

# “纳米前沿”重点专项 2024 年度项目申报指南 (征求意见稿)

“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。

2024 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 36 个项目。同时，拟支持 14 个青年科学家项目。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。

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 大面积、多维度、高精度纳米加工制造和拓扑光电器件研究**

**研究内容：**基于对低维材料内应力的精准调控，研究大面积、多维度、高精度、与硅技术融合的纳米加工制造新方法，建立功能可调、可集成的纳米尺度结构与器件加工制造的科学原理，构建核心纳米材料和纳米结构与新奇物性间的构效关系；研究高质量纳米拓扑光电器件和集成芯片在信息、能源和生物等领域的应用。

**考核指标：**实现在大面积（4-6英寸）衬底上分辨率 $<5$ 纳米和均匀性 $>95\%$ 并与硅技术融合的纳米结构与器件；研制出2-4种高性能拓扑光电原型器件，验证其在信息、能源

和生物等领域中的优势。

## 1.2 低维材料的规模化原子级精准制备及其光电器件集成的研究

发展极限加工制作新原理光电器件技术，研究大规模原子级精准制备技术，研制 3~5 种大规模原子级精准低维材料，尺寸面积 $>10\text{mm}\times 10\text{mm}$ ，在超高空间分辨 ( $<0.1\text{ nm}$ )、能量分辨 ( $<50\text{ }\mu\text{eV}$ )、自旋态能量分辨 ( $<120\text{ neV}$ ) 条件下实现材料单键、单自旋、单声子的精准表征，研究光电器件中电子结构与物性的关联性及其调控技术；研制新型超快高灵敏响应、与当前集成电路技术兼容的探测器件阵列，阵列规模 $\geq 32\times 32$ ；制备与器件阵列兼容的高导热界面材料，提供片上器件集成的热失效解决方案。

## 1.3 纳米级晶体管沟道材料热管理研究

**研究内容：**面向新型纳米尺度晶体管对高性能、高稳定性、高效散热的需求，研究纳米尺度晶体管沟道材料及界面中复杂多物理场下的电子、声子传递和耦合机制，研发纳米尺度界面热阻的精确测量手段；研究工作条件下的晶体管原子级缺陷及应力演变，厘清热失效物理机理，建立沟道结构-温度分布-电学性能的对应关系；研究沟道材料原子尺度结构、形貌以及界面构筑对热物性的影响，提高纳米尺度晶体管性能并降低其工作温度。

**考核指标：**开发新型微纳异质结界面热阻表征系统，用

于多物理场下的微纳界面（界面面积小于  $0.02\mu\text{m}^2$ ）能量传递测量，热阻测量精度优于  $5\times 10^{10}\text{K/W}$ ，温度测量精度优于  $5\text{mK}$ ；建立二维材料晶体管的热点测量和调控的方法，实现工作情况下沟道材料及界面缺陷演变的原位表征，结构表征空间分辨率 $<80\text{pm}$ ；实现晶体管纳米尺度温度分布的测量，测量空间分辨率 $<10\text{nm}$ ；提出原子尺度界面热管理策略，实现二维材料  $10\text{nm}$  沟道晶体管在开关比 $>10^5$ 、饱和电流密度 $>1\text{mA}/\mu\text{m}$  的极端工况下，稳态工作温度相较于热管理前降低不小于  $10^\circ\text{C}$ 。

#### 1.4 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以及物理和化学相关性能的关系，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。

**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。

### 1.5 表面单分子激发态的精准表征研究

**研究内容：**发展高空间分辨扫描探针技术或裂结技术，融合超快时间分辨谱学技术，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，实现 3-5 项对单分子激发态多域高分辨表征与调控的方法；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 $\leq 1.5\text{\AA}$ （或者大气环境中空间分辨 $< 2\text{nm}$ ），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 $< 50\text{fs}$ 。

### 1.6 亚纳米尺度的精密测量新方法研究

**研究内容：**针对材料合成制备中的动态结构成像以及功能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、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 3~5 项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，达到原子/分子分辨率；发展多域（如能量、动量、空间和时域或频域）结合的原位表征技术，建立 3~5 项纳米结构分辨的物性（光电磁热力等）高通量标准测量方法，能量分辨 $<1\text{meV}$ ，动力学时间分辨 $<100\text{fs}$ 。完成 1~2 项工作条件下（磁场 0~2T，光场强度 0~100mW/cm<sup>2</sup>，电压 0~15V，温度 77~373K）材料和器件的表征技术。

### **1.7 纳米药物毒理与药效评价的智能化原理与算法研究**

提出 1-2 类纳米材料与肿瘤或血液相关蛋白分子、及其相关生物信号分子作用的毒理学或药效学理论计算方案；发展物理化学机制和人工智能共同驱动的纳米材料毒理效应与药理效应计算机评价方法；通过理论模型计算发现 3-5 种靶向特定生物功能分子、诱发特定药理效应的安全有效的纳米药物或医用纳米材料；实验验证上述部分关键的作用机制与规律。

