

从极紫外光刻发展看全球范围内的技术合作

曾海峰, 郭磊, 李世光, 钟志坚, 李琛毅, 余江, 李显杰

Global technical cooperation from the perspective of extreme ultraviolet lithography development

引用本文:

曾海峰, 郭磊, 李世光, 钟志坚, 李琛毅, 余江, 李显杰. 从极紫外光刻发展看全球范围内的技术合作[J]. [激光技术](#), 2023, 47(1): 1-12.

您可能感兴趣的其他文章

1. [美国陆军车载战术激光武器发展分析](#)

引用本文: 黄沛, 曹国辉, 张海晶, 等. 美国陆军车载战术激光武器发展分析[J]. [激光技术](#), 2022, 46(6): 817-822.

2. [基于微球透镜远场超分辨率成像方法研究](#)

引用本文: 林巧文, 杨春花, 刘红梅, 等. 基于微球透镜远场超分辨率成像方法研究[J]. [激光技术](#), 2021, 45(6): 686-690.

3. [异种金属氧化物辅助激光刻蚀蓝宝石的研究](#)

引用本文: 杨富理, 袁根福, 李浩. 异种金属氧化物辅助激光刻蚀蓝宝石的研究[J]. [激光技术](#), 2021, 45(6): 756-761.

4. [纳秒和飞秒激光烧蚀单晶硅的超快诊断](#)

引用本文: 田润妮, 王俊波, 邱荣, 等. 纳秒和飞秒激光烧蚀单晶硅的超快诊断[J]. [激光技术](#), 2015, 39(6): 765-768.

5. [基于热效应飞秒激光诱导LiNbO₃表面结构的研究](#)

引用本文: 冯杰, 范宗学, 单常亮, 等. 基于热效应飞秒激光诱导LiNbO₃表面结构的研究[J]. [激光技术](#), 2015, 39(6): 869-872.

文章编号: 1001-3806(2023)01-0001-12

从极紫外光刻发展看全球范围内的技术合作

曾海峰^{1,2,3}, 郭磊^{1,2,3}, 李世光^{1,2,3*}, 钟志坚^{1,2}, 李琛毅^{1,2}, 余江⁴, 李显杰³

(1. 中国科学院微电子研究所 成果转化部, 北京 100029; 2. 中国科学院大学 集成电路学院, 北京 100049; 3. 江苏影速集成电路装备股份有限公司, 徐州 221300; 4. 中国科学院 科技战略咨询研究院, 北京 100190)

摘要: 在针对芯片的“卡脖子”技术中, 极紫外(EUV)光刻是最重要的一环。EUV 光刻技术已经被广泛应用于最先进工艺节点的集成电路芯片制造之中。它的研发交叉融合了光学、机械、电子、控制、软件、材料、数学、物理等多个学科的知识。EUV 光刻的发展反映了世界范围内联合研发的演变过程, 开放和合作是发展过程中的主旋律。回顾了 EUV 光刻的发展历史及所涉及的重大项目和机构, 讨论了全球唯一的 EUV 光刻机制造商——ASML 公司的灵活多变的国际化合作路线, 分析了自 1997 年以来世界各代表性研发机构的研发趋势以及与 EUV 光刻发展的关系, 详叙了各参与机构在世界范围内的合作对 EUV 光刻发展的影响。该研究为研发先进光刻机等类似高端装备提供了一些启示和参考。

关键词: 集成光学; 光刻; 极紫外; 集成电路; 合作; 发展

中图分类号: TN305.7 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.01.001

Global technical cooperation from the perspective of extreme ultraviolet lithography development

ZENG Haifeng^{1,2,3}, GUO Lei^{1,2,3}, LI Shiguang^{1,2,3}, ZHONG Zhijian^{1,2}, LI Chenyi^{1,2}, YU Jiang⁴, LI Xianjie³

(1. Department of Achievement Transformation, Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Integrated Circuits, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Jiangsu Yingsu Integrated Circuit Equipment Co. Ltd., Xuzhou 221300, China; 4. Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Extreme ultraviolet (EUV) lithography is the most important part of the “neck” technology for chips. EUV lithography technology has been widely used in the manufacturing of integrated circuit chips with the most advanced process nodes. Its research and development cross integrates the knowledge of optics, machinery, electronics, control, software, materials, mathematics, physics and other disciplines. The development of EUV lithography reflects the evolution of joint research and development worldwide, and openness and cooperation are the main themes in the development process. The development history of EUV lithography and the major projects and institutions involved were reviewed. The flexible international cooperation route of ASML, the world’s only EUV lithography manufacturer, was discussed. The research and development trends of representative research and development institutions in the world since 1997 and the relationship with the development of EUV lithography were analyzed. The influence of worldwide cooperation among participating institutions on the development of EUV lithography was described in detail. This research provides some enlightenment and reference for the research and development of advanced lithography machines and other similar high-end equipment.

Key words: integrated optics; lithography; extreme ultraviolet; integrated circuit; cooperation; development

引 言

半导体产业是信息时代各行各业快速发展的支撑, 而集成电路(integrated circuit, IC)是半导体产业的基础。自 1947 年第 1 个晶体管诞生^[1], 到 1958 年世界上搭建第 1 块集成电路^[2], 再到 2020 年国际先进半导体制造实现 5 nm 工艺制程量产^[3], 晶体管密度逐渐提高。早在 1965 年, 英特尔公司的创始人之一戈登·

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金资助项目 (BA2021033)

作者简介: 曾海峰(1997-), 男, 硕士研究生, 现主要从事光刻对焦控制与检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lishiguang@tsinghua.org.cn

收稿日期: 2022-01-13; 收到修改稿日期: 2022-06-16

摩尔就提出了著名的摩尔定律^[4]:集成电路上的晶体管数量每隔 18~24 个月增加 1 倍。摩尔定律能够持续,得益于工艺技术的更新,也得益于生产设备的持续升级。经过多年的发展,集成电路行业涉及面愈来愈广,已经形成多国、多科研团队、多公司参与的全球范围的成熟产业链。集成电路制造的难点在于极为精密复杂的制造工艺和制造设备。以最终的芯片为例,其制造流程涉及切片、抛光、涂胶、光刻、显影、刻蚀、切割、封装等一系列步骤,每一步骤都需要专门的设备,因为工序操作复杂,投产一条先进的集成电路生产线对资金和技术都有着极高的要求。

光刻技术是半导体行业的关键核心技术之一,光刻技术的发展与曝光波长的减小息息相关。瑞利判据^[5]告诉人们,晶圆表面清晰成像的两个点的最小距离由工艺因子、曝光波长和投影物镜的数值孔径决定。通过减小曝光波长、工艺因子,或者增大数值孔径可以使最小线宽减小,降低技术节点。减小工艺因子和增大数值孔径方案由于物理限制,几乎已经达到了极限,所以通过减小曝光光源波长在光刻技术发展史中,一直是科研人员探索的方向。光刻机的曝光波长从 435 nm(G 线)、365 nm(I 线)、248 nm(KrF)、193 nm(ArF),一直下降到 13.5 nm 的极紫外(extreme ultraviolet, EUV)光。EUV 光刻在降低技术节点,提高超大规模电路集成度方面具有无可比拟的优势。光刻技术的发展速度是惊人的,其动力不仅源自于人类社会对于高性能芯片的不懈追求,更源自于产业链中诸多团队的紧密合作。EUV 光刻从 1986 年首次报道,到现在大规模使用,仅仅 36 年的时间,它是典型的技术合作的产物,研究它的发展对研发类似高端装备具有重要的启示作用^[6]。本文作者以 EUV 光刻发展为例,阐述这种全球性、广泛的技术合作的发展历程、特点及其必然性。本文中参考文献大多源于国际光学工程学会每年召开的先进光刻会议文集^[7]。该会议是光刻行业规模最大、影响力最广的行业会议,国际知名光刻公司、科研机构每年都会在该会议上介绍他们的最新研究成果和光刻能力。

