

· 研究进展 ·

“纳米制造的基础研究”重大研究计划结题综述

王国彪¹ 赖一楠^{1*} 卢秉恒² 雒建斌³ 黎明¹
刘红忠² 刘磊⁴ 叶鑫^{1,5}

(1. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085;
2. 西安交通大学 机械工程学院, 西安 710049; 3. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084;
4. 东南大学 机械工程学院, 南京 211189; 5. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

[摘要] 国家自然科学基金委员会重大研究计划“纳米制造的基础研究”历时8年于2018年完成结束评估。重大研究计划实施过程中,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集成成果。本文概述了该计划在亚纳米材料去除机理、纳米尺度结构成形、跨尺度批量化制造的原理与方法、系列纳米制造装备国产化等关键技术上所取得的一系列具有重大国际影响的突破性进展。文中展望了纳米制造研究的发展态势,提出了未来关注的重点学术方向。

[关键词] 纳米制造; 纳米精度; 纳米尺度; 跨尺度; 纳米制造装备; 基金委重大研究计划

21世纪,纳米制造将成为世界发达国家技术竞争的制高点之一。生物分子马达、纳米电动机、纳米机器人、分子光电器件、纳米电路、纳米传感器、纳米智能器件和系统不断在实验室涌现,展示了诱人的应用前景,吸引了各国政府、科技界和产业界的广泛关注。作为纳米科学与技术走向实际应用的桥梁,纳米制造是基于物理/化学/生物原理的制造方法,主要研究纳米结构生长、加工、改性、组装等制造新方法与新工艺,以及纳米尺度制造过程中结构与器件的性能演变规律。纳米制造工艺与技术的发展使制造对象由宏观进入到微观和纳观,不仅大大拓宽了制造技术的尺度范围,开辟了新的领域,大幅度提升了制造的精度和质量,也发展了新的制造理论和方法,对促进学科交叉起到积极的推动作用,使制造科学的研究更为深入和完善。物理、化学等基础科学的研究成果以及信息技术的进步带动了纳米制造工艺与技术的发展,而纳米制造工艺与技术反过来也推动了相关学科的进一步深入发展。简言之,纳米制造基础研究的任务就是要把纳米科学的最新发现转变为前沿制造的核心技术。

为提升我国纳米制造的源头创新能力,国家自然科学基金委员会于2009年正式启动了“纳米制造的

基础研究”重大研究计划^[1,2]。遵循“有限目标、稳定支持、集成升华、跨越发展”的总体思路,该计划瞄准学科发展前沿、面向国家重大战略需求,旨在针对纳米精度制造、纳米尺度制造和跨尺度制造中的基础科学问题,通过机械学与制造科学、物理学、化学、生物学、材料科学、信息科学等相关学科的交叉与融合,探索纳米制造的新方法与新工艺,揭示纳米尺度与纳米精度下加工、成形、改性和跨尺度制造中的尺度效应、表面/界面效应等规律,阐明物质结构演变机理与器件功能的形成规律,探索制造过程由宏观进入微观和纳观时,能量、运动与物质结构和性能间的作用机理与转换规律,建立纳米制造的基础理论及工艺与装备的基本原理,以及纳米制造过程的精确表征与计量方法,为实现纳米制造的一致性与批量化奠定基础。

“纳米制造的基础研究”重大研究计划实施周期8年(2010—2017),总经费约1.9亿元人民币,共支持集成项目4项、重点支持项目24项、培育项目121项和战略研究项目4项。该重大研究计划取得了丰硕的学术成绩:在*Nature Nanotechnology*, *Nature Materials*, *Nature Physics*, *Nature Energy*等SCI刊源杂志上发表论文3813篇,其中,91篇论文入选ESI高被引论文;授权发明专利935件(含美国/欧

洲专利 11 件), 出版中英文专著 66 部; 基于研究成果形成自主装备 17 台/套; 多项突出性研究成果获得奖励, 其中国家级奖励 12 项(包括国家自然科学二等奖 6 项、国家技术发明二等奖 5 项、国家科技进步二等奖 1 项)、何梁何利奖 2 项、国防科技创新团队奖 1 项、省部级奖励 21 项等; 为国家培养了大量科研人才: 6 人当选中国科学院院士, 2 人当选中国工程院院士, 2 人当选美国机械工程师协会(ASME)会士, 2 人当选电气和电子工程师协会(IEEE)会士, 18 人获得国家杰出青年科学基金项目资助, 15 人获得“长江学者”称号, 并培养博士后、硕/博士研究生 974 名。

1 纳米精度: 亚纳米级材料去除机理

纳米精度制造主要研究宏观结构的纳米精度制造的新原理、新方法与新工艺。研究人员在纳米精度表面和纳米精度复杂型面加工等制造领域发展了一系列的纳米精度制造方法, 以实现表面纳米精度的无损伤、高效、可控加工等。面向信息、国防、航天等领域高端装备制造的重大需求, 以我国已具备的集成电路(IC)制造、光学制造等高端制造装备和制造工艺为载体, 探索了亚纳米精度制造的基础科学问题。通过关键理论与技术的突破, 系统地建立了亚纳米精度表面制造的工艺方法, 提升了我国在纳米精度制造前沿领域的研究水平。

1.1 原子层级材料去除理论模型与方法

研究人员从损伤机理与控制理论、原子尺度材料去除理论、全频段亚纳米面形精度生成理论与控制方法的角度, 系统地解决了表面制造精度由纳米向亚纳米突破的共性理论问题, 并应用于芯片制造、强激光反射镜制造等国家战略性领域^[3]。针对晶圆减薄中如何减少缺陷、降低损伤层厚度和提高减薄效率的难题, 提出了金刚石纳米切深高速划擦实验方法, 研制了实际磨削速度达到 15 m/s 的高速划擦实验装置以及具有纳米曲率半径的金刚石工具, 确定了实现材料有效去除和材料延性域去除的临界加工条件, 并通过建立单颗粒划擦损伤和磨削损伤之间的关联关系, 提出了磨削损伤控制方法^[4]; 建立了材料去除可控模型, 分析了亚纳米级材料去除的稳定性和可控性, 实现了材料可控柔度的亚纳米级稳定性去除, 如图 1(a)^[5]。

研究人员研究了亚纳米面形精度控制理论, 形成了全频段亚纳米精度误差收敛的方法, 实现光刻物镜全频段误差优于 0.3 nm, 研究了工具特性、微区材料特性对亚纳米精度表面生成的影响规律, 建立了去除函数非线性模型与驻留时间补偿算法, 如图 1(b); 揭示了离子溅射过程中原子/分子材料去除、流动与添加的共生机理, 根据光学性能对面形误差进行划分, 提出了基于磁流变、光顺和离子束等可

