

· 专题二:双清论坛“原子级制造的基础科学问题” ·

原子级制造的关键基础科学问题^{*}

雒建斌^{1**} 郭东明² 杨华勇³ 叶鑫^{4**} 钱林茂⁵
 居冰峰³ 姜澜⁶ 邵金友⁷ 张振宇² 陈磊⁵
 陈远流³ 胡浩⁶ 李祥明⁷ 冯俊元² 韩伟娜⁶
 谭新峰¹ 解国新¹ 赖一楠⁴ 苗鸿雁⁴ 王岐东⁴

1. 清华大学 高端装备界面科学与技术全国重点实验室,北京 100084
2. 大连理工大学 高性能精密制造全国重点实验室,大连 116024
3. 浙江大学 流体动力基础件与机电系统全国重点实验室,杭州 310027
4. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部,北京 100085
5. 西南交通大学 机械工程学院,成都 610031
6. 北京理工大学 机械与车辆学院,北京 100081
7. 西安交通大学 精密微纳制造技术全国重点实验室,西安 710049

[摘要] 人类的制造技术逐步向原子级推进,原子作为化学反应中的最小粒子,虽然它可以分成更小的原子核、电子等,但是从制造的角度看,原子级制造可以说是人类制造的最底层技术,也是继微纳制造之后新的制造范式,可将制造精度以及产品性能推向极致水平,代表着人类对物质世界认知和制造能力发展的新阶段,是引领未来产业变革发展的战略性技术,也是保障国家安全和推动国计民生重大装备跨代升级的重要前沿方向。本文基于第330期双清论坛总结了原子级制造的研究现状、发展趋势及机遇挑战,凝练出未来5~10年原子级制造的焦点问题和亟需解决的关键科学问题,探讨了相关领域的前沿发展方向和科学基金资助战略。

[关键词] 原子级制造;原子层制造;团簇与器件制造;原子级精度制造;原子级测量与表征;学科交叉

原子级制造是指将能量作用于原子,通过原子级材料的可控去除或者原子/分子级结构的大规模操控及组装,实现产品性能与功能跃迁的前沿制造技术。制造先后经历了宏观制造、介观制造、微米制造和纳米制造等多个发展阶段,制造精度不断提升,带来了装备性能的飞跃,也推动了人类文明的进步。随着半导体制造、新型显示、航空航天和超精密仪器等领域高端装备核心零部件逐渐向尺度和功能极端化的方向发展,其加工质量与精度要求日益苛刻,未来的制造精度和尺度将全面拓展到原子级水平(图1)。原子级制造是继微纳制造之后新的使能技术,代表着人类对物质世界认知和制造能力发展的



雒建斌 中国科学院院士,曾任清华大学机械工程学院院长。两届973项目首席,国家自然科学基金重大仪器专项、重大项目和创新群体项目负责人,获国家技术发明奖三等奖1项,国家自然科学基金二等奖2项,国家科技进步奖二等奖1项,省部级科技奖12项,2020年度陈嘉庚技术科学奖,并作为首位中国人获得2013年美国润滑工程师学会(STLE)最高奖—国际奖和中国摩擦学最高成就奖。长期从事纳米摩擦学研究和纳米制造研究。



叶鑫 博士,副研究员,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学二处项目主任,主要研究领域为机械设计与制造。

收稿日期:2023-10-13;修回日期:2023-11-13

* 本文根据第330期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: luojb@tsinghua.edu.cn; yexin@nsfc.gov.cn

新阶段,对支撑国家重大战略需求乃至促进未来新一轮科技革命和产业变革发展具有重大意义。

原子级制造可将制造精度以及产品性能推向更高水平,是半导体制造、航空航天、核能工程、超精密仪器和量子科技等国家战略发展领域竞争制胜的支撑技术^[1,2],如图 2 所示。以半导体制造为例,随着信息产业对高端芯片性能、功耗、集成度等方面的要求不断提高,高端芯片制造线宽必然向原子尺度逼近,下一代芯片将从现在的“纳米时代”进入到“原子时代”。从原子层级精准构筑基于低维材料的信息功能器件乃至制造出下一代原子级芯片以及量子芯片将是未来各个国家在信息产业领域技术竞争的焦点。再如,通过原子级制造将激光诱导核聚变靶丸、强光光学元件等制造精度提升至原子量级,对实现高能量增益激光核聚变点火将起到重要支撑作用。

研讨原子级制造的基础科学问题,凝练总体科学目标,以推进我国原子级制造领域的战略规划、科学研究和技术发展,促进我国先进制造技术水平的整体提升。在此背景下,2023 年 3 月 23—24 日,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)工程与材料科学部、数学物理科学部、化学科学

部、信息科学部和计划与政策局联合主办的第 330 期双清论坛“原子级制造的基础科学问题”在北京召开。来自机械、材料、化学、物理、信息等学科领域 20 多个高校、科研院所的近 40 位专家参加了此次论坛。专家围绕“原子层制造”“原子/分子团簇与器件制造”“原子级精度制造新原理新方法”和“原子级制造测量与表征”等议题进行了深入研讨,系统梳理了原子级制造理论、方法与技术的研究现状、发展趋势及面临的挑战,凝练并提出亟需关注和解决的重要基础科学问题和研究方向。

1 原子级制造的重大机遇与挑战

1.1 原子级制造的发展现状与紧迫性

原子级制造展现出巨大优势和发展潜力,成为先进国家科技战略布局的聚焦点。2015 年,美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了“从原子到产品”(Atom to Products)的研究计划,旨在研制有效的装配方法使制造出的大尺度组件和系统能够保留材料原子级效应和性能,包括“原子到微米组装”,即将原子、分子和团簇等组装成微米尺度的模块以及“微

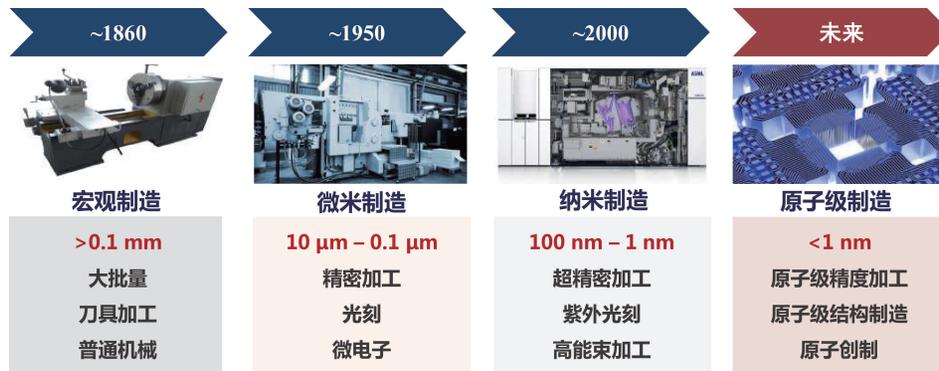


图 1 制造正逐渐迈入“原子级制造”新时代

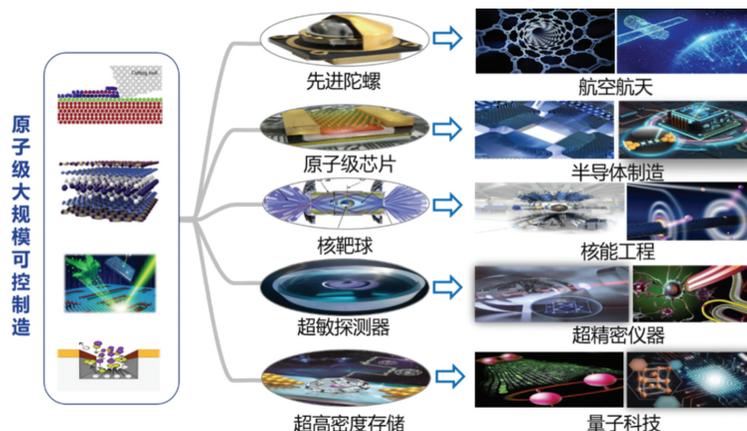


图 2 原子级制造的代表性应用及其未来展望

米到毫米组装”,将微米尺度模块组装成毫米尺度的材料、器件或系统^[3,4]。2018年,日本提出“皮米制造”理念,由日本东北大学、日本理化所、大阪大学等团队相继开展皮米级制造相关研究,旨在将光学元件表面加工精度由纳米级进一步提升到皮米级水平^[5]。同年,美国能源部先进制造办公室启动了原子精密制造计划,目标是推进具有原子级特征结构的后摩尔时代芯片的发展。2019年,德国提出了“单原子晶体管”概念并开展了原子尺度新型集成电路器件的研发^[6]。2022年,美国发布《先进制造业国家战略》,强调原子级精度制造在微电子和半导体制造创新发展中的战略支撑作用^[7]。

