

“物态调控”重点专项 2023 年度项目

申报指南

（征求意见稿）

“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。

2023 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 13 个项目。同时，拟支持 7 个青年科学家项目。

本指南所有方向均可作为青年科学家项目组织申报，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。

1. 电子物态调控

1.1 综合极端条件下多轨道调控的关联电子新材料与量子新物态

研究内容：针对关联电子材料在超高压、极低温、强磁

场等综合极端条件下涌现的丰富量子新物态，发展先进的综合极端条件实验表征新技术，研制多轨道调控的关联电子新材料，研究轨道翻转等新机制诱导的非常规超导与关联量子物态；设计研制新型低维自旋轨道耦合量子磁性材料和原理器件，研究极端条件调控的新奇自旋物态，开展量子相变致冷材料与原理器件的基础研究。

考核指标：发展出 200 GPa 压强下在位磁性测量技术；利用极端条件制备 2 种以上多轨道调控的关联电子新材料；发现 1 种以上用于 10mK 以下极低温制冷的量子材料；发现 1 种及以上由高压等极端条件调控的量子新物态。

关键词：极端条件，电子关联，多轨道调控

1.2 局域-巡游电子渡越区域的关联演生物态及其调控

研究内容：针对 3d 和 4f 族化合物在局域-巡游电子渡越区域的丰富关联演生物态，探寻兼具局域-巡游属性的关联电子新材料、新效应和新机制；发展基于多砧压腔的低温物性测量技术，研究压力、磁场、维度、掺杂等驱动的绝缘体-金属转变、磁性量子相变、奇异金属态及非常规超导电性；利用先进的谱学和散射技术研究局域-巡游渡越区域的奇异电子态，揭示电荷、自旋、轨道、晶格等多自由度耦合机制。

考核指标：发展出 1 种新的多砧高压技术；实现 10GPa 量级静水压下的低温电、磁、热学综合物性测量和固态核磁共振微观性质测量；发现 3 种以上兼具局域-巡游属性的新型

关联电子材料。

关键词：绝缘体-金属转变，奇异金属，多砧压腔低温物性测量

1.3 高压下反常规化学计量比凝聚态体系的物态调控

研究内容：针对寻找具有新奇电子态的凝聚态体系的需求，发展大腔体高压强极端条件宽温区实验技术和变组分结构搜索方法，设计和制备常压条件下难以得到且具有反常规化学计量比的全新凝聚态体系，为获得新型高温超导体、热电材料等提供高压解决方案；研究高压强极端条件对间隙准原子电子物态等新奇电子态的调控规律，揭示元素、组分、结构与超导、热电等物性的关联关系。

考核指标：发展出高温下 (> 1500 K) 压强突破 40 GPa 的毫米级大腔体高压技术；研制 1 套模拟变组分反常规化学计量比的结构预测软件；制备出 1 种以上反常规化学计量比电子化合物新型超导体；制备出 2 种以上反常规化学计量比新型热电材料。

关键词：大腔体高压，反常规化学计量比，电子化合物超导体，热电

1.4 高温超导等关联量子体系的结构调控

研究内容：针对高温超导等关联量子体系仍然缺乏晶体结构与电子态之间定量关系的研究现状，通过结构调控与结

构解析，结合电子结构和电子-电子相互作用测量，研究超导电子配对、分数化元激发等多体量子态，探索电荷序、轨道序、自旋序等有序现象，通过分析晶体结构与关联电子态之间的定量关系，揭示相关量子物态形成的微观机理。

考核指标：发现1种以上新型关联量子材料；利用单轴压、外延生长、结构插层等技术方案实现对2类以上关联量子材料（如高温超导体等）的晶体结构调控。结构参数调控精度 $<1\%$ ；实现误差 $<10\%$ 的电子谱函数测量。

关键词：高温超导，关联量子材料，结构调控

1.5 极性关联氧化物的设计及物态调控

研究内容：针对关联氧化物的新奇电子态和功能应用，提出金属、氧、氢等多离子有序化的结构构筑方案，实现空间反演对称性破缺的精确调控，获得多铁性、极性铁磁金属性等新奇物态；发展晶格、电荷、自旋等自由度的原子尺度测量方法，揭示极性与各自由度间的关联机制；探索多场调控下极性与压电、磁电耦合、自旋轨道力矩、非互易输运等功能性的关联机制，为相应器件应用奠定科学基础。