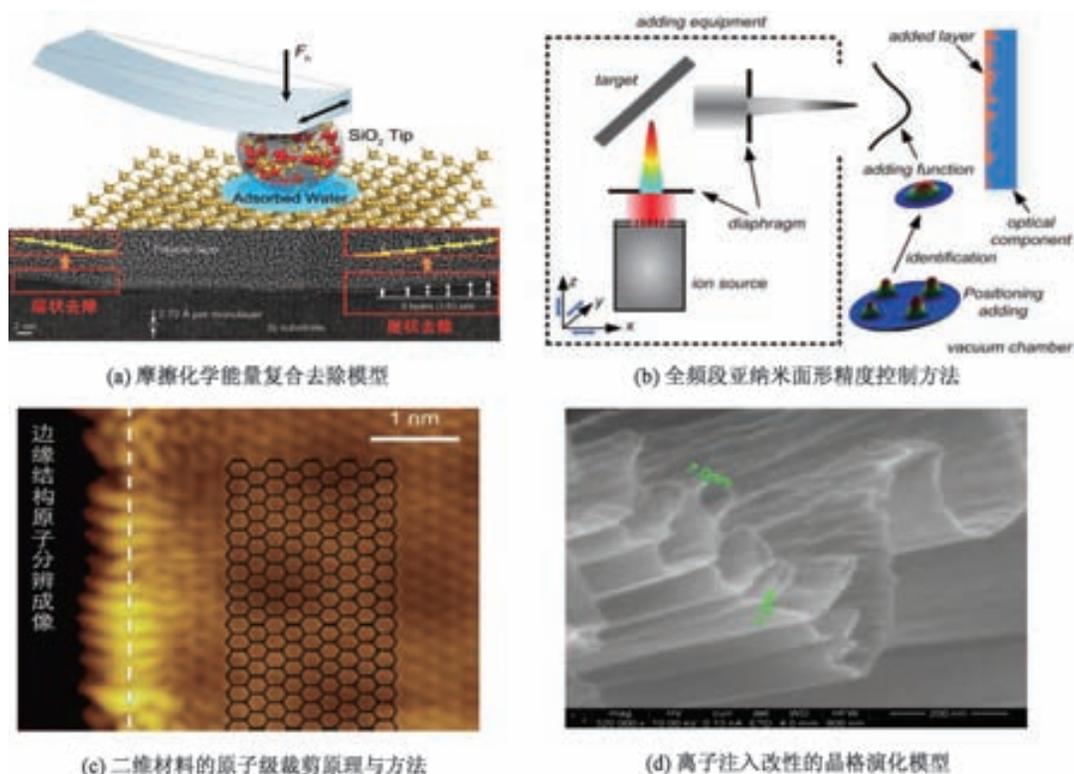


图 1 代表性的纳米精度制造方法

控柔体抛光技术的组合抛光工艺,实现了光刻物镜光学零件的纳米精度制造^[6]。利用氢等离子体各向异性刻蚀,在氧化硅衬底上采用自上而下的加工方法得到了具有 Zigzag 原子级平整边界的双层及多层的各种石墨烯纳米结构;研究了单层石墨烯的各向异性刻蚀,在六方氮化硼上得到了具有 Zigzag 原子级平整边界的单层石墨烯纳米结构,并实现了 5 nm 以下极小尺寸石墨烯纳米带的可控加工,如图 1(c)^[7,8]。

1.2 离子注入改性的界面演变机理

为实现材料表面原子级材料去除,研究人员提出了采用离子注入的材料界面改性原理与方法,深入研究了离子注入改性的界面演变机制,发现离子注入非晶化能够大幅度提高晶体表面的纳米切削性能,如图 1(d)。通过特定元素、能量、剂量的离子组合多次注入,逐次实现指定区域内的局部改性。对于相同的改性目标,优化后的多次注入剂量可降低至单次注入的 1/5,显著提高效率与可操作性。将该方法应用于晶体硅,实现了 3 μm 表面内材料的非晶化;在切削测试中材料呈现了良好的塑性变形过程,使得典型脆性材料(如,硅)以类似于金属剪切的方式被去除;脆塑转变深度由 40 nm 提升至最大 470 nm。在改性硅表面采用单晶金刚石刀具切削微结构阵列,表面无裂纹,刃口磨损显著降低,微沟槽底部粗糙度控制在 1.6—3.3 nm,分布均匀,验证了该方法的有效性^[9,10]。

研究人员发现了含有不同抛光活性元素(如 Ce、Cu、Fe 等)的新型多孔磨粒对抛光液具有更大的吸附量,可促进双氧水分解为羟自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子自由基($\text{O}_2^- \cdot$),显著提高了化学机械抛光(CMP)化学活性,从而提高抛光速率。独特多孔结构的引入降低了颗粒硬度,从而明显降低了抛光损伤,在保证无界面损伤的前提下实现了高表面质量、高效率平坦化,实现了低应力柔性平坦化。研制了具有“高精度、高速率”抛光性能的多孔磨粒,以硬盘基片为抛光对象,实心氧化硅磨粒抛光后,表面粗糙度(Ra)为 0.419 nm;多孔氧化硅/氧化铁磨粒(铁含量 10%)抛光后,Ra 为 0.187 nm,表面质量得到明显提高^[11,12]。

1.3 纳米精度化学机械抛光装备原理与制造

研究人员探索了大尺寸硅片全局亚纳米表面粗糙度的平坦化原理与工艺方法,通过晶圆全区域精确的压力控制、精确的抛光液配给控制、以及抛光垫实时修整与形态控制,可精确控制晶圆表面处于稳

定的化学-机械协同材料去除状态,从而实现全尺寸亚纳米粗糙度表面制造^[13];提出了采用软磨料砂轮的机械化学磨削(MCG)新工艺,研制了用于磨削硅片和蓝宝石基片的金刚石砂轮和软磨料砂轮。发现了软磨料砂轮机械化学磨削硅片时材料去除和低损伤表面形成机理,研究了金刚石砂轮和软磨料砂轮磨削工艺参数对材料去除率、表面粗糙度、亚表面损伤和表面变形的影响规律。提出了高效低损伤减薄加工新工艺,软磨料砂轮磨削硅片材料去除率为 CMP 的 2 倍以上,Ra 为 0.5 nm,非晶层厚度 16 nm,表面质量接近 CMP 加工表面,减薄后硅片厚度 $<40 \mu\text{m}$ ^[14]。

针对极大规模集成电路(ULSI)制造中含有低强度 Cu/Low-k 结构的大尺寸硅片铜互连表面平坦化难题,提出了利用距离敏感刻蚀加工原理实现工件表面的无应力平坦化加工,发展了三种原创性的平坦化新方法:基于扩散控制反应的电致化学抛光方法、基于氧化还原聚合物膜的膜约束刻蚀抛光方法、以及基于光诱导约束刻蚀的化学抛光方法^[15]。通过对三种方法基本原理的研究,从理论和实验上证明了三种新方法的可行性。通过大面积超平滑电极和平坦化原型系统的研制,成功实现了大幅面工件的平坦化加工。

2 纳米尺度:纳米结构成形新方法

纳米尺度制造是基于物理/化学/生物原理的制造方法,主要研究纳米结构生长、加工、改性、组装等纳米制造新方法与新工艺,以及纳米尺度制造过程中结构与器件的性能演变规律。近年来,我国重点着眼于基于物理/化学/生物等原理的纳米尺度制造理论、方法、技术与应用探索研究,发展了以纳米压印、纳米切削等方法为核心的纳米尺度制造工艺,并取得了一些可喜的研究成果,初步形成了纳米尺度制造理论与方法,显著提升了制造学科的研究水平,为高精度传感器、高效率微能源、集成微纳系统、后摩尔时代电子器件和集成电路的研究和应用奠定了基础。

2.1 第三代纳米压印理论模型与方法

研究人员针对常规压印工艺中机械力引起形变、脱模力降低复型精度的瓶颈问题,原创性地发明了电毛细辅助纳米压印技术,如图 2(a),从机理上解决了纳米结构填充的难题,成为国际上与紫外压印技术、热(激光)压印技术并列的新一代纳米压印技术,实现了最小线宽 15 nm、深宽比大于 15 的结构

制造,为纳米结构的批量化和一致性制造提供了技术支持^[16,17]。揭示了电毛细辅助纳米压印中电润湿的界面电荷行为模式和受限电荷对接触角的影响规律,提出了通过电场时序和振幅控制接触角的新方法,突破了传统电润湿理论中饱和接触角的限制,将流体润湿特性提高了 2.9 倍,填充驱动力提高 4.3 倍,同时阐明了电辅助纳米压印技术的填充机理,建立了电场驱动填充过程的物理模型^[18,19],并基于此原理实现了非球面微透镜阵列的规模化制造。通过研究电毛细辅助纳米压印中的纳米结构的形成性机制,研究了聚合物材料分子链在纳米模板内择优取向行为,在压印成形过程中实现了 PVDF 的压电 β 晶相及结晶度的原位增强,为柔性电子及非硅 MEMS 的直接压印制造提供了新途径^[20]。

研究人员创新性地提出了具有自主知识产权的约束刻蚀剂层技术(CELT),如图 2(b)^[21],发明了纳米结构模板调制成形新方法,将电化学反应原理与模板约束成形技术相结合,实现了半导体材料的电化学直接压印成形,缩短了半导体材料成形的工艺链,拓展了纳米压印技术的应用^[22,23]。发现并阐释了接触电势诱导电化学腐蚀的现象和原理,发明了电化学直接纳米压印技术。该技术利用模板金属材料与半导体材料在接触区域产生接触电势,使半导体由于空穴的积累发生阳极氧化,实现了半导体

材料的可控去除^[24]。

2.2 结构自约束的高精度可控制造

研究人员利用自约束纳米加工原理,实现了不依赖于纳米光刻技术的纳米线批量化制造。提出利用(111)绝缘衬底上的硅材料(SOI)实现硅纳米线阵列的晶圆级可控制备,整套工艺与 CMOS 工艺完全兼容,工艺一致性和可控性大幅度提升,成品率超过 90%,器件信噪比显著增强,为硅纳米线阵列的应用奠定了坚实的基础;根据(111)硅片上{111}晶面族的分布特点,用单晶硅各向异性腐蚀的方法先制备宽度为几百纳米的单晶硅薄壁结构,再通过自限制氧化技术将薄壁的特定区域转化为单晶硅纳米线结构。通过采用 SOI 材料进一步提升硅纳米线阵列的圆片级制备的可控性。采用该方法制备了长度从 5 μm 到 40 μm ,宽度从 25 nm 到 100 nm 的悬空单晶硅纳米线阵列器件。由于阵列化硅纳米线的直径具有高度均一性,相对于单根硅纳米线器件,硅纳米线阵列器件的检测信号更强、更稳定,同时信噪比也得到了显著增强,其相关参数大大优于目前报道的硅纳米线器件^[25-27]。