1 EUV 光刻技术

EUV 光刻通过将曝光波长大幅减小至 13.5 nm 来实现更小节点的光刻,目前最先进的 EUV 光刻分辨率为 13 nm,通过优化工艺可以实现 3 nm 逻辑节点器件和尖端动态随机存取存储器(dynamic random access memory, DRAM)的制造^[8]。它属于一种步进-扫描式

投影曝光技术,其结构如图 1 所示。主要包括光源、照明系统、掩模台(承载掩模板)、投影系统、工件台(承载硅片)和测量系统,其中,光源还包括一个巨大的 EUV 光发生装置,它不与光刻机放在同一个房间。本系统为双工件台系统,一个工件台进行曝光,另一个测量硅片表面 3 维位置,工件台可以在曝光位和测量位之间交换。EUV 光确切来说是一种等离子体辐射,它的产生方式主要有两种:激光产生(laser-produced-plasma, LPP)和放电产生(discharge-produced-plasma, DPP)。ASML 公司的 EUV 光刻机采用 LPP 技术,即高功率 CO₂ 脉冲激光轰击一系列锡的液滴/锡靶,产生等离子体,发射 EUV 光。EUV 光不是激光,它类似汞灯,向四周辐射。EUV 光产生后,集光镜将其汇聚到一个中间焦点。从中间焦点发出的 EUV 光经过照明系统整形,投射到掩模板上。掩模板上的图形经过投影系统成像到硅片上的光刻胶上,光刻胶在光照作用下产生光化学反应,经过显影,曝光区域被保留(负胶)或被清除(正胶),进一步经过刻蚀,在硅片上形成需要的图形结构。

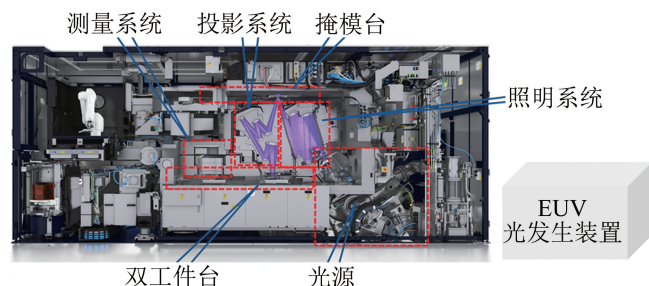


图 1 EUV 光刻机示意图^[8]

Fig. 1 Schematic diagram of EUV lithography machine^[8]

尽管 EUV 光刻过程与深紫外(deep ultraviolet, DUV)光刻过程类似,但由于 EUV 光与 DUV 光有很大差别,且曝光线条明显缩小,因此出现极多全新的挑战。例如:(1) EUV 光会被材料强烈吸收,因此 EUV 光路必须处于真空环境,光学元件需要全部采用反射元件,掩模也为反射式结构,这些改变带来的是 EUV 光刻和掩模制造领域的巨大革新;(2) 高功率、高稳定性 EUV 光源的研制;(3) 几乎零像差的曝光系统的制造与装配技术,包括极高的反射镜加工和镀膜技术、无缺陷掩模板制备技术;(4) EUV 光为高能粒子束,需要在真空环境下有效控制 EUV 光与真空中残余分子作用产生的颗粒、碎屑等污染,减小这些污染对镜片、掩模板、光刻胶等的清洁度影响,保持光能利用率,控制曝光缺陷;(5) 在保证曝光质量和进行污染控制前提下的大气、低、高真空环境切换技术;(6) 各种材料的

放气控制技术、真空环境下的热控制技术等。评价光刻性能有 4 项关键指标:关键尺寸及关键尺寸均匀性、套刻精度、聚焦精度和产能。这 4 项指标不是由光刻机内单一的某个子系统或部件承担,而是子系统、零部件、光刻工艺相互配合、共同作用的综合结果。例如,关键尺寸及关键尺寸均匀性的影响因素包括且不只限于:光源功率、带宽和偏振态、照明的空间光谱分布和照明均匀性、掩模板的干涉衍射效应、投影系统像差、工件台动态特性、光刻胶、光刻工艺等。为了制造纳米线条,必须对所有影响因素进行综合平衡,逐项控制。其它 3 项指标与此类似。在控制这些苛刻指标的同时还要兼顾 EUV 真空环境、EUV 的高能粒子性和低的光能利用率等 EUV 光刻特有的问题。这种光刻机内外对光刻性能影响的错综复杂性与同样具有高技术含量的航天工程有很大区别,以搭载成像光谱仪的卫星为例,运载卫星主要由火箭承担,对地观测主要由空间相机承担,运载能力和观测能力之间几乎没有交叉,可以由各自的研发团队独立完成。

2 EUV 光刻的发展历程

EUV 光刻技术的研发始于 20 世纪 80 年代。1986 年,日本电信电话公司(Nippon Telecom and Telephone Co., NTT)首先报道 EUV(当时叫 X 射线)光刻曝光成

果,如图 2 所示^[9]。图中曝光波长为 11 nm,同步辐射(synchrotron radiation, SR)源照明,8 倍投影物镜,扫描式曝光。1987 年,前苏联的列别捷夫物理研究所^[10]和 1988 年美国 AT&T 的 Bell 实验室分别独立报道了其研究成果^[11]。在当时,这 3 家科研机构均为各自领域的先驱,表明 EUV 光刻从初始阶段就在全球范围内开展研究,且研究内容具有极强的前瞻性和探索性。

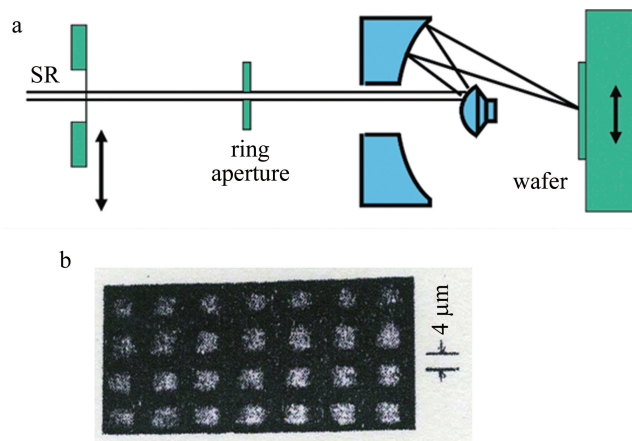


图 2 a—世界第 1 台 X 射线曝光装置原理示意图^[9] b—曝光图形^[9]

Fig. 2 a—schematic diagram of world's first X-ray exposure^[9] b—exposure pattern^[9]

