

附件 4

“纳米前沿”重点专项 2021 年度 项目申报指南

为落实“十四五”期间国家科技创新有关部署安排，国家重点研发计划启动实施“纳米前沿”重点专项。根据本重点专项实施方案的部署，现发布 2021 年度项目申报指南。

本重点专项总体目标是：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。

2021 年度指南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 个重点任务进行部署，拟支持 23 个项目，拟安排国拨经费概算 4.5 亿元。同时，拟支持 10 个青年科学家项目，拟安排国拨经费概算 5000 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。项目实施周期一般为 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，青年科学家项目负责人年龄要求，男性应为 1986 年 1 月 1 日以后出生，女性应为 1983 年 1 月 1 日以后出生，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。

本专项 2021 年度项目申报指南如下。

1. 单纳米尺度等前沿科学探索

1.1 纳米性能标准的计量溯源原理与方法

面向纳米技术在能源环境、信息、生物医药等领域的应用，开展性能检测和质控特性标准研究，建立计量装置，探索纳米尺度能量转换效率、表面吸附、生物结合能力等功能特性的准确测量机制和溯源途径或溯源过程，研制功能特性纳米标准物质，制定规范标准。建立基于晶格常数的量值传递、纳米材料光电转换、纳米表面增强效应等普适性计量溯源方法 3~5 种；完成载药释放、发光效率等功能特性国家标准物质/标准样品 10 项以上；研究制定 ISO/IEC 国际标准 15 项以上。

1.2 纳米尺度生物活性单分子与系综多模态表征新方法

针对生物能量代谢及催化反应过程中的生物活性分子，发展能综合测量生物分子多模态物性的表征方法，在纳米尺度下开展生物活性分子的高灵敏电学（10fA）和单个电子转移测量，揭示其电子自旋分布、电子传递供体-受体-通路特性，以及在能量代谢、生物识别与解离等过程和生理功能中的物理化学机制；获取在单分子条件下生物活性分子的多模态本征指纹信息及系综条件下的平均信息，构筑指纹信息并提供相应的量化分析标准，实现对单个关键结构单元差异的分辨，生物力学操控及动态测量的空

间分辨率达到 0.1nm。

1.3 非均匀纳米材料结构与力学行为的原位分析方法

非均匀纳米材料通过微纳尺度与宏观构件尺度上的结构和成分的合理耦合实现材料高性能。通过从宏观构建与微观区域多尺度研究非均匀纳米材料微纳结构演化过程及建立结构-力学性能的关联规律，揭示整体与局域结构对宏观力学性能与变形机制的影响规律。原位研究材料在多场使役条件下组织与性能的耦合响应机制。实现对典型跨尺度非均匀纳米材料的结构演变与力学行为（包括 10~1773K 条件下）的原位测量；实现非均匀纳米材料的整体和局域结构与力学行为的原位表征与测量；为非均匀纳米材料的强韧化提供若干实现途径及理论基础，并开展验证。

1.4 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

面向智能感知领域探测及其信号放大、存储一体化功能器件，聚焦太赫兹与中远红外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，表征谱段 1~30 THz、空间分辨率在亚 10 纳米尺度、时间分辨率在 30 飞秒以内，兼容光谱、光场、光电响应及形貌等成像；实现在亚 10 纳米尺度下观察极化激元和

载流子自旋演化动力学机制；研制基于单纳米尺度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及其信号放大、存储一体化微纳器件，在室温工作、谱段 1~30 THz、相频可选择。

1.5 手性纳米结构的可控构筑、性能传递及功能调控

发展新型刺激响应性手性纳米结构体系，研究手性纳米材料对多重刺激的响应调控、规律与机制。研究定向合成技术，实现手性纳米结构的独特光化学作用和光力学效应，发展分子构象和功能光调控的新方法。获得 2~3 类吸收、反射和发射的光学各向异性系数（g-factor）超过 1.5 的手性纳米结构；开发 2~3 类具有多重响应性能的手性纳米材料；构建具有生物调控功能的手性纳米结构；探索手性纳米材料的应用。

1.6 纳米限域超流的化学反应和信息传输

开展纳米限域超流体的有序组装反应机理研究，发展高产率、高选择性和低能耗的化学反应技术，理解生物信息传输的原理。获得接近生物水通道中水分子运输的通量 ($>10^9$ molecules/s) 和生物钾离子通道中钾离子运输的通量 ($>10^8$ ions/s)，实现纳米限域空间中分子和离子的高速运输；建立限域通道的尺寸、化学结构、界面浸润性以及通道内的反应物分子流体流速等参数与速率、产率和立体选择性等性能的关系，构建接近 100% 反应产率、100%

