

· 科学论坛 ·

芯片制造中的光学微纳加工技术前沿与挑战^{*}

蒲明博^{1**} 李向平² 张 杨² 郑美玲³ 栗雅娟⁴ 曹耀宇²
曹 瞰⁵ 徐 挺⁶ 段宣明^{2**} 冯 帅⁷ 孙 玲⁷

1. 中国科学院 光电所技术研究所, 成都 610209
2. 暨南大学 光子技术研究院, 广州 511443
3. 中国科学院 理化技术研究所, 北京 100190
4. 中国科学院 微电子研究所, 北京 100029
5. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 大连 116024
6. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 南京 210033
7. 国家自然科学基金委员会 信息科学部, 北京 100085

[摘 要] 基于第 282 期“双清论坛”, 本文分析了我国未来芯片及其制造技术发展面临的国际形势、技术挑战和发展趋势, 回顾了光学微纳加工技术近年来与光学工程、物理学、电子科学与技术、仪器科学与技术、集成电路科学与工程等多个学科领域交叉取得的主要进展和成就, 凝练了未来芯片制造中光学微纳加工技术亟需解决的基础科学问题, 展望了光学微纳加工技术科学前沿, 探讨了未来 5~10 年我国在该领域亟待关注的研究方向。

[关键词] 芯片制造; 光学微纳加工; 多学科交叉; 基础研究

光学微纳加工是芯片制造的核心, 其作用是将掩模版上的图形转移到待加工的基片上。受限于光学衍射极限, 传统技术主要通过缩短光源的波长、增大光学系统中物镜的数值孔径来提高分辨力。其中, 缩短波长导致光源、光学系统、掩模版、光刻胶等各个环节都将重新研发, 需要投入大量的人力和物力。以最先进的极紫外(EUV)光刻机^[1]为例, 在西方国家长期的技术积累基础上, 研发仍耗时数十年、耗资近 200 亿欧元。我国在先进光刻机研制方面与西方国家差距较大, 且受到严格的技术封锁和专利壁垒限制, 进一步发展面临极大挑战。

自集成电路发明以来, 其技术发展一直遵循着摩尔定律, 即每隔约 18 个月集成度翻一番^[2, 3]。近年来, 集成电路的特征尺寸已进入纳米尺度, 摩尔定律正面临难以为继的困境, 亟需芯片架构、材料体系和新原理器件等方面的重大突破与变革, 这为我国



蒲明博 中国科学院光电技术研究所研究员。长期从事微纳光学、亚波长电磁学等研究, 发明了用于矢量光场调控的光学悬链线结构, 阐明了近场倏逝波耦合光场的数学形式, 相关成果应用于激光调控、高分辨和超分辨成像、光学微纳加工、目标电磁特征调控等领域。曾获国家技术发明奖二等奖 1 项、中科院杰出科技成就奖、省部级科技进步奖特等奖和一等奖各 1 项。



段宣明 暨南大学教授。长期以突破光学衍射极限这一重大科学问题为核心, 发展超越衍射极限的激光直写与无掩模投影及其相结合的激光纳米光刻新原理、新技术、新装备, 在激光直写加工与无掩模投影光刻分辨率方面取得多项成果; 开发了具有自主知识产权的低成本、高效率新型纳米光刻技术, 拥有 10 多项中国与国际核心专利。

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2021-10-31

* 本文根据第 282 期“双清论坛”内容整理。

** 通信作者, Email: pmb@ioe.ac.cn; xmduan@jnu.edu.cn

芯片制造技术的发展提供了难得的历史机遇。在此背景下,2021年5月8—9日,国家自然科学基金委员会信息科学部、数理科学部、工程与材料科学部、交叉科学部与政策局共同主办了主题为“光学微加工前沿”的第282期双清论坛,来自全国高等院校、中国科学院各科研院所和相关企业等国内29家单位的37名专家学者围绕满足未来芯片制造需求的新型光学微纳加工技术展开深入研讨,梳理了光学微纳加工多学科交叉发展现状与趋势,凝练了领域未来主要研究方向和关键科学与技术问题,对未来5~10年国家自然科学基金如何支持相关领域的研究工作提出了具体建议。