从此以后,世界各国的科学家在各种项目的资助下开展了一系列研究,部分项目如图 3 所示。红色菱

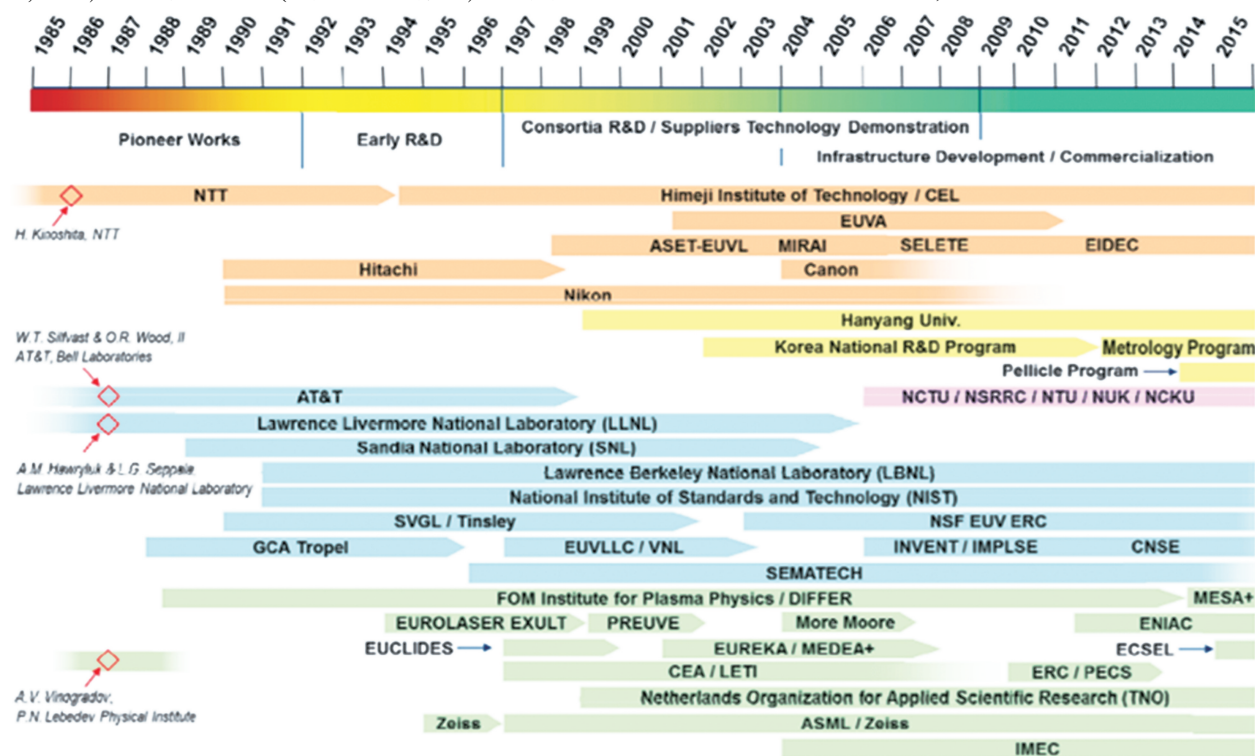


图 3 世界 EUV 光刻项目一览^[12]

Fig. 3 Overview of EUV lithography projects in the world^[12]

形框为最早发表研究成果的机构和完成人^[12]。从图中可知,在 1986 年~2016 年的 30 年里,EUV 光刻经历了初步探索、早期研发、联合研发/供应商技术构建到商业化 4 个过程。诸多世界顶尖机构为此做出了贡献,例如日本 NTT,Hitachi,Nikon,美国 AT&T,三大国家实验室——劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory,LLNL)、桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories,SNL)、劳伦斯·伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory,LBNL),欧洲的 Zeiss 和 ASML 等。这些顶尖机构的参与进一步表明 EUV 光刻技术的难度以及合作进行科学探索的意义。EUV 光刻技术难度之高,已远远超出独立机构所能解决的范围,因此大量联合研发项目或机构此起彼伏,例如日本的 EUVA,ASET,SELETE,美国的 EUV 有限责任公司,SEMATECH,欧洲的 EUCLIDES,MEDEA+等。

在 EUV 光刻发展过程中,比较有影响的事件如图 4 所示。图中,红色字体为美国独立或主导的研究,黄色字体为 ASML 公司独立或主导的研究,绿色字体为 ASML 与美国合作的研究,蓝色虚框为 ASML 的收购或融资行动。

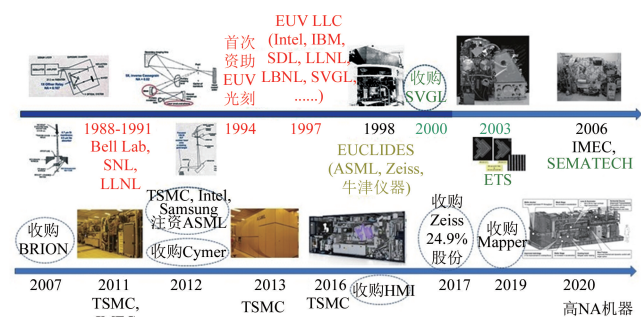


图 4 ASML 公司的光刻发展历程及与美国 EUV 光刻技术之间的联系
Fig. 4 ASML's EUV lithography development and its relationship with the development in the United States

1986 年,NTT 的木下先生搭建了世界上首台 EUV 光刻实验装置并实现扫描曝光,他于 1995 年进入姬路工业大学,1996 年,联合东芝和尼康开发除光源采用同步辐射源外、其它均接近现代 EUV 光刻机的实验系统,并于 1999 年发表了阶段性成果^[13]。在日本研发 EUV 光刻的同时,美国 Bell 实验室也开展相关技术研究,并于 1988 年首次报道其研究成果;1990 年,其实实验装置移往 SNL 继续进行研究;1994 年,美国政府首次资助一个大型 EUV 光刻项目,该项目即包括上述 SNL,同时包括美国能源部(Department of Energy, DOE)另外两大国家实验室 LBNL 和 LLNL。

1997 年,Intel、IBM 等先进 IC 客户联合上述三大国家实验室及其它设备、材料等研发机构成立 EUV 有限责任公司(EUV Limited Liability Company, EUV LLC),开展综合的上下游、产学研结合的 EUV 光刻技术研究^[14],并于 2003 年建成现代光刻机原型——工程测试台(engineering test stand, ETS)系统^[15]。该组织成员有些不是美国本土机构,在满足美国政府一系列苛刻要求的前提下,荷兰的 ASML 公司后期加入该组织,分享了该组织的研究成果。2003 年,该组织解散,美国方面研究重心转移至半导体制造技术(Semiconductor Manufacturing Technology, SEMATECH)产业联盟,于阿尔巴尼纳米研究中心和 LBNL 内进行。受 EUV LLC 影响,欧洲成立了 EUCLIDES,日本成立 ASET,研究在日美欧三强鼎立的局面中开展。

1998 年,ASML 与 Zeiss、牛津仪器等公司合作进行 EUV 光刻关键技术研究^[16],期望最终得到 Beta 样机和商用机。ASML 在充分利用欧洲和美国研发成果的基础上,于 2006 年推出商用测试机 Alpha Demo Tool (ADT),分别安装在比利时微电子研究所(Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC)和美国的 Albany Nanotech^[17],用于推动 EUV 实用技术的进展。在这两家科研机构的协助下,ASML 迅速进行技术迭代,并于 2011 年在 IMEC 和中国台湾的台积电(Taiwanese Semiconductor Manufacturing Company, TSMC)安装预量产机型 NXE:3100,用于产品验证和工艺开发^[18]。2012 年,台积电、Intel、三星 3 家集成电路制造巨头投资 ASML 进行联合研发,3 家同时获得 EUV 光刻机的优先获取权^[19]。2013 和 2016 年,ASML 先后向台积电发货第 3 代和第 4 代机型 NXE:3300B^[20] 和 3350B^[21],逐渐受到业界的认可。

ASML 后来在该领域发展顺利,其路线图如图 5 所示。ASML 公司于 2020 年推出的 NXE:3400C 配备了数值孔径(numerical aperture, NA)为 0.33 的投影光学系统,能够提供每小时不小于 170 片晶圆的生产效率。目前,ASML 仍在致力于研制下一代高 NA 光刻系统。