自然科学基金委在2009年开始实施的重大研究计划“纳米制造的基础研究”过程中,在基础理论方法、关键技术、核心仪器装备、典型工程示范应用等几个层面取得了系列成果^[8]。该计划涵盖了纳米精度制造、纳米尺度制造、跨尺度制造和微纳制造新方法探索四大研究领域,创新性地提出了将宏观尺度的纳米精度制造纳入纳米制造研究中,向批量化、一致性、低成本的制造技术和工艺装备聚焦,通过原理创新及前沿技术攻关,将我国制造技术从微米制造推进到纳米制造,奠定了我国纳米制造的基础,为解决中国制造的战略任务、在国际上形成有重要影响的研究成果发挥了重要作用。2014年,房丰洲^[9]提出了制造发展的三个范式,指明原子及近原子尺度制造是制造范式Ⅲ的核心使能技术。2018年,中国科学院推出了战略性先导科技专项“功能导向的原子制造前沿科学问题”,该专项设立了三个研究方向:低维材料和异质结构的原子尺度精准制造、原子尺度精准结构与性能的对应与调控关系、高品质异质结构信息器件的原子制造。此外,南京大学、浙江大学、华为战略研究院等机构相继成立了有关原子级制造的研究中心。

1.2 原子级制造的发展机遇与挑战

原子级制造有望颠覆传统制造范式并推动物质科学进步,是引领新一轮科技革命和产业变革的前沿技术。原子级制造可利用原子尺度特有的量子效应以及特殊的能量传递规律,在原子尺度精确操控物质和能量,创造前所未有的新物态、新材料、新器件,拓展人类对物质世界认知、控制和制造能力的边界。原子级制造将会打破传统制造工艺、机理规律以及重塑评价表征测量体系,将出现能够精确去除单原子或单原子层的“原子刀具”,具有原子精度测量能力的“原子探头”以及全新的“原子级形位公差”

和表面质量的评价体系。在量子技术领域,实现单原子尺度的材料创制在获得新量子材料和结构、发现和调控新物性、构造新原理量子信息器件等方面具有极大的优势。例如,随着未来信息器件朝着更小尺寸、更低功耗、更高性能的方向发展,以单个原子为基元构建器件单元是信息领域发展的极限目标。在原子尺度条件下,量子纠缠、量子相干等效应凸显,也为规模化可控制造功能信息器件提出了全新的挑战和机遇。

原子级制造不是纳米制造在尺度上的简单延伸,而是有着许多与纳米制造截然不同的理论与工艺亟待探索,也有着包括高端芯片、新型显示等领域未来产业发展的需求牵引。原子级制造技术在我国逐渐形成了一批优秀的研究团队和一定的学术影响力,然而研究方向和成果相对分散,尚未形成推进原子级制造技术进步的有效合力。虽然我们目前已经在原子尺度物质科学研究领域取得一些进展,但距离以批量化、一致性为本质特征的制造工艺的实现仍然存在较大差距。原子级制造涉及物质从经典行为到量子行为的跨越,存在原子之间、原子与能场之间复杂的物理化学作用^[10],需要跨学科组织全国优势力量、研究机构,加强学科交叉融合与人才培养,打通相关学科壁垒,才能提高我国学者在原子级制造领域的整体研究水平和国际影响力,引领国际原子级制造领域的发展,在深入研究原子级制造的同时势必也会推动各相关学科的发展,特别是促进制造科学与物质科学的深度融合。

2 原子级制造的研究进展

2.1 原子层制造

原子层制造是指加工精度达到原子层量级的可控制造技术,包括原子层去除、原子层沉积/生长、原子层改性、原子级缺陷控制。针对航空、航天、核物理等超高性能构件的发展需求,通过原子层可控去除制造全频段原子级精度无损表面,并结合原子层增材制造原子级新结构,有望实现特殊功能的有效创成,保证超高性能构件的安全可靠。另外,后摩尔时代先进芯片的制造工艺将迈入1纳米量级,原子层制造需求贯穿芯片制造工艺的全流程。如图3所示,不仅芯片基底和互连结构表面抛光需要达到原子级全局平坦度和原子级表面精度,同时也需要原子层增材制造特征尺寸小至一个或几个原子层厚度,实现纳米级线宽芯片制造。然而,现有的超精密制造技术通常采用多源外场协同的调控作用来实现

控制精度的提升,但绝大部分能场均具有空间扩展特性,其与原子层制造的原子级限域、定域控制要求之间存在矛盾,导致原子层分辨率的去除、沉积和改性等面临巨大挑战。

原子层去除包含原子层抛光、原子层刻蚀等。其中原子层抛光是指对器件表面实现以原子层为基本单元的极限精度抛光去除,是实现大面积、原子级精度、无损表面原子级制造的关键技术,以获得具有特异功能的高性能器件。抛光是光刻的前道工序,纳米级线宽芯片基底和互连结构的抛光精度需要从纳米级跨入原子级,其本身形貌起伏在原子量级,需要实现原子层精度的可控去除。而碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等第三代半导体材料也需要接近于理想晶格排列的超光滑表面加工,材料抛光去除的分辨率必须在原子层量级^[11]。同时,面对晶圆表面近零缺陷和近零污染的苛刻要求,非晶层等原子级缺陷需要采用原子层抛光和刻蚀清洗技术才能消除。国内学者在晶圆表面极限精度去除和极限表面精度加工方面取得显著进展,实现了单层硅原子可控去除^[12]以及~0.05 nm 表面粗糙度的可控制备^[13]。在产业应用方面,美国、韩国及我国台湾地区已实现了 3 nm 线宽结构晶圆的亚纳米表面精度制造和量产,国内也已实现 14 nm 芯片抛光量产技术。同时,极紫外光刻物镜的表面抛光精度需要在全频段达到原子量级,如图 4 所示^[14],发展和采用原子层去除分辨率的新型抛光技术是实现极紫外光刻突破的主要途径。原子级去除的另一个主要技术就是原子层刻蚀(Atomic Layer Etching, ALE),是利用原子层沉积形成的自限制逐层反应结合传统的连续刻蚀工艺形成的具有原子级刻蚀精度的技术^[15]。随着先进芯片特征尺寸的缩小,要求刻蚀工艺具有原子级精度。然而,现有 ALE 工艺仍然面临难以实现理想预沉积,选择性不足,容易自发刻蚀等问题^[16],理想的原子精度表面制造依旧难以实现。同时,针对多材料原子层同步或选择性刻蚀需求,也需要进一步研究原子层刻蚀新工艺,实现复杂杂质表面的原子级精度可控、高效制造^[17]。

原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)是通过精准控制前驱体气体和反应气体在基底表面发生物理和化学吸附或发生表面饱和反应,实现原子层逐层沉积的技术^[18]。ALD 因沉积薄膜纯度高、原子级薄膜生长厚度可控强、保形性和工艺兼容性好等优点,已成为半导体、光学薄膜、生物医学和航空航天等领域研究热点。虽然 ALD 技术适用的

材料体系有较大的拓展,但仍面临前驱体与表面在等离子、光、电等能场下的原子级反应机理不明、原子级薄膜结构缺陷控制和异质表面同步沉积难等问题^[19]。

原子层制造不但针对零件外表面加工实现极限精度制造,而且涉及异质/异构界面处(内部)的原子层去除和增加,以控制界面处的力/热/光/电等基本物理特性,实现高性能器件/构件制造。诺贝尔物理学奖获得者 Herbert Kroemer 教授在获奖感言时呼吁,在制造过程中从原子层尺度上重视界面科学研究^[20]。开发原创性方法控制异质/异构界面的原子层生成和去除行为,掌握原子层制造的核心技术,将为能源/显示等关键领域下一代器件的发展带来变革性影响。例如,下一代交互终端增强现实(AR)/虚拟现实(VR)的关键光学元件为倾斜式的高深宽比衍射光栅,属于难成形复杂结构,其结构精度、光学特性、产率和成本等主要因素均取决于光栅结构