## **2. 纳米制备核心技术研究**

### **2.1 亚 10 纳米二维半导体超快闪存器件与集成关键技术研究**

针对电荷存储技术在速度和集成功耗上的性能瓶颈，研

究提高二维半导体超快闪存器件的高编程效率和高耐久性的方法；发展亚 10 纳米二维材料异质结构的设计原理与构筑方法，揭示异质结构闪存器件的隧穿工作机制，提出控制隧穿效率新方法；阐明二维纳米材料异质结构提升闪存隧穿效率的内在机制，建立多因子隧穿增强理论模型，实现各因子性能指标理论预测；建立有效提升闪存编程速度、降低器件工作电压、提升器件抗疲劳特性的调控技术，器件编程幅值 $<10\text{V}$ 、编程时间 $<20\text{ns}$ ，变温测试验证器件室温数据保持能力 $>10$  年，器件抗疲劳特性 $\geq 800$  万次。

## 2.2 极化激元多参量太赫兹焦平面探测芯片及感知成像应用研究

**研究内容：**围绕新一代智能感知系统对同时具备室温、高速、多参量特征的太赫兹探测器件的需求，研制极化激元二维晶体多参量太赫兹焦平面探测芯片。研究二维晶体微纳结构的太赫兹电磁场振幅、偏振、频率、相位等参量的协同探测原理，研究多物理场作用下光电转换增强及噪声抑制与微纳范德华界面的关联机制，研究室温高灵敏高速探测的物理机制；研制晶圆级极化激元二维晶体微纳结构太赫兹探测材料，研制完全依赖二维晶体微纳结构的多参量探测微纳器件和焦平面探测芯片；开展焦平面探测芯片在雷达成像系统中的演示验证。

**考核指标：**实现晶圆级极化激元二维晶体微纳结构太赫

兹波探测材料，面积 $\geq 4$ 英寸。实现极化激元二维晶体多参量焦平面探测芯片：无光学辅助系统，具备开关和读出功能；面阵像素 $320 \times 240$ ，单元横向尺寸 $\leq 80 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$ 且厚度 $< 10 \text{nm}$ ；单个探测器峰值探测率 $D^* \sim 10^9 \text{Jones}$ ，响应速度 $< 10 \text{ns}$ ；同时具备可选频率和偏振、相位变化、振幅变化探测功能，支持宽光谱探测和选频探测2种工作模式。实现基于多参量焦平面探测芯片的高分辨成像雷达系统：载波频率 $\geq 0.3 \text{THz}$ ，成像帧频 $10 \text{Hz}$ ，成像分辨率 $< 5 \text{mm}$ ，探测距离 $\geq 10 \text{m}$ 。探测材料、器件、芯片三者均室温工作，且工作频率覆盖 $0.3\text{--}10 \text{THz}$ 。

### 2.3 晶圆级超薄氧化钪纳米铁电材料与集成技术

研究加速纳米铁电材料研发效率的方法，阐明纳米尺度下尺寸和厚度效应、原子层级调控对氧化钪铁电材料性能的影响规律与物理机制；研制适用于先进工艺节点集成的晶圆级高质量超薄氧化钪铁电薄膜，发展基于12英寸晶圆的氧化钪铁电存储器集成技术；开展氧化钪铁电电容器件和阵列性能与可靠性优化，研究包括唤醒效应、疲劳效应和印记效应在内的非理想特性微观机制。高质量超薄氧化钪铁电薄膜厚度 $< 6 \text{nm}$ ，操作电压 $\leq 1.2 \text{V}$ ，剩余极化强度 $2P_r \geq 30 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ；实现12英寸晶圆级氧化钪铁电材料制备并完成存储器阵列集成；实现 $> 4 \text{Mb}$ 铁电存储器原型芯片及完成读写功能验证。

### 2.4 内存级高速相变随机存储器芯片研究

**研究内容：**研究内存级高速相变随机存储器芯片的材料、



器件及其集成技术。研究纳秒级可逆相变材料机理及可靠性机理，研制高速、低功耗、长寿命相变材料，其研究热稳定性满足与 CMOS 工艺兼容的热处理制程；研制高可靠、高良率存储单元结构与存储阵列，以及内存级高速相变随机存储芯片，开展非易失性相变随机存储内存应用系统验证。

**考核指标：**2 种以上内存级相变随机存储器新型相变材料，新型相变材料在 12 英寸晶圆制备的厚度均匀性 $\leq 5\%$ ，材料组分均匀性 $\leq 3\%$ ；研制出内存级高速相变随机存储芯片，芯片容量 $\geq 256\text{Mb}$ 、数据读取延时 $\leq 20\text{ns}$ 、擦延时 $\leq 50\text{ns}$ 、擦写电压 $\leq 3.0\text{V}$ 、擦写功耗 $\leq 0.2\text{pJ/bit}$ 、擦写疲劳大于  $10^8$  次。

