质量科技供给，增强产业创新内生动力。对标高水平科技自立自强的要求，以重大目标任务和发展规划为导向，统筹推进科技、教育、人才工作，形成科技创新驱动产业创新的整体性研发框架。统筹分散和割裂的创新单元和要素，根据业务特长和技术积累，明确主体责任定位和任务分工；支持国立科研机构开展战略性、前瞻性、基础性研究，加强关键核心技术与共性基础技术供给；加强产学研协同，团结下游领先用户，面向产业发展需求共同凝练科技问题，夯实产业创新发展的科技支撑。基于多学科的交叉融合、多领域的跨界汇聚，促进多样化高端人才的整合，形成科技创新与产业创新融合的人力资源基础。此外，探索互利共赢的全球科技创新开放合作新模式，打破制约知识、技术、人才等创新要素流动的壁垒。

(3) 高效发挥龙头企业关键作用，保障科技创新价值实现。科技创新与产业创新深度融合过程中，强化企业科技创新主体地位，推动产业链上下游、大中小企业协同创新，互融共生、分工合作、利益共享，引导各类企业、金融机构、系统集成商等多方力量打造产业体系化能力，构筑充满活力、安全可控的创新生态加强产业关键核心技术攻关及核心子系统整合。支持有持续产品迭代能力的创新主体发挥链主作用，从促进产业体系化发展角度出发构建贯通市场、产品和技术逻辑通路的战略规划，构建高水平的开放供应体系。鼓励链主企业牵头推动建链、延链、补链、强链，带动中小企业卡位入链，形成产业链上下游配套、协同互补的发展格局，提升产业链的完整性、稳定性和竞争力。此外，鼓励产业链龙头企业将中试和研发生产一体谋划，形成行业完整中试能力。

(4) 加强科技创新与产业创新深度融合体制机制设计创新。促进科技创新与产业创新深度融合的关键点在于妥善处理不同发展阶段、不同创新主体的角色分工与协同、利益分配与激励，以及风险分散与共担

等问题。建议加强制度设计,包括:在分工协同过程中,充分考虑创新主体的突出优势,探索创新组织新模式,让科技创新主体与产业创新主体尽早对接;在分配激励过程中,优化知识产权保护机制,既注重有利于产业基础能力提升的知识产权整合与积累,又注重有利于竞争优势建立的知识产权保护与促进;在风险共担方面,要促进创新主体依托不同的纽带形成深度捆绑的利益共享机制,特别是强化以产业资本为纽带赋能科技创新,更好地实现金融链与创新链、产业链的持续对接。

参考文献

- 张学文,陈劲.科技自立自强的理论、战略与实践逻辑.科学学研究,2021,39(5):769-770.
Zhang X W, Chen J. Theory, strategy and practical logic of self-reliance and self-improvement. Studies in Science of Science, 2021, 39(5): 769-770. (in Chinese)
- 孙琴,刘戒骄,胡贝贝.关键核心技术突破能力建设需求分析.科研管理,2024,45(3):31-41.
Sun Q, Liu J J, Hu B B. An analysis of the needs for building the key core technology breakthrough capabilities. Science Research Management, 2024, 45(3): 31-41. (in Chinese)
- 刘雯,马晓辉,刘武.中国大陆集成电路产业发展态势与建议.中国软科学,2015,(11):186-192.
Liu W, Ma X H, Liu W. Development trend of IC industry in the China's mainland and some recommendations. China Soft Science, 2015, (11): 186-192. (in Chinese)
- 曾海峰,郭磊,李世光,等.从极紫外光刻发展看全球范围内的技术合作.激光技术,2023,47(1):1-12.
Zeng H F, Guo L, Li S G, et al. Global technical cooperation from the perspective of extreme ultraviolet lithography development. Laser Technology, 2023, 47(1): 1-12. (in Chinese)
- Bakshi V. EUV Lithography. Washington DC: SPIE Press, 2009: 63-65.
- Linden G, Mowery D C, Ham Ziedonis R. National technology policy in global markets: Developing next-generation lithography in the semiconductor industry. Business and Politics, 2000, 2(2): 93-113.
- 渠慎宁,杨丹辉,兰明昊.高端芯片制造存在“小院高墙”吗:理论解析与中国突破路径模拟.中国工业经济,2023,(6):62-80.
Qu S N, Yang D H, Lan M H. Does there exist “small-yard and high-fence” in high-end chip manufacturing: Theoretical analysis and simulation of China's breakthrough path. China Industrial Economics, 2023, (6): 62-80. (in Chinese)
- 余江,刘佳丽,甘泉,等.以跨学科大纵深研究策源重大原始创新:新一代集成电路光刻系统突破的启示.中国科学院院刊,2020,35(1):112-117.
Yu J, Liu J L, Gan Q, et al. Major original innovation based on interdisciplinary research: International insights from breakthrough of new generation of lithography system. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(1): 112-117. (in Chinese)
- 柳卸林,常馨之,董彩婷.构建创新生态系统,实现核心技术突破性创新:以IMEC在集成电路领域创新实践为例.科学学与科学技术管理,2021,42(9):3-18.
Liu X L, Chang X Z, Dong C T. Build an ecosystem, realize breakthrough innovation in core technology fields: Take IMEC's practice in the semiconductor field as an example. Science of Science and Management of S & T, 2021, 42(9): 3-18. (in Chinese)
- 柳卸林,常馨之.构建市场导向的核心技术创新生态系统.科学学研究,2024,42(3):614-623.
Liu X L, Chang X Z. Building a market-oriented innovation ecosystem for core technologies. Studies in Science of Science, 2024, 42(3): 614-623. (in Chinese)
- Moreau W M. Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials. Berlin: Springer Science & Business Media, 2012.
- Raaijmakers R. ASML's Architects: The Story of the Engineers who Shaped the World's Most Powerful Chip Machines. Nijmegen: Techwatch, 2019.
- 牛惠敏,房超.比较视阈下政府—科研机构—企业关系研究.科学学研究,2023,41(10):1833-1843.
Niu H M, Fang C. A comparative study on the relationship between government, scientific research institutions and enterprises. Studies in Science of Science, 2023, 41(10): 1833-1843.