1 光学微纳加工在芯片制造中面临的机遇与挑战

1.1 光学微纳加工技术研究战略意义

光学微纳加工是芯片制造的核心技术之一,其关键参数包括分辨力、视场、套刻精度和加工速度等。电子束直写、聚焦粒子束等方法虽然可达到亚10 nm的分辨力,但直写速度较慢,无法用于批量生产。成像式光学微纳加工技术遵循经典 Abbe-Rayleigh 衍射理论和 Hopkins 部分相干成像理论,提升分辨力依赖于缩短波长和增大数值孔径,其本质是平面成像,难以实现曲面、三维及跨尺度微纳结构加工。从20世纪70年代以来,随着科学技术的进步,光学微纳加工设备采用的光源已经从紫外的436 nm、365 nm 缩短到深紫外(DUV)的193 nm 和极紫外(EUV)的13.5 nm。目前,荷兰 ASML 公司商用极紫外光刻机 NXE: 3400 数值孔径 $NA = 0.33$, 单次曝光分辨力为13 nm, 并且正在研发数值孔径 $NA = 0.55$ 、单次曝光分辨力达8 nm 的新型光刻机 NXE: 5000。然而,由于极紫外波长带来的技术复杂度极大,EUV 光刻装备的研制难度和成本极高。

近二十年来,我国也在积极布局深紫外和极紫外光刻技术,但由于在光源、光学材料、光学元件、光学系统、光刻胶、工件台等方面存在诸多基础科学和关键技术问题尚未解决,例如,激光与靶材相互作用产生极紫外光的理论、大口径曲面非均匀超精密多层膜系的设计和加工、皮米级精度的面形检测原理方法等有待进一步突破,导致我国光刻技术与西方发达国家之间存在明显代差。另一方面,ASML 的先进光刻机是西方发达国家先进技术的集合体,相关国家和公司已经形成了完整的技术封锁体系和森

严的专利壁垒。

在芯片技术迎来变革和传统技术路线受制的背景下,瞄准未来芯片制造需求,准确研判光学微纳加工技术未来发展路线,加强原始创新,加速开展先进光学微纳加工技术相关的基础科学问题研究迫在眉睫。

1.2 光学微纳加工技术面临的机遇与挑战

经过60多年的发展,集成电路芯片的特征尺寸逐渐逼近量子力学和经济学的双重极限,相关产业又一次站在了历史的岔路口。在后摩尔时代,产业界和学术界普遍认为材料、器件结构、和芯片架构的创新是引领未来芯片领域发展的主要动力。一般而言,集成电路将沿着三个方向继续向前发展:延续摩尔、拓展摩尔和超越摩尔。“延续摩尔”主要通过材料、工艺和器件结构的创新,继续缩小晶体管尺寸以提高集成密度;“拓展摩尔”主张以应用需求为驱动,利用先进封装技术将多个芯片集成,从而形成具有丰富和新颖功能的系统;“超越摩尔”则主要专注于发展不同于 CMOS 的新原理器件。

光子相比于电子在速度、功耗、带宽等方面具有极大优势,光子芯片在数据中心的短距离高速通信、人工智能模拟计算等领域已经展现出重要应用前景。2016年,Intel 公司推出基于微环谐振器的商用硅光芯片,调制速度达到100 Gb/s,未来有望进一步提升到400 Gb/s 以上,比传统调制技术提升接近一个数量级。在微波光子芯片中,光学信号处理器件比电子处理器件具有显著的宽带和高集成度优势。除光子芯片以外,典型的未来芯片还包括量子芯片、自旋芯片、碳基芯片、生物芯片等。这些未来芯片力图从态变量、材料、器件结构或系统架构等不同层面进行创新,以应对未来云计算、人工智能和物联网等数据密集型产业对芯片算力提升和多功能信息处理的迫切需求。

由于未来芯片引入了新架构、新结构以及新材料体系,其制造方法也将有别于传统集成电路芯片,需要新的光学微纳加工技术和装备。以光子芯片为例,由于刻蚀尺寸和粗糙度对光子信号的传播常数、损耗等都有较大影响,因此,亟需发展高精度、低粗糙度的刻蚀和抛光方法。对于碳基芯片和引入二维材料的芯片而言,则需要已在已有半导体工艺线基础上,增加高质量的膜层生长和转移设备及工艺。在欧盟地平线2020研究与创新计划的支持下,欧盟委员会近期启动了“二维材料实验性试产线”(2D-EPL)项目^[4],拟建立一条实验性的试产线,将

石墨烯和相关的二维材料微纳加工工艺融入到现有半导体平台中。站在历史机遇期,加快布局光学微纳加工中的关键技术攻关,解决技术背后的基础科学问题,对我国未来芯片及其相关领域发展意义深远。