## 2.5 氧化镓基深紫外感存算一体芯片与系统研究

针对传统窄带隙材料深紫外探测系统的滤波依赖、高延时等问题，研究大面积宽带隙氧化镓微纳米单晶生长机理，探究缺陷对材料及其深紫外探测器的影响，实现 4 英寸氧化镓单晶衬底，位错密度 $\leq 5 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ ，粗糙度 $\leq 0.5\text{nm}$ ；研究氧化镓基深紫外感算器件、阵列集成及外围电路，探索事件驱动的动态信号感知方案，研究基于新原理器件（忆阻器等）的存算一体芯片及外围电路，探索感算芯片与存算芯片的异质集成方法，实现 200-280nm 波段深紫外感算器件峰值响应度 $\geq 5 \times 10^3 \text{A/W}$ ，响应度可调状态数 $\geq 5\text{bits}$ ，比探测率 $\geq 10^{14} \text{Jones}$ ，完成规模 $\geq 64 \times 64$  感算芯片与 $\geq 1\text{M}$  存算芯片的异质集成，存算芯片支持 $\geq 5\text{bits}$  权重精度；构建感存算一体智能感

知演示系统，完成深紫外场景的智能感知验证，集成系统帧率>60fps，能效>20TOPS/W。

## 2.6 多功能集成化的纳米材料异质结红外光电器件及微观机制研究

**研究内容：**发展红外波段纳米材料异质结的结构解析与使役状态研究新技术，研究异质结界面微结构和纳米限域效应对能带结构的调制机制；研究探测器响应波段和激光器发射波长的匹配方法；研究探测器接收光方向与激光器发射光方向不共面问题，构筑短、中、长波红外的多波段集成化纳米异质结红外光电器件，研制片上的纳米材料异质结构激光器与探测器件的面上多功能集成。

### 考核指标：

InP 基同质集成中远红外激光气体传感器件，波长范围 4-10 $\mu\text{m}$ ，功耗<200mW，其中 NO/CO/CH<sub>4</sub> 下限 1ppm；Si 基异质集成中远红外激光成像探测集成器件，激光波长范围 2-2.5 $\mu\text{m}$ ，探测波长 2-5 $\mu\text{m}$ ，短波工作温度 $\geq 200\text{K}$ ，量子效率 $\geq 30\%$ ，中波工作温度 $\geq 150\text{K}$ ，量子效率 $\geq 30\%$ ，阵列规模 $\geq 640 \times 512$ ，像元中心距 $\leq 5\mu\text{m}$ ，探测率  $D^* \geq 1 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

## 2.7 非 EUV 集成电路芯片图形纳米加工技术原理及应用研究

**研究内容：**开辟非 EUV 混合光刻路线，发展非 EUV 曝

光技术与导向自组装相结合的集成电路芯片图形亚 10 纳米加工技术。开发用于导向自组装的电子级高分子材料；研究并行电子束光刻原理和技术、短波长纳米光源原理及其阵列设计和光刻技术，发展纳米引导图案的高通量加工制备技术；匹配引导图形和嵌段共聚物图形，验证高分辨低缺陷率混合光刻技术，开发仿真工具。

**考核指标：**并行电子束曝光技术：5×5 束冷阴极电子束并行直写；新型短波长光源点阵：10×10 点阵，实现两种变频技术；自组装光刻材料金属杂质总含量≤10ppb；在 12 英寸晶圆上实现图形倍增≥8 倍，缺陷率≤10cm<sup>-2</sup>，线条占空比≥0.7，图形转移后线宽≤8nm、LER3σ≤2nm；1 套混合光刻仿真工具。

## **2.8 1nm 制程二维沟道材料晶圆级制备与器件集成关键技术研究**

**研究内容：**以探索集成电路 1nm 制程关键材料的技术路线为目标，发展满足硅基制程要求的晶圆级高质量二维沟道材料制备方法，建立二维沟道材料在硅晶圆衬底上的高质量、超洁净快速无损转移技术，研究与二维沟道材料兼容的介电材料、导线材料与封装材料的制备与加工技术，构筑高密度、均一稳定、反型层厚度<0.7nm 的二维沟道晶体管阵列，研制低功耗逻辑运算器件和存算器件，验证典型二维沟道材料在集成电路先进制程技术路线应用的可行性。

**考核指标：**实现单层 8 英寸晶圆级典型二维沟道材料的

控制生长，单晶晶畴 $>2\text{cm}$ ，缺陷密度 $<10^{12}/\text{cm}^2$ ；建立超洁净转移技术，转移材料覆盖率 $>80\%$ ，表面粗糙度均方根 $<0.5\text{nm}$ ；研制大规模二维沟道材料晶体管阵列，集成面密度 $>100\text{mm}^{-2}$ 、产率 $>97\%$ 和平均迁移率 $>80\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ；验证二维沟道材料的数字与模拟电路功能，逻辑运算器件静态功率 $<1\text{nW}/\text{gate}$ ，存算器件能耗 $<1\text{fJ}/\text{spike}$ 。

## 2.9 亚 10 纳米节点纳米器件加工集成技术研究

**研究内容：**研究基于多重曝光技术的亚 10nm 超高深宽比介质结构晶圆级低损伤、无污染制备工艺；研究应用于先进光刻场拼接、套刻、调焦的微位移测量器件及仪器；研究基于亚 10nm 加工集成技术的复眼超透镜与 193nm 光刻机反常偏振纳米器件。