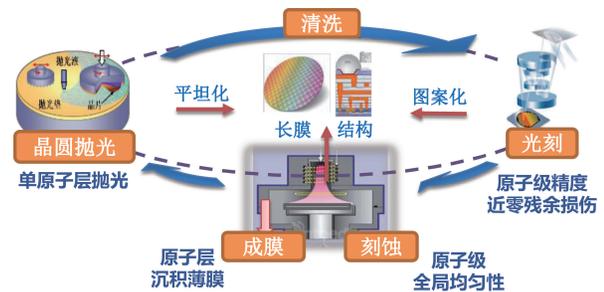


图 3 先进芯片制造工艺中的原子层制造技术

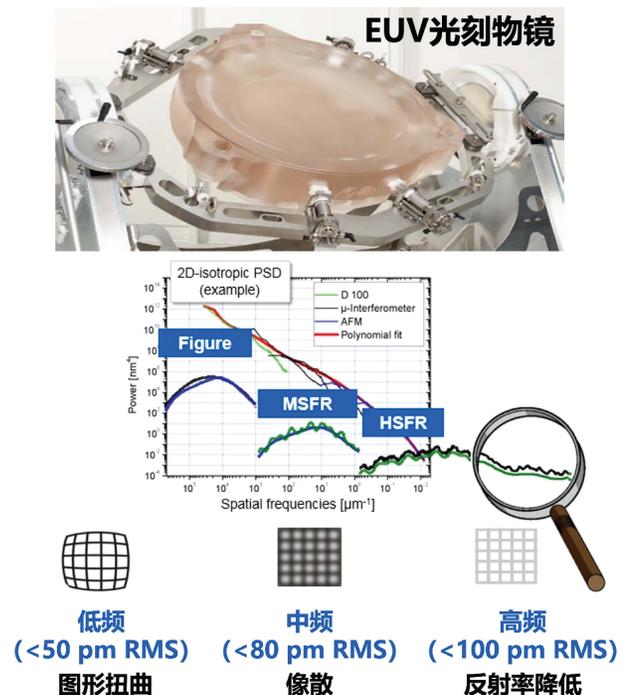


图 4 极紫外光刻物镜要求全频段原子级表面精度制造^[14]

复制过程中模板与结构界面粘附力的原子层调控能力;高功率和高能量密度的双电层电容器是电动交通、电磁弹射、定向能武器的主要电源,多孔电极膜对电荷的快速存储/释放能力,取决于电解质与电极界面的原子层尺度调控能力;基于探针直写技术的硅基单原子量子芯片制造需要实现硼、磷原子的精确放置以及单层硅原子的可控生长^[21]。

对表面原子级损伤层的控制与修复能力是原子层制造的另一个关注点。高密度碳靶丸的壳层内部和表面原子尺度的微观缺陷,在高温高压条件内爆过程所引起的流体力学不稳定性增长,是激光聚变点火成败的核心问题之一。强激光光学元件损伤阈值是制约高功率激光装置输出能力的关键瓶颈,熔石英的紫外激光本征损伤阈值约为 100 J/cm²。美国通过先进的缺陷抑制技术,将熔石英紫外损伤阈值提升至 20 J/cm² 左右,使美国国家点火装置输出能量比设计值提高了 30%,支撑了人类首次在实验室实现激光聚变点火^[22]。而强光元件表面原子层级的结构性缺陷控制,需要如离子束抛光、弹性发射抛光、射流抛光等方法对表层材料的微观组织和成分的精准调控^[23]。其中,离子束抛光能够利用表面扩散效应,通过原子的迁移实现损伤的修复和原子级表面粗糙度的加工^[24]。除此以外,微半球谐振子和光学微腔等复杂构件也需要近无损表面。微谐振子壁厚不均匀度和亚表面损伤层厚度虽已达到纳米量级,但其仍然对惯导系统的导航精度影响较大。因此,亟待研究原子层去除制造方法,通过原子层级的微量去除减少表面损伤形成,并对已有缺陷进行逐层原子去除修复,以及对表层材料微观组织和成分进行精准调控,才能满足战略领域高端装备核心零部件的高性能制造重大需求。

2.2 原子/分子团簇与器件制造

原子/分子团簇是指由几个至几万个原子组成

的相对稳定的微观聚集体,是一种物质结构新形态,具有确定的原子组成、明确的几何结构、独特的本征性质、特殊的表面性质、多级的组装结构,兼具材料基因和原子级制造的双重特性^[25]。美、英两国三位科学家由于对富勒烯的发现和发展做出重要贡献,获得了 1996 年诺贝尔化学奖。以富勒烯为代表的原子团簇,具有精确的原子团簇结构和特定的理化性质,变革了人类在材料科学、生物监测、医学载药、能源催化、柔性显示、太阳能电池等科技和产业领域的发展。由原子/分子团簇直接构筑功能器件或构件,是产品制造的新形式,能够颠覆现有制造方式获得的产品性能,也是物质科学发展的未来^[26-28]。在电子产业领域,将原子/分子团簇等按照一定的方式进行组装能够构筑具有特定功能和性能的器件,如具有超高分辨率、超高亮度、超快响应的新型显示器、红外光电探测系数数倍增强的超敏传感器,以及单分子电子器件及其构建的下一代集成电路^[29];而且部分稳定结构的团簇可以视作“超原子”,利用其优异的时间特性可作为量子计算机的重要功能单元^[30]。在磁性材料领域,利用磁性团簇尺寸小、具有单磁畴结构、矫顽力高等特性,可用作高存储密度的磁记录器件^[31]。在生化环境领域,利用团簇组装纳米结构的高扩散系数和超塑性,可实现气体的存储和探测^[32, 33],提高金属团簇的比表面积,可使其催化性和选择性远高于其它催化剂^[34]。在微纳制造领域,团簇离子束可用于离子注入、离子抛光^[35, 36]和纳米结构自组装^[37];其中离子抛光利用低能、大尺寸的团簇离子束对光滑表面进行超光洁化处理,达到 0.5~0.2 nm 的表面粗糙度,可用来对半导体材料、光学部件进行超高精密加工。国内外研究人员围绕原子/分子团簇材料的宏量制备、原子/分子团簇结构的跨尺度构筑、原子/分子团簇高性能器件制造三个层面开展了相关研究,如图 5 所示。

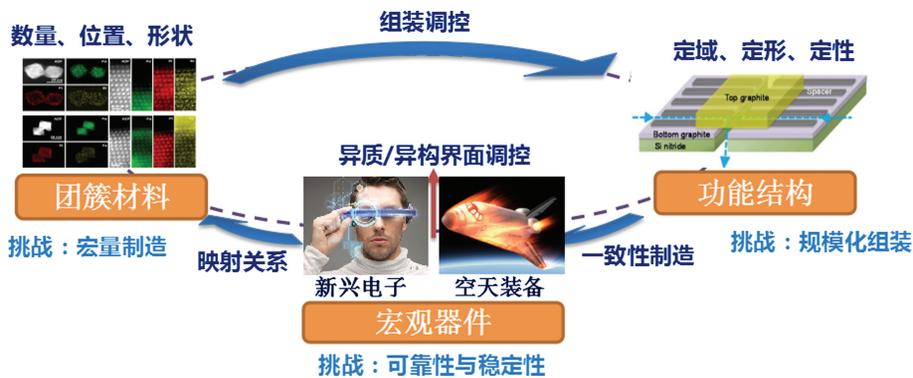


图 5 原子/分子团簇器件制造的发展现状、挑战与趋势

在原子/分子团簇制造方面,团簇特殊的表面性质可以通过配体调控并实现稳定化,而且团簇的多级组装结构可以构筑不同功能团簇材料。因此,构建奇异特性的原子/分子团簇结构,实现原子/分子团簇材料批量化制造,是制造原子/分子团簇器件的重要前提。国内外学者围绕原子/分子团簇材料制造开展了大量研究,其中团簇束流技术利用气体聚集法、飞行时间质谱、团簇的淀积与嵌埋,以及团簇材料的筛选封装,实现了原子精确操控与新物质创制,具备了从微克到毫克的制造能力^[38];南京大学宋凤麒教授团队^[39]提出气相原子凝聚和质谱筛选封装技术实现了团簇中原子精确操控;选择性原子层沉积技术,能够实现网络包覆结构、核壳结构、纳米栅栏结构、纳米陷阱结构等团簇结构形式^[40];化学方法制备原子/分子团簇,已由微观原子/分子精准调控向批量化、一致性方法延伸,实现了贵金属/稀有金属团簇、纳米晶体、二维材料的批量制造^[41];"活性氢介导的界面共还原"制造范式,能够在钯(Pd)纳米八面体上生长双金属纳米层,合成方法具有一定的普适性^[42]。