考核指标：提出3种以上关联氧化物中空间反演对称性破缺的调控方案；发现3种以上多铁性（铁电、铁磁）、极性铁磁金属性等新型关联氧化物材料；发展出亚埃到微米尺度区间的极化结构测量技术。

关键词：极性关联氧化物，多铁性，极性铁磁金属性

1.6 低维磁体中量子临界行为与新奇物态的调控

研究内容：针对低维磁体中的强量子涨落效应，研制具有竞争交换作用的新型磁性材料和异质结构；发展基于 50T 以上强磁场等调控测试技术，研究量子磁性体系的解禁闭、演生对称性、奇异标度率等新颖量子临界行为；构筑超越朗道理论范式等非平庸的磁性相与奇异元激发，运用空间、动量、自旋分辨和宽能量范围的多种谱学手段，揭示新奇物态的微观机制。

考核指标：制备至少 3 种具有强竞争交换作用的新型低维磁性材料或异质结构；发展 1 种基于 50T 以上强磁场的低温磁共振物性测试技术；调控实现至少 2 种新颖量子临界现象；实现至少 3 种非平庸量子磁性相或元激发（含 1 种超越朗道理论范式的量子态）。

关键词：低维量子磁体，强磁场测试技术，量子临界，解禁闭

1.7 基于磁振子的量子耦合和调控

研究内容：针对高灵敏信号处理、高效率能量转换磁电子器件的需求，研究微波谐振腔与磁振子的耦合模式，探索高精度操控磁矩的新技术；设计并构建微米尺度可集成的磁振子-超导谐振腔耦合体系，发展调控和探测耦合强度、相位和体系损耗等方法；研究耦合模式之间的能量转化机制，探索自旋流（磁振子流）交换等自旋输运行为对耦合模式的调

制，发展基于耦合模式的高灵敏交变磁场探测器。

考核指标：实现耦合强度与谐振腔频率比值不低于 10% 的超强耦合；发展出 3 种以上调控和探测耦合强度、相位和体系损耗的方法；实现体系损耗与耦合强度比值在 1/2 到 2 之间的精确调控；在 100 MHz 交变磁场下，探测灵敏度 ≤ 5 pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。

关键词：谐振腔，自旋动力学，弱磁场测量

2. 拓扑物态调控

2.1 非厄米开放系统的物态调控

研究内容：面向调控开放系统的需求，研究非厄米系统中拓扑物态和物性、多体相互作用的关联效应和量子纠缠、热力学过程和相变、非平衡动力学及其拓扑现象等；针对原子、量子光学和固态量子器件等平台，提出构造与调控非厄米系统的新方法；研究对新型非厄米拓扑物态和趋肤效应的探测及动力学调控，探索非厄米拓扑物态调控在传感测量、非互易器件等方面的独特优势与应用前景。

考核指标：实现对非厄米大尺度拓扑晶格结构 (300×300 格点) 及多体相互作用的实验模拟；实现可同时调控增益 ($\geq 3\text{dB/格点}$) 和衰减 ($\leq -30\text{dB/格点}$) 的有源非厄米系统的新方案，研制出非厄米拓扑微波漏斗 (端口数 > 3 ，磁振子驱动效率提升 3 倍)；发展出非厄米增强的 Ramsey 干涉技术 (敏感度达到传统 Ramsey 干涉仪的 2 倍以上)。

关键词：非厄米拓扑物态，非厄米趋肤效应，非厄米增强量子传感，非互易器件

3. 人工微结构物态调控

3.1 多原子分子聚合体系中关联态超快相干调控

研究内容：针对超快相干信号与复杂环境相互作用问题，开展多原子分子聚合体系中电子关联态超快相干动力学研究。发展多体符合测量方法、多维相干光谱方法、液体膜高次谐波产生技术和阿秒近边带瞬态吸收光谱诊断技术；研究团簇和液体体系中电子超快演化过程的环境效应及退相干机制；探索电子局域激发和集体激发对瞬态相变及弛豫过程的影响。

考核指标：实现相互作用原子数目分辨($n \geq 8$)的集体相干动力学探测；发展出阿秒近边带吸收测量技术，实现 30 阿秒时间分辨和 0.4eV 能量分辨的原子分子 K 边电子超快过程测量；利用基于亚微米液体膜的高次谐波产生技术，实现波长小于 60nm 的高次谐波和覆盖 0.1-30 THz 的太赫兹波。

