

附件 2

“纳米前沿”重点专项 2022 年度 项目申报指南

(仅国家科技管理信息系统注册用户登录可见)

“纳米前沿”重点专项的总体目标是围绕物质在纳米尺度(1~100 纳米)上呈现出的新奇物理、化学和生物特性,开展单纳米尺度效应和机理、新型纳米材料和器件制备方法、纳米尺度表征新技术等方面的基础前沿探索和关键技术研究,催生更多新思想、新理论、新方法和新技术等重大原创成果。同时,开展纳米科技与信息、能源、生物、医药、环境等领域的交叉研究,提升纳米科技对经济社会发展重点领域的支撑作用。

2022 年度指南将围绕单纳米尺度等前沿科学探索、纳米尺度制备核心技术研究、纳米科技交叉融合创新等 3 个重点任务部署项目,拟支持 39 个项目,拟安排国拨经费 9 亿元。同时,拟支持 12 个青年科学家项目,拟安排国拨经费概算 6000 万元,每个项目 500 万元。

项目统一按指南二级标题(如 1.1)的指南方向申报。同一指南方向下,原则上只支持 1 项,仅在申报项目评审结果相近、技术路线明显不同时,可同时支持 2 项,并建立动态调整机制,根据中期评估结果,再择优继续支持。

申报单位根据指南支持方向，面向解决重大科学问题和突破关键技术进行设计。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容。项目执行期一般为 5 年。项目下设课题数不超过 4 个，每个项目参与单位总数不超过 6 家。项目设 1 名负责人，每个课题设 1 名负责人。

指南方向 4 是青年科学家项目，支持青年科研人员（男性 35 周岁以下，女性 38 周岁以下）承担国家科研任务。青年科学家项目不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。项目设 1 名项目负责人，原则上团队其他参与人员年龄要求同上。

本专项所有涉及人体被试和人类遗传资源的科学研究，须遵守我国《中华人民共和国人类遗传资源管理条例》《涉及人的生物医学研究伦理审查办法》《人胚胎干细胞研究伦理指导原则》等法律、法规、伦理准则和相关技术规范。涉及实验动物和动物实验，要遵守国家实验动物管理的法律、法规、技术标准及有关规定，并通过实验动物福利和伦理审查。

1. 单纳米尺度等前沿科学探索

1.1 纳米金属极小尺寸结构及其性能研究

研究内容：以探索纳米金属材料的本征纳米尺寸效应与性能极限为牵引，突破纳米金属极小尺寸结构设计与制备技术，获得特征尺寸在 10 纳米以下的稳定新结构，研究金属在极小尺寸下的结构特性，着重探索其中的原子扩散及界面等缺陷的动力学行

为规律和稳定性机制，研究极小尺寸、结构与强度和稳定性等力学、物理和化学相关性能的关系，创新极小尺寸结构的原子尺度表征及跨尺度计算与模拟方法。

考核指标：在三种典型晶体结构（5~8种金属样品）中获得10纳米以下极小尺寸结构；强度达到各自理论强度的50%以上；结构失稳温度高于各自熔点的70%；提出纳米金属极小尺寸结构稳定性机制。揭示极小尺寸结构与强度和稳定性的相互关系，建立极小尺寸结构的原子尺度表征及跨尺度计算与模拟方法。

1.2 纳米尺度的声子热输运研究

研究内容：面向电子和光子器件的热管理在纳米尺度下对超高热导率材料的迫切需求，预测并观测非傅立叶热传导机制，探索相干声子输运（包括声子局域化、量子化和声子流体动力学对热输运）的高效调控，阐明纳米尺度下声子热输运机制；研究声子与光子、电子、磁子、极化子等载流子在低维、异质、界面纳米材料中的相互耦合机制；基于理论研究、结合机器学习和微纳制造等手段，开发高性能纳米热界面材料，以突破纳米热界面研发瓶颈。

考核指标：阐明纳米尺度下声子热输运和调控机制；建立调控纳米结构热输运性能的方法2~3种；阐明纳米尺度下不同载流子相互耦合对热传导的贡献及机理；研发出1~2种固态超高导热纳米热界面材料，实现纵向热导率 $\geq 100\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，纵向界面热阻 $\leq 0.01\text{Kcm}^2/\text{W}$ ，杨氏模量 $\leq 2.0\text{GPa}$ ，剪切模量 $\leq 10.0\text{MPa}$ 和优异

的可靠性 (1000h@150°C, 热阻变化率小于 5%), 并通过回弹率测试 (压缩 30%后释放压力, 回弹 $\geq 90\%$, 循环 1000 次)。

1.3 基于机器学习的纳米表面/界面调控原理与方法研究

发展理论预测模型, 构建基于机器学习描述纳米表面/界面作用的高精度势函数和计算方法, 实现大体系、大规模、长时间的纳米表面/界面相互作用的动力学过程精准描述, 提出精准描述纳米表面/界面相互作用的物理参数和算符, 实现 >10 万原子、 >100 纳秒的第一性原理分子动力学计算方法; 基于上述理论模型, 设计 5 种以上功能纳米材料。

1.4 高强度碳纳米管纤维结构调控及功能化

研究内容: 针对高性能碳纳米管纤维原子级结构调控、多尺度有序组装与功能集成等关键性技术挑战, 研究结构完整、超长碳纳米管的精准构建及生长机制, 发展带隙及手性精准控制制备技术, 研究碳纳米管宏观纤维的结构调控和高强高韧化, 探索碳纳米管纤维多尺度增强增韧的理论机制, 研究碳纳米管纤维的力、热、电学性能调控机制及构效关系, 制备微观及宏观超强、超韧、功能化碳纳米管纤维。