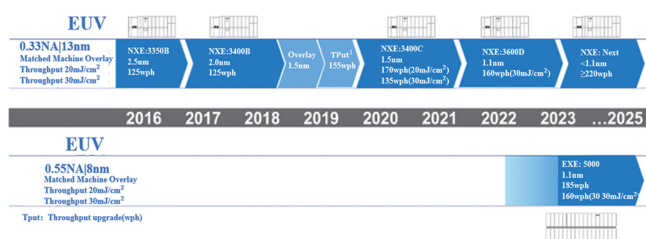


图 5 ASML 公司近年的 EUV 光刻发展路线图^[22]
Fig. 5 ASML's EUV lithography development roadmap in recent years^[22]

作为全球唯一的 EUV 光刻机制造商,ASML 的研发过程对我国研发 EUV 光刻机或类似的高端装备具有重要参考价值。如图 5 所示,ASML 从 EUV 光刻研究之初就走全球合作的发展路线,合作形式灵活,包括联合研发、并购、控股、注资等。从 2000 年至今,ASML 共进行了 6 次收购:(1)2000~2002 年,收购美国的光刻机制造商 SVGL,大幅提高市场份额并有效利用美国的研发力量;(2)2007 年,收购美国计算光刻软件公司 Brion,计算光刻是一种有效的提升光刻性能的方式,通过软件模拟光刻过程,节省大量的工艺验证成本,且有助于找到光刻问题的根源;(3)2012~2013 年,收购美国 EUV 光源制造商 Cymer,解决 EUV 光刻的产能问题;(4)2016 年,收购汉民微测 (Hermes Microvision Inc,HMI),解决纳米级别缺陷检测问题;(5)2017 年,收购 Zeiss 24.9% 的股份,从而使自己与关键部件制造商结成更紧密的同盟;(6)2019 年,收购电子束光刻厂家 Mapper,意在攻克 EUV 光刻其它的技术难点。通过这些收购,ASML 快速获取了自己需要的技术和市场。

在欧美紧锣密鼓地进行 EUV 光刻研发的同时,日本也在同步进行研究,如图 6 所示。图中,蓝色字体为合作国家,红色字体为日本国的联合研发组织。继 ASET 之后,2005 年,半导体尖端技术 (Semiconductor Leading Edge Technologies, SELETE) 组织正式成立。SELETE 组织以东芝、NEC 电子、瑞萨和富士通 4 家公司为中心,带领其他厂商共同从事研发。为了开发光源技术及曝光装置技术,2001 年成立了 EUVA 组织。同年成立的以大阪大学为中心的 Leading Project,与 EUVA 密切配合进行研究。在 SELETE 之后,日本方

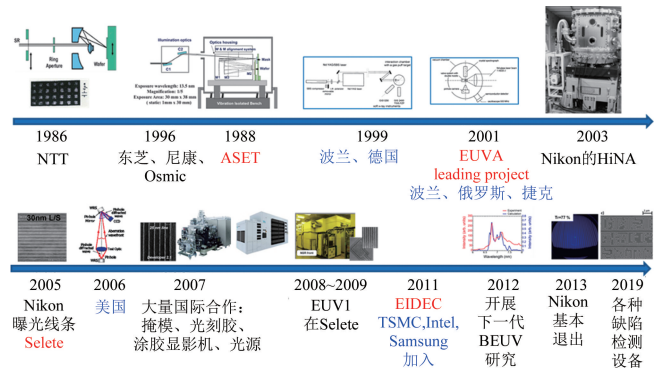


图 6 日本的 EUV 光刻发展历程

Fig. 6 Development of EUV lithography in Japan

面又成立了 EIDEC 机构继续进行掩模和光刻胶的研究。总体来看,日本的研究相对独立,且一开始就是全产业链研究。2007 年以前,仅与波兰、德国、俄罗斯、捷克和美国开展过少量基础研究,2007 年以后,主要以掩模、光刻胶、涂胶显影机、EUV 光源等供应商的形式与其他国家开展合作。2007 年恰恰是 ASML 公司最初两台 ADT 安装到客户端进行验证的第二年,此时国际上需要日本的先进 EUV 技术来打通整个 EUV 光刻工艺线。到目前为止,日本仍在这些领域保持领先地位。也就是从 2007 年左右开始,EUV 光刻进入到不分国界、强强联合的全球合作阶段。Nikon 在 2003 年研制了小型曝光装置 HiNA,2005 年报道了其曝光线条,2008~2009 年,安装了一台曝光装置,但于 2013 年基本退出 EUV 光刻市场。日本于 2012 年左右率先转向下一代 EUV 光刻的研究,并较早地在掩模等缺陷检测方面开展研发,其研究成果获得国际认可。以上研发项目/组织的简介见表 1。

表 1 EUV 光刻主要项目/组织简介

Table 1 Brief introduction of EUV lithography main projects/organizations

项目/组织名称	主要成员	研究目标及方向
EUV LLC	Intel 和美国能源部牵头成立了 EUV LLC,包括 AMD, Motorola, Micron, Infineon 和 IBM 等公司和三大国家实验室 (LBNL, LLNL 和 SNL) ^[14]	致力于 EUVL 生产设备和工艺技术的研发开发; 持续时间:1997 年~2003 年
SEMATECH	核心成员包括台积电、格罗方德、惠普、IBM、Intel、联电以及纽约州立大学奥尔巴尼分校的纳米科学与工程学院 (CNSE) ^[23-24]	其宗旨是加速美国半导体产业的技术创新向制造方案的商业化转化; 创建时间:1987 年
EUCLIDES (Extreme UV Concept Lithography Development System)	由 ASML 领衔,成员还包括卡尔蔡司、牛津仪器、飞利浦、TNO-TPD、FOM/PTB 和 FhG-IWS ^[25]	评估 EUVL 作为分辨率为 70 nm 及以下的可行光刻解决方案; 创建时间:1998 年
MEDEA + (Microelectronics Development for European Applications+)	参加 MEDEA+计划的企业有阿尔卡特公司、伯施公司、布尔公司、飞利浦、ST 微电子公司、ASML、蔡司、爱立信、诺基亚及汤姆逊多媒体公司 ^[26]	MEDEA+计划最重要的目标是加速技术的开发,在这方面主要是确定芯片尺寸的进一步小型化。MEDEA+计划侧重一些对全球竞争有战略意义的关键技术:如系统芯片设计方法和软件工具、芯片基础技术(例如光刻)以及对欧洲半导体工业具有战略重要性的专用组件的芯片技术; 持续时间:2001 年~2008 年

