

# “物态调控”重点专项 2022 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。

2022 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 31 个项目，同时拟支持 20 个青年科学家项目。

青年科学家项目支持青年科研人员承担国家科研任务，可参考指南支持方向组织项目申报。青年科学家项目不再下设课题。

## 1. 电子物态调控

### 1.1 f 电子关联体系中的新奇物态及其调控

研究内容: 针对镧系和铜系强关联电子体系中丰富的物态和相变现象, 寻找具有新奇物性的强关联 f 电子材料, 研制高质量低维 f 电子材料的表面/界面和异质结构; 通过压力、磁场、掺杂和维度等参量的调控, 研究强关联 f 电子材料体系中的电子关联、磁性、超导、拓扑序及其相互作用; 探索新型量子相变及相关临界行为, 研究量子相变的普适性及其分类; 通过多种先进谱学的测量, 研究由 f 电子中强关联效应所导致的奇异金属态、非常规超导、近藤拓扑态等新奇物态产生的机理。

考核指标: 发现具有新奇物性的强关联 f 电子新材料; 实现 f 电子薄膜材料和异质结构的原子级精准可控生长, 制备基于强关联 f 电子的异质结构或薄膜材料, 实现强关联 f 电子材料中新奇物态的维度调控; 获得至少两种强关联 f 电子材料的电子相图, 揭示量子临界性的产生机理以及量子相变与超导的关系; 发现新型近藤拓扑材料, 探索新颖关联拓扑态; 测量强关联 f 电子材料的准粒子色散或磁激发能谱, 并揭示其与物态性质之间的规律。

## **1.2 高压下轻元素化合物超导体的设计、制备和调控**

研究内容: 面向研发高压下轻元素化合物室温超导体的需求, 发展超高压实验产生技术和超导性质(零电阻、迈斯纳效应)的高压原位测量技术, 设计和制备高压下新型轻元素化合物超导体, 研究与超导竞争或共存的磁有序、超离子、拓扑等新奇物态, 研究压强-组分-结构-超导温度之间的关联机制, 探

索高压对超导相和超导温度的调控机制,阐明轻元素对超导性质的关键贡献。

考核指标:发展出适用于轻元素化合物的超高压实验产生技术 ( $>300$  GPa), 研制出一套原位高压超导核磁共振装置 ( $>100$  GPa); 设计出 2 种以上新型高压室温超导体, 制备出高压高温超导体 ( $>200$  K); 获得卸压后可保持超导电性的新型轻元素化合物, 揭示压力对超导性质的调控机制。

### 1.3 二维电子关联单晶体系在极端条件下的物态调控

研究内容: 针对低维体系中关联效应增强的现象, 设计和制备人工低维单晶量子体系和异质结构; 利用极低温、超强磁场、超快泵浦和高压等极端条件, 结合电场、掺杂、人工超晶格、光场等调控手段, 在空间极限尺度上研究单个低维量子体系中电子-晶格-轨道-自旋之间的关联效应以及拓扑物态的观测和调控。

考核指标: 实现人工低维单晶体系、异质结构和超晶格结构在原子精度上的设计与可控制备, 结合原子尺度自旋灵敏的电子能谱和极低温、强磁场、高压、超快泵浦等极端条件下的输运、超快晶格动力学和光谱表征, 实现对磁有序、电荷有序、超导和激子绝缘体相等关联物态和拓扑物态的调控; 揭示电子的轨道、自旋与晶格等多自由度之间的相互作用和能量竞争机制; 揭示纯低维单晶体系中的新型准粒子激发和手征相互作用等新物理效应和潜在应用。

## 1.4 面向新一代微纳电子器件的二维电子材料研究与物态调控

研究内容：针对研发新一代微纳电子器件的需求，发展二维电子材料的理论设计方法与可控制备技术，开展新型二维电子材料的设计、制备和多物理参量（如应变、掺杂及合金化、表界面、高压、外场等）作用下的物态调控，结合高时空分辨的结构及电子态表征手段，探索多参量调控下的电子物态与晶格、电荷、轨道、自旋之间的关联关系，研究提升现有二维电子材料的性能参数的方法，为新一代电子器件的研发提供二维材料与物理基础。

