

附件 5

“物态调控”重点专项 2024 年度项目申报指南

“物态调控”重点专项的总体目标是通过重点专项支持，在物理规范、新奇物态、调控方法、探测手段等方面取得重要创新，在拓扑超导、低维材料等前沿方向实现结构设计、材料制备、原型器件的重大突破，催生更多引领国际前沿的重大原创性成果。同时，面向国家战略需求发展基于新物态的新技术，发展新型功能器件，为推动新兴产业发展、践行自主创新奠定基础。

2024 年度指南围绕电子物态调控、拓扑物态调控、人工微结构物态调控等 3 个重点任务进行部署，拟支持 20 个常规项目，国拨经费总概算 4 亿元，每个项目概算参考数约 2000 万元。同时，拟支持 10 个青年科学家项目，国拨经费总概算 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。每个指南任务原则上支持 1 项（有特殊说明的除外）。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。项目执行期一般为 5 年。

常规项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部研究内容。常规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。

本指南所有方向均可作为青年科学家项目组织申报。适当考虑对电子物态调控、拓扑物态调控、人工微结构物态调控等 3 个重点任务的均衡支持。青年科学家项目不受研究内容和考核指标限制，不再下设课题，项目参与单位总数不超过 3 家。青年科学家项目设 1 名负责人，负责人年龄男性 38 周岁以下（1986 年 1 月 1 日以后出生），女性 40 周岁以下（1984 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。

1. 电子物态调控

1.1 基于高通量电子显微技术的关联电子材料微结构研究

研究内容：针对关联电子材料中的复杂微结构（掺杂、缺陷、局域晶格畸变、短程电荷序、界面等），发展大数据驱动的高通量透射电子显微技术，在温度、电场、光脉冲和电子辐照的调控下，突破对微小原子位移和原子尺度电荷分布原位表征的现有精度；探寻电荷密度波和相分离等复杂物态在超导材料中对超导态的作用；研究界面处的组分偏析、晶格畸变和电荷转移等微观机制。

考核指标：在 6K 到 500K 的温度区间，原位物态调控中实现每秒 10^6 张电子衍射图像或能谱的采集、10pm 的原子测量精度与亚原子尺度的电子分布测量；在铜基、铁基等非常规超导材料以及二维材料异质结中，实验发现由电子-晶格耦合导致的新型微结构（不少于 5 种），并分别揭示它们在宏观物态形成机制中的作用。

关键词：高通量宽温区、微结构定量表征、微结构-宏观物性关系

1.2 氧化物高温超导薄膜和转角堆垛体系的制备、原位测量及物态调控

研究内容：针对高温超导演生物态对电荷和晶体结构的敏感性以及对超导机理研究的重要性，外延生长氧化物高温超导薄膜，单晶解理制备氧化物高温超导转角堆垛体系，发展与原位栅压调控相兼容的扫描隧道显微镜、角分辨光电子谱和透射电镜技术，实现连续电场调控下的原子和电子结构与宏观输运性质的协同原位测量；研究原位连续调控下，超导配对以及赝能隙、配对密度波、玻色金属等演生物态的演化规律。

考核指标：实现不少于 2 种氧化物高温超导薄膜和不少于 2 种氧化物高温超导转角堆垛体系的制备；在保证能量分辨率优于 1meV 或空间分辨率好于 0.5nm 的前提下，实现不少于 2 类对氧化物高温超导薄膜和转角堆垛体系均具备连续调控能力（载流子浓度可调范围不窄于 $10^{12} \sim 10^{14}\text{cm}^{-2}$ ）的原位测量技术；获得高温超导演生物态随外场调控的连续演化规律及演化相图。

关键词：高温超导薄膜和转角堆垛体系、演生物态、原位调控谱学

1.3 突破常规迁移率的硅 MOS 量子器件

研究内容：针对硅 MOS 结构量子器件面临沟道迁移率难以突破 $3 \times 10^4\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ($T < 1\text{K}$) 的关键瓶颈，研究硅 MOS 量子器件