选择性和低能耗（40°C以下）的反应体系。

2. 纳米尺度制备核心技术研究

2.1 高迁移率超薄半导体材料与高性能器件集成

围绕新型沟道材料的规模化制备、硅基兼容与器件性能提升的问题，研制 200°C 下电学性质稳定的超薄高迁移率沟道材料及高 k 栅介质的晶圆（直径大于两英寸）。研制短沟道场效应晶体管，沟道厚度小于 3nm 时，室温场效应迁移率高于 $125\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ；沟道长度小于 12nm 时，在 0.7V 驱动电压下的开态电流密度大于 $1\text{mA}/\mu\text{m}$ ，开关比超过 10^6 。实现工作频率 1.5GHz 以上的环振电路演示。验证器件在柔性逻辑电路等领域的优势。

2.2 围栅硅纳米结构器件与三维垂直集成技术

针对 3 纳米及以下节点大规模集成电路制造问题，研究围栅（环绕栅）硅纳米结构（如纳米线/片）器件与三维垂直集成新工艺，探索构建不同功能典型电路的技术路径，研制至少四层硅纳米结构堆叠沟道的环绕栅器件，单层沟道厚度小于 10 nm；在 N/PMOS 器件上实现三种以上阈值调控（区间大于 200 mV）；N/P 型源漏上的接触电阻率小于 $1\times 10^{-9}\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ ；在 0.7 V 驱动电压下的驱动电流密度大于 $400\ \mu\text{A}/\mu\text{m}$ ，亚阈值摆幅小于 70 mV/dec，电流开关比高于 10^7 ；实现双层器件高密度三维垂直集成，同等设计规则条件下，新工艺的 16K SRAM 阵列面积相比传统电路缩小

30%以上。

2.3 晶圆级二维半导体集成电路

针对二维材料器件的大规模集成电路制造和设计问题，研究二维材料的低缺陷均匀生长方法、N/P型精准掺杂与界面调控、高性能互补MOS器件设计及工艺集成方法、器件物理精确解析模型。研制直径大于8英寸、薄膜厚度均一性大于99.9%的晶圆级高质量二维材料，获得高性能互补MOS器件，室温下N/P型晶体管器件平均场迁移率大于 $50\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、电流开关比大于 10^5 ；研制基于二维半导体材料的逻辑、模拟和射频电路的整套集成工艺，实现千门级逻辑电路功能展示；建立器件模型和工艺库，获得大规模集成电路的SPICE电路仿真结果。

2.4 亚5纳米分辨率并行电子束集成电路芯片高通量检测装备关键技术

面向亚10纳米节点集成芯片高通量检测装备的需求，研制快速响应的并行电子束源模组及其电子光学系统，研究多电子束信号串扰机制、形貌表征和电特性多维度检测方法、高通量数据采集与成像系统，研究上述功能协同驱动实现并行电子束同步检测的集成原理和技术。实现12束电子束同步并行检测和空间分辨小于5nm、景深不小于1mm的成像技术；电子发射端

曲率半径小于 5nm；单电子束的束流强度不小于 200pA、亮度不小于 $5 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \text{Sr}^{-1} \text{V}^{-1}$ 、能谱半高宽不大于 1eV；12 束电子束流强度均匀性高于 95%；研制出并行电子束集成芯片检测装备原型样机。

2.5 纳尺度电畴调控的高灵敏光电感知器件及系统

面向光电感知应用对高灵敏、快速响应探测器的需求，研究极化电畴调控的高速高灵敏光电探测器件原理，研究纳尺度电畴对器件势垒结构及其空间电荷区特征参数的调控机制，揭示其对器件光生载流子拆分、传输及收集的规律，研制采用极化材料与半导体异质结构的光电探测器件，研发集成技术。纳尺度电畴实现不同势垒类型调控，器件空间电荷区尺度调控范围 2~120nm；光电探测器件响应度 $>0.5 \text{ A/W}$ ，响应时间 $<1\text{ns}$ ，比探测率 $>10^{12} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ ，响应波长 400~1550nm；集成列阵规模 $\geq 128 \times 128$ ；实现探测和识别演示。

2.6 二硫化钨半导体晶圆和可集成光源器件

针对光子信息技术可集成光源性能难以满足需求的问题，聚焦高质量、高发光效率单层二硫化钨晶圆的研究，研制满足半导体器件制作的单层二硫化钨晶圆（直径大于 4 英寸），载流子迁移率 $>200 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ ，并拓展到其合金及其它过渡金属硫族化合物晶圆制备；研制室温工作二硫化钨的发光二极管，出光效率

达到 $\geq 5\%$ ，同时发展二硫化钨掺杂及其合金材料制备工艺等，进而实现波长可调谐发光二极管，波长调谐范围 $>100\text{nm}$ ，驱动电压 $<2\text{V}$ ；实现连续光激发下受激辐射，发射谱线半高宽 $<1\text{nm}$ 、阈值 $<0.5\text{W}/\text{cm}^2$ ，集成多层垂直器件；探索研发二维电泵浦激光器。