续表

项目/组织名称	主要成员	研究目标及方向
More Moore	15 家公司: ASML, Phystex, Zeiss, AMTC, Philips EUV, XTREME Technologies, FOCUS, SIGMA-C, AZ Electronic Materials, Schott Lithotec, Philips, XE-NOCS, Sagem Défense Sécurité Imagine Optic, EPPRA and Media Lario. Academic; 10 个研究所: IMEC, CEA Leti, CNRS, TNO, FOM Rijnhuizen, Fraunhofer Institute, ISAN and IPM RAS (Russian Institutes of Science), ENEA, ELETTRA, NCSR; 4 所大学: Bielefeld, Mainz, Delft 和 Birmingham ^[27]	旨在促进欧洲极紫外光刻 (EUVL) 的发展; 持续时间: 2003 年~2006 年
EXEPT	项目领导者: Gerold Alberga, ASML; 项目参与者: Adixen Vacuum Products AMTC, ASML, Bruker Advanced Supercon GmbH, Carl Zeiss SMT GmbH, Dynamic Micro Systems, Semiconductor Equipment GmbH, FOM institute DIFFER, Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology (IISB), IMEC-Interuniversitair Micro-Electronica Centrum VZW, IMS Chips, Media Lario Technologies, SAGEM Défense Sécurité, SUSS MicroTec Photomask, Equipment GmbH & Co. KG, Xenocs, XTREME Technologies GmbH ^[28]	探索将光刻工艺扩展到 22 nm、16 nm 甚至 11 nm 节点的可能性; 持续时间: 2009 年~2012 年
ASET (Association for Super-Advanced Electronics Technologies)	姬路工业大学高度产业科学技术研究所, 东北大学科学计测研究所, 大阪大学产业科学研究所, Hoya, NTT, Nikon, Canon 等 ^[29]	专注于掩模和抗蚀剂技术的开发, 主要方向是开发面向 21 世纪的 16 GB-Dram 所需的集成电路技术; 持续时间: 1996 年~2001 年
EUVA (Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association)	5 家装备公司: Ushio, Canon, Nikon, Komatsu, Gigaphoton; 4 家半导体器件制造商: Toshiba, NEC, Fujitsu, 和 Renesas Technology ^[30]	对 EUV 光源和光刻工具进行广泛的研究; 持续时间: 2001 年~2011 年
SELETE	以东芝、日本电气、瑞萨和富士通 4 家公司为核心 ^[31]	专注于掩模和抗蚀剂技术的开发, 以研究和开发 45 nm 和 32 nm 节点的实用制造工艺为主; 创建时间: 2006 年
EIDEC (Evolvingnanoprocess Infrastructure Development Center)	由东芝领军, 由 11 间日本企业共同出资设立, EIDEC 已经和 ASML 等不少半导体大厂合作, 包括英特尔和三星, 台积电和瑞萨电子于 2011 年加入; 除了半导体厂外, 日本国内也有不少感光材料厂和掩模厂加入 EIDECm, 其中 JSR、信越化学工业、东京应化工业 3 家感光树脂大厂的合计市场占有率就高达 7 成, 大日本印刷及凸版印刷等各掩模厂的合计市场占有率也足足达到 5 成 ^[32]	致力于研究深紫外线微影技术; 持续时间: 2011 年~2019 年

纵观整个 EUV 光刻发展史可以看出, 它是一部世界范围内的联合研发演变史。在这个发展过程中, 研发项目此起彼伏, 成员不断演变, 研究目标不尽相同, 最终形成以 ASML 为核心的比较稳定的研发群体。ASML 集欧洲和美国研发成果于一身, 在 ETS 建成 3 年后, 推出 EUV 测试样机, 与欧美日科研机构进行深度合作, 将测试样机和预量产机型实用化。日本在掩模和光刻胶方面进行了长期持续的研究, 这直接促使日本在这两方面优势明显。

国内对于 EUV 光刻技术的研究起步稍晚, 哈尔滨工业大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所于 20 世纪 90 年代起, 开展了 EUV 光源、成像技术研究^[33], 并于 2002 年研制了国内第 1 套 EUV 光刻原理装置^[34]。2008 年, 国家“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”科技重大专项将 EUV 光刻技术列为“32 nm~22 nm 装备技术前瞻性研究”重要攻关任务^[35]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所作为牵头单位承担起了“极紫外光刻关键技术研究”

项目工作, 其他成员包括中国科学院光电技术研究所、中国科学院上海光学精密机械研究所、中国科学院微电子研究所、北京理工大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学等。可见, 无论国内外, EUV 光刻发展都伴随着科研团队和产业机构的紧密合作。

3 开放与合作

在 EUV 光刻发展过程中, 科研团队和产业机构的紧密合作具有其内在必然性。这是因为 EUV 光刻机是集成电路产线上的一台曝光工具, 它具有以下特征: (1) 它是一台集诸多尖端创新技术于一身的精密仪器; (2) 机器内子系统、零部件之间, 机器与产线上其它工艺步骤之间具有强烈耦合关系, 整机性能是子系统、零部件、光刻工艺相互配合、共同作用的综合结果。这决定了 EUV 光刻技术的研发具有以下两个显著特点: (1) 任何单独的光刻机厂家都极难掌握全部尖端技术, 必须与外界进行紧密合作; (2) 光刻机厂家必须与产线、零部件供应商之间进行深度的信息沟通, 并对

影响整机性能的关键部分进行及时调适,保证整机的最终性能。

这些内在联系的必然性决定了 EUV 光刻发展的主旋律是开放与合作,从图 3 和表 1 可见一斑。图 3 和表 1 从表层体现了项目成员间的合作关系,但无法体现这种合作属于深度的有机融合还是简单的机构拼凑。公开资料中,学术论文是深层次合作关系的直接参考。一篇论文由不同机构的不同作者共同完成,那么可以认为该论文包含的信息在这些作者间进行了深度沟通,甚至可能共同取得,代表一种深层次的合作关系。下面通过统计 1997 年~2019 年论文发表的情况,深度分析各机构间的发展和合作状态。

3.1 发表论文的代表性机构

表 2 中统计了在 Advanced Lithography 会议上发表论文的各组织机构,包括光刻机制造商 ASML、Nikon、ASML 的合作科研机构 IMEC、美国能源部三大实验室,以及三大芯片制造商 Intel、三星、台积电。可以通过分析这些机构在 Advanced Lithography 上的论文发表情况及合作论文比例,借此考察合作交流与融合的程度。

3.2 代表性机构的发文趋势

7 家机构历年的论文数量如图 7 所示。除了 Advanced Lithography 会议外,还有大量论文发表在其它论坛或期刊,同时有些机构不愿意发表创新成果,因此

表 2 与 ASML 共同在 Advanced Lithography 会议上发表论文的机构
Table 2 Institutions that co-publish papers at the Advanced Lithography conference with ASML

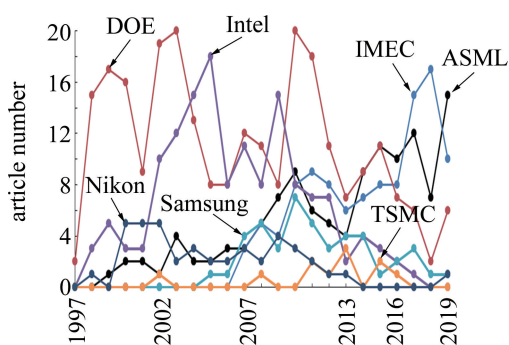
国家	序号	机构名称	领域
美国	1	Global Foundries	代工厂
	2	IBM	芯片制造商
	3	AMD	芯片制造商
	4	Micron Technology	芯片制造商
	5	Intel	芯片制造商
	6	Inpria	光刻胶
	7	Cymer	EUV 光刻机光源供应商
	8	Rohm & Haas	光刻胶
	9	LBNL	美国能源部三大国家实验室之一,拥有 12 名诺贝尔奖获得者,EUV LLC 成员
	10	SNL	美国能源部三大国家实验室之一,研发 LPP 光源,EUV LLC 成员
	11	LLNL	美国能源部三大国家实验室之一,最早研究 EUV 光刻的机构,EUV LLC 成员
	12	University at Albany, State University of New York	ASML 的 ADT 安装地
	13	SEMATECH	战略联盟,其宗旨是加速美国半导体产业的技术创新向制造方案的商业化转化
	14	Shipley Company LLC	光刻胶
	15	Mentor	电子设计自动化软件等电子设计自动化工具
	16	National Institute of Standards and Technology	计量标准、测量
	17	Lam Research	半导体设备
	18	Rigaku Innovative Technologies	光学镀膜
	19	Zygo Corporation	光学测量
	20	Synopsys	光刻仿真软件
	21	AGC Electronics America	光学材料,掩模基板
	22	University of California, University of Wisconsin System, MIT, University of Arizona, New Jersey City University, University of Texas System, Rochester Institute of Technology, Stanford University, Cornell University	探索性研究
	23	Integris Inc	掩模辅助工具
	24	Nanometrics Inc	晶圆检测
	25	HermesMicrovision	晶圆检测
	26	KLA-Tencor	晶圆检测