中的低温载流子界面散射、电声耦合、自旋退相干及量子相干效应并探索调控机制；发展高性能硅基量子结构材料理论设计新方法及制备技术，突破硅 MOS 结构沟道迁移率低的关键瓶颈；研制出高性能单电子晶体管、自旋极化场效应器件等硅基 MOS 量子器件。

考核指标：发展 1 种包含电-声、电-光相互作用的低维量子结构非平衡电子态的第一性原理计算方法；理论上设计出不少于 2 种硅基量子结构新材料，实验上实现硅 MOS 结构的沟道迁移率突破 $10 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ($T \geq 1\text{K}$)；研制出不少于 2 种兼容硅基 CMOS 工艺的硅 MOS 量子器件。

关键词：硅 MOS 量子器件、沟道迁移率、界面物理、散射机制

1.4 低维反铁磁量子系统中非常规和拓扑低能激发的探测与调控

研究内容：针对低维反铁磁量子体系中的强自旋涨落及极弱磁性研究手段的受限性，发展能同时实现低温、强磁场和高压调控的非弹性光散射等无损光谱学技术，实现对其弱磁性的有效观测；研究低维反铁磁材料中强自旋涨落演生的新奇量子基态、非常规和拓扑低能激发等；通过对反铁磁量子体系的多场调控，研究二维反铁磁量子系统与二维超导体构成的异质结构中的自旋和电荷激发特性及其潜在应用。

考核指标：发展多场（温度 $\leq 2\text{K}$ ，磁场 $\geq 14\text{T}$ ，压强 $\geq 20\text{GPa}$ ）

无损光谱学测量技术，最低探测能量好于 0.05meV ，以实现对于少层反铁磁材料磁子激发的探测和超交换能等基本参数的推定；制备出不少于 3 种典型的单层或少层二维反铁磁量子材料，实现其非常规和低能激发的多场谱学测量；制备出不少于 2 种二维量子反铁磁体和二维超导体的异质结构，实现自旋和电荷激发特性的多场调控。

关键词：反铁磁、低维、量子涨落、拓扑激发

1.5 新型平带材料探索与物态调控

研究内容：针对强电子关联的平带晶体材料稀缺及其调控难度大的现状，采用高通量计算与实验制备策略，精准合成具有平带结构的高质量单晶样品；通过掺杂、应力、超快光场等手段调控平带结构，在极低温、强磁场、超高压等综合极端条件下深入探索平带衍生的新奇量子有序态；揭示平带结构与量子态之间的关联。

考核指标：发展出能实现平带材料结构预测的逆向设计方法，研制出软件 1 套；基于理论预言，成功合成不少于 3 种平带新材料体系；精确解构多场调控与调控诱导的新奇物性及其对应关系；厘清平带和各种量子有序态之间的关系。

关键词：平带、综合极端条件、量子态调控

1.6 磁性微结构中新型自旋流效应及调控

研究内容：针对自旋电子器件中低功耗自旋流调控的需求，研究磁性微结构中自旋流的新型产生机制，包括自旋霍尔效应之

外的纯自旋流非常规产生机制和电子自旋之外的角动量转移机制；揭示自旋流的张量特性并应用于自旋流极化方向的调控；研究超短自旋流脉冲的输运特性，以及自旋流-电荷流超快转化规律；研究新型自旋流效应对磁性微结构中磁化取向的零磁场调控机理，探索基于自旋流的低功耗自旋调控原型器件。

考核指标：厘清新型自旋流产生和转换物理机制；实现多极化方向自旋流对垂直磁化的零磁场翻转；定量表征自旋流输运的频谱特性，产生峰值电场强度不低于 1.6MV/cm 且偏振方向可调的强太赫兹波；实现基于新型自旋流效应的磁随机存储原型器件和开关比不低 400% 的非易失自旋流场效应管原型器件。