考核指标：发展出以性能参数为目标导向的二维电子材料理论设计方法与软件，以及二维电子材料的可控制备技术（包括层数、层间堆垛、相结构、缺陷密度等的精准控制）；设计并制备出 3-5 种新型二维电子材料；发现 2 种以上物态调控策略，突破现有二维电子材料的性能参数（如载流子浓度及迁移率、铁电极化强度、磁性及磁转变温度等）；揭示 3-5 个二维电子材料物态调控的微观物理机制，获得多参量调控下的电子物态与晶格、电荷、轨道、自旋之间的关联关系；构建 2 种以上微纳电子器件，器件性能较已有器件得到提升。

## 1.5 强自旋轨道耦合反铁磁材料物态调控及原型器件

研究内容：针对低维反铁磁体系中的电荷、自旋、谷、晶格和轨道等自由度之间的强相互耦合，研究反铁磁材料中的自

旋-轨道耦合、自旋-晶格相互作用、自旋-谷锁定等诱导的新奇物性、集体激发态和拓扑态等，并探讨实现反铁磁材料中多种磁学和电学性质的调控。拓展研究电荷、自旋、谷、晶格和轨道等相互耦合机制的理论方法和实验手段，探索不同对称性下各自由度之间相互耦合产生的新奇物性和物态。

考核指标：理论预测和实验制备具有新奇物性和物态的反铁磁材料新体系；揭示反铁磁材料体系中产生和调控自旋流等新型机制；厘清反铁磁材料中的自旋流和自旋波等的阻尼机制，实现稳定本征太赫兹自旋自震荡的方式；阐明反铁磁材料中自旋波和声子的相互作用与调制；实现反铁磁材料体系中磁结构及其激发态的高效门电压调控，并揭示其机理；制备具有潜在应用价值的原型器件。

### **1.6 量子自旋阻挫体系中的新奇物态及调控**

研究内容：针对量子自旋阻挫体系中的新奇物态及调控，研究非常规自旋激发的新型自旋阻挫体系；在极端条件下运用多种谱学手段，寻找量子自旋阻挫体系中的新物态及非常规自旋激发；建立新自旋阻挫体系的相互作用微观模型与相图，研究新型量子相变的普适类和确定新型量子临界行为，探索新物态及非常规自旋激发的形成机制；研制自旋阻挫异质结，探索非常规自旋激发特性的潜在应用。

考核指标：制备出超越现有阻挫体系的高品质单晶，确立新体系的微观模型，揭示新物态形成的机理；从实验和理论上

确定新物态及非常规自旋激发，确定相图及新型量子临界行为，并建立其理论描述；发展多场调控技术、量子多体方法及自旋阻挫异质结制备技术，开发量子多体计算软件。

### **1.7 新奇磁子量子效应调控及其器件**

研究内容：针对新型磁子材料及其磁子异质结，研究磁子量子效应等新奇物态，构建几种具有自主知识产权的磁子发生器和探测器、磁子阀、磁子结和磁子晶体管等新型磁子器件，研究磁子长程输运、磁子偏振特性和手性特征、磁子古斯汉欣位移、磁子-磁子或磁子-光子或磁子-声子等耦合诱导的带隙等新奇物态性质，探索其在凝聚态物理及信息科学中的应用。

考核指标：利用铁磁、亚铁磁和反铁磁性金属、氧化物、特别是磁性绝缘体等材料，研制出三种以上新型磁子异质结、磁子晶体和磁子型原理器件（如磁子发生器和探测器、磁子阀、磁子结和磁子晶体管等）；揭示磁子阀效应、磁子结效应、磁子阻塞效应、磁子趋肤效应、磁子电流拖拽效应、磁子转移力矩效应、磁子非局域霍尔磁电阻效应等新奇磁子量子效应。

### **1.8 新型铁性的机理研究及铁性的超快调控**

研究内容：面向集成度更高、功耗更低、响应更快的下一代电子信息技术研发需求，发展描述铁电性、铁磁性及铁谷性之间相互耦合的理论模型和相应的计算方法，设计新型室温铁性材料（包括铁谷体和二维多铁材料），探索纳米空间尺度和纳秒时间尺度铁性的动态调控规律，研制高密度、高速和低功耗

耗的新型铁性原理电子器件和光电器件。

考核指标: 发展用于铁性研究的基于第一性原理的有效哈密顿量方法和机器学习方法, 开发一套软件; 厘清多个自由度之间相互耦合的规律和新型铁性 (包括铁谷性和二维多铁性) 的产生机制, 设计并实验上制备出 1 到 2 种可室温工作的新型铁性材料; 揭示纳米空间尺度和纳秒时间尺度铁性的调控规律, 研制出高密度、高速和低功耗的新型铁性原理电子器件或光电器件 (包括铁电畴壁存储器、光电探测器、铁电场效应管等)。

