

## 原子级制造揭榜挂帅任务榜单

### 一、核心基础

#### (一) 原子层沉积工艺仿真平台

**揭榜任务：**原子层沉积是能源、化工和高端电子器件领域的关键核心工艺。当前新工艺摸索周期长成本高，材料生长质量难以控制。因此需发展高精度仿真技术，耦合各原子尺度与介观尺度仿真方法，模拟真实生长/刻蚀过程中前驱体分子与基底的反应过程，沉积/刻蚀过程及后退火过程。通过仿真研究不同前驱体、反应温度和压力等工艺参数对薄膜沉积质量的影响，优化工艺参数。利用仿真结果预测沉积薄膜的结构、电子性质和机械性能，为新工艺探索提供指导。

**预期目标：**到 2026 年，面向 Si/SiO<sub>2</sub> 等衬底的高介电常数氧化物的原子级沉积，如 Hf(Zr)O<sub>2</sub>，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，开发 ALD 仿真平台，包含吸附、脱附模块，材料生长模块，薄膜质量评估模块等。平台能够实现 10nm 厚 10 万原子秒级时间材料生长模拟，模拟的关键工艺参数不少于 3 个。对 ALD 生长速度的计算准确度达到 90% 以上，大深宽比（10:1）沉积的台阶覆盖度预测准确度达到 90% 以上。

#### (二) 异质多晶材料的原子级平坦化工艺研究

**揭榜任务：**面向微电子元器件异质互连结构、多晶材料

等的原子级精度制造需求，建立能量限域调控作用下异质、多晶材料表面原子级抛光和亚表面损伤层控制技术，发展原子尺度制造过程的原位动态表征方法，形成宏观尺度互连异质表面原子层去除一致控制的抛光工艺、技术与装备，实现4英寸及以上尺寸的典型材料原子级抛光和亚表面近零损伤控制。

**考核指标：**到2026年，实现4英寸及以上尺寸的典型材料表面原子级精度及亚表面近零损伤制造与原位动态表征，针对典型异质、多晶材料的原子级抛光，实现表面粗糙度Ra小于2Å，亚表面损伤层≤20层原子，单次制造幅面10×10μm内面形精度优于10Å，原位动态观测与表征的空间分辨率优于1Å。

### **（三）面向原子级对准的原子层沉积工艺研究**

**揭榜任务：**面向先进节点的对准结构制造套刻误差比重增大、可靠性下降问题，发展表面区域选择性钝化与活化改性的选区沉积技术，突破非生长区表面形核缺陷选择性去除技术，形成先进互连介电层表面电介质材料高可靠性、精简步骤选区沉积工艺与技术。

**预期目标：**到2026年，建立选择性原子层沉积形核模型，完成基于互连对准结构介质层表面选择性沉积工艺体系；在两类以上金属与介电材料体系内开发出选择性>99.9%，实现单层可控生长，生长区膜厚>6nm，非生长区检测无缺陷，并在12寸原子层沉积机台完成验证，推广产业化应用。

#### **（四）强光光学元件原子级缺陷调控及修复技术**

**揭榜任务：**面向极端服役强光光学元件原子级缺陷和损伤控制需求，突破原子级缺陷形性参量表征、复合能场选择性精准调控、缺陷环簇/点位高效可控修复及抗激光损伤性能评价等关键技术，研发原子级缺陷精确表征与可控修复原理样机，实现强光光学元件制造过程中的缺陷调控和修复，提升高精度光学元件在强激光极端服役条件下的抗损伤能力。

**预期目标：**到 2026 年，完成原子级缺陷高效可控修复原理验证平台的开发工作，具备原子级缺陷高置信度表征、局域选择性可控修复及抗激光损伤性能评估等能力，可有效修复原子级缺陷类型  $\geq 5$  种，能够在口径大于 300mm 的尺寸范围内实现原子级缺陷损伤的修复，修复后元件激光诱导损伤阈值提升 50%以上，并在损伤测试平台上进行实验验证。

#### **（五）原子级金属粉体宏量开发**

**揭榜任务：**通过自主研发精密设备，将原料金属制备成比当前纳米粉体更细的原子级粉体，可实现粉体的熔点大幅下降和表面原子占比的大幅提高，这使得该粉体可以支撑更低温的工件焊接。

**预期目标：**到 2026 年，原子级金属粉体可在金属焊接、粉末冶金、3D 打印、医疗器械、一体成型等领域应用。每天提供公斤级粉体，粉体中 90%以上的颗粒，单颗粒包含原子数少于 1000，部分高档原子级粉体少于 200，验证多种焊接和加工场景温度的急剧下降（下降 20%以上），建立原子