续表

国家	序号	机构名称	领域
德国	1	Carl Zeiss AG	光学系统
	2	Advanced Mask Technology Center	掩模
	3	Fraunhofer-Gesellschaft	微电子器件
	4	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	计量与测试
	5	GermanyoptiX Fab	EUV 产品初创公司,2012 年成立,商品化 IOF 的
	6	XTREME Technologies GmbH	光源
	7	Forschungszentrum Dresden	光源
	8	BLV Licht-und Vakuumtechnik GmbH	光源
日本	1	TOSHIBA	微电子产品
	2	Tokyo Electron Limited	涂胶、显影设备
	3	Osaka University	大学
	4	JSR Corporation	光刻胶
	5	JSR MICRO	光刻胶
	6	Toppan	掩模
	7	Hoya Corporation	掩模
	8	EUVL Infrastructure Development Center	专注于 EUV 光刻的合作研发组织,东芝领军
荷兰	1	The Netherlands Organization for Applied Scientific Research	国家科研机构
	2	Philips	ASML 母公司
	3	The Dutch Institute for Fundamental Energy Research	同步辐射源
	4	University of Twente	大学
	5	Leiden University	大学
	6	Technische Universiteit Delft	大学
	7	Eindhoven University of Technology	大学
	8	ASML	EUV 光刻机供应商
瑞士	1	Paul Scherrer Institute	光源
	2	Swiss Federal Institute of Technology in Zurich	大学
	3	EULITHA AG	光刻设备及零件
	4	STMicroelectronics	芯片商
比利时	1	IMEC	比利时微电子研究所,ASML 的测试机安装场所
	2	Catholic University of Leuven	大学
	3	ASM International	半导体材料
法国	1	Sagemcom	电子产品
	2	FranceXenocs	分析测试仪器
韩国	1	SKhynix	芯片商
	2	Samsung	芯片商
中国	1	Shanghai IC R&D Center	科研机构
	2	ChangXin Memory Technologies, Inc.	代工厂
新加坡	1	Chartered Semiconductor	代工厂
	2	National University of Singapore	大学
巴基斯坦	1	University of Agriculture, Faisalabad	大学
	2	The University of Sindh	大学
波兰	1	Military University of Technology in Warsaw	光源
俄罗斯	1	Institute of Laser Physics(ILP)	光源

续表

国家	序号	机构名称	领域
英国	1	Oxford Instruments	20 世纪 90 年代与 ASML 公司合作 EUV 光刻项目
捷克	1	Czech Technical University in Prague	光源
爱尔兰	1	University College Dublin	光源

图 7 ASML, IMEC, DOE, Nikon, Intel, Samsung 及 TSMC 发文趋势^[7]Fig. 7 ASML, IMEC, DOE, Nikon, Intel, Samsung, TSMC articles trends^[7]

这种统计并不完全,但仍能看出一定的趋势。

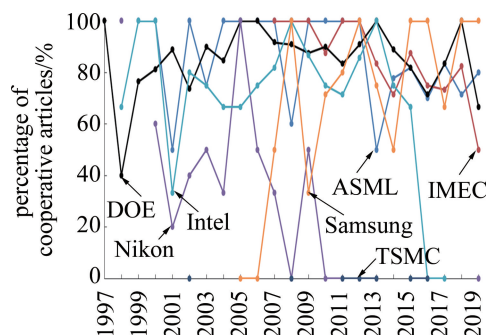
由图 7 可见,ASML 论文逐年稳步上升,2006 年,随着 ASML 的 ADT 安装在 IMEC,IMEC 的论文数从零稳步上升,这表明 ADT 的安装使用对两者的科学研究均起到了促进作用。Nikon 在 2007 年及以前与 ASML 文章数目相当,甚至在 2002 年以前还处于优势,但在 2007 年以后,Nikon 发文数量与 ASML 差距逐步加大。2002 年和 2007 年这两个时间点分别是 EUV LLC 的 ETS 的完成时间及 ASML 的 ADT 送到两家科研机构的时间,这间接可以说明,ASML 凭借美国的 EUV LLC 逐渐赶上 Nikon,并在 5 年时间内将 Nikon 甩在身后。2012 年,3 家 IC 巨头注资 ASML 联合研发后,Nikon 文章数量锐减,表明 Nikon 已经放弃了这方面的研发。作为世界上最早发表 EUV 光刻研究成果的研究单位之一,DOE 的文章数长期处于第 1 位,但在 2014~2016 年,其与 ASML 和 IMEC 的位置发生了变化,此时正是 NXE3300B 和 3350B 安装的时间,这说明当 ASML 的 EUV 光刻机逐渐受到客户认可后,DOE 的研究兴趣发生了转移。DOE 的三大国家实验室长期以来致力于前沿科学探索,仅 LBNL 就有 12 名诺贝尔奖获得者,因此这种兴趣转移符合这些实验室一直以来的工作重点。

由图 7 可见,3 家芯片制造公司中,Intel 的文章数量最多,台积电最少,总体上三者均在 2013 年后发文锐减,尤其是 Intel,此时对应三者投资 ASML 的时间,这或许说明三者对 EUV 光刻研究兴趣在投资后发生了转移,主要的研究任务落在了 ASML 身上。从上述

分析可知,各机构发表的文章数在几个时间点发生了转变,这些时间点与 EUV 光刻发展的重要里程碑吻合:2002 年,EUV LLC (包括 ASML) 完成 ETS 系统;2006 年,ASML 将 ADT 运送至两家科研机构进行工艺验证;2012 年,Intel 等三大芯片巨头投资 ASML;2014~2016 年,ASML 向台积电运送第 3 代和第 4 代光刻机型;2016 年后,ASML 和 IMEC 继续联合研发,推进 EUV 光刻机的实用化。

3.3 代表性机构的合作关系

图 8 为合作论文比例。合作比例的计算方式是:本机构作者参与的文章数/有多个机构作者的总文章数。该统计的参考意义在于:如果存在合作论文,说明这些机构间必然进行了知识的深度交流与融合,实际的交流与合作只会比本文中提到的更加广泛。在 7 家机构中,ASML,IMEC,DOE,Intel 和三星的合作文章比例年度最少为 30% 以上,且随时间没有规律性变化,这说明在进行 EUV 光刻研究中,不同国别、不同机构的科研工作者在一个开放的科研环境中开展了大量的合作和交流。Nikon 发表的合作文章较少,可能与它基本是独自进行光刻机研发有关。台积电发表文章最少,且均为单独发表,这不能说明它与其他机构没有合作,而可能是它的兴趣不在于发表自己的研究成果。更有趣的是,台积电、Nikon、三星均为东亚地区的机构,他们的合作占比倒数第 1~第 3 名,其他机构均为欧美国家,这可能与文化差异有关。

图 8 ASML, IMEC, DOE, Nikon, Intel, 三星和台积电的合作发文比例^[7]Fig. 8 Percentage of cooperative articles of ASML, IMEC, DOE, Nikon, Intel, Samsung and TSMC^[7]