### **1.9 关联材料界面量子态耦合机理研究与调控**

研究内容: 针对关联电子材料的界面磁性与电极化耦合问题, 研究其异质界面及超晶格的设计与构筑, 发展高空间分辨、高能量分辨电子显微学与谱学分析等界面多尺度定量观测方法, 研究原子尺度下的界面晶格与磁电量子态以及相关的集体激发行为; 发展相应的微观理论与模型, 研究关联电子材料异质层间、界面间量子态的产生与耦合机理及其调控方法, 探索其在新型信息与传感器件中的应用。

考核指标: 实现具有磁性、电极化等特性关联材料异质界面与超晶格的原子级可控生长, 获得具有优化性能的人工低维材料; 建立定量观测界面自旋和磁电量子态与其集体激发行为的方法, 实现磁电激发的色散测量 (能量分辨率小于 10 meV), 获得界面电子轨道和自旋原子尺度的空间分布信息; 提出描述

界面量子态产生及耦合机理的新理论,并建立对其调控的有效手段;研制出一种以上基于关联材料人工结构的新型信息存储和传感器件原型,获得核心自主知识产权。

### **1.10 新型二维界面非常规超导体系的构筑、调控及其机理研究**

研究内容:针对界面体系中丰富的非常规超导现象及新颖机理,预言并构筑新型二维界面非常规超导体系,通过界面工程直接调控界面超导体系,并结合栅压、光激发、摩尔势场等调控技术,提高其超导温度、并搜寻其它新奇物性。阐明界面近邻效应、准粒子耦合以及多物理场调控等对于诱导和增强超导特性的微观机理,为厘清非常规超导机制、获得新的高温超导材料提供新途径。

考核指标:制备若干新型二维界面非常规超导材料,得到体相不存在的二维层状超导体系;实现界面工程与多种外场调控技术,提高超导温度、并实现其它新奇物性;利用多尺度原位表征等实验技术,揭示界面近邻效应、电子与不同玻色子激发的耦合与协同对二维超导电性的调制,并阐明其诱导、增强超导特性的微观机理与普适性规律,为探寻新型高温超导提供物理基础;探索和调控新型二维界面非常规超导体系的拓扑物性。

### **1.11 强耦合超导材料及机理研究**

针对强相互作用引起的高临界温度超导现象,研发常压下

高临界温度的新超导体系，发现强耦合超导体的共性特征，建立描述超导体从弱耦合到强耦合的统一图像，在非中心对称和强自旋轨道耦合体系中探寻超导序参量具有手性特征的新型三维超导体。

### **1.12 低维磁性体系的自旋态调控及其应用**

针对将电子自旋应用到存储与逻辑运算等基本信息操作的需求，发展低维磁性体系的自旋态的制备和高时空分辨表征方法以及自旋输运的动态空间成像表征方法，研究低维磁性体系相互作用诱导的集体行为、磁性与非磁性界面自旋态及其对自旋注入的影响，探索自旋态与自旋输运的关联及其多场调控方法及物理机理，构筑低维磁性体系的自旋电子器件及系统集成。

## **2. 拓扑物态调控**

### **2.1 关联拓扑物态理论、材料和低能激发研究**

研究内容：针对拓扑物理学研究的深化，发展关联拓扑电子理论，预测、制备和表征关联拓扑电子新材料，特别是具有较大体能隙、高迁移率或奇异电子结构的拓扑新材料；发展新的实验方法探测关联拓扑物态中的低能激发；研究电子关联效应导致的独特物性及相关的拓扑量子相变；针对关联拓扑物态在传感、信息存储或处理等方面的潜在应用，制备关联拓扑材料低维结构，研究其多场调控，利用其独特物性或相变特性研制关联拓扑电子器件原型。

考核指标：发展关联电子体系中的拓扑物态理论，提出识别关联拓扑物态的有效方法；形成探测关联拓扑物态中低能激发的新实验方法；预测并制备出新型关联拓扑电子材料，完成对其结构和物性的系统表征，实现电子关联导致的拓扑量子相变；制备出高质量拓扑低维结构（薄膜、异质结等），实现其多场调控，观测到电子关联引起的输运和谱学特征，并提出相应的理论解释；研制出关联拓扑材料的电子信息原理器件。