级金属粉体的工艺评价指标体系和相关标准。

## **（六）粉体原子级包覆技术与装备**

**揭榜任务：**面向粉体含能材料表面原子级致密钝化层的制造需求，开展粉体原子层包覆工艺研究，突破材料颗粒解团聚、前驱体定量输出和反应原位监测等关键技术，形成批量化粉体表面原子级制造工艺、技术与装备。

**预期目标：**到 2026 年，完成批量化粉体表面原子级制造装备研制，实现粉体表面厚度 $<1\text{nm}$  薄膜沉积，粉体比表面积保持率大于 95%，批处理能力大于 10kg/批次，一致性大于 95%，推动原子级制造技术在核能、氢能等绿色能源的产业化应用。

## **二、重点产品**

### **（一）多场辅助化学机械原子级抛光装备**

**揭榜任务：**面向半导体衬底原子尺度抛得光、纳米尺度抛得平、微米尺度抛得快的高质高效加工需求，研究电、光、声、等离子体等多场辅助化学机械原子级去除工艺，突破多场辅助协同调控、超低压力分区加压、测量反馈智能控制等关键技术，开发多场辅助化学机械抛光装备，实现原子级精度抛光，满足半导体衬底应用需求。

**预期目标：**到 2026 年，研制模块化的多场辅助化学机械原子级抛光装备，可以集成电、光、声、等离子体等多场，抛光压力调控精度 0.1psi，抛光压力分区数量 6 个，利用该设备对单晶硅衬底进行抛光，表面起伏小于 10 个原子层，

满足先进制程需求。

## **（二）高效团簇离子束原子级抛光装备的研发及在大径厚比金刚石光学窗口的加工应用**

**揭榜任务：**面向高功率激光系统、中长波红外探测器等对原子级表面精度的金刚石窗口需求，突破气体原子团簇束流中和关键技术，建立原子级超光滑金刚石表面制造方法，研制超硬金刚石团簇离子束原子级抛光装备，实现大径厚比金刚石光学窗口的原子级制造，并应用验证。

**预期目标：**到 2026 年，高性能、低成本的束流中和器自主可控，具有较高的中和效率，对  $\text{Ar}_{100}$  团簇中和效率  $>50\%$ ，研制金刚石材料团簇离子束原子级抛光装备，建立金刚石光学窗口纳米级精度及原子级表面质量制造工艺，加工金刚石光学窗口直径  $\geq 75\text{mm}$ 、径厚比  $\geq 100$ 、表面面形精度  $\text{PV} \leq \lambda/4$ 、表面粗糙度  $\text{Ra} \leq 1\text{nm}$ ，设备支持  $\text{Ar}/\text{SF}_6$  等多种气体团簇离子束、束流强度  $\geq 100 \mu\text{A}$ 、团簇束斑直径  $0.5\text{-}10\text{mm}$  可调、团簇离子能量  $\geq 60\text{keV}$ ，能够支撑 3 英寸级金刚石光学窗口原子级可控制造。

## **（三）原子级精度 X 射线反射镜**

**揭榜任务：**面向 X 射线掠入射反射镜对表面全频段误差的极端精度需求，突破 X 射线反射镜原子级精度加工关键技术；研发以等离子体加工和弹性发射加工为核心技术的原子级精度 X 射线反射镜加工工艺；研制等离子体与弹性发射加工装备，并开发误差高效收敛算法；推动自主加工的高精度

X 射线反射镜在同步辐射和自由电子激光装置的应用。

**预期目标：**到 2026 年，完成 400mm 尺寸 X 射线反射镜加工装备的研制，满足面型精度 RMS 优于 2nm，斜率误差优于 RMS 0.2 $\mu$ rad，表面粗糙度 RMS 优于 0.1nm。自主加工的 X 射线反射镜在同步辐射和自由电子激光装置上得到应用。

#### **（四）原子级分散的金属制剂**

**揭榜任务：**针对传统植保制剂的药害风险高、与其他农药混配难度高、以及金属残留严重和橡胶制备使用过量氧化锌的污染问题，采用原子级分散工艺，降低金属的用量，实现相关领域产品国产化。

**预期目标：**到 2026 年，分别实现三款以上原子级分散金属制剂/助剂用于植保制剂、橡胶制备等领域。制剂中金属的原子级分散率高于 95%；用于植保的杀菌铜制剂铜用量降低 80%以上，施用后铜残留降低 90%以上；完成实验室验证与大田实验，实验面积不低于 100 万亩；用于橡胶硫化助剂的金属锌用量降低 70%以上，生产成本降低 50%以上。