研究人员通过外场诱导实现了特征尺度 ~ 200 nm、结构空间取向变化(0 \sim 180 度的折叠和弯曲)的三维结构微纳制造^[28,29],如图 2(c);发展了一种基于聚焦离子束辐照的折叠应变加工三维金属

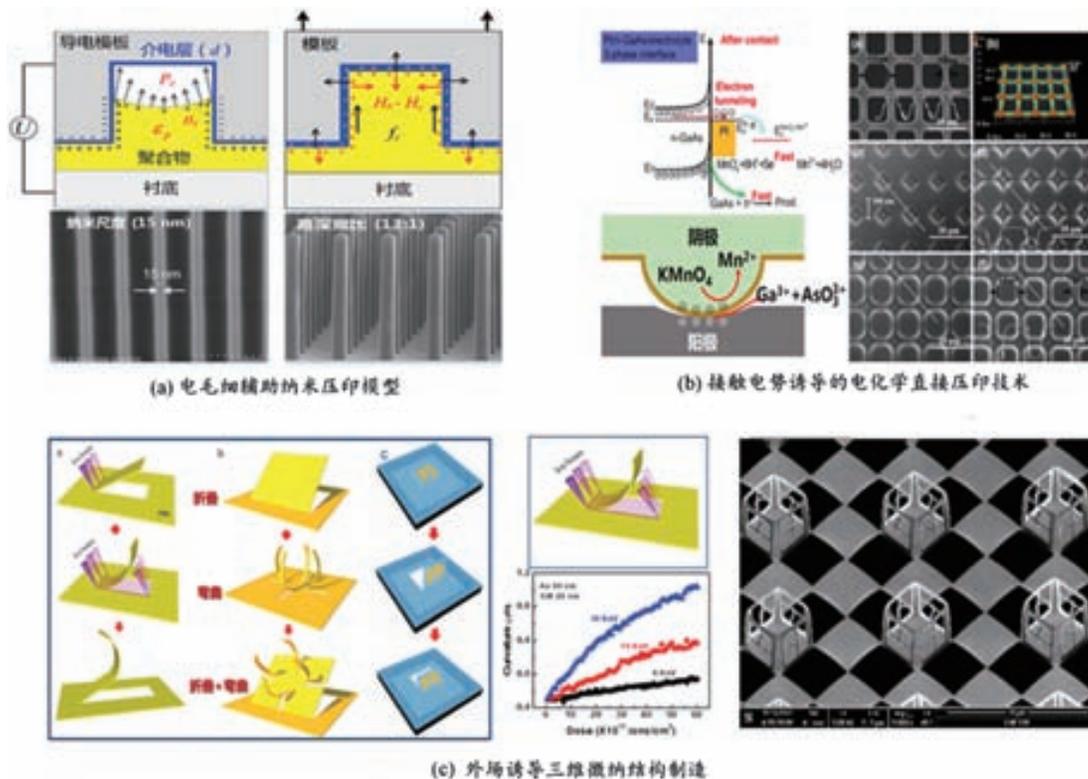


图 2 代表性的纳米尺度制造方法

纳米结构方法,可对平面内二维金属薄膜材料进行剪切和折叠,经过图形设计、平面剪切和多次有序折叠,实现了金属纳米结构单元在空间、尺寸、周期与几何形貌可调制的大面积可控加工。该方法具有材料普适性优势,适合于其他介质及氧化物薄膜三维微纳结构的折叠加工。通过折叠加工,还可以将二维金属结构单元折叠的介质结构复合形成介质薄膜/金属结构单元复合三维结构,极大拓展了折叠结构的材料组合功能,也拓展了其在光学调控领域的应用空间^[30-33]。

3 跨尺度:大面积微纳结构制造新原理

面向新能源、航空航天、国防等领域对难加工材料三维复杂曲面微纳结构的制造需求,发展了激光微纳制造新方法;在民生领域针对柔性显示器、柔性薄膜太阳能电池、柔性传感器等柔性电子器件需求的提升,在大面积纳米结构制造技术方面取得多项突破,研究了纳、微、宏互连存在的尺度效应,实现了器件性能精确调控,解决了大面积纳米结构高效、高精度、低成本制造的技术难题。

3.1 电子动态调控的超快激光加工新原理与新方法

在高能束纳米制造技术领域,特别是在超快激光加工、离子束加工、电子束加工等领域,我国具备较强的国际竞争力。如图3(a),研究人员建立了超快激光与材料相互作用的多空间尺度理论模型(亚纳米到毫米),通过超快激光时空整形,对电子激发/电离/复合过程、局部瞬时材料特性、材料相变过程和最终形成性过程进行调控^[34-36]。预测了飞秒激光烧蚀形状及表面纹理结构,并成功预测了存在纳米级的超衍射极限稳定加工深度区域;提出并建立了“飞秒-皮秒-纳秒-毫秒”的多时间尺度实时观测系统,实现了对制造过程中电子动态的实时观测,为制造新方法提供了直接的实验证据;在秒时间尺度,利用CCD摄像实时拍摄了激光加工高深径比微孔过程;在毫秒尺度,用增强CCD观测了微孔形成中的等离子动态过程;在纳秒尺度,采用飞秒激光双脉冲诱导击穿光谱(fs-LIBS)系统观测了等离子体的喷发过程;在皮秒时间尺度,采用泵浦-探测显微系统观测了激光诱导等离子体/冲击波的产生及演化过程;在飞秒时间尺度观测了飞秒激光脉冲的动态传播过程^[37,38]。

研究人员提出并实现了超快激光时空整形微纳加工新原理新方法;通过协同优化时域/空域整形超

快激光调控加工过程,大幅提高了加工质量、效率、精度、一致性等^[39,40]。针对国家某重大专项中核心结构微孔加工的技术挑战,利用超快激光时空整形微纳加工新方法,通过空间整形改变超快激光光场空间分布,控制瞬时局部电子密度分布及其相变过程,优化和调节等离子体喷发过程,解决了大深径比(1000:1,直径1.5 μm)、高一一致性(25万孔/平方厘米)、高质量(无微裂纹/重铸层)、高效率(单光束100孔/秒)、极小化残留物等微孔制备难题。

3.2 微纳3D直写技术

研究人员提出了基于结构光场的微纳3D直写原理与方法,采用位相光+空间光调制、高速率数据刷新的结构光场技术,可实现在任意型面上写入任意复杂结构,突破了传统干涉系统只能制造周期结构的重大难题和技术瓶颈,特征结构接近 $\lambda/4$,355 nm波长下可实现100 nm—10 μm周期连续可调的微纳结构,且结构调节分辨率达到亚纳米量级^[41,42],写入速度 $>3000 \text{ mm}^2/\text{min}$,是电子束光刻速率的1000倍以上,是具有自主知识产权的纳米结构高效制备的创新方法,实现了大面积纳米结构的可控、快速和高精度制备,如图3(b);采用自主发明的空间-位相联合调制光学系统,支持纳米和微米结构混合直写^[43],突破了高精度微米级幅面双驱龙门结构研制、飞行同步曝光控制、3D导航自动聚焦等关键技术。

在基于探针的跨尺度纳米制造领域,研究人员分析了激光辐射作用下原子力显微镜(AFM)探针周围的光强分布、热效应、电磁效应、力效应,以及多场耦合效应,采用分子动力学仿真研究了碳纳米管焊接的动态过程,建立了光纤探针导光的激光-AFM集成实验系统,开展了激光与AFM探针复合后的纳米粒子聚集实验研究,验证了激光纳米焊接的可行性^[44,45];提出了动态组合纳米蘸笔印刷技术(CD-DPN),在一定程度上解决了AFM探针应用于纳米互连时重复定位不准,以及操作效率低等技术难题。采用该技术,纳米焊点的制造耗时可缩短到10 s左右(传统DPN平均耗时5—10 min以上);开展了力调制模式蘸笔纳米刻蚀技术(FM-DPN)的研究,得到了DPN结点直径与针尖-基底作用力之间的定量关系,用以实现焊锡材料的精确定量沉积,有效控制了DPN结点的尺寸,并进一步探索了不同维度纳米结构间的互连方法^[46-48]。