2 未来芯片及其加工技术主要进展

近年来,未来芯片初露端倪,在许多方面展现出超越传统芯片的优异性能。同时,基于新原理的光学微纳加工技术也在快速发展,有望满足未来芯片的加工制造需求。

2.1 未来芯片发展现状和挑战

2.1.1 新架构的微电子芯片

新架构的微电子芯片是突破传统架构局限的有效解决方案之一,其中,基于芯粒(Chiplets)的模块化设计被认为是后摩尔时代微电子芯片的重要发展方向^[5]。将多种不同架构、不同工艺节点、甚至来自不同代工厂的专用芯粒通过先进封装技术集成在一起,可快速定制出能满足多种功能需求的“超级芯片”。

芯粒是由不同的芯片模块组合而成,设计者可在特定部分选用最先进的技术,其他部分选用更成熟、性价比更高的技术,从而节省整体成本。例如,AMD第二代EPYC服务器处理器Ryzen采用芯粒设计^[6],将台积电7nm工艺制造的CPU模块与格罗方德12/14nm工艺制造的I/O模块组合,满足高算力(7nm CPU)、低成本(12/14nm成熟工艺)的需求。此外,芯粒可以实现异构处理器,将CPU、GPU、AI加速器等不同处理单元按需组合在一起,为各类应用需求提供更丰富的选择。但是,基于芯粒的模块化设计当前依然面临信号传输、散热、电源管理等方面的挑战。

研发新结构晶体管替代传统晶体管是后摩尔时代芯片发展的另一重要方向。体硅平面晶体管在20nm工艺节点后已经无法保持等比例缩小的性能、成本和功耗优势。2011年,英特尔公司在22nm节点上成功引入FinFET晶体管^[7],随后被一直延续到14nm和5nm节点^[8]。在5nm节点以下,环绕式栅极晶体管(GAA FET)被认为是更优的选择^[9, 10]。三星公司研究表明,相比7nm工艺而言,GAA技术的电压可以下降至0.7V,并且能够提升35%的性能、降低50%的功耗和节省45%的芯片面积^[11]。

与此同时,芯片晶体管和互连层的材料体系也

在不断发展,二维材料^[12]、碳基薄膜材料^[13]等被认为有望用于制造1nm晶体管。IBM和台积电分别正研究用钴和铋替代铜互连的技术^[13, 14],着力解决金属互连层的漏电和发热问题。近年来,分子晶体管^[15]也引起了人们的研究兴趣,如新型晶体管中的铜原子以正六边形排列,每个铜原子的直径约0.167nm,通过改变铜原子上的电荷分布来可改变晶体管中心酞菁分子方向,从而实现“0”和“1”两个状态。

近年来,深度学习相关计算方法和硬件技术的发展推动了人工智能领域的复苏。然而,传统芯片无法满足深度学习的算力需求,新架构的人工智能(AI)芯片技术应运而生。AI芯片主要包括^[16]:训练和推理加速芯片、类脑仿生芯片、通用AI芯片等。2015年,浙江大学发布了达尔文类脑芯片^[17];2019年,清华大学展示了一款名为“天机”的AI芯片架构^[18]。当前的AI芯片主要是针对神经网络训练与推理所研发的“加速器”,其底层架构是具备“乘加功能”的计算单元,并以IP核的方式集成到系统级芯片(SoC)中。目前,AI芯片在集成度、功耗以及耐用性等方面还面临诸多科学和技术难题。

2.1.2 光子、自旋与量子芯片

光子、自旋与量子芯片是超越电子芯片的重要发展方向。2016年,*Nature*杂志在“超越摩尔”评论中指出传统电子芯片难以为继,利用光子计算替代传统电子计算是解决摩尔定律困境以及冯·诺依曼架构问题的极具潜力的途径之一^[19]。光子芯片主要可以分为以下三类^[20]:基于多层感知器的衍射光学光子芯片、基于马赫-曾德尔光开关阵列的可编程光子芯片以及基于微环的全光学脉冲光子芯片。光子芯片的关键技术难点在于如何在高度集成的芯片上实现对光子的自由调控。2019年,美国国防部高级研究计划局(DARPA)启动“未来计算系统”项目,重点研究高算力和低功耗的集成光子芯片。

随着微波光子技术的快速发展,光子芯片处理电磁信号的频段已拓展至微波波段^[21, 22]。微波光子芯片的主要功能是利用光子芯片处理微波信号,实现微波信号的产生、分配、传输和处理。光电异质、异构混合集成将是集成微波光子芯片发展的重要趋势。

随着自旋电子学的发展,自旋芯片开始崭露头角,他利用电子的自旋特性作为信息的存储和运算的载体,展现出非易失性、抗辐射性、高集成度、高运

算速度、低功耗、长寿命等优势^[23, 24]。

另一种典型的未来芯片是量子芯片^[25, 26]，它是量子计算、量子通信及量子传感的核心部件。目前被认为最有应用前景的量子芯片包括超导、半导体和离子阱量子芯片。2018 年 3 月，Bristlecone 量子处理器成功研制，通过约瑟夫森结及电容构成非线性 LC 振荡电路，其量子比特数达到 72。超导量子比特的弛豫时间已经从纳秒量级提升到毫秒量级，接近可实用化的下限^[27]。当前，量子芯片依然面临工作环境温度低、可实现纠缠的量子比特较少等局限。