关键词：多原子分子聚合体系、电子关联动力学、环境效应、退相干机制、超快调控

3.2 基于人工微结构中光/声时空矢量场的物态调控

研究内容：针对天基红外遥感与复杂结构声场探测的需求，基于对称性和拓扑原理，发展具有时空拓扑结构矢量场的主动探测新原理和新技术；发展人工微结构材料调控光/

声时空矢量场的拓扑能带结构理论；探索光/声时空矢量场与微结构相互作用的机制；提出能量、动量、角动量以及人工拓扑构型等多自由度协同调控的方法；发展人工自旋和轨道角动量分辨的红外和矢量声场探测技术和原型器件。

考核指标：实现中红外腔内集成不低于 10 阶的涡旋激光器；制备碲镉汞雪崩探测原型焦平面器件：规模 $\geq 64 \times 64$ ，波长覆盖 $3\text{-}5 \mu\text{m}$ ，增益 $\geq 1000 @ 10 \text{ V}$ ，暗电流 $\leq 1 \text{ nA/pixel}$ ，可检测涡旋光阶数 ≥ 10 ；研制出矢量声场探测器，其像素尺寸 $\leq 6 \text{ mm}$ ，规模 8×8 ，频率 $20 \text{ Hz}\text{-}10 \text{ kHz}$ ，信噪比 $\geq 60 \text{ dB}$ 。

关键词：人工微结构、能带调控、时空矢量场、拓扑构型、主动探测

3.3 半导体量子结构声子态调控及其器件应用

研究内容：针对半导体量子结构声子态及其相关元激发的探测与调控，发展高能量分辨、高空间分辨的多物理场环境下的声子态探测技术；探索半导体量子结构中新奇声子态及相关混合元激发；研究半导体量子结构中声子动力学过程、声子态与其他元激发耦合的多场调控机制，优化和提升半导体光电子器件的关键性能参数。

考核指标：发展出至少 2 种多场环境下声子态探测技术，发现至少 2 种新奇声子态或相关混合元激发；揭示至少 2 种半导体量子结构中声子态的多参量调控机制；基于声子态调控相关的效应和机制，突破激光器阈值等至少 2 种光电子原

型器件关键性能参数。

关键词：半导体量子结构，声子动力学，声子态元激发，声子态多场调控，光电子器件

3.4 基于量子混沌的人工微结构新物态与调控

研究内容：针对人工微结构中与量子混沌相关的复杂物理效应和新奇物态，研究光与物质耦合体系中准粒子的混沌动力学行为，揭示其对人工微结构多重物理参数的调控机制；研究各向异性体系中光场及物态角动量快速转换的混沌动力学机理，调控光场及物态的时空局域特性，制备具有单向手性、复合轨道角动量等物理特性的新型微腔光场，探索混沌微腔中强耦合效应在光电器件中的潜在应用。

考核指标：发现 2 种以上光-电子耦合系统中与量子混沌相关的新物态（如量子疤痕态、时间晶体态等）；实现 2 个以上在固态环境中复杂混沌体系（如受击转子等）的量子模拟；制备品质因子大于 10^7 的片上混沌微腔，实现光场角动量转换带宽超过 1000 nm，并具有定向出射、单向手性等特性。

关键词：人工微结构，量子混沌动力学，量子疤痕，混沌光学微腔

3.5 摩尔超晶格多场物性与光子态调控

研究内容：基于低维与人工序构等体系实现摩尔超晶格光子学材料制备，研究摩尔超晶格新物态中摩尔结构、摩尔

周期、摩尔能带等的可编程设计和动态调控；探索不同二维材料体系摩尔超晶格的光子学特性及其机制；研究外场对摩尔超晶格的光学带隙、耦合机制、能量传递、拓扑与光子学局域相变等新奇光子学特性的调控。实现基于摩尔超晶格的单光子光源、电光调制器和光学倍频器等原理性器件。

考核指标：设计并制备 3 种以上摩尔超晶格光子学材料。单光子光源激发效率提高 1000 倍以上（与基于同类二维材料的高效单光子光源相比），实现百纳米量级的波长调控；电光调制器实现半波电压长度积小于 $1 \text{ V}\cdot\text{cm}$ 的宽带宽角扫描；光学倍频器实现单位长度转化效率大于 $1.00\%/\mu\text{m}$ 。

关键词：摩尔超晶格，光子态调控，光学带隙，单光子光源，电光调制