**考核指标：**实现亚 10 nm 超高深宽比介质结构的低损伤、无污染制备，介质结构深宽比 $\geq 10:1$ ；研制微位移测量器件及仪器，其位移测量分辨率 $\leq 100\text{pm}$ ；研制高性能介质纳米光学复眼超透镜芯片，实现可见光波段复眼成像，该复眼超透镜芯片的视场角 $\geq 120^\circ$ 、中心 MTF(30 lp/mm) $\geq 0.3$ ，应用于 193 nm 光刻机反常偏振纳米器件上，且消光比 $\geq 100$ 。

## 3. 纳米科技交叉融合创新

### 3.1 纳米复合结构光场调控与器件研究

**研究内容：**发展超高空间分辨、超高时间分辨、超高能

量和动量分辨的显微测量新技术，探索弱光与纳米复合结构相互作用新规律和纳米复合结构光场调控新机理；研制超小尺寸、超低能耗纳米复合结构光子器件；发展纳米集成新技术，探索纳米复合结构光子器件的高密度集成应用。

**考核指标：**（1）实现纳米光子器件空间分辨 $<50\text{nm}$ 、时间分辨 $<120\text{fs}$ 的超高时空分辨测量技术；（2）实现基于纳米复合结构的超低能耗光场调控，阈值能耗 $<10\text{fJ}$ ；（3）实现纳米集成定位精度 $<100\text{nm}$ ，纳米复合结构中的最小结构尺寸 $<150\text{nm}$ 。

### 3.2 纳米尺度多物理场调控的材料与器件研究

**研究内容：**针对高速高分辨光电器件对人工序构纳米结构精准设计的需求，发展新型纳米结构定向构筑新技术，设计研制纳米尺度多物理场调控的材料与器件。研究不同时空尺度下的纳米结构-电/磁/光等多场耦合微观机制，探究多物理场作用下纳米结构对电子态、相位相干性、超快响应等物性调控的新效应，建立多场下纳米结构与光电器件局域响应和宏观性能的构效关系。

**考核指标：**（1）发展纳米结构定向精准构筑新技术 3-5 项。（2）研制微型光谱仪：工作波段  $1.55\text{-}5\mu\text{m}$ ，光谱获取速度 $<0.1\text{s}$ ，光谱分辨率 $<1\text{nm}$ ，波长复现精度 $<1\text{nm}$ ，光强复现精度 $<0.1\text{cd/m}^2$ ，动态范围 $>1000$  倍。（3）研制超导单光子探测器：工作波段  $1.55\text{-}5\mu\text{m}$ ，工作温度 $>40\text{K}$ ，峰值探测率

$D^* > 10^{15}$  Jones, 探测速度  $< 1$  ns。

**关键词:** 纳米结构精准构筑, 多场耦合, 微型光谱仪, 单光子探测器

### 3.3 时空选择性信号放大分子成像纳米器件与技术研究

设计 DNA 人工序列作为基元, 并将其组装成为具有信号放大功能的纳米结构单元, 针对亚细胞结构成像研发能在时间和空间维度可操控的原位信号放大纳米技术, 研发具有智能识别活体特定细胞、器官和病灶组织空间分辨分子成像功能的信号倍增纳米器件, 实现肺癌、感染性肺炎和神经免疫疾病低丰度标志物的高灵敏成像。建立至少 4 类靶标分子触发型成像和 4 种亚细胞分子成像信号原位测量方法; 建立 2 类器官和 3 种疾病活体水平分子成像信号放大纳米技术; 在真实条件下验证时空选择性信号倍增纳米器件, 针对神经系统疾病临床研究样本数量不少于 200 例, 检测灵敏度较现有商业化成像技术提升 50 倍以上。

### 3.4 稀土掺杂钙钛矿纳米晶薄膜材料及其器件研究

研制新型高效稀土掺杂钙钛矿纳米红外发光材料和 LED 器件。揭示钙钛矿材料的组成和结构等与掺杂纳米材料光学性能间的内在关联和物理实质; 调控由钙钛矿激子到稀土红外发光中心间的能量转移与量子剪裁发光过程, 获得  $\geq 4$  种光致发光内量子效率  $\geq 100\%$  的近红外发射纳米晶与薄膜材料 (950-2000nm)。采用荧光转换技术大幅度提高晶硅电池的光电转换效率, 实现效率提升  $\geq 3\%$  及  $\geq 1\text{m}^2$  光伏组件应用展示。

研制基于荧光下转换的硅探测器阵列，进行可视化光电探测，实现 200-1100nm 范围内探测器外量子效率 $\geq 70\%$ ，探测能力 $\geq 1 \times 10^{10}$  Jone。研制高效稳定、毫秒量级发射寿命的 1550nm 等光通讯窗口波段的电泵光源，实现在硅光波导芯片上的集成和光放大。