考核指标: 可控制备管径 $\leq 3.0\text{nm}$ 、长度 $\geq 10\text{cm}$ 、半导体纯度 $\geq 99.9\%$ 的高品质碳纳米管; 制备抗拉强度 $\geq 20\text{GPa}$ 、延伸率 4~8%、电导率 $(0.2\sim 1.0) \times 10^7\text{S/m}$ 、导热系数 $\geq 500\text{W/m}\cdot\text{K}$ 的碳纳米管宏观纤维, 并研制 2~3 种强度、导电性、导热性等功能同

时达到上述指标的功能性器件及应用系统。

1.5 纳米材料诱发机体免疫互动与应答机制研究

研究内容：研究纳米材料诱发的机体免疫互动与应答机制是纳米生物效应领域的关键科学问题，是医用纳米材料理性设计的理论基础。通过纳米科学、材料学、免疫学、医学、计算科学等交叉研究手段，系统阐明纳米材料本征性质对免疫识别、应答的分子机制；解析纳米材料构效关系，发展纳米免疫应答调控新机制与新方法，为纳米材料在重大疾病防治的创新应用奠定基础。

考核指标：建立高通量、单细胞多组学、多维动态研究流程与方法，系统阐明 5~7 类纳米材料免疫互动和应答机制，其中至少 1 类纳米材料有原子层次的单分布性和原子精确的组成结构；以 Toll 样受体、炎症小体等靶点为突破口，结合纳米构效关系及计算机辅助设计，发展 5~7 种精准纳米免疫调控策略，并提出普适性方法；在至少 3 类疾病模型中（如病原体感染、肿瘤、炎症）完成纳米材料的免疫调控原理验证，并建立其生物标志物。开展临床研究，获得临床受试者免疫相容性的临床数据。

1.6 一维纳米通道栅控离子学器件

研究内容：面向纳米技术在未来超低能耗器件中的应用，探索基于非电子信息传输的新型离子学器件，研究适用于栅极调控的一维纳米离子通道及其与固态电解质的异质集成技术；通过原位表征等手段，研究离子在一维限域空间里的运输机制；建立理

论模型，模拟栅极调控下纳米通道中的离子输运行为，验证构效关系；构建具有低功耗信息传输功能的纳米离子学器件，突破传统电子学器件研究范式。

考核指标：构建不少于 2 种基于一维纳米通道的三端栅控离子学器件，纳米通道尺寸小于 5 纳米，离子流调控精度优于 100 fA；提出并验证 3 种以上栅控离子流测试方案；开发 1 套离子学器件模拟器；低功耗开关器件工作电压小于 1V，单脉冲能耗小于 1pJ；建立纳米离子学器件应用国家标准。

1.7 太赫兹与中远红外波段极化激元二维原子晶体及其感放存微纳器件研究

研究内容：针对太赫兹与中远红外波段（谱段 1~30THz）材料的光与物质相互作用弱，导致探测和放大器件效率低、存储器件难以实现等问题，聚焦该波段的高效极化激元二维原子晶体及其新特性新结构，研究建立时空高分辨太赫兹与中远红外原位多模态物理特性表征技术，研究亚 10 纳米尺度下极化激元、激发态载流子和载流子自旋演化动力学机制，研究基于二维原子晶体及其结构极化激元效应的太赫兹波及中远红外光探测、电信号放大和存储的微纳器件实现途径。

考核指标：建立工作在室温、干燥空气环境条件下的原位多模态物理特性表征技术，其表征谱段 1~30THz、空间分辨率达亚 10 纳米尺度、时间分辨率达 30 飞秒以内，兼容光谱、光场、光

电响应及形貌等成像；可在室温工作的探测、放大和存储微纳器件，工作谱段位于 1~30THz 范围，其中，探测器的室温等效噪声功率小于 $1\text{nW/Hz}^{0.5}$ 、响应时间小于 3ns。

1.8 无机二维纳米材料热绝缘极限研究

面向工业制造等领域节能降耗对超薄、高效保温隔热材料的应用需求，通过调控无机二维材料晶格中声子群速和弛豫时间以及非晶材料中热载体的振动模式分布，建立突破热绝缘性能极限的材料设计理论；揭示声子非谐性振动规律及声子纳米粒子散射机制，阐明晶格极限尺度下声子散射强度及平均自由程的调控规律，发展二维晶格热传导理论，获得常温常压下无机二维热绝缘极限材料，其中晶态材料热导率 $<0.09\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，非晶态材料热导率 $<0.01\text{W/m}\cdot\text{K}$ ，各向异性热导率比 >300 ，研制宽域温度范围（-40~1000°C）新一代保温隔热材料。

1.9 介晶纳米构建与多自由度光场动态调控

面向未来光通信、光计算的变革性器件需求，探索介晶纳米构建用于实现振幅、相位、偏振态、光子角动量、工作波段等多自由度光场动态调控。研究 2 种具备刺激响应构象多稳态的液晶、类液晶基元构造设计，揭示纳米到百纳米尺度的跨尺度/多层级介晶纳米结构组装构建。探索层级结构与 5 种以上光子自由度的构效双向映射，实现光子多自由度可重构、可编程的精准动态操控，设计验证 128×128 阵列多自由度光调制器等原理性器件，获得相