#### **（五）原子台阶电镀高纯单晶铜板与靶材**

**揭榜任务：**针对 6G 通信、新能源等领域对高性能磁控溅射铜薄膜的需求，开展大尺寸高纯单晶铜板/靶材制备的关键技术研究。重点开发原子台阶调控技术，实现高纯、高质量铜板材的单晶制造；发展先进电镀制造工艺，实现单晶铜板材的连续增厚；基于单晶铜板材开发单晶铜靶材，优化磁

控溅射薄膜的高质量沉积技术，制备高性能溅射铜薄膜；同时，建设高纯单晶铜板/靶材生产线，推动产业化示范应用。

**预期目标：**到 2026 年，实现原子台阶电镀高纯单晶铜板的尺寸达到  $\geq 25\text{cm} \times 30\text{cm}$ ，纯度达到 6N 级，厚度  $\geq 3\text{mm}$ ；基于单晶铜板制备的单晶铜靶直径达到 2-8 英寸；在相同条件下，溅射薄膜电阻率较多晶铜靶降低 15% 以上；建立大尺寸高纯单晶铜板生产示范线，年产  $25\text{cm} \times 30\text{cm}$  高纯单晶铜板  $\geq 5000$  块。

#### **（六）基于石墨烯原子制造技术制备高导热低热阻石墨烯热界面材料**

**揭榜任务：**面向高功率器件的热管理解决方案，基于原子制造技术，发展更高效的热界面材料。以结构原子级精准的石墨烯材料，构筑器件热源本体与散热构件本体之间的热通道，提高热量传递效率，解决器件受力形变等核心关键技术问题，在高功率器件上验证可靠性，并探索实现高效热电转换的可能。

**预期目标：**到 2026 年，实现高导热低热阻的石墨烯热界面材料规模生产，垂直导热系数大于  $300\text{W/m} \cdot \text{K}$ ，热阻小于  $0.05\text{K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$ ，压缩残余应力小于 30PSI（50%压缩量），回弹率大于 50%，系列产品在不少于 10000 个高功率器件上示范应用。

#### **（七）高密度原子团簇传感阵列打印技术**

**揭榜任务：**开展基于团簇墨水的柔性传感阵列打印制造

技术研究，突破高稳定原子团簇墨水可控制备及印刷电子“墨水”化过程中材料物化性能和界面性质调控，结合高精度、大面积打印制备工艺技术，突破高性能、高效率、高分辨率打印制造技术难题。针对人体或机械装备穿戴需求，制备基于原子团簇功能材料的柔性薄膜阵列传感器，实现应用验证。

**预期目标：**到 2026 年，开发出基于团簇墨水的柔性传感器打印技术，团簇墨水材料不少于 3 种，传感物理量不少于 3 种，传感器阵列密度 $>100$  个/cm<sup>2</sup>；其中压力传感范围优于 5kPa-50MPa，弯折柔性薄膜性能变化小于 $\pm 10\%$  @  $> 10$  万次，柔性温度传感器响应范围 10℃-80℃，精度 $\leq 0.5$ ℃。

### 三、公共支撑

#### （一）高分辨透射电子显微镜

**揭榜任务：**面向原子级加工中结构演变的动态表征和原子级制造产物性能及可靠性的综合评测需求，突破高相干性场发射电子源稳定发射、200-300kV 高压电子枪发和低纹波高压电源等技术难题；发展亮度更高、发射更稳定和相干性更优的场发射电子源；发展低像差系数高分辨率物镜；实现低电子剂量下原子级分辨能力；助力原子级制造评价体系的建立。

**预期目标：**到 2026 年，完成 120kV 场发射透射电镜的稳定量产，实现 200-300kV 场发射透射电镜系列的自主研发和商业化，仪器采用场发射电子枪；加速电压 30-200/300kV

连续可调；信息分辨率优于  $1.4\text{\AA}$ ，点分辨率优于  $3\text{\AA}$ 。

## **（二）基于面域扫频光学相干的超分辨高通量原子级形貌检测新方法 with 装备**

**揭榜任务：**面向高端电子器件制造、三维微纳超材料结构等场景的检测需求，突破光学干涉检测分辨极限，创新跨尺度三维空间结构的时-空光学信号同步调制及解调方法，形成面域扫频光学相干的三维结构及形貌超分辨高通量检测新技术及装备，实现原子级精度形貌的高效测量与表征，并实现应用验证。