## 2.2 关联电子拓扑物态中的贝里曲率场调控

研究内容：针对具有关联电子效应的拓扑物态调控需求，通过系统研究拓扑物态中出现的电子关联性、贝里曲率场以及相关的各种输运效应，发展包括能带、磁场、电场、光场以及界面等对关联电子系统贝里曲率场的调控技术；探索具有非阿贝尔贝里相位的拓扑物态；设计具有较大反常效应、量子反常霍尔效应以及较强的光耦合性的新拓扑材料；探索贝里曲率场在自旋积累中的作用；发展大尺寸单晶拓扑新材料制备技术及原理性器件。

考核指标：厘清关联电子拓扑物态中贝里曲率场与各种反常效应的内在联系；发展出针对贝里曲率场的有效的磁场、电场等调控手段；找到超出传统拓扑金属范畴的具有非平凡几何相位的材料体系；实验发现具有室温（300K）磁性的关联电子拓扑材料并对其贝里曲率场进行有效调控；发现可以在液氮温度以上实现量子反常霍尔效应的新拓扑材料；基于贝里曲率

和自旋输运的关联，找到 3-5 种通过自旋流和空间自旋分布产生较大垂向自旋积累的新型材料体系；实现大尺寸单晶拓扑新材料层数、转角的精准制备及光电子等新原理器件。

### **2.3 拓扑磁性结构的超快动力学和调控**

研究内容：针对数据存储爆发式增长对变革性高速磁存储的需求，探索以磁斯格明子和磁浮子等为代表的拓扑磁结构超高速运动规律及调控手段。利用高时间和空间分辨的磁结构表征技术，理解拓扑磁结构的超快动力学行为；发展高效产生和调控超快自旋流的方法，提高自旋流在界面注入的效率；研究拓扑磁结构的超快自旋流调控机制，为获得基于拓扑磁结构的超快磁存储器夯实物理基础。

考核指标：阐明以磁斯格明子和磁浮子等为代表的多种拓扑磁结构产生、湮灭及高速运动的动力学物理规律，进而建立具有高时间分辨（纳秒级）和空间分辨（小于 5 纳米）的磁结构原位表征技术；实现电磁场、温度场、声场等对超快自旋流（皮秒级）产生和传输的高效调控，阐明基于反铁磁超快自旋动力学产生超快自旋流的物理机制，揭示界面对自旋流注入的影响，提高自旋注入的效率；实现利用超快自旋流对拓扑磁结构的超快（小于 10 纳秒）的高速操控。

### **2.4 三维量子霍尔效应与非线性霍尔效应**

针对在三维材料体系中调控量子霍尔效应的挑战，探索实现三维量子霍尔效应，以及非线性霍尔效应的新体系（如拓扑

半金属、高阶拓扑绝缘体、准晶、拓扑电路、扭角二维范德瓦尔斯材料、磁性拓扑绝缘体等)；揭示无序诱导，外力诱导，周期场驱动等新机制；研究非对易几何、多参数空间几何相位、相互作用效应、非线性磁电响应等新物理和新应用；探索非线性霍尔效应在揭示和标识量子材料新物相和对称性中的应用。

## **2.5 磁性拓扑物态及其物性调控研究**

针对发展磁性拓扑物态的需求，将拓扑理论拓展至磁空间群，探索磁空间群保护的新型拓扑不变量和拓扑分类，发展预测磁结构和拓扑不变量的计算工具，发现磁性高阶拓扑绝缘体、磁性外尔半金属等新材料体系；利用谱学、输运性质研究，绘制电荷和自旋动力学谱；利用电荷、自旋和轨道等多自由度耦合效应实现对磁性和拓扑态的有效调控。

## **2.6 拓扑超导物态探测及调控研究**

针对未来信息技术以及量子器件对拓扑物理的需求，寻找潜在的作为拓扑超导态载体的拓扑材料和超导材料；发展观察和测量拓扑超导物态的实验技术手段；实现拓扑超导边缘态的成像观察和对拓扑超导物态的观测和调控；理解拓扑超导现象的内在机制，发展预言和设计拓扑超导物态的理论。