关键词：自旋流、自旋-轨道矩、自旋流-电荷流转化、零磁场翻转

1.7 量子关联物质的非平衡态理论计算方法研究及软件开发

研究内容：针对量子关联物质的非平衡态特别是超快动力学缺乏有效计算方法和工具的现状，发展精确计算方法，并开发计算软件。发展非平衡态下高性能实时多轨道量子杂质模型求解器；建立密度泛函理论与非平衡态动力学平均场理论相结合的第一性原理计算方法；结合张量网络态与变分量子蒙特卡洛，发展非平衡态计算方法；拓展基于含时密度泛函理论和量子多体微扰理论的计算方法，研究强关联电子材料的超快动力学。

考核指标：实现 1 种新的高性能实时量子杂质模型求解器，开发计算软件 1 套；发展出密度泛函理论结合非平衡动力学平均

场理论的第一性原理计算方法，开发计算软件 1 套；实现强关联格点模型动力学性质的高效计算，开发出可处理阻挫自旋系统和费米子系统的计算软件 1 套；开发含时密度泛函理论加哈伯德 U 的计算软件以及 Bethe-Salpeter 方程加量子多体微扰展开理论的计算软件各 1 套。

关键词：量子关联物质、非平衡态、超快动力学、量子多体计算方法

1.8 激光诱导的关联非平衡态超快动力学

研究内容：针对关联量子材料非平衡态的物性，研究激光诱导的新关联量子态及其相变的超快动力学。发展激光诱导超快光谱探测手段，研究超导强关联量子材料在远离费米面的非平衡态超快动力学，探测电-声子耦合等多自由度耦合强度；利用超快电镜、超快 X 射线衍射、强场太赫兹、空间自相位调制等激光相干诱导技术，制备隐藏量子态等，探索激光诱导的瞬态超导现象。

考核指标：实现射频压缩超快透射电镜成像，时间和空间分辨率优于 200fs 和 2nm；动量空间动力学测量分辨率优于 100fs 和 10^{-4}\AA^{-1} ；实现 THz 能量谱密度 $\geq 1\text{mJ/THz}$ 且可调谐范围达到 5~15THz；实现不少于 2 个超导强关联样品的超快动力学测量，并获得其电-声子耦合强度值；制备并探测到激光诱导的隐藏量子态 2 个。

关键词：超快动力学、非平衡态、激光诱导、隐藏量子态、多自由度耦合

1.9 自旋力矩调控及其非易失多功能可编程自旋逻辑器件研究

研究内容: 针对计算系统数据传输和存算转换造成的时间延迟和能耗成本等问题, 研究无外磁场高效自旋轨道力矩 (SOT) 驱动的新型磁纳米异质结, 探索垂直极化或极化方向可调的自旋流产生新机制和自旋调控新原理; 研制高性能 SOT 材料及磁性隧道结 (MTJ) 单元器件及其阵列; 研制 SOT 或自旋转移力矩 (STT) 型 MTJ 单元器件构建的全部 16 种布尔逻辑; 探索适配 MTJ 器件的人工智能算法, 开发具有求解功能的原型器件。

考核指标: 研制出不少于 2 款支持无外磁场高效 SOT 驱动磁矩翻转和自旋极化方向可调控的新型磁纳米异质结; MTJ 单元器件其室温隧穿磁电阻比值 $>100\%$; 单比特 SOT-MTJ 器件写入时间 $<1\text{ns}$ 、写入能耗 $<1\text{pJ}$; 基于自旋力矩型核心器件, 研制出具有非易失性多功能可编程的全部 16 种布尔逻辑单元器件; 结合人工智能算法研发出具有知识产权和求解功能的原型器件。

关键词: 自旋轨道力矩效应、磁性隧道结、自旋逻辑器件

2. 拓扑物态调控

2.1 基于拓扑与纠缠物态的新型功能器件研究

研究内容: 针对量子功能器件对鲁棒性、抗噪性、集成化的要求, 探索拓扑与纠缠的抗噪性能与组合机制; 基于超导量子电路, 研究利用量子态调控信息传递的拓扑属性, 开发具有拓扑保护的量子三极管; 基于光子芯片, 研究可在高背景噪音下运行的