2.7 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，建立大尺寸石墨烯材料向硅衬底的洁净无损规模化转移方法，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 ，石墨烯层数为 $\geq 95\%$ 单层；石墨烯单晶转移至硅衬底的完整度 $\geq 99\%$ ，石墨烯室温载流子迁移率高于 $15000\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ ；石墨烯集成光通信器件数据速度 $\geq 30\text{Gbit/s}$ 。

3. 纳米科技交叉融合创新

3.1 纳米材料跨越生物屏障机制与效应调控方法

为夯实纳米生物学理论基础，建立3~5类高生物相容纳米材料跨越多种生物屏障体内外过程的高灵敏、高特异、多尺度、高通量的原位动态研究方法；纳米颗粒跨越不同种类生物屏障的活体动态成像，实现活体组织深度 $>1.5\text{cm}$ ，分辨率 $>0.2\text{mm}$ ，帧数率 >100 帧/秒；单细胞三维成像空间分辨率 $>50\text{nm}$ 、灵敏度 $>fg$ /细

胞。重点研究纳米材料和体内流体微环境表界面生物大分子形成的纳米蛋白冠和环境冠等对肠道微生物屏障、生殖屏障及对子代生长发育的影响及其分子机制；整合大数据和计算分析方法，系统揭示 2~3 类纳米材料跨越复杂生物屏障的基本过程；阐明纳米材料在不同生物屏障微环境的生物转化途径与作用机制。

3.2 抗病毒高分子纳米药物

针对重大疾病（如病毒引起的肿瘤、突发传染病等）靶向治疗药物的发展需求，研究高分子组装体和生物纳米材料构建纳米药物的普适性规律，发展基于高分子的高效功能定向新方法，利用这些纳米材料设计并合成新型药物（例如病毒中和抗体），研究揭示不同构象、组成、价态的纳米药物与靶标的作用规律和分子机制，完成 3~5 种体内靶向纳米药物偶联物和高效抗病毒中和抗体，针对新型病毒引起的传染病对真病毒半抑制浓度达到 pM 级，其中至少 1 种获得临床批件进入临床试验。

3.3 纳米体系或工程化细胞对重大疾病基因治疗药物递送

发展副作用低而递送、转染、治疗效率高且构效关系明确的基因药物递送材料的制备新技术、新方法。创建仿生纳米体系或工程化细胞的制备技术，制定质控标准，开展其肿瘤治疗的临床前研究和临床研究。构建 1~2 种针对肿瘤基因治疗具有特异性的、靶向性的递送载体和新剂型，完成临床前研究；构建 1~2 种仿生

纳米药物递送体系或 1~2 种工程化细胞，建立规模化制备工艺和质控标准，完成临床前研究，其中 1~2 种体系获得临床批件进入临床试验。

3.4 微纳米智能系统的组装原理及其临床研究

发展微纳米智能系统及其组件原位定向合成、可控组装、体内自主靶向及病灶智能识别技术；研发具有诊疗一体化功能、高组织穿透性以及智能型分子组装体系，应用于体内活检、肿瘤及栓塞疾病治疗，实现可控定点药物释放新功能；发展智能型微纳米机器人的体内过程分析及安全性评价方法。完成 3~4 种生物相容的新型微纳米自组装体系的构建，揭示对肿瘤微环境的响应机制。至少有 1 种微纳米智能系统完成临床前药效评价及其安全性评价。

3.5 诊疗、器官修复、体外防护用的纳米杂化纤维

基于人体组织与材料相互作用机制，通过有机-无机杂化、高通量成形和仿生命体多场耦合调控等，研究功能一体化仿生设计，获得具有增强诊疗、组织修复、体外防护等功能的纤维聚集体复合材料。研制含水光导诊疗纤维，模量 10^{-2} ~10MPa，衰减达 $0.1\text{dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ ；研制肌肉/肌腱修复用可编织高强仿生杂化纤维，含水率 0~70%，强度达 50MPa，杨氏模量达 200MPa，伸长率 10~200%，磨损强度和扭转强度均不低于 100 万次；开发类人体

软-硬组织一体化三维纳米支架，孔径 20~100 μm 可调，杨氏模量 200kPa 至 2GPa 可调，强度>5MPa，实现诱导成骨再生。开展 2~3 个产品的临床应用。

3.6 用于电磁治疗的医用磁性微纳器件及技术

面向若干难治性疾病，研制可体内驻留达完整疗程的、由磁性纳米颗粒组装构建的磁性微纳器件；研究磁场遥控微纳器件产生磁极化、磁热、磁力等电磁效应及与纳米尺度相关的新现象、新机制，以及对体内特定部位神经系统的调控规律；在动物或人体水平开展神经电磁调控对难治性疾病的治疗研究。开发 2~3 种在体内驻留时间不少于 4 个月的磁性微纳器件，及 1 套电磁治疗设备，针对不少于 3 种疾病（骨质疏松、骨关节炎、周围神经损伤等）验证治疗有效性和适用性；至少 1 种磁性微纳器件电磁治疗新技术获批临床试验，在 2 家以上三甲医院开展研究。