# **3. 人工微结构物态调控**

## **3.1 里德堡激子/原子新奇物态的电场传感与测量**

研究内容：面向基于微波及红外光场的新奇物态调控和感知，在低维量子点、二维膜材料及气态碱金属原子体系中，制

备里德堡激子、里德堡原子的拓扑态、集体激发态等新奇物态，研究微波和红外光场对里德堡激子、里德堡原子等新奇物态的操控及演化，基于里德堡激子/原子的长程相互作用实现特定拓扑结构的新奇物态及电场调控。发展微纳尺度下里德堡激子、里德堡原子体系的电场腔增强技术，探索拓扑态及集体激发态等新奇物态在电场传感和精密测量等交叉学科问题中的应用。

考核指标：构建微波及红外光场强相互作用的固态里德堡激子/原子的腔增强格点数达  $16 \times 16$  的二维阵列。揭示时间反演物态、受拓扑保护的边界态等里德堡新奇物态的微波及红外光场电场增强测量与传感，拓展新奇物态在电磁场的调控和测量的应用。具体指标为微波频谱响应带宽：1-300GHz，场强探测灵敏度  $< 40 \text{ nV} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ；1-5 $\mu\text{m}$  红外光场的功率探测灵敏度  $< -120 \text{ dBm} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 。

### 3.2 超冷原子气体的自旋态调控及其新奇物态研究

研究内容：针对超冷原子气体中的自旋态调控，发展原子自旋与线动量、角动量等外部自由度耦合的调控技术，制备角动量量子数可控的涡旋态，研究其中的角向条纹相、自旋霍尔效应和斯格明子等物态；研究单自旋和两自旋超冷原子气体的光晶格高轨道装载，观察具有全局轨道角动量的手性超流，研究具有拓扑准粒子激发的玻色超流；动态调控不同自旋态原子间的相互作用，探索两自旋超冷原子体系动力学相变行为的普

适规律。

考核指标：实现超冷原子气体的自旋和角动量的绝热耦合，制备温度低于 10nK 的光晶格  $p$  轨道超冷原子体系，实现不同自旋态原子间相互作用的快速 ( $t \approx 100\mu\text{s}$ ) 操控；在超冷原子气体中制备大角动量 ( $L \geq 2$ ) 和长寿命 ( $t > 100\text{ms}$ ) 的涡旋态；制备出基态长寿命 ( $t > 200\text{ms}$ ) 的角向条纹相、拓扑超流和手性超流等新奇多体关联物态；实现两自旋体系的相变，揭示动力相变行为的普适规律。

### 3.3 基于相互作用超冷原子气体的新奇物态调控

研究内容：针对相互作用超冷原子气体中的物态调控问题，利用光晶格和动量晶格技术构造超冷原子晶格体系，基于低磁场 Feshbach 共振实现超冷原子散射长度的大范围连续可调谐；调节原子间的两体接触性相互作用及三体相互作用，制备强关联体系中的拓扑绝缘体态、手征性原子流和安德森局域态等新奇物态；研究相互作用对拓扑物态的拓扑不变量和拓扑边界态的影响，探索基于相互作用调控的拓扑泵浦和迁移率边。

考核指标：基于光晶格和动量晶格技术的高度可控超冷原子晶格体系，实现 Su-Schrieffer-Heeger、准周期 Aubry-André、Harper 等模型；实现晶格参数的全方位操控，包括近邻格点间的隧穿强度和隧穿相位、格点势能、跨格点间的长程耦合（跨格点间隔不小于 4）；基于低磁场 ( $< 200\text{G}$ ) 下 Feshbach 共

振实现超冷原子散射长度大范围连续可调谐（-2000 到 1500 波尔半径）；制备出强关联体系中的拓扑绝缘体态、手征性原子流和安德森局域态等新奇物态。

### **3.4 超构光学材料的多自由度物态调控与功能集成**

研究内容：针对下一代光信息技术高集成与高效能的需求，发展新型超构材料中光相位、偏振、振幅、对称性等多自由度联合调控的新原理和新技术；研究不同材料体系、合成维度、人工自旋、拓扑序等对超构材料的能带和光子态的调控规律；基于复杂超构表面的多重相位特性，研究其对光的频率色散、空间色散、调制效率等的调控方法，探索提高超构光学器件性能的新方案，发展相关原理器件。