位调制深度大于 2π 、工作波段的光谱调制范围大于 400 纳米。

1.10 表面单分子激发态的精准表征研究

研究内容：发展空间高分辨扫描探针或裂结技术与超快时间分辨谱学的融合技术，提升表面单分子的多模态纳米表征方法和手段，精准测量分子电子态、振动态、自旋态等自由度的内禀特性及其在外场下的响应与演化，在单个化学键精度上甄别多样性的中间反应物种，在皮飞秒时间尺度上探测单分子激发态特性以及化学反应、电荷转移和能量传递动力学过程，构建描述分子构效关系的全局模型和多模态作用理论机制。

考核指标：针对化学基元反应与高效光电转换等领域中的共性表征难题，发展单分子电子、振动以及自旋等激发态的空间、能量、时间高分辨表征与调控方法 3~5 项；实现对反应物种的高空间化学分辨（单个化学键精度）以及外场下分子激发态演化动态过程的表征；超高真空环境中空间分辨不大于 1.5\AA （或者大气环境中空间分辨小于 2 纳米），电子态能量分辨 $<1\text{meV}$ ，振动态测量精度 $<8\text{cm}^{-1}$ ，实现皮飞秒时域表征，最优时间分辨 $<50\text{fs}$ 。

1.11 亚纳米尺度的精密测量新方法

研究内容：针对材料合成制备中的动态结构成像以及工况器件中电子和能量转移过程的原位观测问题，发展具有空间和时间高分辨能力的表征技术，实现对成核生长、基元自组装、化学反应过程、器件中电荷与能量转移过程的精密测量，为新概念纳米

材料的制备与器件应用奠定基础。

考核指标：发展低维材料生长和化学反应过程的原位动态成像与化学识别技术 3~5 项，达到原子/分子分辨率，温度范围 400~1000K；发展多域（能量、动量、空间、时域、频域）结合的原位表征技术，建立纳米结构分辨的物性（光电磁热力等）高通量标准测量方法 3~5 项，能量分辨 $<1\text{meV}$ ，动力学时间分辨 $<100\text{fs}$ 。完成工况下材料和器件的表征技术 1~2 项：磁场 0~2T，光场强度 0~100mW/cm²，电压 0~15V，温度 77~373K。

2. 纳米尺度制备核心技术研究

2.1 低功耗范德华异质结晶体管与功能耦合电子器件关键技术研究

研究内容：针对尺寸微缩极限下异质结晶体管器件高漏电流导致的高功耗问题，研制新型低维半导体沟道材料和新原理异质结晶体管器件；发展晶圆级范德华异质结控制组装技术和界面原位多场耦合表征技术，建立范德华界面载流子输运模型，研制低功耗范德华异质结晶体管；研发范德华平面与三维互联技术，构筑范德华异质结晶体管低功耗逻辑电子器件，设计构筑范德华晶体管柔性电子器件。

考核指标：获得直径大于 4 英寸、层数可控的高质量二维范德华异质结构；研制室温电子迁移率 $>150\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、室温空穴迁移率 $>200\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 的单层二维半导体材料；构筑接触势垒 $<20\text{meV}$ 、

接触电阻 $< 500\Omega\cdot\mu\text{m}$ 、漏电流 $< 10^{-12}\text{mA}/\mu\text{m}$ 的范德华晶体管；研制静态功耗 $< 10\text{pW}$ 的多层互联范德华晶体管逻辑电子器件。

2.2 二维材料异维超结构与器件关键技术研究

研究内容：针对电子芯片特征尺寸缩小面临的物理极限问题，研究二维磁性材料的异维原子级有序超结构（ $2+N$ 维， $N=1, 2$ ）的创制机理及其层间精确操控、多层次互连的新范式构筑方法，精准调控异维原子和重复单元结构，获得高磁有序温度、强磁各向异性的异维超结构；探究超结构及相关新奇物性的调控规律并阐明其物理机制；制备低功耗、高速度和多阻态二维磁性存储与逻辑器件、垂直互连多层次大规模集成逻辑电路。

考核指标：获得重复单元 > 50 的 $2+N$ 维异维结构；超结构磁有序温度 $> 300\text{K}$ 、室温下各向异性场 $> 1\text{kOe}$ ；实现单次操作功耗 $< 200\text{fJ/bit}$ ，操作时间 $< 1\text{ns}$ ，阻态数 ≥ 5 的二维磁性存储与逻辑器件；层间互连层级数 ≥ 5 ，集成逻辑电路晶体管数量 > 10000 。

2.3 超低功耗自旋轨道矩调控与器件关键技术研究

面向未来信息技术对超低功耗非易失存储与逻辑器件的需求，研制居里温度 $\geq 450\text{K}$ 的晶圆级二维磁性材料（直径 ≥ 2 英寸），实现强电压调控磁各向异性（ $\xi \geq 200\text{fJ/Vm}$ ）和低写入电流密度（ $J_c \leq 1 \times 10^6\text{A/cm}^2$ ）的无磁场自旋轨道矩翻转新方法。构建具有高隧穿磁阻（TMR）的新型室温二维磁性隧道结（MTJ）纳米器件，突破超低功耗全电控自旋轨道矩（SOT）器件写入新技术并进行

高能效布尔逻辑运算验证。

2.4 低维功能材料体系的单原子尺度精准构筑及其原理性器件关键技术研究

针对未来信息功能器件所亟需的低维材料体系及其物性研究，建立高效的单原子/分子尺度精准构筑低维结构、原子可控组装和扫描探针自主操纵新方法，发展同时具备超高空间 (<0.01 nm) 分辨、超高能量分辨 ($<50\mu\text{eV}$)、超高自旋态能量分辨 (<100 neV) 的成像与多场探测技术，实现单电子、单自旋层次的精准测量并建立变革性的物性研究新方法。构筑原子级精准界面的超快开/关逻辑器件 ($<50\text{ns}$)。