2.1.3 生物芯片

近二十年来，电子技术和生物技术相结合催生了生物芯片。利用分子间的特异性相互作用，生物芯片可实现生物成分的快速、准确检测，具备高通量、微型化和自动化的特点。根据芯片上固化的生物材料不同，生物芯片可分为基因芯片、蛋白质芯片、多糖芯片和神经元芯片等。此外，片上实验室^[28, 29]是生物芯片未来发展的一个重要形态，可将样品的制备、生化反应及检测分析的全过程进行集成，但其高精度制造仍是限制其广泛应用的瓶颈问题。

2.2 光学微纳加工前沿研究进展和挑战

光学微纳加工前沿既涉及传统微纳加工领域持续发展涌现出的新技术和新方法，也包含基于新原理的光学微纳加工理论、方法及相关技术。以下从新原理光源、超衍射光刻、多物理场协同的纳米光刻、超精密测量和控制等四个方面进行分析阐述。

2.2.1 新原理光源理论和方法

光源是光学微纳加工技术的核心之一，下一代光刻技术曾考虑过 EUV、X 射线、甚至波长更短的电子或离子束。由于更短波段的 X 射线和电子、离子束技术面临许多理论和技术难题，EUV 成为国际半导体技术路线选择的主要波段。当前，产生 EUV 光的主要途径包括等离子体辐射、同步辐射和自由电子激光。

利用高温等离子体辐射产生 EUV，其发光机制在于等离子体中被激发出来的电子与正离子的复合。根据等离子体产生手段的不同，EUV 光刻中使用的等离子体光源主要有电荷放电等离子体 (Discharge Produced Plasma, DPP) 和激光等离子体 (Laser Produced Plasma, LPP) 两种。相比于 DPP 光源，LPP 光源具有更好的可控性和稳定性。

因此，目前用于大规模加工的 EUV 光源多以 LPP 为主。但是，基于 LPP 的 EUV 光源能源转换效率低^[30]，功率达到 500 W 之后难以进一步增加，限制了光刻产率的提升。

同步辐射光源最初伴随电子同步加速器而出现，其优点是可以产生高功率的 EUV 光，而且对光学元件无碎屑污染，可以长时间稳定工作。但是，过于复杂和庞大的装置构造以及极其高昂的造价，导致同步辐射源目前尚未用于规模生产。自由电子激光可看作同步辐射源的延伸，由自由电子辐射产生。与传统激光相比，自由电子激光有许多优点，如辐射频率可调、频谱范围广、峰值功率和平均功率大且可调、相干性好、偏振强、具有短脉冲时间结构等，可满足 EUV 光刻所需的波长和功率要求。目前，我国已有的自由电子激光装置包括中国科学院高能物理研究所的北京自由电子激光装置 (BFEL)，中国科学院大连化学物理研究所和上海应用物理研究所联合研制的极紫外自由电子激光装置 (大连光源)。2018 年，上海开始建设能输出波长更短、能量更高的上海硬 X 射线自由电子激光装置。

2.2.2 超衍射光刻理论和方法

分辨力是决定光刻性能的核心技术指标。由于光的波动性，传统光学光刻存在衍射极限，成为其光学分辨力提升的原理性障碍。当前，常见的超衍射光刻技术主要包括：表面等离子体超衍射光刻技术、双光子直写技术和受激辐射损耗 (Stimulated Emission Depletion, STED) 超衍射光刻技术。

首先，我国已经在实验上验证了表面等离子体超衍射光刻^[31-35]的原理和方法可行性。表面等离子体光刻的分辨力和光刻图形质量逐步提升，已经发展为一种高分辨力、低成本的纳米光学加工新技术。按工作模式的不同，表面等离子体超衍射光刻又分为超衍射干涉光刻、超衍射成像光刻与超衍射直写光刻^[31, 36, 37]。未来，需着力解决基片平整度和光刻胶厚度、对准套刻等方面的问题。

利用双光子吸收效应的阈值效应，飞秒激光双光子直写技术能够突破光学衍射极限^[38, 39]。但是，该技术受限于直写模式，加工效率和图形均匀性仍然需要进一步提升。近期基于双光子效应的远场无掩模超衍射投影光刻技术已初现端倪^[40]，有望解决高分辨力、加工效率和成本之间的难以兼容的痼疾。