考核指标：提出基于多自由度调控的超构材料的能带及光子态的全局设计方法，发现并建立新颖光学拓扑物态的多维调控机制，实现关键功能集成与拓展；揭示复杂超构表面设计对多重光学性能参数的影响规律，实现突破传统制约机制的新型光学元件，研制超宽带消色差、大尺寸高效率的平面透镜（带宽：400-1100nm，直径 $>1\text{cm}$ ， $\text{NA}>0.1$ ，效率 $>50\%$ ）；实现低损耗的通信波段超构材料原理器件（有效模式尺寸 $<800\text{nm}$ ， $Q$ 值 $>500$ ）。

### **3.5 超构声学材料的新奇物态调控及器件研制**

研究内容：针对声学高性能关键器件的需求，发展主动单元、层间耦合、应变、转角、位错及旋错等调控手段，探索非

厄米、对称性、拓扑对声场调控的新原理和新方法，发现声超材料的新奇物态；发展高精度激光测振技术和高分辨声场扫描技术，表征微纳尺度下的声传输性质；研制高灵敏射频声表面波传感器件，并为声光通信、医学超声成像、无损探测等提供关键技术。

考核指标：发现声高阶奇异点、非厄米导致的声非互易传输、声非阿贝尔拓扑荷、高维空间的声学绳结结构、声脆弱拓扑态等新奇物态；发展高精度激光测振技术，其中千赫兹以下和千赫兹至兆赫兹的振动测量精度分别 5 皮米和 2 皮米；发展分辨率达 2 微米的高分辨声场扫描技术；基于弹性波的拓扑边缘传输，制备品质因子达  $10^4$  的环形谐振原理器件、时延在 30 微秒以上的无源声表面波延迟原理器件。

### **3.6 面向多功能可集成光电子芯片应用的物态调控**

研究内容：针对 CMOS 兼容的多功能、高性能光电子集成芯片的应用需求，探索新型光子材料微结构中缺陷发光与自旋相干调控、高速光场调制及非线性频率转换的机理与单片集成技术途径；研究薄膜色心光源的形成机理及调控方法，阐明非线性的多场耦合调控机理，研发大尺寸、高导热、高品质单晶薄膜制备技术及其光子器件制备方法；研究色心光源、低损耗波导、电光调制器、孤子光频梳等片上光子器件结构，并构筑单片式多功能原理芯片。为下一代光电子集成芯片技术提供物态调控物理基础。

考核指标：研发 CMOS 兼容的新型光电子单晶薄膜（尺寸  $\geq 4$  inch，XRD  $< 100$  arcsec，RMS  $< 1$  nm，导热率  $\geq 200$  W/mK）；光子微腔结构 Q 值  $\geq 5 \times 10^6$ ，实现锁模光频梳产生（谱宽  $\geq 150$  nm，梳齿光源数量  $\geq 35$ ），并向可见光波段拓展；发展微结构中色心的精准植入工艺，制备出新型多功能规模化集成原理芯片，单片集成度不低于 10 个单元器件。

### 3.7 超构表面对光场及表界面物理化学过程的调控

研究内容：针对局域场修正、近场耦合等带来的超构表面的效率问题及设计困难，研究超构表面调控光场的基本理论，设计具有特定振幅/相位/偏振分布的复杂光场；将超构表面与量子材料相结合，通过光学方法探测和操控表界面物理化学过程；基于新型低维材料/磁性纳米异质结等构建超构表面，研究其对光场的动态调控；探索超构表面对光场及表界面物理化学过程的高效调控在信息、能源和生物医疗等方面的应用。

考核指标：将超构表面与量子材料相结合，建立超构表面调控光场及实现复杂矢量光场的基础理论；结合超构表面发展线性/非线性表面光谱技术，实现对表界面物理化学过程（如逆自旋霍尔效应、界面化学反应、荧光反应等）的探测和操控，揭示其中的微观机理；基于新型量子材料（如低维材料、磁性纳米异质结等）构建超构表面，实现对复杂光场的动态高效调控；实现若干超构表面功能器件。

### 3.8 新型拓扑光子学结构物态调控与应用

研究内容：针对拓扑物理前沿课题和新一代光子学器件的需求，设计和制备新型光场和突破传统材料性能的光子学结构，利用光场与物质及光子学微结构的相互作用，研究非线性、对称性、平带局域、非厄密拓扑、人工合成维度等对光子学拓扑相、光场传输与局域、和新奇光学物态的调控规律；研究对拓扑结构光场、能带简并点、高阶拓扑态和非厄密奇异点等的智能调控，探索其在前沿交叉学科重要科学问题和新型光子学功能器件方面的应用。