成像与光谱探测技术，研发高抗噪量子雷达与微型红外量子光谱仪。

考核指标：提出不少于 2 种基于拓扑或纠缠的抗噪方案；实现不少于 1 种具有纠缠和拓扑特性的量子三极管原型器件；实现能探测三维物体形貌（横向及纵向分辨率均优于 $100\mu\text{m}$ ）、对高背景噪音（ $\geq 80\text{dB}$ ）免疫的量子雷达原型器件；实现基于室温探测器的 $2\text{-}5\mu\text{m}$ 波段微型光谱仪，其核心尺寸不大于 $10\text{mm} \times 20\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。

关键词：拓扑物态、量子纠缠、量子三极管、量子雷达、微型光谱仪

2.2 拓扑及关联低维体系中量子态及其低耗散器件的多场调控研究

研究内容：针对低维电子及自旋量子体系的拓扑与关联效应，在器件层面开展对电荷与自旋的分数激发、拓扑激子绝缘态等关联量子态的研究。发展拓扑量子器件的实空间分辨测量及自旋分数激发器件的电学探测与调控等新型技术；探索拓扑量子态在原位多参量调控下的演化规律；揭示拓扑量子态及其器件输运和耗散调控的微观机制。

考核指标：在低温强磁场下实现对拓扑量子器件输运特性的实空间表征（分辨率不低于 50nm ）；发展 1 种针对无巡游电子体系分数自旋激发的量子输运新型表征方法；通过双层独立离子栅等新型手段实现拓扑量子器件的原位调控；发展 1 套数值模拟拓

扑器件输运和耗散的程序，并构建表征拓扑器件耗散的理论框架。

关键词：低维量子器件、拓扑量子态、原位调控

2.3 莫尔超晶格中的新奇电子物态调控

研究内容：针对莫尔超晶格中大量未知物态亟待发现的研究现状，开展相关的新物理与新材料研究，实现关联拓扑物态、莫尔铁电、莫尔激子等新奇物态；发展大尺度材料计算方法，构建莫尔超晶格材料物性数据库；高通量筛选并制备莫尔超晶格材料，发展适用于该类材料研究的原子级精度表征手段，厘清其中多自由度间的协同作用规律；探索莫尔超晶格材料中的演生新物态及其多场耦合调控机制，挖掘潜在应用。

考核指标：在不少于 2 种莫尔超晶格体系中实现关联拓扑态、莫尔铁电态、莫尔激子态和非线性拓扑光电效应；发展出基于第一性原理的大尺度材料计算方法，实现 $\geq 10^5$ 原子的大莫尔超胞电子结构预测，构建包含不少于 1000 种莫尔超晶格材料的物性数据库；合成出不少于 20 种同质或异质莫尔超晶格材料；实现莫尔超晶格中莫尔势场的三维重构与原位操控，面内分辨率优于 1nm；提出不少于 2 种基于莫尔超晶格多自由度耦合的物性调控方法。

关键词：莫尔超晶格、关联拓扑物态、第一性原理大尺度计算

2.4 关联和磁性拓扑材料的热效应调控

研究内容: 针对固态制冷材料低温下能量转换效率低、冷量小等瓶颈问题, 研究关联和磁性拓扑材料的热效应调控。开展相关拓扑物态的理论研究与材料计算, 探索磁性拓扑电-热运输新理论; 合成新的关联与磁性拓扑材料, 调控拓扑增强热电效应, 探索提升液氮温区及以下热电优值的新途径, 实现大的反常能斯特效应; 合成新的量子磁性材料, 调控阻挫增强磁卡效应, 研制亚开尔文温区无氦 3 制冷原型器件。

考核指标: 构建磁性拓扑电-热运输的有效模型, 建立不少于 100 种材料的量子磁性材料热效应数据库; 合成不少于 3 种关联拓扑和磁性拓扑新材料, 调控横向热电效应, 实现液氮温区 ($\leq 77\text{K}$) 反常能斯特系数 $10\mu\text{V/K}$ 以上; 合成不少于 3 种阻挫磁性新材料, 研制无氦 3 制冷平台, 在其上实现 50mK 以下电导、比热测量。