利用原子/分子团簇制造特定功能的微纳米结构或图形、开发原子/分子团簇定域组装及其图形化

技术,是实现原子/分子团簇器件制造的核心问题。在原子/分子团簇结构的跨尺度构筑方面,国内外学者发展了多种形式的团簇组装新方法,其中将"自下而上"与"自上而下"相结合能够兼顾制造结构和调控性能两个关键要求,是实现团簇结构大面积、低成本、多维度、跨尺度制造的关键途径,已用于精准构筑纳米通道器件^[43];将物理法图案化与化学法功能化相结合,能够控制石墨烯等二维材料的图形化透光率、实现电色或光色功能^[44];多组分和多层次的分子组装能够实现原子/分子团簇的多位点弱键协同作用和多重反馈协同作用,比化学反应更适用于原子级制造^[45];团簇诱导晶核共组装策略,能够构建类嵌段共聚物亚纳米结构,实现了亚纳米尺度无机纳米线的类高分子特性^[46],如图 6 所示。

原子/分子团簇器件是从原子到产品的创新制造形式,涉及团簇、微纳结构以及功能器件的映射新原理。国内外学者重点围绕团簇新器件的工作机制和器件构建等问题开展研究。在新型显示器件研究方面,新加坡国立大学的研究团队^[47]研究了以系列巯基配体保护的、具有原子级精确结构的金(Au)纳米团簇的发光动力学过程,揭示出 Au 纳米团簇的表/界面精细结构对聚集诱导发光(AIE)性质的影响

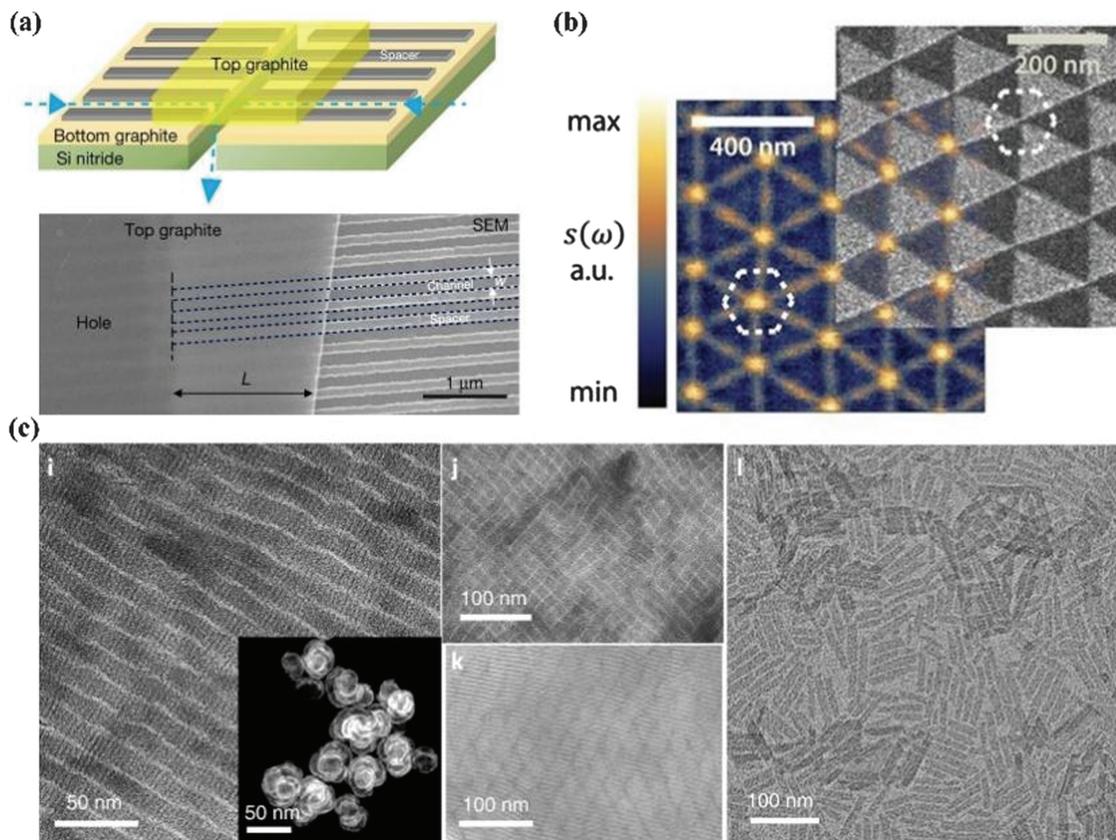


图 6 团簇构筑的微纳功能图形^[43, 44, 46]

规律。黑龙江大学的学者^[48, 49]提出了配体—器件工程相结合的团簇电致发光体系,显著提升了电致发光外量子效率和器件色度。在新型二极管研究方面,纽约大学的研究团队^[50]将二硒化钨(WSe_2)二维材料浸入到超原子团簇 $Co_6E_8(PEt_3)_6$ 溶液中,使 WSe_2 的空穴输运转变为电子输运,进而制备出 WSe_2 的 p-n 结。斯坦福大学的研究团队^[51]开发了基于金属纳米簇的光阻剂,用于制造纳米簇—聚合物纳米晶格,形成了具有高比能量吸收、高比强度等性能的机械超材料。在新型存储器研究方面,南京大学的研究团队^[52]研制出团簇基 $Gd@C_{82}$ 单分子存储器,可以实现利用电偶极子在单分子水平进行存储信息。荷兰代尔夫特理工大学的研究团队^[53]研制出可实现 10^4 个原子操作的可复写原子存储器。

尽管国内外学者围绕原子/分子团簇与器件制造开展了大量研究,但仍有诸多基础理论问题有待明确。在原子/分子团簇新材料的宏量制造方面,需要进一步探索团簇结构的精确调控机制、团簇材料的批量化制造方法等问题;在高性能器件或构件的原子/分子团簇构筑方面,有待聚焦团簇材料的定域组装、异质/异构界面特性调控等问题;在团簇器件制造方面,需要重点关注团簇形性特征、微纳结构功能特征、器件性能三者之间的映射关系等问题。

2.3 原子级制造测量与表征

原子级制造测量与表征是原子级制造可控性保障的核心基础。原子级制造过程涉及原子核外电子密度的动态变化和重新分配,而电子动力学变化时

间尺度极短,可短至飞秒($fs, 10^{-15} s$)至阿秒($as, 10^{-18} s$)量级,考虑到测量通常比制造要具备更高的时空分辨率,其对探测表征装置的分辨能力和精度要求十分苛刻;原子级制造面临着从经典力学到量子理论、从线性到非线性、从平衡态到非平衡态等的跨越。原子级制造的测量与表征成为其理论揭示、过程优化与精度/品质可靠性保障的核心基础。其关键在于如何在电子、原子和分子层面,实现原子级制造过程中光子—电子—声子相互作用的超快观测与动态表征,如图7所示。

在超快观测方面,原子级制造涉及载能粒子的超快时间尺度、极小空间尺度、多维度及跨尺度等动力学过程,对其实时在线观测技术的研发和设计,能够为原子级制造方法在各种极端制造情景中的加工调控机理提供必不可少的研究手段^[54-56]。超快科技(如超快光学和超快电学)的发展使得载能粒子的超快动力学测量和调控成为可能,实现直接探测原子尺度下材料界面电子声子的超快能量耗散过程,揭示以电子声子为能量载体的新奇量子现象^[57, 58]。1988年,美国加州理工大学^[59]利用泵浦探测实现了当时世界上最快的照相技术,观测了化学反应中电子状态的变化过程,该成果获得超快激光领域的三项诺奖之一;2010年,该研究组^[60]又提出了高时空分辨率的四维超快电子显微镜观测系统。我国北京理工大学姜澜团队^[61]于2012年率先提出了跨越 $fs \sim s, 15$ 个时间数量级的多尺度观测系统。德国基于热发射电镜及法国基于冷场发射电镜研发的超快透射电子显微镜在正空间成像、倒空间电子衍射图