基于材料的 STED 原理，也可以实现超衍射光刻。该技术需要两束不同波长的激光，一束实心的

激光束使感光材料产生固化反应,另一束空心的激光束用于抑制固化反应,两束光综合作用下只有空心光斑中心区域的光刻胶最终被固化,从而在远场突破衍射极限。利用该技术可在光刻胶上实现 9 nm 线宽、双线间距低至约 50 nm 的超衍射光刻^[41]。通过采用阵列化模式可进一步提高 STED 超衍射光刻技术的加工速度。

2.2.3 多物理场协同的纳米光刻

多物理场协同的纳米光刻技术主要包括纳米压印光刻、导向自组装、光热光刻等。纳米压印光刻于 1995 年由普林斯顿大学纳米结构实验室的周郁(Stephen Chou)教授提出^[42],通过机械力将具有纳米结构的模板压在涂有高分子材料的基底上来等比例复制纳米图案,一步实现传统光刻的曝光和显影工艺过程。理论上,其加工分辨率仅与模板分辨率有关,避开了曝光波长衍射极限的物理限制,也不需要其他光刻技术所需的昂贵光学系统。纳米压印技术具有高分辨率、低成本的优势,目前已经可以实现 5 nm 分辨率的图案制造^[43]。但由于接触导致的缺陷问题,该技术主要被用于存储器等对缺陷控制要求不高的领域。如何控制纳米压印的缺陷,是学术界下一步关注的重点。

导向自组装(Directed Self-assembly, DSA)是一种将光学光刻与嵌段共聚物的自组装结合起来的技术,先通过光刻工艺制得模板,嵌段共聚物在模板表面的几何控制或化学诱导下通过微相分离实现自组装,从而得到有序的微相结构^[44]。该技术被认为是传统自对准多重图形(Self-aligned Multiple Patterning, SAMP)的替代技术,已被列入 2020 年最新的 IEEE(电气电子工程师学会, Institute of Electrical and Electronics Engineers)国际器件与系统路线图,可用于制造特征尺寸小于 10 nm 的周期性图案。该技术未来发展方向主要是寻求更为理想的嵌段共聚物材料、新的自组装方法和先进的光刻技术(如电子束光刻、纳米压印光刻等)的组合,从而得到更高分辨率和更灵活多变的图形结构。

除纳米压印、导向自组装等技术外,近年来学术界还提出了多种基于多物理场相互作用的微纳加工方法。例如,基于光热反应机理,在无机钛膜上采用双激光束(405 nm)交叠技术将 Ti 氧化为 TiO_2 ^[45],可实现纳米分辨力的光热光刻。通过精确控制能量密度及步长,获得的最小分辨力可达到 1/55 衍射极限(5 nm)。

2.2.4 超精密测量及控制理论和方法

超精密测量及控制是确保光学微纳加工精度和

一致性的关键,国内外在该领域取得了大量成果,同时也面临诸多新的挑战。与传统测量技术相比,激光干涉测量技术具有非接触性、灵敏度高、精度高等特点。双频激光干涉测量技术是在单频激光干涉测量技术的基础上发展起来的一种外差式干涉测量技术,对由光强变化引起的直流电平变化不敏感,抗干扰能力强。但是,国外的高端双频激光干涉仪对我国禁运,迫切需要自主发展相关的基础理论、关键技术和系统集成能力。

光学频率梳技术具有优异的时频域特性,如脉宽窄、重复频率稳定性高等,为高性能时间频率测量和高精密距离测量提供了新的技术手段。根据测量对象的不同,光频梳距离测量可分为两大类:绝对距离测量和位移测量。当前,基于频率梳的绝对距离测量标准不确定度已减小至 5 nm,位移测量可达亚纳米精度。我国在光频梳测距研究领域起步较晚,近年来多家单位虽已陆续开展了大量工作,但与国际顶级研究机构相比仍存在不小的差距。

在投影光刻技术中,ASML 光刻机采用光强调制型离轴三角检测方法检测工作间隙,测量垂直和倾斜离焦量重复性分别为 25 nm 和 2 μrad 。虽然该方法在投影光刻中广泛应用,但其斜入射的光路只适用于检测物镜与基片之间间隙较大时的相对距离,无法适用于纳米间隙的绝对测量。在近场纳米光学中,目前公开报道的间隙主动检测方法主要有:表面等离子体共振(Surface Plasmon Resonance, SPR)传感测量法、干涉空间相位成像法(Interference Space Phase Imaging, ISPI)、白光扫描干涉测量法以及基于白光非扫描干涉原理的绝对间隙检测方法。这些间隙测量方法空间分辨率低,如何在复杂条件下实现更高的原位测量精度是一大挑战。