考核指标：制备基于非传统概念的光子学人工结构，包括具有不同对称性的拓扑光子晶格、拓扑半金属、非厄密拓扑光子学结构、合成维度光子拓扑绝缘体；构筑可重建的实验平台，从光学非线性、对称性、非厄密、轨道自由度、人工合成维度等多重维度实现对光子学带隙结构、光子学拓扑态、光场传输与局域的调控；研制基于结构光场、高阶拓扑、非厄密拓扑等物理机理的高灵敏光学传感原理器件和复杂光场（包括  $m \geq 5$  的高阶涡旋光）波导耦合原理器件。

### **3.9 基于拓扑电路的物态调控及应用研究**

研究内容：针对大数据时代快速、安全和可靠信息处理的迫切需求，基于凝聚态物理中晶格与电子线路网格的一致性，探究基于拓扑电路系统实现凝聚态体系中难以实现或无法实现的新奇物态；设计并制备新型经典电路芯片，探索其在快速信息处理方面的应用；研制基于非厄米经典电路特性的新型功

能化电路器件。

考核指标：构建出能模拟凝聚态微观效应的经典电路体系，实现对非阿贝尔高维拓扑态的有效模拟；实现类马约拉那零能模的非阿贝尔编织，设计并制备出关联拓扑电路芯片，实现对强关联体系新奇物态对应现象的实验观察，并揭示出其演化规律；设计并制备出新型经典电路芯片，使其信息处理能力比传统芯片有指数提升；研制出基于非厄米拓扑电路的新型传感系统，使读取器的频谱响应灵敏度相比于传统无线电传感装置提高 10 倍以上。

### **3.10 取向序新奇物态及其调控**

研究内容：针对取向序物态的按需调控和多元化应用需求，探索取向序新奇物态，如铁电向列相/手性液晶态；揭示新物态在电、磁、光、热、力等外场下的新奇物理效应和操控变换机制；研究取向序新物态中拓扑结构、三维孤子、光子晶体等的可编程设计和动态调控，发展远离平衡态取向序新物态的集群行为及构建调控方法；探索基于取向序新物态的新型原理性器件。

考核指标：制备具有电极化和分子取向强耦合、螺旋多层级组装的取向序新奇物态，如铁电向列相、手性液晶态；建立高分辨率的分子取向图案化技术，实现取向拓扑物态、三维孤子、手性软光子晶体结构的可编程设计，揭示电、磁、光、热、力等多场下的新奇物理效应、操控变换机制；构建生物/液晶

混合体系等远离平衡态的取向序新物态，发展按需调控方法；实现柔性拓扑光电子原理器件和智能生物传感原理器件。

### **3.11 自旋物态调控及其原理器件**

针对未来信息应用需求的爆发式增长，变革自旋物态调控的方法和手段，探索以自旋为信息载体的新原理信息器件。研究自旋物态在电、光、磁等多手段调控下的新现象，特别是探索垂直磁性材料中自旋物态的全电学调控新方法，并阐述内在的物理机制；实现低维半导体中的高效自旋注入、输运和探测；研究铁磁/半导体异质结中光与物质的相互作用以及自旋极化光电子的集体行为；设计并研制新型低维磁性/半导体（超导）等异质结构，探索相关物理机理和器件新效应。

### **3.12 微波腔强耦合体系的物态调控**

开展微波腔与人工原子和固体元激发强耦合体系的物态调控研究，实现微波腔与超导人工原子的强耦合，发现反旋波相互作用导致的新效应和现象，发展基于宇称对称破缺的探测强耦合系统量子真空的方法；实现可调控的非厄密物理系统；实现高性能的表面等离激元与腔的强耦合，探寻在单光子或少光子条件下的表面等离激元调控。

### **3.13 低维超冷原子气体的物态、表征与输运特性研究**

针对低维超冷原子物态制备和表征中的关键科学问题，通过引入新型盒子势，无序势、人工规范势和相互作用等精确调控手段，实现均匀量子气体、摩尔晶格中的超流和量子磁性等；

发展高时间分辨率的相互作用调控以及空间分辨率为单格点的自旋、密度、相位调控和测量技术，高精度表征低维体系的相变、演化、输运和耗散性质。