3.3 大幅面滚压印制造方法与技术

卷对卷滚压印制造技术是一种简单、低成本、高

通量复制微纳米尺度图形的有效制造方式,正逐步成为可替代传统光刻制造的纳米制造技术。如图3(c),研究人员围绕卷对卷滚压印制造技术的高精度微纳尺度压印模具、压印过程中的动力学分析等方面开展了一系列研究工作,为微纳结构的高通量、工业规模化制造的实现提供了一种新途径,满足了半导体和电子行业最新的发展需求^[49-54]。研究人员进行了柔性基底上纳米结构及器件的批量制造工艺验证,研发了UV纳米柔性压印拼接方法与系统,如图3(d),幅面达800 mm×600 mm,为大面积纳米模具的制备提供了新思路和解决方法,实现了50 nm—30 μm范围的制造工艺。该工艺在大尺寸透明导电膜等材料上获得了应用,缩短了纳米制造通向应用的距离。

研究人员提出了采用连续滚压印技术实现高档数控机床用量光栅精确制造的创新思路,探索了纳米结构三维轮廓精度对光栅测量系统的影响规律,建立了高精度反射式光栅的滚压印制造工艺,实现了1 μm栅距、±0.03 μm栅距精度的反射式光栅高精度制造,并开发了具有自主知识产权的光栅读数系统。开发的超长超精密金属光栅、超高精密反射式光栅、反射式角位移光栅传感器等高端系列产品获得了重要应用:二维光栅应用于中科院光电所

193 nm光刻机的镜组装配,圆光栅应用于中国计量院国家角度基准装置,立体光栅应用于中国工程物理研究院的大口径光栅位姿多自由度实时测量^[55-59]。

3.4 纳米混合印刷技术

研究人员研究开发了柔性透明导电膜的纳米材料混合印刷制造技术,突破了传统技术中导电性与透过率相互制约的问题,实现了方阻为0.03 Ω/□的金属网栅型柔性透明导电膜(透过率高达88%—90%)^[60,61]。该新型制造方法可以通过卷对卷方式进行连续、批量化制造,成本大大低于传统氧化铟锡(ITO)透明导电膜的制造方法。该透明导电膜不仅有望取代目前占主流的用于量产触摸屏的ITO透明导电材料,还可以拓展到其他应用领域;开发了高密度柔性电路的印刷纳米增材制造技术,利用沟槽填充纳米银种子层结合电镀/化学镀,实现了最细3—5 μm等线间距的超精细、高密度电路,加工线宽精度可达0.1 μm^[62,63]。

研究人员发明了功能结构的“纳米压印+增材填充”复合制造工艺,实现了微金属网格型透明导电膜(电极)、嵌入电子器件、柔性传感器的创新制造^[64]。为解决微纳米结构腔体功能材料填充不均的难题,提出了电场辅助纳米刮涂填充技术,利用电

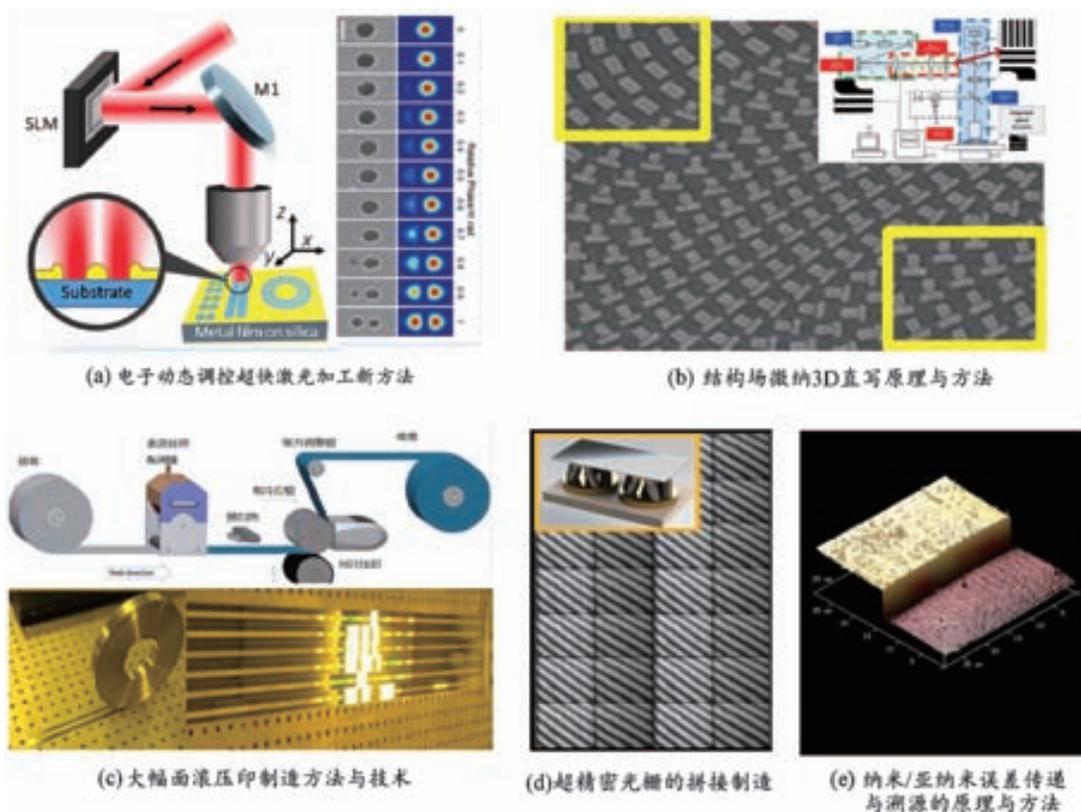


图3 跨尺度大面积微纳结构制造方法

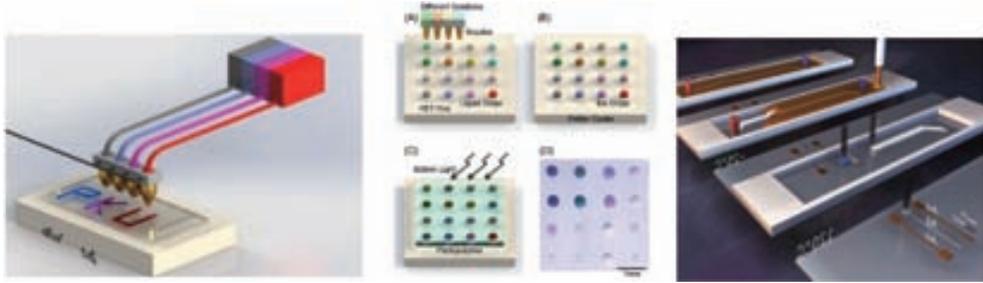


图4 三维冰微打印技术在生化检测微纳流控器件中的应用

润湿降低材料填充过程中的边缘效应和界面能量壁垒,实现了多种功能材料在高深宽比微纳米结构腔体内的可靠填充,阐明了电场辅助的型腔刮涂填充机理。采用“纳米压印+增材填充”技术制备的透明电容触控屏,已进入产业化应用,实现了无蚀刻大尺寸透明电极和柔性电路的绿色制造,颠覆了柔性电路需要蚀刻工艺的传统思路。其中,8—70寸透明电容触控屏已批量应用,8—70寸基于纳米银微网格的透明电容触控屏和基于微纳结构超薄导光膜已批量应用,产品被美国、欧盟和日本著名品牌(亚马逊、宏基、IYAMA、微软 Surface、HP、Sharp 等)采用;推出的智能信息交互终端威讯宝 VisionBoard (55寸、110寸双屏),实现了视频会议、上网、电视、白板、演示和娱乐等全功能特征。

3.5 纳米/亚纳米误差传递与溯源的原理与方法

研究人员制备了 8 nm、18 nm 和 44 nm 的系列台阶高度样板,已经由德国物理技术研究院(PTB)校准,并与美国国家标准与技术研究院(NIST)校准过的相应高度样板进行了比对,表明所制备的系列台阶高度样板可作为该尺度的标准样板,成为纳米测量/溯源基准;根据分形理论构造纳米粗糙度评定的数学模型,并对纳米结构特征和功能特征进行了提取与分析,建立了纳米结构的纳米/亚纳米级粗糙度的测量方法^[66-68];提出了基于碳纳米管的原子力探针制备方法,发展了基于碳纳米管探针的大深宽比纳米结构测量方法,实现了大深宽比纳米结构的测量,如图 3(e)。