光学对准是以光学手段精确检测掩模标记与基片标记相对位置关系的技术,是实现多层微纳图形精准套刻的关键。随着微纳器件结构尺寸越来越小,光刻分辨力越来越高,对准检测精度要求也越来越高。纳米光学对准技术主要包括:标记显微图像对准技术、叠光栅莫尔条纹对准技术、光栅多级衍射场检测对准技术。其中,叠光栅莫尔条纹对准技术主要用于纳米压印、接近/接触式光刻,报道的对准检测精度一般在 10 nm 左右。光栅多级衍射对准检测精度最高,多用于高端光刻装备。荷兰 ASML 公司的先进光刻装备,套刻精度为 2 nm 左右,对准精度预计可达亚纳米尺度。如何针对新的光学微纳加

工体系,发展匹配的高精度对准套刻技术,是下一步发展的重点方向。

3 面向未来芯片制造的光学微纳加工主要研究方向

3.1 发展目标

瞄准微纳电子、微纳光子、微纳机械等战略性微纳器件的制造需求,围绕光学微纳加工领域“超越衍射极限的光学微纳加工原理和方法”这一重大科学问题,从源头抓起,系统谋划,务实推进。尤其关注从“0”到“1”的原创性工作,发展具有自主知识产权的新型高端光学微纳加工技术体系,力争在基础理论、关键技术和系统集成方面取得全面突破,实现未来芯片的自主可控。

3.2 主要研究方向

经过深入研讨,与会专家们凝练了“突破光波衍射极限的机理”“多物理场协同微纳加工理论”和“超衍射精密测量理论和方法”等三个光学微纳加工技术面临的核心科学问题,并针对三个核心科学问题,建议了未来 5~10 年光学微纳加工领域的主要研究方向。

(1) 突破光波的衍射极限方向:需要围绕光学微纳加工涉及的物理化学过程,研究光与物质相互作用机理,阐明微纳尺度下,光与光刻胶、半导体材料等相互作用的物理化学机制;围绕时间、空间、强度、相位、偏振、波段、相干性等多维参数,研究微纳矢量光场的产生、传播、操控和表征中的关键科学技术问题,突破复杂结构中光场的精准计算和表征理论方法,在动态环境下实现微纳尺度的局域聚焦和按需空间分布;围绕将光学微纳加工转变为利用长波长光源实现超衍射加工,研究“后 Abbe-Hopkins 成像”新理论、理想成像透镜以及基于非线性效应、量子效应和多物理场协同效应的亚 10 nm 分辨力光学微纳加工新原理和新方法等。

(2) 多物理场协同微纳加工方向:借鉴原子和分子制造理论,通过多物理场(力/热/电/磁等)协同调控,对图形载体的流变和表界面行为进行诱导与约束,利用导向自组装、纳米压印、自对准多重图形等技术对微纳图案成型进行精准控制。需要研究极端尺度下,光/力/热/电/磁多物理场的耦合机制,纳米尺度多材料体系流变行为的外场协同调控机理以及“自上而下”与“自下而上”相结合的超衍射纳米光刻方法。

(3) 超衍射精密测量方向:为满足纳米/亚纳

米精度的对准套刻以及加工速率的需求,需要厘清各部件运动误差的产生和传递规律,并设计先进的闭环控制以及人工智能算法,在保证控制精度的同时提升运动速度;为满足复杂材料和三维结构的新型微纳器件的精密测量,亟需发展多波长光学成像、小角度 X 射线散射、激光超声成像等新原理方法,解决多层材料光学吸收大、多重散射复杂等基础科学问题,实现器件内部三维结构的精确重建。

(4) 光学微纳加工科研仪器单元与集成技术方向:一方面需要研究面向微纳加工的新材料,研究降低材料损耗、增大非线性响应和响应灵敏度的方法,形成标准化的高性能材料制备工艺;同时研究新型掩模设计和加工方法,探索基于新原理的光源技术。另一方面,需攻关关键单元技术和装备集成技术,实现科研仪器和装备的自主可控。包括,大口径光学元件的原子级加工与精度传递,核心运动部件位姿的超精密测量和控制,纳米精度的对准套刻原理和方法以及亚 10 nm 光学微纳加工仪器设计与系统集成等。

4 结 语

光学微纳加工技术既是集成电路芯片制造的核心,也是微纳光子、微纳机械、微纳生物等领域未来芯片和器件研发的关键支撑。本次论坛深入研讨了未来芯片和微纳器件对光学微纳加工的新需求,初步凝练了未来光学微纳加工发展路径上的基础科学问题和关键挑战,提出了前沿性和战略性的重点发展方向,对促进我国新原理光学微纳加工技术研究起到积极推动作用。

致谢 国家自然科学基金委员会第 282 期双清论坛共同主席罗先刚院士、郭东明院士、吕跃广院士,论坛秘书组成员韦亚一、刘红忠、程亚、郭江以及出席论坛的所有专家学者共同凝练了我国光学微纳加工领域今后的前沿研究方向和亟需关注的重要基础科学问题,再次深致谢忱!同时感谢国家自然科学基金委员会数理科学部、工程与材料科学部、交叉科学部和政策局对本次论坛的支持!