3.7 纳米结构光学功能设计及其高灵敏增强光谱应用

针对光波长与分子之间尺寸失配导致光与物质相互作用微弱，难以获取有效信号的问题，设计和构筑新型纳米光学材料和结构实现将光波长压缩超过 50 倍，实现单分子水平光谱探测。建立具有光学功能的纳米材料和结构的理性设计方法；实现 2~3 类具有高局域光场增强的纳米结构（光强度增加> 10^5 倍），频率范围直接覆盖分子振动指纹区（675~2000 cm^{-1} ）；利用增强结构实

现高光场局域结构与发光材料之间的强耦合；实现 2~3 种单分子层有机物和无机半导体的增强光谱测量；实现含 C-O、CH-O 等化学键的 2~3 种催化反应中间体的化学成分检测，以及 2~3 种亚纳米级生物分子检测。

3.8 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；开展循环肿瘤细胞/肿瘤干细胞/微小残留灶等各种生物组织的探测与识别。单个纳米数字显微芯片的像素数目 ≥ 10 亿，显微芯片量子效率 $\geq 30\%$ ，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。

3.9 收集水波能的纳米发电基础与应用

水波和微风蕴藏着丰富而清洁的可再生能源。研究纳米固体之间、液体与纳米固体之间在分子与原子级的摩擦起电物理机制，开发用于收集水波能量的高性能纳米发电机的新材料和新结构，研制高输出功率和高效率的水波能摩擦纳米发电机网络；构筑海洋环境中基于水波能的自驱动应用系统，面向不同的应用需求，实现在水波激励下达到 50W/m^3 以上的输出功率密度，构建海上

可移动自供电系统。

3.10 纳米铁—微生物处理有机废水的协同机制与智能化关键技术

研究纳米铁界面的质子梯度效应、电子—质子协同传输与调控机制，揭示微生物利用纳米铁电子的分子机制；构建纳米铁—微生物协同技术工艺体系；开展纳米铁—微生物协同处理低可生化性与低碳氮比有机废水的技术实际应用验证。完成纳米铁规模化的生产工艺，研制出废水可生化性/碳氮比快速测定及智能化调控设备，验证纳米铁—微生物协同处理典型有机废水（处理量大于 50 吨/日）的技术有效性。

4. 青年科学家项目

4.1 手性软光子材料的纳米构筑、多元操控与光学应用

针对纳米光子技术主动式、柔性化、功能集成化的需求，研究手性软光子材料在多元外束缚条件下的纳米尺度分子场效应、特征光电效应及动态调控机制，探索提升纳米组装结构的稳定性、光谱动态域和工作波段范围的技术路径，发展多维度、超宽带、高效率、自适应的纳米光学新思路、新技术。

4.2 超低功耗场控自旋电子器件

面向未来信息技术对超低功耗逻辑器件的需求，开展基于纳米尺度新材料与高效耦合界面的场效应控制自旋逻辑器件研究。

探索自旋—轨道与自旋—电偶耦合的界面特性和基于场效应控制的自旋态传递机理，以及在外加磁场情况下的多级器件输入输出级联技术途径。研制非易失性逻辑器件、布尔逻辑门电路，开展验证实验。

4.3 纳米尺度钪基铁电材料与器件

面向大数据时代对存储器高速、高密度和低功耗的需求，开展新型钪基铁电机理、存储单元与三维集成技术的研究。探索纳米尺度钪基铁电材料的极化机制与翻转动力学过程，研究掺杂浓度、工艺条件、薄膜厚度对极化的调控规律，构建高速、低功耗的存储器件结构，研究铁电存储器的三维集成技术。

4.4 高性能金属空气电池相关的纳米器件

发展高性能金属空气电池中正极氧还原/析出过程的关键功能纳米材料设计方法，筛选出 5 种以上下一代金属空气电池非贵金属纳米材料并探索宏量制备技术，研究金属空气电池关键功能纳米材料的结构与氧还原反应路径的关系，提出可以调控 4 电子转移或 2 电子转移的方法，开展在电池器件应用的验证研究。

4.5 用于水中抗生素及抗性基因污染治理的纳米材料与技术

针对我国水环境抗生素及抗性基因污染治理的重大需求，发展基于纳米材料与技术的抗生素及抗性基因废水深度处理技术与工艺。面向我国产量大及使用量大的几类典型抗生素的生产企业

或使用场所，探索源头排放控制技术，验证技术实际应用能力。