3.6 三维冰微打印技术

研究人员提出了一种创新的三维冰微打印技术,与生物材料良好兼容、易形成三维机构、无污染等优点,可以实现微流控、生化反应物、纳米材料、微机电系统(MEMS)器件的跨尺度制造和集成^[65]。三维冰微打印技术利用了水到冰的相变过程。由于液体水具有良好的流动性,而且可以形成非常微小的液滴,而固体的冰却有很好的强度,因此这种通过

微小水滴相变来形成三维冰微结构的过程是一种典型的“自下而上(bottom-up)”的过程,因而也具有了“bottom-up”方法所共有的优势和特点,适用于多材料器件的跨尺度制造与集成。

器件方面,提出了一种基于冰打印技术的生化检测微胶囊检测阵列器件,并成功制备和测试了一系列微胶囊检测阵列,包括基于环介导恒温扩增技术(LAMP)的沙门氏菌病原体 DNA 检测预封装芯片,基于功能核酸的具有特异性和敏感性定量检测功能的二价铜离子检测芯片,以及可以同时检测氢离子、铅离子、六价铬离子、氟离子、亚硝酸盐离子、镍离子、铜离子和铁离子的即用型水中金属离子检测阵列芯片。在此基础上,研究人员又开发出了一种“全打印”的微流控系统制造技术^[69],实现了微流控生化检测器件功能结构(包括检测电极、生化反应凝胶和微流道)的一体化打印制造方法,如图 4。

研究人员面向若干国家重大战略需求(如精密计量光栅、国家某重大工程中异形物理光栅、超高效率纳米光电子部件等),集成精密模板制造方法、多场诱导复形方法、误差传递理论和精度溯源方法的研究,发展纳米尺度的精确、高效复形制造原理。揭示外场诱导下结构和物理性质演变规律;发现新的纳米结构复形制造原理;发展复制成形的误差传递控制和精度计量的溯源理论。

4 纳米制造装备领域的突破:装备国产化

纳米制造装备的研制是实现纳米结构、器件、系统批量化生产的重要前提和基础,能够有力推动纳米材料、纳米加工和纳米器件的发展。在重大研究计划支持下,我国在纳米制造装备方面取得了长足的进步与可喜的成果,从立项之初的整机进口,发展到当前的自主装备研究,部分核心器件实现了自主制造,研发自主装备 17 台/套。

4.1 纳米精度表面制造装备

研究人员围绕光刻物镜纳米精度制造、超光滑

表面生成和特殊材料加工等要求,提出了纳米精度制造的关键性理论和方法,采用自主研发的抛光制造装备和工艺,实现了12英寸硅片全局均匀度大于97%、粗糙度小于0.05纳米的抛光结果,为集成电路制造装备和工艺的国产化提供了技术支撑,如图5(a);针对CELT微纳加工的工艺特点,相关科研机构研究解决了纳米定位系统磁滞误差补偿、高速进给宏微切换运动控制、模板-基底接触检测与恒微接触力控制、产物输运与反应物补给控制、纳秒脉冲电源、调平导向头等关键技术,研制了CELT微纳加工仪器,实现了对GaAs、石英等硬质光学材料的纳米精度表面加工^[70,71];研制了超精密飞刀铣削加工机床,功能齐全、指标先进,打破了国外发达国家长期的技术封锁,满足了惯性约束激光核聚变领域对高精度大口径KDP晶体光学元件的加工要求^[72,73]。

4.2 纳米压印装备

我国在纳米压印装备上的发展尚属于起步阶段,但进展非常迅速,已取得了诸多成果。如图5(b),开发了面向准三维结构制造的新型纳米压印装备,解决了翘曲表面、台阶表面的接触难题,促进了纳米压印技术由传统二维纳米结构制造向三维纳米结构制造的发展^[74-76]。针对大面积纳米压印中翘曲衬底均匀接触的难题,发明了“气压-电场”协同纳米压印技术,改变了模板-衬底的接触机制,将宏观接

触变为时序控制的微观接触,在大面积翘曲衬底表面实现了纳米孔阵列结构的均匀制造^[77]。针对局部不平整、台阶表面的纳米结构制造难题,发明了离散支撑纳米压印技术,通过离散支撑单元的刚度调控,降低了接触过程的能量惩罚,在电极图形化发光二极管(LED)芯片台阶表面实现了纳米结构的均匀制造,将出光效率提高了40%以上;研制了多尺度卷对卷纳米压印关键装备,实现了多尺度结构特征的保真高效制造。采用低密度聚乙烯(LDPE)材料复合在聚对苯二甲酸类聚合物基材(PET)上,通过热熔LDPE到接近玻璃化温度再制冷的卷压模式,将金属模具上的跨尺度微纳结构高保真的复制出来,实现了线宽100 μm —100 nm的多尺度结构特征的快速卷对卷微纳结构转移,保真度达到95%,连续压印2.4万米/版,幅面宽度1200 mm,工作速度60 m/min。通过张力、恒温、压力、涂层(厚度0.5—1 μm)、变形量伺服等可实现无缝双辊补偿纳米压印,如图5(c)。

4.3 激光直写装备

研究人员提出了空间与位相调制微纳结构光场的新方法,提出基于位相-空间光混合调制数字化光场的光刻技术,采用“微纳结构光场”逐帧数字化滚动叠层(积分)技术(1.2万帧/s,1902 \times 1080数据/帧)、3D导航飞行曝光(3D mapping)模式,攻克了在



图5 代表性国产纳米制造装备

翘曲表面上的复杂微纳 3D 形貌高效加工这一重大难题,成功研制了大面积微纳 3D 直写设备 (MiScanV),制造幅面达 70 寸,形貌深度 50 nm—25 μm ,横向分辨率 100 nm(在 355 nm 波长下),数据处理与光电转换能力达 50 Tb,数字化直写效率达 250 mm^2/min —1 000 mm^2/min (叠加曝光次数 8—32 次)。这种原创性跨尺度微纳 3D 形貌直写技术填补了行业空白,可广泛应用于柔性电子、微光学—结构光(人脸识别)、薄膜成像、显示照明器件、超表面材料、柔性仿生材料和 MEMS 等国防和民用高技术研究领域。在以“创新驱动发展,科技引领未来”为主题的《国家“十二五”科技创新成就展》中,微纳 3D 直写设备作为国家“863 计划”先进制造领域标志性成果进行了展出。

4.4 高能束加工装备

在激光加工装备方面,根据加工尺寸的不同,研究人员建立了三维精密移动系统。开发了一种在水平方向,由转镜控制激光聚焦点移动,垂直方向由压电平台控制样品上下移动的三维精密移动平台,精度为 1 nm,保证了高精度双光子聚合微细加工^[78,79];建立了由大范围气浮平台作为主控制台的三维精密移动平台,加工范围可达厘米级、加工精度可达 10 nm,满足了大尺寸高精度光学器件的加工要求,如图 5(d);在聚焦离子束加工装备方面,成功研制 DY-2000 图形发生器,可用于加工高端通用纳米图形,已经批量生产并投放市场;将聚焦离子束/扫描电子显微镜(FIB/SEM)双束系统与样品旋转器相结合,通过精确控制刀具相对离子束的方位,解

决了微刀具制备中多自由度加工和高精度定位的技术瓶颈^[80,81]。

5 对国家重大需求的支撑

(1) 在重大科学工程中的支撑作用。研究人员自主开发的 12 英寸晶圆化学机械抛光设备及工艺应用于国内最先进的集成电路制造厂(中芯国际)的 12 英寸晶圆再制造生产线,已累计为中芯国际完成 12 英寸晶圆抛光超过 250 000 片,0.12 等级和 0.16 等级的平均成功率分别达到 70% 和 96%,如图 6(a);实现了光刻物镜正式光学零件的纳米精度制造,为支撑我国光刻机关键部件自主研发提供了有效途径,如图 6(b);基于脉冲序列和共振吸收的超快激光微纳制造新方法,实现了制造中对局部瞬时电子动态及其对应材料特性的主动调节,采用超快激光脉冲序列及共振吸收调控等离子体密度等方法提高加工效率,将微通道体积加工效率提高了 5—56 倍,被国家某重大工程选定为核心构件微靶靶球深孔的加工工艺,微孔加工极限深径比可达 1 000 : 1,如图 6(c);研制了超精密飞刀铣削加工机床,打破了国外发达国家长期的技术封锁,为未来超大型激光装置的建设奠定了技术基础。