ASML 和 IMEC 是重要的战略合作伙伴,从图 7 中发表文章趋势来看,似乎两者存在绑定关系。为了确

认这一点,对这两家的文章进行了分析统计,如表 3 所示。1997~2019 年,ASML 共发表 120 篇文章,合作发表 100 篇,占论文总数的 83%,合作的国家有 11 个,共 57 家机构。IMEC 共发表 108 篇文章,合作发表 89 篇,占论文总数的 82%,合作的国家有 9 个,共 57 家机构。两者各方面数据非常相似,但考察同时包括 ASML 和 IMEC 的文章,共有 24 篇,仅占两者论文总数的 20%左右。这说明尽管两者为战略合作伙伴,但双方均存在很大的自由空间,与其他合作者进行了充分的信息交流与技术融合。在单一国家和机构方面,与 ASML 合作最多的前 3 个国家为美国、德国和比利时,分别为 36 篇、36 篇和 24 篇。其中,德国和比利时的合作文章绝大部分由 Zeiss 和 IMEC 贡献,分别为 31 篇和 24 篇,而美国则是由 22 家机构瓜分,其中合作文章最多的为格罗方德,共 12 篇,其余为 IBM、AMD、美光科技等机构。Zeiss 为 ASML 提供核心曝光镜头,IMEC 和格罗方德则为光刻机进行工艺验证,因此他

们的合作论文较多具有合理性。与 IMEC 合作最多的前 3 个国家为美国、日本和荷兰,分别为 42 篇、29 篇和 26 篇。其中,荷兰和日本的合作文章绝大部分由 ASML 和东京电子贡献,分别为 24 篇和 17 篇,而美国则是由 23 家机构瓜分,其中合作文章最多的是格罗方德,共 12 篇,其余为 Intel、IBM、美光科技等机构。东京电子是世界著名的涂胶/显影设备供应商,它与 IMEC 密切合作,促进光刻工艺的成熟。可见,无论 ASML 和 IMEC,在单一国家的合作广泛性方面,美国占据明显的整体优势,格罗方德、纽约州立大学奥尔巴尼分校、美光科技、美国国家标准与技术研究院等均与这两家开展了合作研究,其中格罗方德的合作更加深入和广泛。从表 1 中还可以找到与 ASML 在 Advanced Lithography 上合作发表过论文的机构,他们在光刻胶、分辨率增强技术(光学近邻效应、光瞳滤波)、光源、污染控制、光学镀膜、流片研究、工艺验证、性能提升(CDU、位置对准)、光刻仿真和光刻机与掩模优化等

表 3 ASML 及 IMEC 论文发表统计(1997~2019 年)^[7]

Table 3 ASML and IMEC publication statistics (1997~2019)^[7]

	发表文章 总数	合作论文 总数	合作论文 占比/%	合作 国家数	合作 机构数	同时包括 ASML 和 IMEC 的文章占比	共同的 合作国家
ASML	120	100	83	11	57	24/120	美国、日本、荷兰、德国、 比利时、瑞士、韩国、英国
IMEC	108	89	82	9	57	24/108	

方面进行着大量合作。

4 结束语

从 1986 年发表第 1 份 EUV 光刻研究成果以来,EUV 光刻发展了 36 年,经历了初步探索、早期研发、联合研发/供应商技术构建到商业化 4 个阶段。EUV 光刻从初始阶段就在全球范围内开展研究,且研究内容具有极强的探索性,诸多世界顶尖机构如 Intel、Bell 实验室、NTT、DOE 国家实验室、Zeiss 等为此做出了重要贡献。EUV 光刻技术难度之高、牵涉范围之广,已远远超出独立机构所能解决的范围,因此大量联合研发项目或机构此起彼伏,比较著名的有 EUV LLC、SE-MATECH、EUCLIDES、ASET 等。这种科研团队和产业机构的紧密合作是由 EUV 光刻各部分之间的内在联系决定的。EUV 光刻机是集成电路产线上的一台曝光工具,它具有以下特征:(1)它是一台集诸多尖端创新技术于一身的精密仪器;(2)机器内子系统、零部件之间,机器与产线上其它工艺步骤之间具有强烈耦合关系。光刻性能是光刻机内子系统、零部件和光刻工艺相互配合、共同作用的综合结果。ASML 从 EUV 光

刻研发之初就走国际合作路线,与 EUV LLC、Zeiss、IMEC、台积电等世界著名机构紧密合作,且进行 6 次并购,最终成为世界上唯一能够生产 EUV 光刻机的厂家。日本借助本土产业链齐全的优势,初期主要进行本土联合研发,后期逐渐过渡到国际合作,日本在掩模、涂胶显影、光刻胶和缺陷检测方面进行了长时间的持续研究,因此日本在这些方面占有优势。

科技论文是研究成果的体现,合作论文体现了合作者之间深层次的技术交流与融合。本文作者以 EUV 光刻中的代表性机构 ASML、DOE、IMEC、Nikon、Intel、三星和台积电为对象,分析了他们的论文发表情况。

科技论文的文章数走向可以作为 EUV 光刻发展的重要趋势指标。2002 年前,Nikon 的文章数比 ASML 多,此时 Nikon 的技术实力优于 ASML;2003 年,EUV LLC(包括 ASML)完成 ETS 系统,ASML 的技术能力开始与 Nikon 抗衡,文章数开始与 Nikon 持平,这种趋势一直保持到 2007 年;2006 年,ASML 将 ADT 运送至 IMEC 和 Albany Nanotech 进行工艺验证,此后 Nikon 的文章数逐年减少,ASML 的文章数逐年上升,这时

Nikon 的 EUV 光刻水平开始弱于 ASML;2012 年,Intel 等三大芯片巨头投资 ASML,Nikon 几乎放弃 EUV 光刻机,文章数锐减。

2013 年前,DOE 文章数长期位于第 1 名,这与它当时在 EUV 光刻方面的先驱地位吻合;直到 2013~2016 年,ASML 向台积电运送第 3 代和第 4 代光刻机型,DOE 的文章数开始与 ASML 的文章数相当,表明此时两者的科学研究能力相当;2016 年后,EUV 光刻机逐渐受到认可,ASML 的文章数开始超越 DOE,DOE 的文章数逐渐减少,此时产品已逐渐商用化,科学研究价值逐渐减弱,因此 DOE 的研究兴趣也逐渐转移;2016 年后,ASML 和 IMEC 继续联合研发,推进 EUV 光刻机的实用化,此时两家机构的文章数逐年上升,且具有正相关性,表明此时两者已超越其他科研机构,成为 EUV 光刻研究的主要推动者。

1997~2019 年,ASML 在 Advanced Lithography 会议上共发表 EUV 光刻方面的论文 120 篇,合作论文多达 100 篇,占比 83%,与 11 个国家、共 53 家机构发表过合作论文。与 ASML 合作最多的前 3 个国家为美国、德国和比利时。其中,德国和比利时的合作文章绝大部分由 Zeiss 和 IMEC 贡献,而美国则是由 22 家机构瓜分,这代表美国在 EUV 光刻相关方面的整体实力。IMEC、DOE 和 Intel 情况类似。对于 3 个亚洲国家和地区的研发机构,三星合作论文最多,Nikon 第二,台积电几乎不发表文章,但总体上,这 3 家机构在该会议上发表的文章均比欧美国家少,这可能与语言文化差异、对该会议的认可度和交通方便性等有关。研究也表明,尽管 ASML 和 IMEC 为紧密合作的伙伴,但两者并未相互绑定,共同文章仅占各自文章的 20% 左右。