2.5 平板 X 射线源与探测器及视频适形 CT 成像关键技术研究

研究内容：针对医学诊疗应用对低剂量、高分辨、视频成像的 CT 技术需求，研究亚 10 纳米尖端场发射体与高亮度微纳电子源、快速微纳 X 射线束源及阵列寻址的关系，研制满足视频成像的可寻址微纳 X 射线源阵列面板；研究微纳器件结构中的纳米界面与光电转换、载流子快速输运、信号放大的关系，研制快速高灵敏度和宽动态响应范围的平板 X 射线探测器；研究视频适形成像的三维重构算法，研制采用平板 X 射线源与探测器的视频适形 CT 成像系统样机，并申报开展临床研究批件。

考核指标：(1) 可寻址微纳 X 射线源阵列面板：场电子发射体为纳米材料，单个像素电子源尺寸 $\leq 50\mu\text{m}$ 、开关时间 $\leq 0.1\mu\text{s}$ ；

对角线尺寸 ≥ 8 英寸，X射线束源阵列数量 $\geq 500 \times 200$ ，发光均匀性高于80%。（2）平板X射线探测器：单个像素尺寸 $\leq 50\mu\text{m}$ 、动态响应范围 $\geq 120\text{dB}$ ；对角线尺寸 ≥ 8 英寸，探测像素单元阵列数量 $\geq 3200 \times 2400$ 。（3）视频适形CT成像系统样机，成像分辨率优于 $50\mu\text{m}$ ，三维图像重构时间 $\leq 60\text{s}$ 。

2.6 硅基低维半导体三维异质光电集成关键技术研究

研究内容：针对新一代光电芯片的高密度集成与高通量信息处理需求，开展低维半导体光电功能器件的三维异质集成研究。实现低维半导体驱动编码的硅基高密度量子阱纳米光源与超快光电探测器阵列；发展三维异质集成工艺实现光电功能互连，构建多通道信号并行收发演示系统，探索片上高通量光电信息技术应用。

考核指标：纳米光源阵列尺寸达4英寸、阵列规模不低于 1024×1024 、发光亮度 $>10^5$ 尼特；实现低维半导体驱动管阵列调制、单管工作带宽 $>10\text{MHz}$ ；光电探测器阵列响应频率 $>1\text{GHz}$ ；实现驱动、纳米光源与探测器件三维异质片上集成，单通道光电功能模块投影面积 $<100\mu\text{m}^2$ ，信息传输带宽 $>1\text{Mbit/s}$ 。

2.7 高偏振有机微纳激光材料与器件关键技术研究

研究内容：探索微纳尺度分子聚集体中的激子手性产生、传递和放大机制；从分子水平和纳米尺度上认识有机材料的激子手性起源和偏振发光的本质；研究自旋极化激发态过程的微观调控机制，通过激子耦合及纳米微腔效应实现高性能激光出射；利用

外场手段诱导自旋简并态的塞曼效应，调控有机材料发光的偏振属性；构建具有特定线偏振、圆偏振发光属性的有机微纳激光阵列，探索其在新型显示技术中的应用。

考核指标：有机微纳激光光谱覆盖全可见（400~750nm）范围，激光线偏振比>20:1，激光阵列器件色域范围超过标准 RGB 空间 30%以上；光致圆偏振发光 g 值>0.5，电注入偏振发光器件 g 值>0.1，外量子效率>20%，亮度 1000cd/m² 下，器件寿命（LT50）>3000h；单个微纳器件中外场对发光偏振的有效调制幅度>20%。

2.8 石墨炔聚集态结构可控制备及电化学储能基础研究

研究内容：石墨炔具有我国自主知识产权，是我国科学家引领的领域。主要研究石墨炔独特的原子分布以及兼具 sp 和 sp² 杂化的二维网络结构与高效储能、化学转化及其新概念器件中特殊功能的关系，研究碳化学键和本征带隙等特征与石墨炔晶体及连续制备超大面积单层和少层石墨炔晶态薄膜的关系，发展石墨炔及其功能材料生长、组装和性能调控的新知识。

考核指标：揭示石墨炔连续制备超大面积单层和少层晶态薄膜生长的热力学和动力学基本问题；建立 2~3 种大面积、高晶化和高取向石墨炔晶态薄膜可控制备方法，石墨炔薄膜的面密度 8 mg/cm²，面积容量密度 12mAh/cm²；发现 3~5 种原创的石墨炔“炔烯互变”等新概念引发的电化学储能新性质、新效应和新现象，提出基于石墨炔基纳米材料的电化学高效能源存储与智能转换过

程的原创性基础原理，电化学电池首圈库伦效率大于 85%，循环稳定次数 10000 圈以上。

2.9 多维纳米超材料声能调控机理及其射频器件研究

研究内容：微纳声学芯片是射频前端关键技术之一，开展基于多维纳米超材料的新一代声学芯片技术研究，阐明纳米级成核层对压电单晶薄膜的调控机制及表面晶格对声能的调控机理，建立多物理场仿真平台，研究大机电耦合系数、低损耗多层纳米异质衬底及超材料表面设计方法，突破三维结构的精细化纳米工艺，开发高性能射频器件，实现其在移动通信领域及在航天极端环境领域的示范应用。