(2) 在重大工业领域的支撑。在光刻机装备制造领域,研究人员提出空间与位相调制微纳结构光场的新方法,建立了“纳米结构紫外波长混合光刻”实验装置,实现了高速率、纳米精度、高可靠性微纳图形直写功能,在 351 nm 波长下实现 100 nm 结构的高速率直写;设计并开发出了渐进气动式电毛细

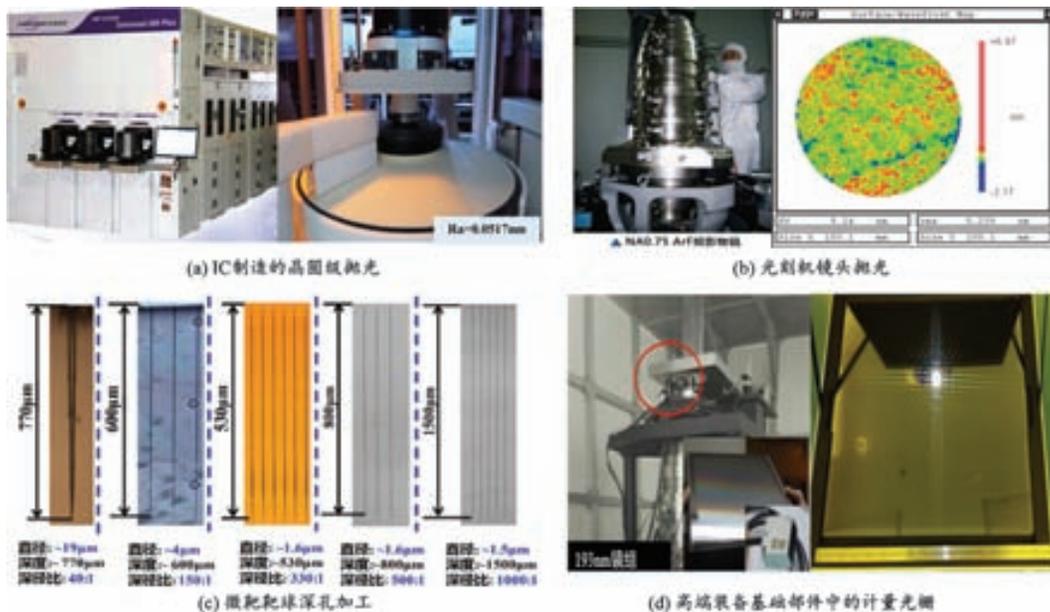


图 6 纳米制造对国家重大需求的支撑

力纳米压印光刻机,将纳米结构电毛细力驱动的纳米结构压印成形与透明导电柔性模板的几何约束相结合,实现了4英寸二维平面光子晶体纳米结构的大面积制造;在高端机床装备制造领域,研究了纳米尺度材料的去除和添加的转换机制,研制了稳定可靠的高精密离子束材料添加机床,提出的材料添加和去除联合抛光工艺,实现了高精度光学零件的高效高精度加工;实现了米级幅面二维光栅、米级幅面物理光栅、上百米长纳米计量光栅、米级直径圆光栅等系列光栅的制造,成功应用于成都光电所“02专项”光刻机平台纳米定位、上海光机所纳米平台位移测量、国家某重大工程实验用物理光栅、中国计量院圆度基标准装置等重大科学工程应用中,如图6(d)。

(3) 在重大民生领域的支撑。研究人员实现了在微米流道中集成多重纳米管道的微纳跨尺度芯片制造方法,纳米管道的尺寸在2—20 nm之间可调,长度达到厘米级。以该芯片为核心,设计制造了一种新型的固相萃取器件,对溶有敌敌畏等三种痕量农药的水溶液进行了富集处理,并将其中的痕量农药分子进一步萃取到了与水互溶的乙醇中,萃取回收率到达80%。

6 展望未来及关注的研究方向

随着技术水平的爆炸性急剧提升及社会经济对极小尺度相关产品的迫切需求,纳米制造技术将快速走向极限尺度/精度(原子尺度及以下)以及多功能集成的战略目标:从材料上,趋近于材料本源,且必然涉及多材料体系;从精度与尺度上,趋近于物理极限;从功能上,体现为多功能集成一体化,从手段上,体现为精准性和普适性。根据国际纳米制造发展趋势,结合我国当前纳米制造水平与基础,未来10—30年,我国在纳米制造领域可能取得重大突破的研究包括以下几个方面。

(1) 趋近物理极限的超精密制造。未来的纳米制造精度和尺度要全面拓展到原子水平。原子级制造是加工尺度为原子量级的制造,包括原子级减材制造(原子层去除、物理/化学键调控)与原子级增材制造(原子尺度可控组装、生长),从原子尺度构建新材料、新结构、新性能,将制造精度与尺度从“纳米”延伸至“原子”。美国国家科学基金会的“纳米技术发展研究”、欧盟的纳米制造2020计划等,均将“原子级制造”列为未来10—20年的发展战略。例如,利用二维材料在制造平面外的亚纳米级精度,发展全新的大规模空间三维纳米尺度可控的宏微纳跨尺

度制造方法。可以预见,以二维材料为基础的大规模制造,将在能源、信息、生命、新材料等重大领域取得颠覆性应用。在本研究计划的资助下,研究人员在电子调控制造、化学机械抛光等方面的加工已经进入了原子尺度,取得了重要突破。面向未来应用的原子级制造,在前期成果基础上,重点发展:(i) 电子/离子调控的量子制造理论。与物理学科深入交叉,发展量子制造理论,将非金属超快激光制造发展到金属的电子调控制造,满足未来战略必争的极端制造需求。(ii) 化学键解构制造理论。与化学学科深入交叉,将化学机械抛光发展为更具有普适性化学键解构与重构的广谱材料制造方法。

(2) 面向普适对象的大规模精准制造。纳米制造技术的发展经历了一个漫长的过程,从天然存在的纳米物质到人工操控原子、分子的纳米材料与器件,这是一个从不自觉到自觉、从设想到理论上的突破再到制造应用的过程。在这个过程中,制造手段的创新是实现高水平纳米制造的前提和基础。在本研究计划的资助下,研究人员在激光微纳制造、纳米压印等方面取得了重要突破。面向未来纳米制造进一步拓展应用的需求,在前期成果基础上应重点发展:(i) 精准制造。以高能束制造为例,如何有效精准地实现高能束斑、射角、能量密度等参数的调控,满足未来超高精密原子级制造需求。(ii) 普适制造。目前得到有效应用的纳米制造手段都只是针对一种或者有限几种特定材料体系。如何在进一步丰富和完善纳米制造理论基础,面向多种材料,完善普适性、大规模纳米制造工艺和技术,对将来纳米制造走向大范围应用具有举足轻重的重要意义,也将是未来重要的研究方向。

(3) 满足社会发展新需求的纳米制造。微纳制造基础科学研究是支撑纳米科技走向应用的基础,并在传感检测、新能源开发、能量转换和储存及生物技术等领域取得了飞速的发展。在本研究计划的资助下,研究人员已经发展出一系列的纳米制造工艺,服务于芯片制程抛光、光刻机镜头抛光、靶球微孔制造、米级二维计量光栅、空间飞行器表面多级微纳结构蒙皮等国家重大科学/工程,为提升我国纳米制造工艺与装备水平提供了理论与技术基础。永无止境的科学发展为技术产品的不断创新奠定了基础,同时也对技术进步不断提出了更高要求。例如,在物理学家不懈努力下,人类对微量量子态的操纵水平不断刷新纪录,量子计算机也从理查德·费曼提出的概念逐步成为可能。可以预见,将来量子计算机

的普及应用离不开纳米制造技术的创新,对纳米光纤、相关功能纳米结构单元和器件等的大规模、低成本的制造需求,将有如我们今天对芯片的需求。面向人类社会发展新需求的新一代纳米制造技术及其衍生出的新一代纳米计量、纳米检测相关理论、技术和设备,毫无疑问将会是未来的研究趋势。

(4) 效法生命科学的类脑智能制造。生物体具备强大的自我修复能力,但纳米器件受热、机械和化学等因素的影响,在应用过程中,结构形状破裂,使用寿命和力学性能受到影响。通过模仿生物体自身修复损伤的原理,智能自修复微纳米器件是未来的重要发展趋势。基于自修复材料的智能微纳米器件可在包括军用装备、电子产品、汽车、飞机等领域获得广泛的应用。该技术的突破对维持社会的可持续发展具有重大意义。国际纳米制造强国已经对类脑生物制造进行了战略布局,本研究计划在立项之初就重点关注与资助纳米制造与生命、化学、信息等领域的深度交叉,在纳米靶向药物精准医疗、类脑智能器件、仿生制造等方面取得了一系列突破。面向未来应用的类脑生物制造,可以与生命学科深入交叉,发展人体器官再创、5D 增材制造与仿“DNA”制造理论;基于随机神经网络的类脑器件制造方法将类脑器件由固定关联模式发展到随机网络型互联,从底层提升类脑器件的智能。