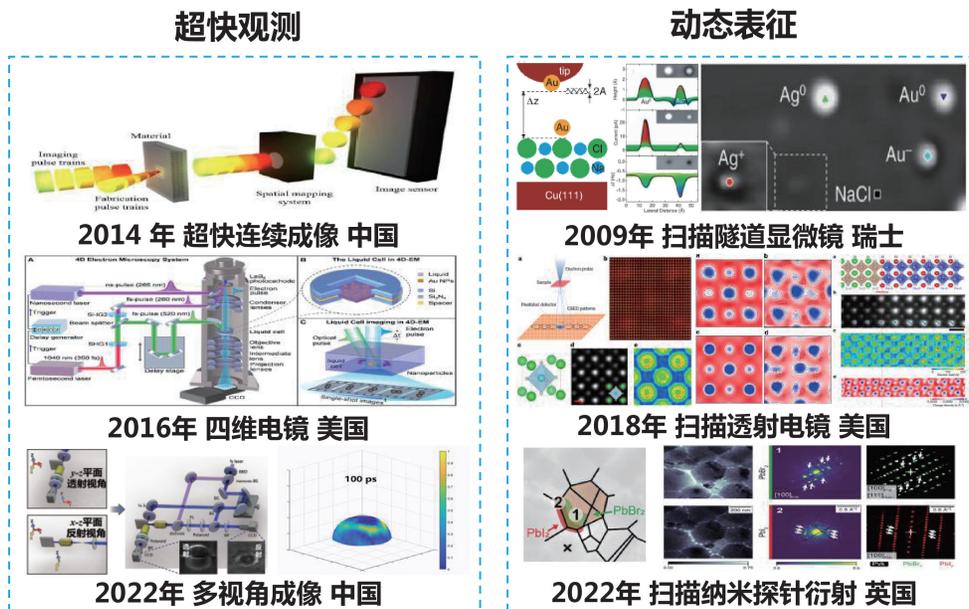


图7 超快观测及动态表征发展现状

等应用中均可达到飞秒级分辨率^[62]。日本学者研发的光脉冲调制扫描隧道显微镜、德国雷根斯堡大学等研制的太赫兹扫描隧道显微镜都成功实现高时间分辨隧穿电流的测量和高空间分辨率动力学信息的获取^[63, 64]。美国加州大学集成的超快原子力显微镜可实现多种半导体材料超快电子动力学的探测^[65]。2023 年, 诺贝尔物理学奖颁给了美国的 Pierre Agostini、德国的 Ferenc Krausz 和瑞典的 Anne Huillier, 他们开发出阿秒光脉冲实验方法来研究物质中的电子动力学, 为探索原子和分子内部电子世界提供了新工具。目前超快科技结合高空间分辨率测量技术呈现两个发展趋势: 从单一尺度向多尺度转变, 发展多系统协同全时空演化的跨尺度观测对揭示原子级制造过程中复杂机理意义重大; 单一维度观测向多维度、多参数在线实时观测拓展, 如何结合多物理场模式, 实现跨尺度的多维、多参数测量至关重要^[66, 67]。

在动态表征方面, 原子级制造的在线表征是对原子级制造过程进行高分辨动态原位表征, 对制造过程参数以及制造器件的结构和性能进行测试的过程。目前, 具备原子级测量能力的设备包括扫描隧道显微镜、原子力显微镜、扫描透射电子显微镜和衍射电子显微镜等。利用上述表征设备, 研究人员成功地在原子尺度对材料的表面结构、电子态、电势分布、晶体成分、结构动力学进行了观测与表征^[68, 69]。1990 年, 国际商业机器公司(International Business Machines Corporation, IBM) 的科研人员^[70]使用扫描隧道显微镜操纵了 35 个氩原子, 在镍(110)表面拼写出“IBM”字样。2009 年, 瑞士苏黎世实验室^[71]使用一氧化碳(CO)分子修饰 qPlus 音叉型原子力显微镜的针尖, 实现了并五苯分子化学键的直接成像, 精确提取了键序和键长等参数, 将人类的观测能力提高至亚原子级。2019 年, 加州大学欧文分校^[72]借助四维电子显微技术突破亚埃级空间分辨极限, 实现了对钛酸锶/铁酸铋异质结表面电荷密度分布的实空间成像。2022 年, 英国剑桥大学卡文迪许实验室^[73]利用扫描纳米探针衍射技术跟踪了局部晶体结构随通量的变化, 揭示了电子和 X 射线辐射与卤化物钙钛矿半导体的相互作用机制。上述设备虽然具备强大的探测能力, 但是只能对单一物理量进行测量。而在原子级制造过程中, 物质相互作用不仅发生在极限时空条件下, 还受到热、磁、电等多物理场耦合作用的影响, 远超过现有设备的探测和表征能力。

3 未来 5~10 年原子级制造的发展目标及资助重点

3.1 发展目标

瞄准原子级制造研究前沿, 结合高端芯片、新型显示等领域超高性能关键零部件、超构光学器件和超高精度仪器等重大需求, 通过机械、物理、化学、材料、信息等多学科交叉, 开展原子级制造基础理论与工艺方法研究, 促进原始创新。重点围绕原子层制造、原子/分子团簇器件制造、原子级制造测量与表征等方面的新原理、新方法、新工艺深入开展系统性基础研究, 建立支撑原子级制造这一全新制造范式的体系化工艺和技术, 为半导体制造、新型显示和超精密仪器等领域的技术变革和产业发展提供坚实的理论支撑。通过相对稳定和较高强度的支持, 吸引和培育一支具有国际先进水平的研究队伍; 开展学科交叉的原子级制造基础理论研究, 促进我国先进制造研究与技术水平的整体提升。

3.2 资助重点

经过大会报告、发言和研讨, 与会专家分别针对以芯片制造、激光武器、先进陀螺等国防军工领域为代表的复杂战略性装备制造的“卡脖子”难题以及未来对原子级制造发展战略展开了热烈的讨论, 凝炼出焦点问题和亟需解决的关键科学问题, 并建议未来 5~10 年原子级制造基础研究发展的“原子层制造”、“原子/分子团簇与器件制造”、“原子精度制造新原理新方法”和“原子级制造测量与表征”等领域的 12 个研究方向。

3.2.1 原子层制造

与会专家聚焦大规模集成电路、先进核能、航空航天等领域“卡脖子”重点问题, 阐述了先进芯片和高端光学元件等高性能构件原子层制造的迫切需求, 概括为三个方面:

(1) 原子层抛光新原理与新技术。目前高端芯片、新型显示等向尺度和功能极端化方向发展, 如钨互连层抛光终点抓取需要逐渐迈入单原子层精度, 而第三代半导体材料表面粗糙度达到原子量级且原子层缺失小于 3 层, 因此对原子层抛光的需求迫切。建议聚焦于机械化学限域反应原理及原子层去除多源能量调控机制等科学问题, 重点研究多源能量协同的原子级极限精度加工理论和方法, 探索复杂曲面、功能结构、多种异质/异构表面原子级材料的精准操控机理, 建立以原子层为基本单元的功能表面和结构极限精度加工的新原理、新方法与新工艺。

(2) 原子层沉积/刻蚀精准调控机制。近年来

量子芯片、激光芯片等高端芯片的制造是各国激烈争夺的战略方向,需要原子层制造技术及工艺装备的支撑。例如,高端芯片的极小结构表面和边沿需要将表面精度控制在数个原子层起伏,深宽比需要进一步提升。建议聚焦多场作用下异质/异构界面材料原子运动与迁移控制原理与方法、跨尺度高性能、高效率制造技术与理论等关键科学问题,重点研究从单原子操纵到任意多原子组合的集成技术、异质界面选择性原子级精度沉积与同步刻蚀工艺,建立多自由度量子协同调控新原理,实现原子层去除/组装/改性精准控制,发展全过程工艺耦合制造方法,为原子级样机制造到跨尺度产品集成提供理论与技术支撑。