考核指标：成核层 $\leq 30\text{nm}$ ，表面粗糙度 $\leq 0.5\text{nm}$ ；千根以上电极的三维多场精确仿真速度达到分钟级；超高频声学谐振器： $Q \geq 1000@10\text{GHz}$ ；无源标签传感器： $f_r \geq 3.5\text{GHz}$ （ $-240\sim 300^\circ\text{C}$ ），耐过载 $3.2 \times 10^4\text{g}$ ；纳米超材料性能指标：获得不少于 3 种压电超材料表面结构，研发微纳声学芯片，实现微纳声学芯片能量的单向聚集和高效控制。

2.10 三维集成围栅器件关键技术研究

研究内容：针对 3nm 以下节点大规模集成电路的纳米尺度制备关键核心问题，研究围栅器件的单片三维顺序堆叠的关键工艺与集成技术，探索设计与工艺协同优化的等效微缩方法，突破纳米尺度下高迁移率沟道材料、低接触电阻率、功函数调控等瓶颈

问题，形成高密度的围栅器件三维集成制造方法，研制基于围栅器件的三维集成 CMOS 单元，完成环振、SRAM 等主要电路宏单元的演示验证。

考核指标：在晶圆垂直方向上集成不少于 2 层围栅结构器件，器件中最薄沟道厚度小于 10nm，在 0.7 V 驱动电压下沟道饱和区电流密度 $\geq 400\mu\text{A}/\mu\text{m}$ ，亚阈值摆幅 $\leq 70\text{mV}/\text{dec}$ ，电流开关比 $\geq 4\times 10^6$ 。

2.11 基于莫尔超晶格的激子特性研究及单光子源应用关键技术研究

研究二维半导体莫尔超晶格的激子态发光特性，发展高精度转角可控的垂直堆垛转移技术（转角精度 < 0.1 度），获得周期均一的莫尔超晶格（面积大于 $> 5\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ ）和限域莫尔激子，建立高时（ $< 80\text{fs}$ ）空（ $< 1\text{nm}$ ）分辨的原位光电表征技术，实现单光子发射阵列数 $> 100\times 100$ ；发展莫尔激子单光子源的外场调控关键技术，实现单光子发射波长（800~1200nm）、偏振极化率（ $> 90\%$ ）、寿命（10ns~1 μs ）等可控调节；探索莫尔激子单光子源的微腔增强和片上集成应用。

3. 纳米科技交叉融合创新

3.1 高性能钙钛矿发光材料与器件

研究内容：面向信息领域可穿戴终端对柔性显示器件的需求，聚焦高效高稳定金属卤化物钙钛矿发光材料与器件，研究钙钛矿发光材料组分和纳米结构的内在关联及其与材料光电性能的

关系，研究多层纳米薄膜结构形貌构筑和界面调控及其对器件发光性能的影响规律，研究纳米尺度下钙钛矿发光材料与器件的可柔性化制备技术，研究钙钛矿发光器件中界面、体相及封装条件与稳定性的内在关联，研究钙钛矿发光器件与 TFT 的集成工艺，实现单色钙钛矿发光器件的显示验证。

考核指标：（1）在电流密度不小于 100mA cm^{-2} 条件下，基于至少 2 种钙钛矿发光材料的发光器件外量子效率大于 30%，柔性发光器件外量子效率大于 25%；（2）在 Rec.2020 色域及电流密度不小于 100mA cm^{-2} 条件下，实现红、绿、蓝发光器件外量子效率分别大于 20%、25%、15%， 100mA cm^{-2} 实际工况加速老化下器件稳定性 T_{50} 分别大于 100、200、50 小时。

3.2 大尺寸石墨烯单晶与高速光通信器件

针对下一代高速光通信技术中的关键支撑材料和器件集成需求，开展面向硅基集成的石墨烯单晶精准合成及规模化制备技术，研制与硅基光波导技术结合的片上集成石墨烯高速光通信器件。石墨烯单晶尺寸达 6 英寸，平整度优于 0.5nm，层数为 $\geq 95\%$ 单层；室温载流子迁移率高于 $15000\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ；集成光通信器件数据速度 $\geq 30\text{Gbit/s}$ ，电光调制器件功耗 $\leq 500\text{fJ/bit}$ ，光电探测器件响应度 $\geq 50\text{ mA}\cdot\text{W}^{-1}$ 。

3.3 大视野纳米数字显微芯片成像技术

针对生物纳米尺度大视野高分辨成像的重要需求，研究超大

规模纳米像素数字显微芯片的大规模集成工艺制程设计与成像串扰抑制方法；开展小体积、长时程、多模态大视野纳米数字显微芯片成像系统设计和研制；集成微流控技术开展肿瘤微环境可视化、动态转移监测及高通量治疗药物筛评，发展 2~3 种医学研究创新科学仪器和临床检验设备。纳米数字显微芯片的像素数目 ≥ 10 亿，显微芯片量子效率 $\geq 30\%$ ，像素串扰 $\leq 30\%$ ，响应波段为 400~700nm，实现 $\geq 100\text{mm}^2$ 视野中全部活细胞动态监测，成像分辨率优于 500nm，帧频 ≥ 1 帧/秒。

3.4 纳米铌酸锂薄膜光子器件原理及加工

研究内容：面向 5G/6G 通讯、光计算、精密测量对现有芯片性能升级的重大需求，研究电、光、声场与铌酸锂纳米薄膜中不同微纳结构相互作用原理与机制，发展基于铌酸锂纳米薄膜的微纳器件设计、关键加工工艺及集成技术，实现高速调制、高频滤波和高精光频控制等功能。