7 结语

“纳米制造的基础研究”重大研究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研究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,培养汇聚了一批学科交叉、从事纳米制造研究的优秀队伍,奠定了我国纳米制造的基础,有希望持续开展研究,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重要作用。在该重大计划研究成果的基础上,继续探索支撑原子级制造的理论及关键技术,阐明面向普适材料的原子级制造机理,将制造尺度延拓至原子水平,建立基于上述新原理的工艺与装备,实现若干引领纳米制造的理论及技术。

致谢 本文是依据“纳米制造的基础研究”重大研究计划的总结报告、成果报告以及战略研究报告整理

而成,在此感谢所有参与重大研究计划工作和材料准备的专家,并感谢西安交通大学邵金友教授提供本期《中国科学基金》封面图片。由于篇幅所限,文中仅为枚举,未能列出所有优秀成果,敬请谅解。文中所列的未来重点关注方向,为一己之见,仅供参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 王国彪, 黎明, 丁玉成, 等. 重大研究计划“纳米制造的基础研究”综述. 中国科学基金, 2010, 24(2): 70—77.
- [3] Chen L, Wen J, Zhang P, et al. Nanomanufacturing of silicon surface with a single atomic layer precision via mechanochemical reactions. *Nature Communications*, 2018, 9(1):1542.
- [4] Chen X, Peng Z, Yu X, et al. Microstructure and tribological performance of self-lubricating diamond/tetrahedral amorphous carbon composite film. *Applied Surface Science*, 2011, 257(8):3180—3186.
- [5] Li H, Zhao Q, Lu X et al. Signal processing and analysis for copper layer thickness measurement within a large variation range in the CMP process. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(11):115103.
- [6] Wen J, Ma T, Zhang W, et al. Atomic insight into tribochemical wear mechanism of silicon at the Si/SiO₂ interface in aqueous environment: molecular dynamics simulations using ReaxFF reactive force field. *Applied Surface Science*, 2016, 390: 216—223.
- [7] Xie G, Shi Z, Yang R, et al. Graphene edge lithography. *Nano Letters*, 2012, 12(9):4642—4646.
- [8] Wu S, Liu B, Shen C, et al. Magnetotransport Properties of Graphene Nanoribbons with Zigzag Edges. *Physical Review Letters*, 2018, 120(21):216601.
- [9] Wang J, Fang F, Zhang X. An experimental study of cutting performance on monocrystalline germanium after ion implantation. *Precision Engineering*, 2015, 39: 220—223.
- [10] Zhang N, Srivastava A, Kirwan B, et al. Manufacturing microstructured tool inserts for the production of polymeric microfluidic devices. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 25(9): 095005.
- [11] Gao S, Dong Z, Kang R, et al. Design and evaluation of soft abrasive grinding wheels for silicon wafers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, 227(4):578—586.
- [12] Zhang Z, Wang B, Kang R, et al. Changes in surface layer of silicon wafers from diamond scratching. *CIRP Annals*, 2015, 64(1):349—352.
- [13] Zhao D, Lu, X. Chemical mechanical polishing: theory and experiment. *Friction*, 2013, 1(4): 306—326.

- [14] Gao S, Huang H, Zhu X, et al. Surface integrity and removal mechanism of silicon wafers in chemo-mechanical grinding using a newly developed soft abrasive grinding wheel. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2017, 63: 97–106.
- [15] Shan K, Zhou P, Cai J, et al. Electrogenerated chemical polishing of copper. *Precision Engineering*, 2015, 39: 161–166.
- [16] Li X, Ding Y, Shao J, et al. Fabrication of microlensarrays with well-controlled curvature by liquid trapping and electrohydrodynamic deformation in microholes. *Advanced Materials*, 2012, 24(23): 165–169.
- [17] Lan H, Liu H. UV-nanoimprint lithography: structure, materials and fabrication of flexible molds. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2013, 13(5): 3145–3172.
- [18] Li X, Tian H, Shao J, et al. Decreasing the saturated contact angle in electrowetting-on-dielectrics by controlling the charge trapping at liquid – solid interfaces. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18): 2994–3002.
- [19] Tian H, Shao J, Ding Y, et al. Numerical characterization of electrohydrodynamic micro- or nanopatterning processes based on a phase-field formulation of liquid dielectrophoresis. *Langmuir*, 2013, 29(15): 4703–4714.
- [20] Chen X, Tian H, Li X, et al. A high performance P (VDF-TrFE) nanogenerator with self-connected and vertically integrated fibers by patterned EHD pulling. *Nanoscale*, 2015, 7(27): 11536–11544.
- [21] Tian ZW, Fen ZD, Tian ZQ, et al. Confined etchant layer technique for two-dimensional lithography at high resolution using electrochemical scanning tunneling microscopy. *Faraday Discuss*, 1992, 94: 37–44.
- [22] Yuan Y, Han L, Zhang J, et al. Electrochemical mechanical micromachining based on confined etchant layer technique. *Faraday Discussions*, 2013, 164: 189–197.
- [23] Zhan D, Han L, Zhang J, et al. Electrochemical micro/nano-machining: principles and practices. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(5): 1526–1544.
- [24] Wang C, Zhang HW, Zhang JF, et al. New strategy for electrochemical micropatterning of nafionfilm in sulfuric acid solution. *Electrochimica Acta*, 2014, 146: 125–133.
- [25] Chen C, Chen Y, Xu P et al. Silicon micro-cantilever chemical sensors fabricated in double-layer silicon-on-insulator (SOI) wafer. *Microsystem Technologies*, 2016, 22(8): 1959–1965.
- [26] Wang Q, Wang E, Pan Z, et al. Self-rolled-up InGaAs/GaAs microtubes fabricated directly on Si (100) substrates. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2014, 32(3): 030603.
- [27] Li Z. Emerging technologies of micro-nanoelectromechanical systems (MEMS/NEMS). *Scientia Sinica Information*, 2012, 42(12): 1599–1615.
- [28] Liu Z, Du S, Cui A, et al. High-quality-factor mid-infrared toroidal excitation in folded 3D metamaterials. *Advanced Materials*, 2017, 29(17): 1606298.
- [29] Liu Z, Cui A, Li J, et al. Folding 2D Structures into 3D Configurations at the micro/nanoscale: principles, techniques, and applications. *Advanced Materials*, 2018, 1802211.
- [30] Li J, Liu Z. Focused-ion-beam-based nano-kirigami: from art to photonics. *Nanophotonics*, 2018, 7(10): 1637–1650.
- [31] Cui A, Liu Z, Li J et al. Directly patterned substrate-free plasmonic “nanograter” structures with unusual Fano resonances. *Light: Science & Applications*, 2015, e308.
- [32] Yang S, Liu Z, Jin L, et al. Surface plasmon polariton mediated multiple toroidal resonances in 3D folding metamaterials. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2650–2658.
- [33] Song Z, Lv C, Liang M, et al. Microscale silicon origami. *Small*, 2016, 12(39): 5401–5406.
- [34] Wang C, Jiang L, Wang F, et al. First-principles calculations of the electron dynamics during femtosecond laser pulse train material interactions. *Physics Letters A*, 2011, 375(36): 3200–3204.
- [35] Wang A, Jiang L, Li X, et al. Mask-free patterning of high-conductivity metal nanowires in open air by spatially modulated femtosecond laser pulses. *Advanced Materials*, 2015, 27(40): 6238–6243.
- [36] Jiang L, Wang A D, 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(2): 17134.
- [37] Yang B, Jiang L, Wang S, et al. Quantitative detection of oxygen in reduced graphene oxide by femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy. *Applied Optics*, 2018, 57(5): 1267–1272.
- [38] Yu Y, Jiang L, Cao Q, et al. Pump-probe imaging of the fs-ps dynamics during femtosecond laser Bessel beam drilling in PMMA. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32728–32735.
- [39] Leng N, Jiang L, Li X, et al. Femtosecond laser processing of fused silica and aluminum based on electron dynamics control by shaping pulse trains. *Applied Physics A*, 2012, 109(3): 679–684.
- [40] Xiong W, Zhou YS, He XN, et al. Simultaneous additive and subtractive three-dimensional nanofabrication using integrated two-photon polymerization and multiphoton ablation. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(4): e6.
- [41] Qiao W, Huang W, Liu Y, et al. Toward scalable flexible nanomanufacturing for photonic structures and devices. *Advanced Materials*, 2016, 28(47): 10353–10380.
- [42] Huang W, Shen S, Pu D, et al. Working characteristics of external distributed feedback polymer lasers with varying waveguiding structures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(49): 495105.