1833-1843. (in Chinese)

14 陈凤, 余江, 甘泉, 等. 国立科研机构如何牵引核心技术攻坚体系: 国际经验与启示. 中国科学院院刊, 2019, 34(8): 920-925.

Chen F, Yu J, Gan Q, et al. How national research institutes pilot system for core technology breakthrough: International experience and implications. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(8): 920-925. (in Chinese)

Deep integration of technological innovation and industrial innovation in modern industrial system: Inspiration from global new generation lithography systems

YU Jiang^{1,2} CHEN Feng^{1,2*} GUO Yue²

(1 School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract Utilizing technological innovation to lead the construction of a modern industrial system is a strategic choice for seizing the opportunities of the new round of technological revolution and industrial transformation. It is also a necessary step for winning the strategic initiative towards high-level self-reliance and self-improvement. Technological innovation is the intrinsic driving force behind industrial innovation, and industrial innovation is the value embodiment of technological innovation. The deep integration of technological innovation and industrial innovation is the key to constructing and improving a modern industrial system. Taking the global extreme ultra-violet (EUV) lithography system as an example, based on the perspective of the innovation chain, this study explores the breakthrough of EUV lithography system from four stages: applied basic research–applied research–pilot scale-up–large scale production. It refines the process of the formation of closely dynamic deep integration of technological innovation and industrial innovation from aspects such as diversified main bodies collaborating to strengthen application-oriented technological innovation supply to enhance the advancement of the technical system, leading enterprises leading to break through the industrial chain resources to promote the integrity of the supply system, and innovative institutional design ensuring the output transformation of achievements to enhance the dynamic nature of the innovation system. This provides theoretical and practical insights for China to seize the commanding heights of global science and technology and build modern industrial systems, as well as develop new quality productivity.

Keywords modern industrial system, science and technology innovation, industrial innovation, deep integration, extreme ultra-violet (EUV) lithography

*Corresponding author

余 江 中国科学院科技战略咨询研究院研究员,中国科学院大学公共政策与管理学院教授、博士生导师。主要研究领域:数字技术与产业化、产业创新管理与竞争战略。E-mail: yujiang@casid.cn

YU Jiang Professor at Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS), Professor at the School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences. His research interests include digital technology and industrialization, industrial innovation management and competitive strategy. E-mail: yujiang@casid.cn

陈 凤 中国科学院大学博士后。主要研究领域:创新管理与政策、数字技术创新。E-mail: chenfeng20@ucas.ac.cn

CHEN Feng Postdoc Research Fellow at the School of Public Policy and Management, University of Chinese Academy of Sciences. Her research interests include innovation management and policy, digital technology innovation.
E-mail: chenfeng20@ucas.ac.cn

■ 责任编辑: 岳凌生