### 3.5 有机半导体纳米结构材料和自旋器件研究

**研究内容：**面向有机半导体纳米结构中电子态调控和自旋运输的基础性挑战，研究单晶纳米结构和纳米薄膜中抑制自旋弛豫和能量损失的基本原理和方法，建立材料特性-电子结构-器件性能的关联，发展高效自旋运输材料和自旋存储、自旋运算等新型有机自旋电子器件；结合有机半导体的光电特性，研究自旋对调控电荷转移、复合等过程的作用，提升有机自旋、有机光伏、有机发光等器件性能。

**考核指标：**提出 1-2 种电子态调控和自旋运输机制关键描述符；发展 2-3 种调控材料自旋运输的关键方法，实现室温有机半导体自旋寿命 $> 1\text{ms}$ 、电注入自旋运输距离 $> 1\mu\text{m}$ 、空气稳定自旋存储 ( $T_{80} > 1000\text{h}$ )；有机光伏能量转换效率增幅 $> 10\%$ ，有机电致发光发光效率提升 10%以上。

### 3.6 碳基纳米管太赫兹芯片与成像系统研究

**研究内容：**以新一代太赫兹芯片技术及其应用需求为牵引，突破纳米尺度碳基太赫兹器件的关键工艺，研究碳基场效应晶体管与肖特基二极管在晶圆级绝缘衬底上的单片集

成技术，研究密排阵列碳管沟道中的载流子输运机理，研究碳基太赫兹器件的非线性混频效应、碳基器件的高频寄生效应与阻抗分布效应，解决太赫兹核心电路 IP 等关键问题，获得适用于碳基太赫兹芯片的设计与验证方法，实现阵列天线与碳基太赫兹芯片的单片集成，形成具有自主知识产权的碳基太赫兹芯片的综合解决方案，并开展太赫兹成像技术验证。

**考核指标:** 1. 在晶圆级绝缘衬底上制备出密排阵列碳管，碳纳米管密度  $> 300$  根/微米；实现阵列碳管 MOS 器件与肖特基二极管的单片集成，肖特基二极管的截止频率 ( $f_c$ )  $> 1000\text{GHz}$ 。2. 研制出基于阵列碳管 MOS 器件的功率放大器、压控振荡器、倍频器、混频器等关键射频电路，形成阵列碳管射频电路核心 IP 库，申请集成电路布图设计专有权 5 项。3. 实现 D 波段阵列碳管太赫兹芯片，在绝缘衬底上单片集成天线阵列与太赫兹芯片，工作频段为  $154\sim 160\text{GHz}$ ，研制出 16 通道主动太赫兹成像演示系统。

### 3.7 高性能三维纳米网络复合材料的可控构筑与机制研究

**研究内容:** 以突破高性能铜和铝材料强韧倒置、热稳定性差的共性关键科学问题为目标，研究三维纳米网络增强铜和铝基复合材料的多尺度结构优化制备和结构功能一体化调控设计；发展基于三维纳米网络复合材料的低成本规模化制造技术，研究三维纳米网络复合材料的多尺度构效关系与



跨尺度力学模型，实现材料体系、网络特征以及制造工艺方案与性能的高效同步优化，形成自主知识产权的面向高温服役条件的纳米网络增强金属基复合材料的解决方案。

**考核指标：**建立三维纳米网络复合材料的多尺度构效关系与跨尺度力学模型；发展三维纳米网络复合材料制备技术，开发不少于 5 种具有不同网络特征结构的三维纳米网络复合材料，网络壁厚在 1~5 nm 范围内可调；铝基复材 300°C 拉伸强度 > 450 MPa，热膨胀系数较纯铝降低 50%；铜基复合带材、线材 180°C 的电阻率 <  $2.57 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，800°C 退火 100h 后，室温抗拉强度 > 400MPa，断后伸长率 > 8%；实现航空航天、新能源汽车或电子电路等领域重要应用 2-4 个。

### 3.8 纳米颗粒在生命间质途径的行为与调控机理研究

**研究内容：**针对合成纳米粒子和中药煎剂小体等在体表、四肢及脏器间生命间质途径中非血液循环的分布与行为特点，发展具有空间和时间高分辨力的测量技术，实现对纳米颗粒在长程间质传输中的特征及局域微观结构功能关联的检测；阐明具有促进间质活性的纳米颗粒新体系，如中药煎剂小体等的间质输运过程，发现中药煎剂小体等纳米颗粒影响间质途径及其作用的关键因素，建立经特殊间质途径输运纳米颗粒的新理念、新方法。

**考核指标：**建立 3 项以上可以表征纳米颗粒间质途径传输的活体原位、动态成像技术，至少一项实现分子水平识别；

完成 5 种以上中药煎剂小体等纳米颗粒在体表、四肢及脏器间的间质传输行为与分布的活体动物实验验证；提出 1-2 种利用间质传输行为增强纳米颗粒调节体内递送功能的应用方法。