关键词: 关联拓扑材料、磁性拓扑材料、阻挫磁性、热电效应、磁卡效应

3. 人工微结构物态调控

3.1 异质集成光量子芯片及光场多维调控

研究内容: 针对高速、低损耗和多功能集成光量子芯片的应用需求, 研究异质集成光子芯片和片上多物理场量子调控。开展确定性量子光源、低损耗光子波导、电光调制器等光子器件的异质芯片集成的研究; 探索单光子发射器、波长调控器、路由器以及延时器的单片集成原理与技术; 实现片上多量子光源的协同辐

射及 Fock 态 Hong-Ou-Mandel 干涉等应用。

考核指标: 发展不少于 3 种异质集成芯片; 实现确定性量子光源与高性能电光调制芯片异质集成, 单光子全同性 $\geq 90\%$, 调制速率 $\geq 10\text{GHz}$, 光子耦合效率 $\geq 60\%$; 实现单片上不少于 2 个量子光源的协同辐射和三路单光子时-空复用、双光子干涉。

关键词: 异质集成、确定性单光子源、协同辐射

3.2 片上原子(离子)体系单量子态相干调控与精密测量

研究内容: 针对原子(离子)精密测量体系小型化的需求, 开展片上原子(离子)体系单量子态相干调控及精密测量应用研究。研究厘米至毫米级尺度芯片的高真空获取与基于光纤微腔谐振器的真空度测量方法; 研究芯片上囚禁与冷却的原子(离子)体系单量子态制备与退相干机制; 探索片上原子(离子)体系在电磁场和热力学量精密测量中的应用。

考核指标: 在小于 1cm 尺度内实现真空度优于 10^{-6}Pa 的片上原子系统; 实现片上单原子里德堡态操控、实现片上单离子制备并调控声子数 $N \geq 10$ 的宏观量子态; 利用单原子探针在芯片表面百微米尺度实现分辨率优于 30mV/cm 的表面电场分布探测, 用离子芯片探测低于 500kHz 的电磁波, 灵敏度优于 $10\mu\text{V}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{Hz}^{-1/2}$, 探索片上可控的量子热力学过程并实现热力学量的精密测量(分辨率优于 10^{-28}J)。

关键词: 原子(离子)芯片、单量子态、精密测量

3.3 低维氧化物人工微结构的新奇物态与调控

研究内容：针对氧化物人工微结构中的新奇物态和功能应用，研究其原子级异质界面和复合人工微结构的设计与构筑，发展宽温区二次谐波、超快成像、超高空间分辨成像等先进表征方法；提出光子、电子、声子、受激声子极化激元等微观粒子间的瞬态相互作用理论；揭示氧化物异质界面诱导新物态的物理机制；研究多场调控下氧化物人工微结构与光电功能的构效关系，探索其在感存算多功能融合新原理信息器件中的应用。

考核指标：实现低维氧化物人工微结构的原子级可控生长；制备出受激声子极化激元调控的低维氧化物复合微结构；建立低维氧化物的表征技术，实现优于 0.5pm 原子测量精度和优于 20pm 高空间分辨的测量；建立低维氧化物中微观粒子间的瞬态相互作用理论；阐明界面诱导新物态的物理机制，并研制出基于氧化物人工微结构的原理性神经形态器件。

关键词：氧化物低维结构、受激声子极化激元、光电智能器件

3.4 过渡金属硫族化合物纳米管的物性调控及其器件应用

研究内容：针对人工微结构中半导体纳米管的调控与应用，研究过渡金属硫族化合物纳米管结构参数（手性角分布和匹配关系、直径和层数等）的定向调控；通过大尺度电子结构计算研究过渡金属硫族化合物纳米管多层转角堆垛结构的电学、光学和输运性质，优化半导体光电子器件的关键性能参数；探究过渡金属硫族化合物纳米管中手性角分布、曲率和堆叠层数等结构参数对