**预期目标：**到 2026 年，研制面域扫频光学相干的超分辨高通量原子级检测设备，检测精度优于  $0.1\text{nm}$ ，表面三维形貌及内部结构的同步测量，实现  $1000000\text{points/s}$ （每点同时包含表面及内部结构信息）的测量效率，能够支撑 12 英寸晶圆的原子级检测可控，并在高端电子器件制造、三维微纳超材料等领域进行应用验证。

## **（三）面向原子级制造的多探针操控平台**

**揭榜任务：**针对原子级精密操控需求，研发一套高性能的多探针操控平台，具备四个独立的探针模块，能够实现对微小结构的高精度操作与测量，突破当前探针间距、噪声控制和温度调节等技术，推动原子制造技术的发展。

**预期目标：**到 2026 年，完成具备四套扫描探针模块的多探针操控平台。该平台的 Z 方向机械噪声控制在  $<5\text{pm}$ ，探针最小间距  $\leq 50\text{nm}$ ，变温区间为  $10\text{K}-420\text{K}$ 。通过引入先进

的控制算法与材料技术，包括多探针协调控制、原子结构构筑智能优化算法、原子跟踪技术等，实现高效的原子级精密操控，为材料科学、纳米技术等领域的研究提供强有力的支持，推动相关技术的产业化应用。

#### **（四）分子束外延超薄薄膜厚度原位探测器**

**揭榜任务：**面向埃米至纳米厚度超薄薄膜生长可控问题，突破超薄薄膜生长过程的原位光学测量、超薄至薄膜形态的光学模型构建、薄膜厚度与光学常数有效动态解析、长时低漂移高信噪比测量系统研制、高真空系统原位集成设计等关键技术。形成分子束外延工艺下超薄薄膜厚度原位探测方法与探测器样机研制，在分子束外延薄膜生长平台上进行实验验证。

**预期目标：**到 2026 年，完成分子束外延工艺下超薄薄膜厚度原位探测方法与探测器样机研制，可支持金属膜、氧化膜、有机膜等多类型超薄薄膜的原位探测能力，支撑分子束外延工艺超薄薄膜的可控生长。厚度测量范围：1nm-50nm，测量分辨力达到亚单原子层，每小时信号漂移  $< 5 \times 10^{-3}$ ，信噪比  $> 1000:1$ ，单次厚度最快测量时间  $< 10\text{ms}$ 。

### **四、示范应用**

#### **（一）高灵敏原子团簇无创唾液传感器**

**揭榜任务：**为满足多样化医疗服务场景的迫切需求，实现近距邻接耦合团簇阵列精确制备，攻克复杂基质中对痕量物质高特异性识别的技术难题，开发基于金团簇等离激元即

时检测（POCT）唾液智能分析系统。

**预期目标：**到 2026 年，搭建 1 套唾液 POCT 能智能分析仪，其中金团簇原子数的误差控制在绝对值小于 100。系统具备同时检测唾液中的葡萄糖、尿酸和皮质醇三种关键生物标志物的能力，检测时间缩短至 10 分钟以内。

## **（二）面向高效稳定太阳能电池的钙钛矿薄膜原子级缺陷钝化技术**

**揭榜任务：**针对面积大于  $30 \times 30\text{cm}^2$  商用钙钛矿太阳能电池产品的迫切需求，发展原子级沉积新方法，生长大面积高品质钙钛矿薄膜，突破钙钛矿薄膜均匀化原子级缺陷钝化关键技术，研制电池电极和封装材料的原子层沉积集成技术，提升钙钛矿太阳能电池的寿命和可靠性，推动产业化应用。

**预期目标：**到 2026 年，产出面积  $>900\text{cm}^2$  的钙钛矿薄膜，实现薄膜的原子级缺陷钝化且缺陷态密度  $<10^{14}\text{cm}^{-3}$ ，结合原子层沉积技术完成相应太阳能电池模组的批量化生产。在此面积下实现光电转换效率  $\geq 20\%$ 。连续光照 2000 小时后，效率衰减  $<5\%$ ；通过 IEC “双 85” 湿热测试认证。