参 考 文 献

- [1] Wagner C, Harned N. Lithography gets extreme. *Nature Photonics*, 2010, 4(1): 24—26.
- [2] Lundstrom M. Moore's law forever?. *Science*, 2003, 299(5604): 210—211.

- [3] Schaller RR. Moore's law: past, present and future. *IEEE Spectrum*, 1997, 34(6): 52—59.
- [4] Don M. Flatter chips. *Communications of the ACM*, 2021, 64(10): 8—10.
- [5] Shalf J. The future of computing beyond Moore's Law. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2020, 378(2166): 20190061.
- [6] Lyon DA. The rise of ryzen. *International Journal of Computer and Systems Engineering*. 2020, 1(1): 1—2.
- [7] Bohr M, Mistry K. Intel's revolutionary 22 nm transistor technology. Intel website, 2011.
- [8] Yu B, Chang L, Ahmed S, et al. FinFET scaling to 10 nm gate length. *Digest International Electron Devices Meeting*, 2002: 251—254.
- [9] Colinge JP, Gao MH, Romano-Rodriguez A, et al. Silicon-on-insulator 'gate-all-around device'. *International Technical Digest on Electron Devices*, 1990: 595—598.
- [10] Simoen E, Magnusson U, Claeys C. A low-frequency noise study of gate-all-around SOI transistors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, 40(11): 2054—2059.
- [11] Theis TN, Wong HSP. The end of Moore's law: a new beginning for information technology. *Computing in Science & Engineering*, 2017, 19(2): 41—50.
- [12] Akinwande D, Huyghebaert C, Wang CH, et al. Graphene and two-dimensional materials for silicon technology. *Nature*, 2019, 573(7775): 507—518.
- [13] Cao Q, Tersoff J, Farmer DB, et al. Carbon nanotube transistors scaled to a 40-nanometer footprint. *Science*, 2017, 356(6345): 1369—1372.
- [14] Shen PC, Su C, Lin Y, et al. Ultralow contact resistance between semimetal and monolayer semiconductors. *Nature*, 2021, 593(7858): 211—217.
- [15] Perrin ML, Burzuri E, van der Zant HSJ. Single-molecule transistors. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(4): 902—919.
- [16] Han D, Zhou SY, Zhi T, et al. A survey of artificial intelligence chip. *Journal of Computer Research and Development*, 2019, 56(1): 7—22.
- [17] de Ma, Shen JC, Gu ZH, et al. Darwin: a neuromorphic hardware co-processor based on spiking neural networks. *Journal of Systems Architecture*, 2017, 77: 43—51.
- [18] Pei J, Deng L, Song S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture. *Nature*, 2019, 572(7767): 106—111.
- [19] Waldrop MM. The chips are down for Moore's law. *Nature*, 2016, 530(7589): 144—147.
- [20] Gaeta AL, Lipson M, Kippenberg TJ. Photonic-chip-based frequency combs. *Nature Photonics*, 2019, 13(3): 158—169.
- [21] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave photonic signal processing. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 571—586.
- [22] Capmany J, Ortega B, Pastor D. A tutorial on microwave photonic filters. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(1): 201—229.
- [23] Žutić I, Fabian J, Das Sarma S. Spintronics: fundamentals and applications. *Reviews of Modern Physics*, 2004, 76(2): 323—410.
- [24] Pulizzi F. Spintronics. *Nature Materials*, 2012, 11(5): 367.
- [25] Houck AA, Türeci HE, Koch J. On-chip quantum simulation with superconducting circuits. *Nature Physics*, 2012, 8(4): 292—299.
- [26] Politi A, Matthews JCF, O'Brien JL. Shor's quantum factoring algorithm on a photonic chip. *Science*, 2009, 325(5945): 1221.
- [27] Pop IM, Geerlings K, Catelani G, et al. Coherent suppression of electromagnetic dissipation due to superconducting quasiparticles. *Nature*, 2014, 508(7496): 369—372.
- [28] Cheung K, Gawad S, Renaud P. Impedance spectroscopy flow cytometry: on-chip label-free cell differentiation. *Cytometry Part A*, 2005, 65(2): 124—132.
- [29] Bhat MP, Kurkuri M, Losic D, et al. New optofluidic based lab-on-a-chip device for the real-time fluoride analysis. *Analytica Chimica Acta*, 2021, 1159: 338439.
- [30] Panning E M, Goldberg K A, Mizoguchi H, et al. Performance of 250W high-power HVM LPP-EUV source. in *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII*. International Society for Optics and Photonics. 2017, 10143: 101431J.
- [31] Luo XG. Plasmonic metalens for nanofabrication. *National Science Review*, 2017, 5(2): 137—138.
- [32] Luo XG. Principles of electromagnetic waves in metasurfaces. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2015, 58(9): 1—18.
- [33] Luo XG, Ishihara T. Surface plasmon resonant interference nanolithography technique. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(23): 4780—4782.
- [34] Luo XG. Subwavelength optical engineering with metasurface waves. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(7): 1701201.
- [35] Luo J, Zeng B, Wang CT, et al. Fabrication of anisotropically arrayed nano-slots metasurfaces using reflective plasmonic lithography. *Nanoscale*, 2015, 7(44): 18805—18812.
- [36] Gao P, Yao N, Wang CT, et al. Enhancing aspect profile of half-pitch 32 nm and 22 nm lithography with plasmonic cavity lens. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(9): 093110.