其激子特性、电学性质等物性的调控机制；实现基于过渡金属硫族化合物纳米管结构的场效应管、光伏和光探测等原理性器件。

考核指标：实现不少于 3 种过渡金属硫族化合物纳米管的可控生长和手性调控；实现不低于百万原子量级过渡金属硫族化合物纳米管多层转角堆垛结构的大尺度电子结构计算；揭示过渡金属硫族化合物纳米管的结构对其激子特性、体光伏效应以及电子输运性质的调控机理；实现不少于 3 种基于过渡金属硫族化合物纳米管的原理性器件。

关键词：过渡金属硫族化合物、半导体纳米管、场效应管、光探测器件

3.5 异质异构集成低维半导体的极化调控与功能器件

研究内容：针对先进半导体技术中片上集成更多功能器件的需求，探索片上极性半导体的异质异构集成及其极性调控方法；揭示铁电极性、光学极性与晶格、电荷等自由度的关联机制；研究极性低维半导体中铁电极化、偏光响应等极化物理特性，研究界面退极化效应及其外场调控方法；研制基于铁电极化的存算一体原型器件和硅基 CMOS 片上集成的感算融合原型器件。

考核指标：制备不少于 2 种新型面内各向异性低维半导体材料；实现不少于 2 种铁电、偏振等极化相关调控方式；实现片上集成铁电材料的退极化临界厚度 $\leq 2\text{nm}$ ；研制出编程脉冲写入能耗 $\leq 10\text{pJ/bit}$ 的片上集成存算一体铁电原型器件，发展偏振成像和原位处理的片上集成感算融合原型器件（峰值算力不低于 1TOPS）。

关键词：低维半导体、片上异质异构、极化物态调控

3.6 微纳结构中非平衡物态探测和调控

研究内容：针对固体微纳结构中非平衡物态探测和调控的难题，发展集光、电、磁、热等调控手段的综合显微表征技术，在原子尺度研究光场驱动下电子、晶格、自旋的时空演化规律；探索微纳结构中的热电转换规律和太赫兹热辐射效应；利用结构光场或啁啾光场，调控非平衡物态的超快过程和光电响应；发展理论计算方法，阐明微纳结构中非平衡过程电荷输运、自旋翻转等现象的物理机制。

考核指标：开发超快扫描隧道显微技术，实现小于 150fs 脉冲激发下非平衡态的原子级空间分辨探测；利用扫描太赫兹噪声显微镜，揭示载流子在超高温梯度 ($\geq 5 \times 10^2 \text{K}/\mu\text{m}$) 下的非经典热电转换机制；实现不少于 1 种非平衡物态的光场调控方式；基于含时多体微扰理论实现光场调控及响应的模拟，发展针对非平衡态的非线性光谱的理论计算方法。

关键词：非平衡物态、超快原子级显微、纳米电子测温

3.7 稀土离子 4f 电子上转换发光的人工微结构调控

研究内容：针对稀土离子 4f 电子上转换发光布居时间长、辐射跃迁几率低、激发波长频段少等关键问题，构筑具有可操控多自由度（偏振、振幅和相位等）、强局域等特征的人工微结构光场；发展其与目标体系 4f 电子上转换发光的耦合方法和技术，实现人工微结构对 4f 电子上转换发光布居时间、辐射跃迁几率、激

发波长频段的有效调控；探索对上转换发光稳态、瞬态及空间分布调控的新机理和新方案；发展高品质上转换微纳光源，研制新型红外光子信息加密原型器件。

考核指标：制备出不少于 5 种高效调控稀土 4f 电子上转换发光的人工微结构（Purcell 因子 $\geq 10^3$ ）；实现上转换发光有效激发波长频段 ≥ 4 个、量子产率 $\geq 3\%$ 、寿命 $\leq 10\text{ns}$ ；制备出 1 种偏振和波前复用的稀土上转换微纳光源，研制出 1 类不少于 6 个维度（含时间、寿命等）的红外光子信息加密原型器件。

关键词：人工微结构、稀土 4f 电子、上转换发光