考核指标：波导结构刻蚀最小线宽 40nm，加工误差 $< 20\text{nm}$ ，工艺稳定性 $> 90\%$ ；调制带宽 $> 70\text{GHz}$ ，功耗 $< 20\text{fJ/bit}$ ，滤波频率 $> 8\text{GHz}$ ，插入损耗 $< 4\text{dB}$ ，光频率梳光谱范围 $> 50\text{nm}$ ，超倍频程的连续谱展宽，波导色散 $< 1 \times 10^{-25}\text{s}^2/\text{m}$ 。

3.5 面向空间环境的纳米功能薄膜设计、制备与应用

研究内容：面向新一代空间高效热管理、轻量化在轨实时变形测量应用需求，建立宏观尺度纳米薄膜材料的构筑与构效关系，制

备可满足空间环境的轻质柔性纳米功能薄膜材料,发展纳米功能薄膜的设计、制备新方法;揭示功能单元及其聚合物界面对光反射/发射、声子热传导、力电耦合等的作用新机制与影响规律;建立纳米功能薄膜涂层的空间应用、稳定性与服役性能的评价体系。

考核指标:热控涂层太阳光平均反射率 ≥ 0.95 ,长波红外平均发射率 ≥ 0.98 、减重25%以上;BN复合薄膜面内外热导率均 $\geq 20\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、体电阻率 $\geq 7\times 10^4\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$;石墨烯薄膜面内热导率 $\geq 1600\text{W/m}\cdot\text{K}$ 、电阻率 $\leq 1.2\times 10^{-4}\Omega\cdot\text{cm}$ (厚度 $\geq 300\mu\text{m}$);柔性传感薄膜响应时间 $\leq 0.5\text{s}$ 、变形测量精度优于 $10\mu\text{m}/\text{m}^2$ 。经空间4000ESH紫外、 $1\times 10^{13}\text{p}/\text{cm}^2$ 质子、 $1\times 10^{14}\text{e}/\text{cm}^2$ 电子辐照环境试验后,纳米功能薄膜性能退化 $\leq 10\%$ 。

3.6 用于极端环境防护的结构功能一体化纳米复合材料及应用探索

研究内容:针对覆冰、雷击、高能冲击等极端环境和复杂服役条件,研发高性能纳米复合材料,发展百纳米内结构与界面静、动态力学性能和热、电输运行为测试方法,探索纳米结构及界面传热、电荷注入与传输、相变与损伤对材料宏观性能的作用机制。

考核指标:建立从纳米、介观到宏观的多尺度力、热、电特性构效关系与本构关联,关键性能预测误差小于20%;发展纳米复合技术,-15~0°C冰风洞实验较现役材料覆冰减少90%,200kA雷击、 $1\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 高能冲击1纳秒无烧蚀、汽化、断裂;实现航空

航天飞行器重要应用 2~3 例。

3.7 智能控释材料分子设计及纳米农药研制

研究内容：面向农业绿色发展所面临的农药减施增效国家重大需求，针对若干大吨位农药品种和我国自主创制的绿色农药新品种，研究环境友好硅基纳米空心结构等智能控释载体材料的分子设计、水分散界面调控及其低成本规模化制备技术；发展高效农药负载技术和水分散农药控释新技术，研制纳米智能控释农药制剂，实现减量增效；开展农业有害生物的田间防效和生态环境安全性评价，建立纳米农药使用技术规范及质量标准。

考核指标：研制 5~7 种纳米智能控释材料，突破年产百吨以上纳米载体材料的低成本规模化制备技术；研制 3~4 种新型绿色高效水分散纳米农药，与传统乳油剂型相比，农药原药用量减少 1/3，持效时间延长 30%以上，施药成本降低 25%以上；开展田间科学试验，完成纳米农药安全性评价，建立 3~5 项纳米农药使用技术规范及质量标准。

3.8 超高灵敏检测痕量危险有害化学物质的纳米材料与技术

研究内容：面向特定场合危险有害化学物质（爆炸物、神经毒剂、毒品等）原位、快速、精准监测需求，发展纳米尺度有机光敏材料设计方法，研制晶态有机纳米孔材料及大尺寸高孔隙率纳米薄膜材料，研究结构基元、键合方法等对纳米材料结构和性能的影响和调控机制；发展纳米有机光敏材料器件化方法，研制

具备实际应用能力的监测装置，验证其在典型行业和特定场合的技术有效性。

考核指标：揭示纳米尺度有机光敏材料对危险有害化学物质的响应机制，研发 3~5 种超高灵敏检测痕量危险有害化学物质的纳米材料，实现对典型实际样品的超高灵敏检测，连续工作 8 小时，材料性能衰减不超过 4%；建立监测装置示范生产线，实现 5 个以上不同类型场景的示范应用；在擦拭或抽气条件下，对 TNT、沙林和冰毒等代表性爆炸物、神经毒剂和毒品的检出限分别达到 0.1ng、1mg/m³ 和 8ng。

3.9 深度除磷与磷回收的水处理纳米材料与技术

研究内容：研发功能有机载体固定的小尺寸纳米除磷材料 (<10nm)，发展适合于固定床水处理工艺的复合材料毫米级成型方法；揭示复合材料通过载体/纳米颗粒的过程协同实现水中磷深度净化的效应与机制；构建水中磷形态定向调控—纳米材料深度除磷与磷资源回收的集成工艺体系；开发以复合纳米材料为核心的深度除磷与磷回收集成技术并进行实际应用验证。