(3) 高效高一致性原子层制造工艺与装备。随着高端芯片制造工艺逐渐迈入1纳米线宽的物理极限,硅晶圆基底和互连层多元异质材料的表面抛光精度需要达到原子级平坦度和表面粗糙度以及近零缺陷,面临很大的挑战性。建议聚焦芯片加工和原子级材料去除过程中的基础科学问题,重点加强异质材料同步去除机理、晶圆表面单原子层蚀刻清洗原理和原子级精度表面生成规律的研究,着力推动新一批原创技术发展与应用,促进人工智能与制造工艺、装备研制相结合,研发高精度在线检测一体化技术与装备,为实现原子级精度表面高效加工及一致性制造提供理论与技术支撑。

3.2.2 原子/分子团簇与器件制造

与会专家针对团簇新材料的宏量制造方法、新型功能器件的原子/分子团簇构筑机制与方法、团簇—器件的制造工艺和装备等相关原理与技术进行了讨论,总结如下:

(1) 原子/分子团簇新材料的宏量制造方法。构建具有奇异特性的原子/分子团簇材料,是制造强塑性/强韧性/耐高温航空航天结构件、高分辨新型显示/超灵敏探测器等的原子/分子团簇构件或器件的重要前提。团簇材料制造涉及原子/分子团簇的构效关系、精确调控、宏量制造等方面。与会专家建议聚焦团簇结构的精确调控机制、团簇材料的批量化制造方法等关键科学问题,重点研究团簇生成及晶胞结构调控过程中的量子力学作用机制与控制方法,为原子/分子团簇和晶胞的高性能制造提供调控原理;研究团簇和晶胞结构形态与材料特性之间的构效关系,为优异特性的材料制造提供合理设计;研究特定形性团簇和晶胞的稳定性和一致性控制方法,为团簇的宏量制造提供关键方法支撑。

(2) 高性能器件或构件的原子/分子团簇构筑

机制与方法。由原子/分子团簇构筑新型功能器件涉及对器件物理的深刻认知、构筑结构的精确调控、构筑界面的特性控制等问题。与会专家建议面向新型显示和航空/航天结构件等典型器件或构件等关键需求,聚焦团簇材料的定域组装、异质/异构界面的力学/电学/光学界面特性调控等科学问题,重点研究团簇组装和图形化过程中的界面力学作用机制,为团簇结构制造提供关键理论支撑;研究“自下而上”与“自上而下”相结合的团簇结构定域组装机制与调控方法,实现团簇微纳结构的一致性、批量化制造;研究团簇异质/异构界面的力、热、光、电等基本物理特性形成机制与控制方法,实现团簇结构的基本性能调控,为从原子到器件制造提供原理方法支撑。

(3) 团簇—微纳结构—器件性能的映射关系与高性能制造技术。从团簇到器件的跨尺度制造不但需要厘清团簇—微纳结构—器件性能的映射关系,而且需要关键工艺与装备作为支撑。与会专家建议聚焦团簇器件或构件制造的跨尺度映射关系,团簇材料的高效率印刷制造工艺和装备等关键问题和挑战,重点研究团簇形性特征、微纳结构功能特征、器件性能三者之间的对应关系,为器件功能和性能设计提供理论依据;研究由团簇材料到宏观器件的一体化制造新工艺和新方法,为高性能团簇器件制造提供创新工艺技术;研究新型显示/航空航天结构件等典型团簇器件或构件的创新印刷装备,为团簇器件的制造和应用提供制造装备新范式。

3.2.3 原子级精度制造新原理新方法

与会专家针对能场辅助原子级切削、多能场辅助原子有序排布、突破光学衍射极限的原子级精度制造等相关新原理与新工艺进行了讨论,总结如下:

(1) 能场辅助原子级切削机理研究。高性能复杂构件的制造精度与损伤控制要求逐渐逼近原子级,然而根据现有原子尺度切削机理,机械去除难以实现单层原子去除,亟需探明能场辅助下的表层原子键能弱化和去除机制,为原子级精度及损伤控制这一难题提供新原理和新方法。与会专家建议聚焦于多场耦合原子级精度材料去除以及近零损伤的加工难题开展研究,探索多能场耦合作用对切削断键所需能量的调控新原理,阐明原子尺度推挤变形、断键成屑材料去除机制,探索多能量场对表面原子之间键能弱化的新方法,为复杂构件表面材料原子级精度的可控去除提供理论依据,进而为实现战略领域高性能复杂构件表面原子级精度制造奠定基础。

(2) 多元能场原子有序排布机理。强激光透镜

等尖端元件的原子级缺陷是制约光学元件损伤阈值的关键因素,也是人类突破核聚变技术实现无限清洁能源梦想必须解决的核心问题之一,亟需研究原子级制造新方法对材料内部原子排列进行精准调控,从而实现无损加工。与会专家建议针对多元能场材料表层原子定域操控的新机理和新方法等关键问题,研究高密度电子风等能场对表面原子进行排布的调控新方法,揭示能场作用下金属材料的结晶优化、进而促使位错移动和湮灭的新原理,探索相界原子的高有序度调控新机制,以实现表层裂纹和亚表面塑性应变的修复,对晶体材料表面加工缺陷进行原子级尺度的精准调控,为高性能无损表面加工以及修复提供理论支撑。

(3) 突破光学衍射极限的原子级精度制造机理。未来物理、化学和生物领域的特殊功能和性能的实现依赖原子级精度微孔对离子、光子、声子以及生物大分子的精准调控,亟需研究突破光学衍射极限加工新方法。与会专家建议面向基因测序、海水淡化等领域离子主动调控需求的原子级精度微孔加工难题,探索超光学衍射极限的超高精度、近原子尺度微孔加工新方法。研究纵波红外激光、扫描探针介电击穿等超光学衍射极限的超高精度微孔加工新方法,探究多能场耦合作用下定点原子级材料转移新机制;研究多能场辅助下基于电子束和离子束等高能束的原子级精度高深宽比微孔制造新方法,解决异质材料表面原子精度去除的近原子尺度微孔制造难题,为离子、光子、声子在线测量和精准调控的实现提供支撑。

3.2.4 原子级制造测量与表征

原子级制造中的分子间作用力变化、分子内化学键断裂/形成/重排等物理、化学过程决定了原子级去除/组装等行为,其关键在于如何在电子、原子层面,实现原子级制造过程中光子—电子—声子相互作用的观测与表征。与会专家针对原子级制造测量与表征进行了深入讨论,总结如下:

(1) 高时空分辨多维动态超快观测。原子级制造涉及原子尺度下的能量注入、交换与耗散过程,涉及超快时间尺度、极小空间尺度、多维度及跨尺度等动力学过程,其质能传输在时间、空间、能量和动量等多维度下以及在温度场、电磁场和应力场等多场下均有体现,现有观测技术已无法满足。建议聚焦原子级制造过程中光子—电子—声子非线性、非平衡态质能传输机制等科学问题,重点研究高时空分辨和多场耦合观测技术、超快连续观测技术、以及超快多维跨尺度观测技术等。

(2) 原子级制造过程超精密原位动态表征。原子级制造表征是保障原子级制造可达性和可靠性的关键。当前对跨尺度多场动态高速测量方法、原子尺度高端动态表征设备等需求极为迫切。建议聚焦多物理场作用下的超高空间分辨信息解耦原理等科学问题,重点研究超高动态响应跨尺度多物理场测量新方法,发展具有超高分辨能力的高端动态原位表征设备,推进原子尺度动态表征设备自主可控。

(3) 原子级制造性能评价新方法。原子级制造性能评价新方法是实现原子级制造过程精准控制、保障原子级制造精度的必要手段。建议聚焦极端服役环境下原子级制造中缺陷、形位误差等对器件性能的影响机制等科学问题,重点研究加工质量/产品性能指标的综合评价方法,形成加工质量/服役性能和原子级制造之间的双馈模式,提升原子级制造稳定性及可控性。

4 结 语

随着微/光电子、先进核能、航空航天等领域的快速发展,先进芯片和高端光学元件等核心零部件的表面/结构制造精度已逐渐迈入原子量级,而我国在这些国家战略领域的复杂构件高性能制造方面仍面临巨大挑战,能源/显示等关键领域已进入下一代器件的国际竞争阶段,器件性能依赖于异质/异构界面的原子层制造水平。因此,只有深入到原子尺度,研究与揭示原子级材料可控去除/生长机理以及形性调控机制,系统研发结构件表面和异质/异构界面的原子层制造新机理、新方法及新装备,才能解决复杂构件高性能制造的“卡脖子”难题,实现战略领域高性能装备的技术突破。