### 3.9 荧光半导体纳米材料的多指标纳米流式医学检测技术研究

**研究内容：**针对荧光半导体纳米材料在生物医学领域的应用瓶颈，如合成机制不清、光学性质难以控制等问题，发展荧光半导体纳米材料先进工艺与原理。揭示反应中间产物的演化规律并完善非经典成核路径模型，探索反应参数对材料形成及光学性质的调控机制，解决纳米合成化学中的基础科学问题。构建具有生物安全性的光学编码纳米球制备方法，开发多指标/目标病原微生物编码检测技术。

**考核指标：**系统阐明荧光半导体纳米材料可控制备的机理；研发 5 种半导体纳米材料，荧光互不交叉，后处理前发射半峰宽  $< 20$  nm，荧光量子产率  $> 95\%$  的半导体纳米材料；研发粒径  $100 \pm 5$  nm、荧光量子产率  $> 95\%$  的光学编码纳米球，实现单次检测  $\geq 5$  个指标/目标；完成高通量纳米流式检测技术的研发，每批次的病原微生物检测量达到 10 万人份（第三方测试报告）。

### 3.10 提高多肽蛋白类药物体内递送效率及成药性的纳米技术研究

**研究内容：**针对生物大分子药物递释系统，研究纳米载体材料的关键结构参数及其药物递释效应的构效关系，发展用于恶性肿瘤或代谢性疾病等重大疾病治疗的纳米调控新技术，提高针对恶性肿瘤（如乳腺癌或脑胶质瘤）或代谢性疾病（如糖尿病或骨质疏松）的多肽蛋白类药物体内递送效率和治疗效果，推动其成药性研究，构筑具有自主知识产权的代表性多肽蛋白药物纳米递释系统，解决多肽蛋白药物递送系统产业化面临的瓶颈问题。

**考核指标：**研发适用于多肽蛋白类药物装载且具有自主知识产权的纳米载体材料 3-5 种；开发基于上述载体材料的多肽蛋白药物纳米制剂 3-5 种，载药量 > 5%；完成其治疗恶性肿瘤或代谢性疾病等临床前研究，获 1 件以上纳米药物临床试验批件。

### 3.11 有机大分子纳米药物的研究

围绕实体肿瘤治疗药物的重大临床需求，结合纳米尺度有机生物大分子纳米药物的高穿透低毒性及易于工程化制备等优势，发展高效纳米药物递送系统，实现脑肿瘤等实体肿瘤高效靶向。研究有机生物大分子纳米药物成分、结构、尺度、及界面特性对于药代、药动和药效的影响规律，阐释跨越血脑屏障的纳米递送系统的生物学效应；建立有机大分子纳米药物规模化制备工艺和质控标准；开发针对脑肿瘤等实体肿瘤的新型纳米药物，在动物模型中的疗效超过现有一线临床治疗药物 30~50%。完成至少 1 种纳米药物的临床前

研究，提交临床批件申请。

### **3.12 精准靶向肺部炎性病灶的吸入性纳米载药脂质体技术体系研究**

研究高效递送系统的吸入给药，突破肺组织生物屏障，精准靶向肺部病灶的药物递送系统；揭示在组织细胞层面运输识别、药物作用及药代等生物学机制。发展吸入性纳米载药脂质体（50-80nm）新技术 2-3 项；完成 3-5 种针对不同肺部疾病临床用药的吸入性纳米仿生载药脂质体；研发 1-2 种针对肺部疾病病理生理机制特点的药物脂质体吸入制剂，完成临床前研究。

### **3.13 多维纳米结构材料热电微电场调控难愈创面生物微环境的机制及其应用技术研究**

**研究内容：**围绕难愈创面治疗的重大临床需求，筛选纳米结构热电材料，研究纳米微电场调控难愈创面生物微环境促进组织再生新策略，包括室温区高性能热电器件，高通量 3D 打印皮肤类器官芯片技术等，创建适配创面修复的热电-智能敷料集成治疗器械；揭示微电场诱导的纳米-生物界面-细胞膜-蛋白靶分子作用机制，开展其生物安全性和有效性评价；推进纳米微电场治疗难愈创面的重大创新应用。

**考核指标：**创面适配热电器件 290-320K 区间平均  $zT \geq 1.2$ ，20K 温差下输出功率密度  $\geq 6 \text{ mW/cm}^2$ ；研制 2~3 种适配创面修复的热电治疗器械，完成难愈创面创新治疗生物纳米材料

的临床前研究,其中至少 1 种获得临床批件或进入临床试验;研发高通量 3D 打印皮肤类器官芯片技术,建立基于微电场定向调控治疗难愈创面的 2~3 种新策略。

### 3.14 极端环境中微纳结构材料的热辐射调控机理与应用研究

**研究内容:** 极端环境(高温、高速等)下的热辐射应用亟需对光热与热辐射进行精准调控。针对高温极端环境下光热与热辐射材料的应用需求,通过微纳结构的设计与精密构筑,实现对热辐射的波长、方向等多自由度精准调控;设计和制备耐高温、耐冲击、跨尺度、大面积红外辐射抑制器件,发展热辐射矢量场调控技术,开展其在极端工作环境下目标热辐射抑制技术验证。