考核指标：发展深度除磷复合纳米材料的制备以及材料毫米级成型的方法；揭示复合材料深度除磷过程中的载体/纳米颗粒的协同效应与机制；突破日产吨级复合纳米材料的规模化生产技术；开发磷形态定向调控—复合材料深度除磷与磷回收的集成技术及相关撬装式装置，验证其处理含磷污废水 (300m³/d) 的技术有效

性，处理后出水总磷 0.1ppm 以下。

3.10 极端条件下提升机体负荷能力的响应性纳米功能材料及技术研究

研究内容：针对高原高寒等极端条件下细胞线粒体受损、功能低下导致机体负荷能力下降的问题，构建靶向体内主要应激器官及效应细胞线粒体的纳米探针，发展可视化监测线粒体效能的高分辨活体动态成像技术，研究线粒体动态行为与功能之间关系；研制可主动识别线粒体、并在线粒体内可控释放的响应性纳米材料，发展极端条件下提升受损线粒体网络效能的新方法，并形成批量化制备工艺。

考核指标：研制 2~4 种靶向主要应激器官效应细胞线粒体的纳米探针（尺寸 $<10\text{nm}$ ，至少包括一种具有原子层次的单分布性和原子精确组成结构的纳米材料），包括荧光、磁和 PET 纳米探针，其对 ATP、ROS、 NAD^+ 和 NADH 的可视化检测限分别为 $0.1\mu\text{M}$ 、 0.8nM 、 $1\mu\text{M}$ 和 $0.06\mu\text{M}$ ；开发 2~3 种靶向心肺等器官、提升线粒体效能的纳米控释材料（尺寸为 $50\sim 200\text{nm}$ ，长效释放时间大于 24 小时，累积释放率大于 85%），建立规模化制备工艺；实现海拔 3500 米以上机体主要应激器官干预后负荷能力提升 50%，并完成临床批件的申报。

3.11 基于仿生纳米材料的关节软骨损伤修复技术

研究内容：面向关节软骨损伤修复的临床需求，研究基于仿生纳

米复合材料的关节软骨损伤修复技术,发展新型关节软骨基质仿生纳米复合材料;研究仿生纳米材料结构与特征对细胞增殖、分化与基质重建等生物学行为影响的机制;研究仿生梯度结构关节软骨预构体3D生物打印技术,研究生物力学微环境对仿生关节软骨预构体性能影响的规律;研究仿生关节软骨植入体对软骨损伤修复的疗效。

考核指标:开发新型低摩擦系数(<0.01)和高耐磨性的仿软骨基质纳米复合材料5~7种;实现透明软骨植入体压缩模量 ≥ 5 MPa;研制1套可构建仿生梯度结构的3D生物打印设备(线宽 $\leq 50\mu\text{m}$,打印速度 $\geq 50\text{mm/s}$);开发3~5种具有纳米孔道的细胞包覆材料;获得1~2种三类医疗器械临床批件;关节软骨植入体在植入6个月后,植入区与正常区的MR成像T2值之间无显著统计学差异($P>0.005$)。

3.12 体内原位组装可形变纳米结构设计与抑瘤效应及其代谢过程的基础研究

设计生物相容性的多肽单元,研究其生物微环境中组装过程,构筑病理/生理环境因子调控的体内原位组装和形变纳米体系;研究形变纳米结构与泌尿系统靶向富集、病灶滞留、体内转运和快速代谢规律;建立原位自组装形变纳米体系对泌尿系统肿瘤诊疗一体化的高效安全的新方法,肿瘤组织滞留时间大于6天,在手术过程中对 $<1\text{mm}$ 肿瘤稳定成像时间 $>24\text{h}$ 。构建5~6种肿瘤介导组装的多肽纳米诊疗剂,实现肿瘤富集效率 $>10\%ID/g$,滞留

时间>6天；肿瘤成像效果：分辨率<1mm，信噪比>10；成像效率：敏感性>90%，特异性>90%，成像时间窗口>24h；肿瘤抑瘤率>90%，治疗指数>10；建立1~2种人离体膀胱和肾荷瘤器官安全性评价模型，1~2种纳米诊疗剂疼痛行为和分子生物学指标降低>50%，申报临床实验研究（IND）批件。

3.13 植物源光敏剂纳米结构组装体的功能调控与构效关系研究

研究内容：研究植物源新型光敏剂的纳米结构组装原理；探索智能纳米组装体靶向肿瘤、血管、细菌、病毒的功能与调控方法及构效关系；植物源新型光敏剂的纳米组装体系在细胞和组织层面的输运、识别、免疫激活、杀伤、代谢等的生物学机制；开展植物源光敏剂纳米药物用于光动力治疗恶性肿瘤、血管畸形、细菌/病毒感染等疾病的临床前效果研究。

考核指标：研发出3~5种植物源光敏剂组装的粒径 $\leq 200\text{nm}$ 新型纳米药物，在600~900nm的光动力治疗窗口实现强吸收，摩尔消光系数大于 $20000\text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ ，多分散系数 ≤ 0.5 ，包封率 $\geq 80\%$ ；完成光动力治疗恶性肿瘤、血管畸形、细菌/病毒感染的临床前效果的基础研究，至少1种植物源光敏剂纳米药物获得I类新药临床许可，进入临床试验。