- [43] Huang W, Yu X, Liu Y, et al. A review of the scalable nano-manufacturing technology for flexible devices. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2017, 12 (1): 99—109.
- [44] Liu Z, Jiao N, Liu Z et al. Atomic force microscope deposition method for nano-lines. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 48(2): 200—206.
- [45] Hu KX, Wang QK, et al. Development and application of vector-mode nanofabrication system by modulating electric signals based on AFM. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2013, 1: 001.
- [46] 程柏, 韩冰, 谷立山, 等. 纳结构的连续激光复合微纳探针刻划加工. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 2043—2050.
- [47] Yan Y, Geng Y, Hu Z, et al. Fabrication of nanochannels with ladder nanostructure at the bottom using AFM nanoscratching method. *Nanoscale Research letters*, 2014, 9 (1): 212.
- [48] Yan Y, Geng Y, Hu Z. Recent advances in AFM tip-based nanomechanical machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2015, 99: 1—18.
- [49] Li G, Xu Z, Fang F, et al. Micro cutting of V-shaped cylindrical grating template for roller nano-imprint. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213 (6): 895—904.
- [50] Ye X, Ding Y, Duan Y, et al. Effects of exposure time on defects and demolding force in soft ultraviolet nanoimprint lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2009, 27(5): 2091—2096.
- [51] Li G, Xu Z, Fang F, et al. Micro cutting of V-shaped cylindrical grating template for roller nano-imprint. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 213 (6): 895—904.
- [52] Liu H, Jiang W, Ding Y, et al. Roller-reversal imprint process for preparation of large-area microstructures. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, 28(1): 104—109.
- [53] Ban Y, Ye G, Liu H, et al. Pre-stress-assisted nanoimprint lithography for fabricating high-density diffraction gratings. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28 (10): 105013.
- [54] Jiang W, Liu H, Yin L, et al. Fabrication of well-arrayed plasmonic mesoporous TiO₂/Ag films for dye-sensitized solar cells by multiple-step nanoimprint lithography. *Journal of Materials Chemistry A*, 2013, 1(21): 6433—6440.
- [55] Ye G, Liu H, Jiang W, et al. Design and development of an optical encoder with sub-micron accuracy using a multiple-tracks analyser grating. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(1): 015003.
- [56] Ye G, Fan S, Liu H, et al. Design of a precise and robust linearized converter for optical encoders using a ratiometric technique. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25 (12): 125003.
- [57] Fan S, Jiang W, Li X, et al. Fabrication of high-resolution reflective scale grating for an optical encoder using a patterned self-assembly process. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2016, 26(7): 075015.
- [58] Ye G, Liu H, Fan S, et al. A theoretical investigation of generalized grating imaging and its application to optical encoders. *Optics Communications*, 2015, 354: 21—27.
- [59] Ye G, Liu H, Yan J, et al. Fabrication of high edge-definition steel-tape gratings for optical encoders. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(10): 105006.
- [60] Cui Z. *Printed Electronics: Materials, Technologies and Applications*. John Wiley & Sons, 2016.
- [61] Xu W, Zhao J, Qian L, et al. Sorting of large-diameter semiconducting carbon nanotube and printed flexible driving circuit for organic light emitting diode (OLED). *Nanoscale*, 2014, 6(3): 1589—1595.
- [62] Li Y, Mao L, Gao Y, et al. ITO-free photovoltaic cell utilizing a high-resolution silver grid current collecting layer. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 113: 85—89.
- [63] Mao L, Chen Q, Li Y, et al. Flexible silver grid/PEDOT: PSS hybrid electrodes for large area inverted polymer solar cells. *Nano Energy*, 2014, 10: 259—267.
- [64] Li Y, Wu Y, Ong BS. Facile synthesis of silver nanoparticles useful for fabrication of high-conductivity elements for printed electronics. *Journal of the American Chemical Society*, 2005, 127(10): 3266—3267.
- [65] Zhang H, Zhang F, Zhang X, et al. Portable, easy-to-operate, and antifouling microcapsule array chips fabricated by 3D ice printing for visual target detection. *Analytical Chemistry*, 2015, 87: 6397—6402.
- [66] Li C, Yang S, Wang Y, et al. Measurement and characterization of a nano-scale multiple-step height sample using a stylus profiler. *Applied Surface Science*, 2016, 387: 732—735.
- [67] Wang C, Yang S, Jing W, et al. Fabrication of nanoscale step height structure using atomic layer deposition combined with wet etching. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 29(1): 91—97.
- [68] Yang S, Li C, Wang C, et al. A sub-50 nm three-step height sample for AFM calibration. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(12): 125004.
- [69] Zheng F, Pu Z, He E, et al. From functional structure to packaging: fully-printing fabrication of microfluidic chip. *Lab on a Chip*, 2018, 18: 1859—1866.
- [70] Zhan D, Han L, Yang D, et al. February. Confined etchant layer technique (CELT) for micromanufacture. In *Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*, 2011, 2011: 863—867.

- [71] Cao Y, Guo S, Yan Y, et al. Etching and smooth processing of GaAs surface based on the confined etchant layer technique. *International Journal of Nanomanufacturing*, 2017, 13(1):71—80.
- [72] Zhang SJ, To S, Zhu ZW, et al. A review of fly cutting applied to surface generation in ultra-precision machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2016, 103:13—27.
- [73] Chen W, Liang Y, Luo X, et al. Multi-scale surface simulation of the KDP crystal fly cutting machining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 73(1—4):289—297.
- [74] Shao J, Ding Y, Wang W, et al. Generation of fully-covering hierarchical micro-/nano-structures by nanoimprinting and modified laser swelling. *Small*, 2014, 10(13): 2595—2601.
- [75] Li X, Shao J, Tian H, et al. Fabrication of high-aspect-ratio microstructures using dielectrophoresis-electrocapillary force-driven UV-imprinting. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2011, 21(6): 065010.
- [76] Le Y, Liu HZ, Ding YC, et al. Five-step loading locus for high-conformity patterning in nanoimprint lithography. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2005, 9: 005.
- [77] Wang C, Shao J, Tian H, et al. Step-controllable electric-field-assisted nanoimprint lithography for uneven large-area substrates. *ACS Nano*, 2016, 10(4):4354—4363.
- [78] Wang S, Chen YR, Wang S, et al. Design of 3D precision displacement system. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1):175—182.
- [79] Deng XW, Chen YR, Dan BB, et al. The design of nanoscale 3D precision displacement system. In *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 456:199—202.
- [80] Chen J, Jin T, Wang J, et al. Study on machining mechanism of nanotwinned CBN cutting tool. In *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Advanced Optical Manufacturing Technologies*, 2014, 9281: 92811D.
- [81] 靳田野, 陈俊云, 赵明慧, 等. 纳米孪晶立方氮化硼机械研磨机理研究. *机械工程学报*, 2016, 52(5): 95—100.

Review of the Achievements of Major Research Plan on “Fundamental Research on Nanomanufacturing”

Wang Guobiao¹ Lai Yinan^{1*} Lu Bingheng² Luo Jianbin³
Li Ming¹ Liu Lei⁴ Ye Xin^{1,5}

- (1. *Department of Engineering and Materials Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing, 100085;*
2. *School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049;*
3. *Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, 100084;*
4. *School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, 211189;*
5. *School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, 100081*)

Abstract NSFC major research plan of “Fundamental Research on Nanomanufacturing” has been successfully executed for 8 years and completed in 2018. A series of integrated achievements have been attained during the implementation of this major research plan in terms of basic theoretical methods, key technologies, core equipment, typical engineering demonstration, etc. This review summarizes the research progress of this major research plan and presents a series of representative breakthroughs, which mainly focus on materials removal at sub-nano level, nanostructure forming, multi-scale mass production and localization of high-end nanomanufacturing equipments. This review also prospects the developments trends of nanomanufacturing and put forward several key academic fields to be paid more attention in the future.

Key words nanomanufacturing; nano-precision manufacturing; nanoscale manufacturing; cross-scale manufacturing; high-end manufacturing equipment; major research plan of NSFC