**考核指标:** 研制出 600°C 稳定的热辐射抑制材料: 光学透过率 > 80% (3~5 $\mu\text{m}$ ) 和 75% (0.5~0.9 $\mu\text{m}$ ); 垂直辐射率 < 0.02 (3~5 $\mu\text{m}$ ); 材料内外表面热调控温差 300°C~30°C; 抗弯强度 > 350MPa。研制出 800°C 稳定的跨波段热辐射抑制材料: 尺寸  $\geq 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ , 且厚度  $\leq 15\text{mm}$ ; 红外辐射率 < 0.2 (3-5 $\mu\text{m}$ ); 电磁吸收效率  $\geq 90\%$  (2-12GHz)。

### 3.15 宏观尺度纳米碳-金属复合自支撑薄膜及太阳帆应用研究

**研究内容:** 针对太阳帆应用需求,替代现有高分子薄膜,降低重量,提高强度、热稳定性和耐辐照性能,增加收发天

线和光电转换等功能，研发宏观尺度自支撑纳米碳薄膜与金属膜的复合技术；研究在宽温区复合膜力、电行为及热稳定性；厘清纳米碳-金属界面处力、电和热耦合特征；揭示纳米尺度声子和电子导热协同机制；研究光电作用和转换机制；研制太阳帆原理样机。

**考核指标：**实现至少两种大面积和自支撑纳米碳连续薄膜（面密度 $\leq 2\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ）的规模化制备；制备出纳米碳-金属自支撑复合薄膜，其面电阻 $\leq 30\Omega/\text{sq}$ ，反射率 $\geq 90\%$ ，面积 $\geq 50\text{cm}\times 1\text{m}$ ，膜厚 $\leq 500\text{nm}$ ，面密度 $\leq 10\text{g}/\text{m}^2$ ，抗拉强度、热稳定性和耐辐照性能优于现有高分子材料；研制出太阳帆原理样机。

### 3.16 极端条件下提升机体负荷能力的响应性纳米材料及技术研究

**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，研发靶向体内主要应激器官及效应细胞线粒体的纳米探针和可视化监测线粒体效能的高分辨活体动态成像技术，揭示线粒体动态行为与功能之间关系；构建可主动识别线粒体且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：**创制 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<sup>+</sup>和 NADH 的可视化检测限分别为 0.1 μM、0.8 nM、1 μM 和 0.06 μM；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 50~200 nm，长效释放时间>24 小时，累积释放率>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。

### 3.17 纳米能源材料复杂表界面的原位高时空分辨表征新技术研究

面向能源纳米材料复杂表界面的电荷转移和物质转化过程，发展 2~3 项在光或电等外场调控下的能源纳米材料复杂表界面高灵敏和高时空分辨的多模态原位光谱表征和成像新技术，在纳米尺度研究固气和固液界面在外场调控下晶格、载流子及表面物种的时空演化；实现空间分辨率 < 5nm，动力学时间分辨率 < 50fs，化学反应成像时间分辨率 < 10ms，提供 5cm<sup>-1</sup>~3800cm<sup>-1</sup> 的振动光谱信息；建立纳米结构物相、结构及分子构象和性能之间的关联；从空间、时间和能量多维度揭示纳米结构及活性位点在表界面物质和能量转化过程中的演化规律。

### 3.18 储能纳米材料的全生命周期及其健康风险研究

**研究内容：**针对当前大量使用的锂电池和超级电容器中所含的储能纳米材料，研究其全生命周期过程，重点研究其进入环境介质的途径、环境化学转化过程及赋存状态等；阐

明储能纳米材料在重点暴露人群生命体内的暴露组和健康风险特征，诠释其毒性机制，发现新的分子标志物；构建储能纳米材料的安全评价预测模型。

**考核指标：**揭示 2-3 种典型储能纳米材料的全生命周期过程，明确关键的理化性质和赋存状态；基于重点暴露人群队列筛选 1-3 个指示早期健康效应的分子标志物，开发 2-3 个相应的检测技术或方法；建立 2-3 类储能纳米材料的安全评价模型。

### **3.19 光调控新污染物选择性脱毒的纳米材料与技术**

面向新污染物治理的国家重大需求，发展可实现光调控新污染物定向原子转移脱毒的纳米材料与技术，发展 2-3 种纳米材料表界面结构精准构筑新技术，完成相关纳米材料的公斤级制备；研究纳米材料及表界面结构的精准设计原理及光调控能量/电子与原子转移机制，建立纳米材料及表界面结构与光调控新污染物或其毒性基团选择性脱毒性能的构效关系；为新污染物的选择性脱毒提供技术支持，在共存较高浓度（高于 100ppm）其它有机/无机物质条件下，实现低浓度（低于 1ppm）新污染物（抗生素、多卤代的 POPs、内分泌干扰物等）/毒性基团的低能耗、高选择性转化，建立开展废水光调控新污染物选择性脱毒纳米技术的应用示范。