- [37] Gao P, Pu MB, Ma XL, et al. Plasmonic lithography for the fabrication of surface nanostructures with a feature size down to 9 nm. *Nanoscale*, 2020, 12(4): 2415—2421.
- [38] Serien D, Sugioka K. Fabrication of three-dimensional proteinaceous micro- and nano-structures by femtosecond laser cross-linking. *Opto-Electronic Advances*, 2018, 1(3): 180008.
- [39] Jia YC, Wang SX, Chen F. Femtosecond laser direct writing of flexibly configured waveguide geometries in optical crystals: fabrication and application. *Opto-Electronic Advances*, 2020, 3(10): 190042.
- [40] Liu YH, Zhao YY, Jin F, et al. $\Lambda/12$ super resolution achieved in maskless optical projection nanolithography for efficient cross-scale patterning. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3915—3921.
- [41] Gan Z, Cao Y, Evens R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size. *Nature Communications*, 2013, 4(6): 2061.
- [42] Chou SY, Krauss PR, Renstrom PJ. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(21): 3114—3116.
- [43] Austin MD, Ge HX, Wu W, et al. Fabrication of 5nm linewidth and 14nm pitch features by nanoimprint lithography. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(26): 5299—5301.
- [44] Archambault S, Girardot C, Salaün M, et al. Directed self-assembly of PS-b-PDMS into 193nm photoresist patterns and transfer into silicon by plasma etching. *SPIE Advanced Lithography*, 2014, 9054: 90540O.
- [45] Qin L, Huang YQ, Xia F, et al. 5 nm nanogap electrodes and arrays by super-resolution laser lithography. *Nano Letters*, 2020, 20(7): 4916—4923.

The Frontiers and Challenges of Optical Micro-nano Fabrication Technology for Chip Fabrication

Pu Mingbo^{1*} Li Xiangping² Zhang Yang² Zheng Meiling³ Su Yajuan⁴ Cao Yaoyu²
 Cao Tun⁵ Xu Ting⁶ Duan Xuanming^{2*} Feng Shuai⁷ Sun Ling⁷

1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209*

2. *Institute of Photonic Technology, Jinan University, Guangzhou 511443*

3. *Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

4. *The Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

5. *School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024*

6. *Modern College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210033*

7. *Faculty of Information Sciences, National Natural Science Foundation, Beijing 100085*

Abstract Based on the 282nd issue of “Shuangqing Forum”, this paper analyzes the international situation, technical challenges and development trends of the future chips and their fabrication technology in our country. The main progress and achievements in optical micro-nano fabrication technology in recent years are reviewed, with multidisciplinary research involving optical engineering, physics, electronic science and technology, instrument science and technology, integrated circuit science and engineering, etc. The basic scientific questions that need to be solved in optical micro-nano fabrication technology for future chip fabrication are summarized. Finally, this paper forecasts the scientific frontier of optical micro-nano processing technology and discusses the research direction in this field in our country in the next 5~10 years.

Keywords wafer fabrication; optical micro-nano fabrication technology; multidisciplinary; fundamental research

(责任编辑 吴征天)

* Corresponding Author, Email: pmb@ioe.ac.cn; xmduan@jnu.edu.cn