针对原子级制造的重要基础科学问题,提出了未来 5~10 年原子级制造基础理论及工艺方法研究的发展目标及资助重点。未来还需瞄准原子级制造研究前沿,结合高端芯片、航空航天超强性能关键零部件、超构光学器件和超高精度仪器等重大需求,进一步对原子级制造的总体科学目标进行凝练,强化多学科交叉,促进原始创新。重点围绕原子层制造、原子/分子团簇到宏观器件跨尺度制造、原子级制造在线检测与调控等方面内容开展基础研究,给信息、航空航天、生物医药、超精密仪器等领域的技术变革和产业发展提供坚实的理论支撑。

致谢 感谢赵纪军教授在论文撰写过程给予的宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] 王国彪, 赖一楠, 卢秉恒, 等. “纳米制造的基础研究”重大研究计划结题综述. 中国科学基金, 2019, 33(3): 261—274.
- [2] 2022中国原子制造高峰论坛. [2023-08-23]. https://news.ycwb.com/2022-11/18/content_41179158.htm.
- [3] Atoms to Product (A2P). [2023-08-23]. <https://www.darpa.mil/program/atoms-to-product>.
- [4] Gerrer L, Ling SL, Amoroso SM, et al. From atoms to product reliability: toward a generalized multiscale simulation approach. *Journal of Computational Electronics*, 2013, 12(4): 638—650.
- [5] 《日本制造业白皮书(2018)》. [2023-08-24]. <https://www.innovation4.cn/library/r29267>.
- [6] Xie FQ, Peukert A, Bender T, et al. Quasi-solid-state single-atom transistors. *Advanced Materials*, 2018, 30(31): e1801225.
- [7] 《美国先进制造业国家战略》. National Strategy for Advanced Manufacturing. [2023-08-23]. <https://www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2022/10/>.
- [8] 王国彪, 邵金友, 宋建丽, 等. “纳米制造的基础研究”重大研究计划研究进展. *机械工程学报*, 2016, 52(5): 68—79.
- [9] Fang FZ, Zhang N, Guo DM, et al. Towards atomic and close-to-atomic scale manufacturing. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2019, 1: 012001.
- [10] 高鸿钧. “原子制造:基础研究与前沿探索”专题编者按. *物理学报*, 2021, 70(2): 37.
- [11] Zheng ZY, Zhang L, Song WJ, et al. Gallium nitride-based complementary logic integrated circuits. *Nature Electronics*, 2021, 4: 595—603.
- [12] Chen L, Wen JL, Zhang P, et al. Nanomanufacturing of silicon surface with a single atomic layer precision via mechanochemical reactions. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1542.
- [13] Xu J, Luo JB, Lu XC, et al. Progress in material removal mechanisms of surface polishing with ultra precision. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1687—1693.
- [14] Graepner P, Kuerz P, Van Schoot J, et al. High NA EUV optics: preparing lithography for the next big step. *International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2021*. Online Only, USA. SPIE, 2021: 11854.
- [15] Kim KS, Ji YJ, Nam Y, et al. Atomic layer etching of graphene through controlled ion beam for graphene-based electronics. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 2462.
- [16] Lee WO, Kim KH, Kim DS, et al. Selective etching of silicon nitride over silicon oxide using ClF_3/H_2 remote plasma. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 5703.
- [17] Liu X, Jia SF, Yang M, et al. Activation of subnanometric Pt on Cu-modified CeO_2 via redox-coupled atomic layer deposition for CO oxidation. *Nature Communications*, 2020, 11: 4240.
- [18] Lim BS, Rahtu A, Gordon RG. Atomic layer deposition of transition metals. *Nature Materials*, 2003, 2(11): 749—754.
- [19] Aspiotis N, Morgan K, März B, et al. Large-area synthesis of high electrical performance MoS_2 by a commercially scalable atomic layer deposition process. *NPJ 2D Materials and Applications*, 2023, 7: 18.
- [20] Materials EN. The interface is still the device. *Nature Materials*, 2012, 11(2): 91.
- [21] Kiczynski M, Gorman SK, Geng H, et al. Engineering topological states in atom-based semiconductor quantum dots. *Nature*, 2022, 606(7915): 694—699.
- [22] Zylstra AB, Kritcher AL, Hurricane OA, et al. Experimental achievement and signatures of ignition at the National Ignition Facility. *Physical Review E*, 2022, 106(2): 025202.
- [23] 陈逢军, 尹业青, 胡天. 仿形喷嘴磨料射流抛光微结构仿真及试验研究. *机械工程学报*, 2022, 58(15): 177—187.
- [24] Zhu WL, Beaucamp A. Compliant grinding and polishing: a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2020, 158: 103634.
- [25] Jena P, Sun Q. Super atomic clusters: design rules and potential for building blocks of materials. *Chemical Reviews*, 2018, 118(11): 5755—5870.
- [26] Yin JF, Xiao HY, Xu PD, et al. Polymer topology reinforced synergistic interactions among nanoscale molecular clusters for impact resistance with facile processability and recoverability. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2021, 60(41): 22212—22218.
- [27] 宋凤麒, 戴庆, 张敏昊. 原子制造 未来在途. *光明日报*, 2023-7-20(16).
- [28] 宋凤麒, 戴庆. 原子制造: 物质科学的未来技术. *物理*, 2023, 52(6): 371—380.
- [29] Tajaddodianfar F, Reza Moheimani SO, Randall JN. Scanning tunneling microscope control: a self-tuning PI controller based on online local barrier height estimation. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2019, 27(5): 2004—2015.
- [30] Yadav PS, Yadav RK, Agrawal S, et al. *Ab initio* study of the physical properties of binary Si_mC_n ($m+n \leq 5$) nanoclusters. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2006, 18(31): 7085—7102.
- [31] Wang H, Lu WC, Sun J, et al. Theoretical investigation on the structures of silicon and carbon hetero clusters. *Chemical Physics Letters*, 2006, 423(1/2/3): 87—93.
- [32] Bertolus M, Finocchi F, Millie P. Investigating bonding in small silicon-carbon clusters: exploration of the potential energy surfaces of Si_3C_4 , Si_4C_3 , and Si_4C_4 using *ab initio* molecular dynamics. *The Journal of Chemical Physics*, 2004, 120(9): 4333—4343.
- [33] Pradhan P, Ray AK. A density functional study of the structures and energetics of small hetero-atomic silicon-carbon nanoclusters. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 2005, 716(1/2/3): 109—130.
- [34] Van Orden A, Giesen TF, Provencal RA, et al. Characterization of silicon-carbon clusters by infrared laser spectroscopy: the $\nu_3(\sigma_u)$ band of linear Si_2C_3 . *The Journal of Chemical Physics*, 1994, 101(12): 10237—10241.