3.14 纳米酶精准调控及用于血液恶性肿瘤诊疗研究

合成制备氧化还原性能可调的纳米酶，针对白血病等血液恶

性肿瘤细胞与环境，结合细胞内微环境的纳米限域效应，研发定向有序和定量可控的纳米酶催化技术；研究基于纳米酶的细胞和靶器官/组织中免疫微环境精准调控方法，发展纳米酶协同的细胞治疗技术，在白血病动物模型上的综合疗效优于当前临床一线化疗药物柔红霉素和阿糖胞苷；建立其评价方法及疗效和预后评估技术，制定纳米酶活性测量方法等国际标准 1~2 项、国家标准 2~3 项；获批 1~2 个国家药监局医疗器械注册证。

3.15 用于心脑血管疾病治疗且分子结构明确的纳米药物

研究内容：结合纳米尺度药物长循环低毒性的特点以及分子结构明确的药物在质量可控方面的优势，研制在纳米尺度对于心脑血管重大疾病具有显著疗效且分子结构明确的纳米药物，探索其在这些疾病上的靶向递送策略和跨越血脑屏障的纳米生物学效应。研究其纳米结构、纳米尺度及纳米电子特性对于药物治疗效果和代谢动力学的影响规律，建立结构明确纳米药物的质量检测标准和安全性评估方法，并完成临床前研究。

考核指标：研制 3~5 种分子结构确定的纳米药物用于心脑血管疾病（如脑卒中、心梗和缺血再灌注损伤等）的治疗，纳米药物尺寸 1~20nm，疗效优于心脑血管药物“依达拉奉”；建立 1~2 种评价纳米药物跨越血脑屏障的技术或方法；建立 3~5 项纳米药物质量标准 and 安全性检测方法，体内检测限小于 1ng/g；获得 1 件以上纳米药物临床试验批件。

3.16 内源性纳米基元组装生物材料可控制备及其肿瘤治疗新技术

研究尺寸均一可控、高效低毒、高生物相容性的工程化内源性生物纳米基元材料可控组装的原理方法和技术，建立用于药物（小分子药物、核酸药物、溶瘤病毒等）高效递送系统，肿瘤富集效率 $>10\%ID/g$ ，肿瘤抑制率优于一线或二线用药；揭示肿瘤细胞的响应机制；发展 1~2 种体内实时示踪技术及安全性评价方法；建立符合 GMP 标准的规模化制备技术和质控标准，完成针对消化道、呼吸道肿瘤临床前研究，获得 1 项临床批件。

3.17 新型纳米药物调控口腔微生态失衡的递送技术研究

研究纳米分析传感、微流控分析一体化的口腔微生态的精准检测新技术，构建双向调控新型纳米药物递送体系，揭示协同干预口腔及其累及的系统性疾病的多靶点调节机制和作用规律。开发 1 套基于纳米技术的口腔微生态失衡及相关疾病的早诊和预警纳米传感系统，实现口腔一系统疾病协同调控，完成 1 种药物纳米材料递送系统的临床前研究。形成基于口腔微生态标志物等综合指标的口腔疾病及相关全身疾病早诊和预警监控的专家共识。

4. 青年科学家项目

4.1 外场操控新型有机微纳米晶体定向运动及精准定位

区别于国外已报道的偶氮苯等由于化学反应引起的微纳晶体运动体系，研发具有自主知识产权的外场驱动持续定向运动的

新型有机微纳米晶体；研究有机微纳米晶体组成及结构与外场驱动定向运动的构—效关系及晶体内分子受激协同运动机制；实现有机微纳米晶体在二维平面上的持续定向运动和精准定位，运动速度、可持续运动距离、定位精度等技术指标达到领先水平。

4.2 新一代疫苗载体纳米材料设计制备基础研究

针对新型疫苗载体材料面临的难题，系统性研究纳米载体材料与具有几何排列特征的病毒表面蛋白相互作用，实现人工可控的三维自组装纳米材料对于抗原空间排列的纳米尺度精确控制，从而有效调控免疫反应的效果。研究内容包括：开拓自组装纳米结构与多组分抗原蛋白自组装方法；研究纳米材料性质对免疫反应调控机理；构建高通量的免疫功能分析方法。为新一代疫苗构建自主知识产权创新型纳米材料载体，建立普适性的纳米载体设计方法。

4.3 二维极化激元晶体光手性功能材料设计及应用

面向生物大分子的高灵敏、高精度检测等需求，研究二维极化激元晶体序构与高手性特性关联机制，研究手性二维极化激元晶体序构与生物大分子相互作用的动力学机制，研制高手性二维极化激元序构检测功能材料，开展生物大分子的手性检测验证。

4.4 二维异质结构激子极化激元物理及器件

面向实现功能化、集成化片上光电子器件的需求，开展二维异质结构激子极化激元物理及应用研究，探索新型光学微纳结构

与异质结激子强耦合的新机制，利用强耦合效应，研制多维度、宽频谱、低功耗的新型光电调控和感知器件。

4.5 纳米机器人

研究面向精准医疗和环境监测等重大需求的纳米机器人技术，建立纳米机器人功能材料开发和功能集成的交叉科学研究方法，为发展智能纳米机器人提供新思路 and 新技术。

4.6 纳米超快成像技术研究

面向超快观测的极端时间尺度光场调控灵活性、高集成度、高精度探测等需求，研究微纳结构在飞秒级时间尺度下的多维度时空耦合原理及联合调控机制，探索高集成度、高精度超快微纳探测原理，基于智能感知开展灵活、集成、精确的单次曝光超快微纳光学探测新思路、新技术。实现超快多维度光场调控能力，超快成像技术指标达到领先水平。