特别感谢余江研究员的研究生王腾对参考文献的整理工作,感谢安徽大学的陈文杰教授对论文的润色工作。

参 考 文 献

- [1] BARDEEN J, BRATTAIN W H. The transistor, a semi-conductor triode[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(1): 29-30.
- [2] TIETZ T. Jack kilby-inventor of the integrated circuit [EB/OL]. (2012-06-20) [2021-06-15]. <http://scih. org/jack-kilby-inventor-integrated-circuit>.
- [3] DRAPER D. TSMC's 5 nm (FinFET) process technology [EB/OL]. (2020-02-05) [2021-06-15]. https://www. tsmc. com/english/dedicatedFoundry/technology/logic/l_5nm.
- [4] HUTCHESON G D. Moore's law, lithography, and how optics drive the semiconductor industry [J]. Proceedings of the SPIE, 2018, 10583: 1058303.
- [5] YAO Ch Ch, GONG Y. Research on temperature distribution of deep ultraviolet lithographic projection objective [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0516001 (in Chinese).
姚长呈, 巩岩. 深紫外光刻投影物镜温度特性研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0516001.
- [6] HE L W, LUO L, MENG G, *et al.* Recent progress of novel photolithography technologies [J]. Laser Technology, 2019, 43(1): 30-37 (in Chinese).
何立文, 罗乐, 孟钢, 等. 新型光刻技术研究进展 [J]. 激光技术, 2019, 43(1): 30-37.
- [7] SPIE. SPIE advanced lithography conference proceedings browse proceedings (1997-2019) [EB/OL]. [2021-12-10]. <https://www.spiedigitallibrary. org/conference-proceedings-of-spie/browse/SPIE-Advanced-Lithography>.
- [8] ASML. The TWINSCAN NXE:3600D is ASML's latest-generation lithography system, supporting EUV volume production at the 5 and 3 nm Logic nodes and leading-edge DRAM nodes [EB/OL]. [2022-03-19]. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twinscan-nxe-3600d>.
- [9] KINOSHITA H, KANEKO T, TAKEI H, *et al.* Study on X-ray reduction projection lithography [C]//47th Autumn Meeting Japan Society of Applied Physics. New York, USA: IEEE, 1986: 28-ZF15.
- [10] BASOV N G, VERGUNOVA G A, VOLOSEVICH P P, *et al.* Conversion of laser radiation into thermal self-radiation of a plasma [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1987, 17(9): 1203.
- [11] SILFVAST W T, WOOD II O R. Tenth micron lithography with a 10 Hz 37. 2 nm sodium laser [J]. Microelectronic Engineering, 1988, 8(1/2): 3-11.
- [12] YEN A. EUV Lithography: From the very beginning to the eve of manufacturing [J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9776: 977632.
- [13] 木下博雄. X 線工学とその応用 超精密軟 X 線光学系の開発と応用 EUV リソグラフィ [J]. レーザー研究, 1999, 27(1): 20-24 (in Japanese).
- [14] BAKSHI V. EUV lithography [M]. Washington DC, USA: SPIE Press, 2009: 63-65.
- [15] NAULLEAU P P, GOLDBERG K A, ANDERSON E H, *et al.* Static EUV micro-exposures using the ETS Set-2 optics [C]//Emerging Lithographic Technologies VII. Santa Clara, California, USA: International Society for Optics and Photonics, 2003: 36-46.
- [16] BENSCHOP J P H, KAISER W M, OCKWELL D C. Euclides: European EUVL program [J]. Journal of Vacuum Science & Technology, 1999, B17(6): 2978-2981.
- [17] MEILING H, MEIJER H, BANINE V, *et al.* First performance results of the ASML alpha demo tool [J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6151: 615108.
- [18] WAGNER C, BACELAR J, HARNED N, *et al.* EUV lithography at chipmakers has started; performance validation of ASML's NXE: 3100 [J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 7969: 79691F.
- [19] EDITORIAL BOARD OF CHINA INTEGRATED CIRCUIT. ASML received 1. 1 billion euros from TSMC [J]. China Integrated Circuit, 2012(9): 11 (in Chinese).
中国集成电路编辑部. ASML 获得台积电投资 11 亿欧元 [J]. 中国集成电路, 2012(9): 11.
- [20] RUDY P, SJOERD L, JOERG M, *et al.* EUV lithography: NXE platform performance overview [J]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9048: 90481J.

- [21] PIRATI A, PEETERS R, SMITH D, *et al.* EUV lithography performance for manufacturing; Status and outlook[J]. Proceedings of the SPIE, 2016, 9776: 97760A.
- [22] SCHOOT J V, SETTEN E V, TROOST K, *et al.* High-NA EUV lithography exposure tool; Program progress[J]. Proceedings of the SPIE, 2020, 11323: 1132307.
- [23] SUNY POLYTECHNIC INSTITUTE. Sematech [EB/OL]. [2021-12-12]. <http://www.semtech.org>.
- [24] HU D Y. Study on the government behavior in industrial technology innovation consortia; A case study of SEMATECH[J]. Science and Technology Management Research, 2010, 30(18): 21-24 (in Chinese).
胡冬云. 产业技术创新联盟中的政府行为研究——以美国 SEMATECH 为例[J]. 科技管理研究, 2010, 30(18): 21-24.
- [25] BENSCHOP J P H, KAISER W M, OCKWELL D C. EUCLIDES; The European EUVL program[J]. Emerging Lithographic Technologies III, 1999, 3676: 246-252.
- [26] MEDEA CO. MEDEA+ [EB/OL]. [2021-12-22].
- [27] EMERALD GROUP PUBLISHING LIMITED. “More Moore” shows European EUV innovation at EUV 2006 in Barcelona [EB/OL]. [2021-12-22]. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/mi.2007.21824aab.006/full/html>.
- [28] CATRENE. Cluster for application and technology research in europe on nanoelectronics [EB/OL]. [2021-12-22]. <http://www.catrene.org>.
- [29] OKAZAKI S. EUV lithography research program at ASET[C]//Emerging Lithographic Technologies III. New York, USA: International Society for Optics and Photonics, 1999: 238-245.
- [30] GIGAPHOTON. Status of world research in EUV lithography[EB/OL]. [2021-12-22]. <https://www.gigaphoton.com/en/technology/euv-topics/status-of-world-research-in-euv-lithography>.
- [31] CHINA FERROALLOY NETWORK. Introduction and analysis of Japanese semiconductor industry [EB/OL]. [2021-12-22]. <http://www.ferro-alloys.cn/News/Details/132499>.
- [32] DIGITIMES. TSMC joins EIDEC [EB/OL]. [2021-12-22]. <http://www.eepw.com.cn/article/120435.html>.
- [33] CHANGCHUN INSTITUTE OF OPTICS FINE MECHANICS AND PHYSICS, CHINESE ACADEMY OF SCIENCES. The national science and technology project “key technology research of extreme ultraviolet lithography” undertaken by CIOMP successfully passed the acceptance [EB/OL]. (2017-06-21) [2017-07-04]. http://www.ciomp.ac.cn/xwdt/yw/201707/t20170704_4822124.html (in Chinese).
中国科学院长春光学精密机械与物理研究所. 长春光机所承担的国家科技重大专项项目“极紫外光刻关键技术研究”顺利通过验收. [EB/OL]. (2017-06-21) [2017-07-04]. http://www.ciomp.ac.cn/xwdt/yw/201707/t20170704_4822124.html.
- [34] JIN Ch Sh. Investigation on extreme ultraviolet lithography [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2003: 75-95 (in Chinese).
金春水. 极紫外投影光刻中若干关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2003: 75-94.
- [35] ZONG N, HU W M, WANG Zh M, *et al.* Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42 (in Chinese).
宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42.