- [35] González-Herrero H, Gómez-Rodríguez JM, Mallet P, et al. Atomic-scale control of graphene magnetism by using hydrogen atoms. *Science*, 2016, 352(6284): 437—441.
- [36] Artem'ev AV, Liu CW. Recent progress in dichalcophosphate coinage metal clusters and superatoms. *Chemical Communications*, 2023, 59(47): 7182—7195.
- [37] Higaki T, Liu C, Zeng CJ, et al. Controlling the atomic structure of Au₃₀ nanoclusters by a ligand-based strategy. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2016, 55(23): 6694—6697.
- [38] Fan JA, Wu C, Bao K, et al. Self-assembled plasmonic nanoparticle clusters. *Science*, 2010, 328 (5982): 1135—1138.
- [39] Lu SQ, Xie L, Lai K, et al. Plasmonic evolution of atomically size-selected Au clusters by electron energy loss spectrum. *National Science Review*, 2020, 8 (12): nwaa282.
- [40] Jin Y, Zhang C, Dong XY, et al. Shell engineering to achieve modification and assembly of atomically-precise silver clusters. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50 (4): 2297—2319.
- [41] Jing WT, Shen H, Qin RX, et al. Surface and interface coordination chemistry learned from model heterogeneous metal nanocatalysts: from atomically dispersed catalysts to atomically precise clusters. *Chemical Reviews*, 2023, 123 (9): 5948—6002.
- [42] Liu ZJ, Jiang YL, Zhang ZX, et al. Synthesis of noble/non-noble metal alloy nanostructures via an active-hydrogen-involved interfacial reduction strategy. *Nature Synthesis*, 2023, 2: 119—128.
- [43] Radha B, Esfandiar A, Wang FC, et al. Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision. *Nature*, 2016, 538(7624): 222—225.
- [44] Sunku SS, Ni GX, Jiang BY, et al. Photonic crystals for nano-light in moiré graphene superlattices. *Science*, 2018, 362(6419): 1153—1156.
- [45] Bian T, Gardin A, Gemen J, et al. Electrostatic co-assembly of nanoparticles with oppositely charged small molecules into static and dynamic superstructures. *Nature Chemistry*, 2021, 13(10): 940—949.
- [46] Liu JL, Shi WX, Ni B, et al. Incorporation of clusters within inorganic materials through their addition during nucleation steps. *Nature Chemistry*, 2019, 11 (9): 839—845.
- [47] Wu ZN, Yao QF, Chai OJH, et al. Unraveling the impact of gold (I)-thiolate motifs on the aggregation-induced emission of gold nanoclusters. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2020, 59(25): 9934—9939.
- [48] Li Y, Zhang XF, Man Y, et al. Interfacial passivation enormously enhances electroluminescence of triphenylphosphine Cu₄I₄ cube. *Advanced Materials*, 2023, 35(36): e2302984.
- [49] Zhang N, Li Y, Han SY, et al. Cluster light-emitting diodes containing copper iodine cube with 100 % exciton utilization using host-cluster synergy. *Angewandte Chemie (International Ed in English)*, 2023, 62(27): e202305018.
- [50] Yu J, Lee CH, Bouilly D, et al. Patterning superatom dopants on transition metal dichalcogenides. *Nano Letters*, 2016, 16(5): 3385—3389.
- [51] Li Q, Kulikowski J, Doan D, et al. Mechanical nanolattices printed using nanocluster-based photoresists. *Science*, 2022, 378(6621): 768—773.
- [52] Zhang KK, Wang C, Zhang MH, et al. A Gd@C₈₂ single-molecule electret. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(12): 1019—1024.
- [53] Kalf FE, Rebergen MP, Fahrenfort E, et al. A kilobyte rewritable atomic memory. *Nature Nanotechnology*, 2016, 11: 926—929.
- [54] Chen RT, Ren ZF, Liang Y, et al. Spatiotemporal imaging of charge transfer in photocatalyst particles. *Nature*, 2022, 610(7931): 296—301.
- [55] Guo Z, Wan Y, Yang MJ, et al. Long-range hot-carrier transport in hybrid perovskites visualized by ultrafast microscopy. *Science*, 2017, 356(6333): 59—62.
- [56] Mo MZ, Chen Z, Li RK, et al. Heterogeneous to homogeneous melting transition visualized with ultrafast electron diffraction. *Science*, 2018, 360(6396): 1451—1455.
- [57] Padmanabhan P, Buessen FL, Tutchton R, et al. Coherent helicity-dependent spin-phonon oscillations in the ferromagnetic van der Waals crystal CrI₃. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4473.
- [58] Yuan L, Chung TF, Kuc A, et al. Photocarrier generation from interlayer charge-transfer transitions in WS₂-graphene heterostructures. *Science Advances*, 2018, 4(2): e1700324.
- [59] Zewail AH. Laser femtochemistry. *Science*, 1988, 242 (4886): 1645—1653.
- [60] Zewail AH. Four-dimensional electron microscopy. *Science*, 2010, 328(5975): 187—193.
- [61] Yu YW, Jiang L, Cao Q, et al. Pump-probe imaging of the fs-ps-ns dynamics during femtosecond laser Bessel beam drilling in PMMA. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32728—32735.
- [62] Carbone F, Kwon OH, Zewail AH. Dynamics of chemical bonding mapped by energy-resolved 4D electron microscopy. *Science*, 2009, 325(5937): 181—184.
- [63] Yoshida S, Aizawa Y, Wang ZH, et al. Probing ultrafast spin dynamics with optical pump-probe scanning tunnelling microscopy. *Nature Nanotechnology*, 2014, 9 (8): 588—593.
- [64] Cocker TL, Peller D, Yu P, et al. Tracking the ultrafast motion of a single molecule by femtosecond orbital imaging. *Nature*, 2016, 539(7628): 263—267.
- [65] Hansma PK, Schitter G, Fantner GE, et al. High-speed atomic force microscopy. *Science*, 2006, 314 (5799): 601—602.
- [66] Jiang L, Wang AD, Li B, et al. Electrons dynamics control by shaping femtosecond laser pulses in micro/nanofabrication: modeling, method, measurement and application. *Light, Science & Applications*, 2018, 7: 17134.

- [67] Lian YL, Jiang L, Sun JY, et al. Ultrafast quasi-three-dimensional imaging. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2023, 5(4): 045601.
- [68] Giessibl FJ, Hembacher S, Bielefeldt H, et al. Subatomic features on the silicon (111)-(7x7) surface observed by atomic force microscopy. *Science*, 2000, 289 (5478): 422—426.
- [69] Liu H, Wang JC, Liu YS, et al. Visualizing ultrafast defect-controlled interlayer electron-phonon coupling in van der waals heterostructures. *Advanced Materials*, 2022, 34(33): e2106955.
- [70] Eigler DM, Schweizer EK. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature*, 1990, 344: 524—526.
- [71] Gross L, Mohn F, Liljeroth P, et al. Measuring the charge state of an adatom with noncontact atomic force microscopy. *Science*, 2009, 324(5933): 1428—1431.
- [72] Gao WP, Addiego C, Wang H, et al. Real-space charge-density imaging with sub-ångström resolution by four-dimensional electron microscopy. *Nature*, 2019, 575 (7783): 480—484.
- [73] Ferrer Orri J, Doherty TAS, Johnstone D, et al. Unveiling the interaction mechanisms of electron and X-ray radiation with halide perovskite semiconductors using scanning nanoprobe diffraction. *Advanced Materials*, 2022, 34 (18): e2200383.

Key Basic Scientific Issues in Atomic Level Manufacturing

Jianbin Luo ^{1*}	Dongming Guo ²	Huayong Yang ³	Xin Ye ^{4*}	Linmao Qian ⁵
Bingfeng Ju ³	Lan Jiang ⁶	Jinyou Shao ⁷	Zhenyu Zhang ²	Lei Chen ⁵
Yuanliu Chen ³	Jie Hu ⁶	Xiangming Li ⁷	Junyuan Feng ²	Weina Han ⁶
Xinfeng Tan ¹	Guoxin Xie ¹	Yinan Lai ⁴	Hongyan Miao ⁴	Qidong Wang ⁴

1. State Key Laboratory of Tribology in Advanced Equipment, Tsinghua University, Beijing 100084

2. State Key Laboratory of High-performance Precision Manufacturing, Dalian University of Technology, Dalian 116024

3. State Key Laboratory of Fluid Power and Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310058

4. Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

5. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031

6. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

7. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Abstract The manufacturing technology is gradually advancing towards the atomic level. Atoms, as the smallest particles in chemical reactions, are the smallest units of matter. Although atoms can be divided into smaller atomic nuclei, electrons, etc., from a manufacturing perspective, atomic level manufacturing technology can be regarded as the lowest level technology of manufacturing and a new manufacturing paradigm after micro and nano manufacturing, which can push manufacturing accuracy and product performance to the extreme level. It is a supporting technology for winning the competition in the field of national strategic development, and also an important cutting-edge direction for promoting cross generational upgrading of major equipment for national security and economy. This article summarizes the research status, development trends, opportunities, and challenges of atomic level manufacturing based on the 330th Shuangqing Forum. It summarizes the focus issues and key scientific issues that need to be addressed in atomic level manufacturing in the next 5-10 years, and explores the cutting-edge development directions and science funding strategies in related fields.

Keywords atomic level manufacturing; atomic layer manufacturing; cluster and device manufacturing; atomic level precision manufacturing; atomic level measurement and characterization; interdisciplinary intersection

(责任编辑 刘敏 姜钧译)

* Corresponding Authors, Email: luojb@tsinghua.edu.cn; yexin@nsfc.gov.cn