### **3.20 非贵金属高熵合金电极纳米材料可控制备技术**

**研究内容：**针对金属-空气电池电化学反应动力学迟滞问



题，研究在 2-10nm 范围内连续可调的非贵金属纳米高熵合金的可控制备与技术放大，非贵金属高熵合金纳米材料的微观结构改性与电子结构调制，非贵金属高熵合金形核长大过程中的熵变问题、元素间的电荷转移和电子杂化规律研究，基于非贵金属高熵合金材料和新型“离子-电子”双导网络结构设计的催化正极设计。

**考核指标：**3-5 种 2-10 nm 的非贵金属高熵合金正极相关纳米材料；2-3 种成本低、可控性高的非贵金属高熵合金的宏量制备方法；金属-空气电池充放电极化电压 $<0.4\text{ V}$ ，金属-硫电池极化电压 $<0.2\text{ V}$ ；金属-空气电池正极完全放电比容量 $>15000\text{mAh g}^{-1}$ ，循环次数 $>1000$  圈；金属-硫电池 1C 倍率下放电比容量 $>1300\text{mAh g}^{-1}$ ，循环次数 $>10000$  次；最终获得能量密度 $>600\text{Wh kg}^{-1}$ 的金属-空气/硫软包电池电芯。

#### 4. 青年科学家项目

##### 4.1 基于二维材料或有机半导体的快速高灵敏长波长光电探测纳米器件研究

针对光电信息纳米前沿研究，聚焦基于范德瓦尔斯二维材料或有机半导体的快速高灵敏新型长波长 ( $>1100\text{ nm}$ ) 光电探测纳米器件研究，建立相关纳米材料的晶体构型和电子结构的精确调控与有序构筑原理与方法，发展兼具高灵敏度、高响应速度的近红外光探测器件阵列或基于范德瓦尔斯构筑的片上集成太赫兹探测面阵芯片。

## 4.2 以神经形态计算为突破口的纳米电子器件

面向神经形态计算架构的高集成度和高能效需求，研究逻辑可重构与神经形态功能混合集成的神经网络加速器件设计方案，研究柔性单晶异质结的近场耦合机理和亚十纳米栅长器件的异质集成制造工艺，研究加速器件缺陷与神经网络模型的协同优化规律，实现高能效存内加速运算和原位图像处理应用探索。

## 4.3 纳米光学材料的多层次结构按需设计制备

围绕高速运载工具视窗对高强高韧透明材料的需求，针对无机透明光学材料强度和韧性相悖的科学问题，研究透明纳米结构单元组分、物相、形貌调控机制及其对力学性能的影响规律；研究透明纳米结构单元多尺度、多级次、多梯度有序组装方法及原理，设计构筑多层次组装结构；研究多组分复合工艺与界面调控原理，研制具有多层次结构的高强高韧透明复合材料（可见光透过率 $\geq 90\%$ ，强度 $\geq 180$  MPa，韧性 $\geq 3.5$  MPa m<sup>1/2</sup>），开展服役性能评价，千万次疲劳循环后强度下降 $\leq 50\%$ 。

## 4.4 电极材料离子输运原位表征技术

针对工况下离子输运难以观察难题，研发可观察单个离子的原位电化学图谱表征方法及装置，研究电池工况下晶界、裂纹、缺陷结构对离子输运行为的影响机制，研究电化学反应工况对离子输运及相应结构演化的作用机制，建立空间分辨率小于 0.07 nm、实时成像的离子输运原位表征技术。

#### 4.5 新型仿生纳米药物对炎症及免疫稳态调控研究

针对病毒、细菌等重大感染诱发的细胞因子风暴及后遗症问题，研究仿生（模拟天然生物结构）纳米药物，阐明双向调节炎症风暴和免疫抑制实现免疫稳态的调控机制，显著降低炎症风暴致死率，揭示避免二次感染并逆转损伤诱导的纤维化的原理和机制；开发实时动态活体光学成像方法，实现炎症损伤的精准检测及预后评估。

#### 4.6 多维度模式结构高分子纳米材料精准调控免疫细胞行为研究

面向新型免疫治疗药物与疫苗佐剂的研发需求，设计具有不同分子结构、集簇结构、表面几何结构等多维度模式结构的免疫活性高分子纳米材料，研究高分子缀合物及纳米组装体的多维度模式结构精准调控免疫细胞行为的构效关系规律与分子机制；以此为基础，发展新型高分子纳米免疫材料，筛选至少 1 种新型高分子纳米材料，开展在高效激活特异性免疫响应的高致病性病原体疫苗设计中的应用验证。

#### 4.7 面向自身免疫疾病的纳米药物技术

针对 B 细胞在自身免疫疾病发生发展过程中的重要作用，发展人工智能驱动设计的纳米药物，实现 T 细胞等免疫细胞的体内原位工程化改造，识别和清除过度激活的 B 细胞；发展高时、空分辨的活体显微成像技术，揭示免疫细胞突破体内屏障的动态过程，探究免疫细胞靶向的原

理；开发基于机器化学的高通量筛选技术，推进用于系统性红斑狼疮、心肌炎、系统性硬化症等疾病治疗的原位细胞改造纳米技术。

南京航空航天大学 A000551