

## 附件 3

# “量子调控与量子信息”重点专项

## 2017 年度项目申报指南

“量子调控与量子信息”重点专项的总体目标是瞄准我国未来信息技术和社会发展的重大需求，围绕量子调控与量子信息领域的重大科学问题和瓶颈技术，开展基础性、战略性和前瞻性探索研究和关键技术攻关，产生一批原创性的具有重要意义和重要国际影响的研究成果，并在若干方面将研究成果转化为可预期的具有市场价值的产品，为我国在未来的国际战略竞争中抢占核心技术的制高点打下坚实基础。

本专项鼓励和倡导原始创新，并积极推动应用研究，力争在新原理原型器件等方面取得突破，向功能化集成和实用化方向推进。量子调控研究的目的是认识和了解量子世界的基本现象和规律，通过开发新材料、构筑新结构、发现新物态以及施加外场等手段对量子过程进行调控和开发，在关联电子体系、小量子体系、人工带隙体系等重要研究方向上建立突破经典调控极限的全新量子调控技术。量子信息研究的目标是在量子通信的核心技术、材料、器件、工艺等方面突破一系列关键瓶颈，初步具备构建空地一体广域量子通信网络的能力，实现量子相干和量子纠缠的长时间保持和高精度操纵，实现可扩展的量子信息处理，并应用于大尺度的量子计算和量子模拟以及量子精密测量。

“量子调控与量子信息”重点专项将部署 6 个方面的研究任务：1.关联电子体系；2.小量子体系；3.人工带隙体系；4.量子通信；5.量子计算与模拟；6.量子精密测量。

2016 年，量子调控与量子信息重点专项围绕以上主要任务，共立项支持 28 个研究项目（其中青年科学家项目 6 项）。根据专项实施方案和“十三五”期间有关部署，2017 年，量子调控与量子信息重点专项将围绕关联电子体系、小量子体系、人工带隙体系、量子通信、量子计算与模拟以及量子精密测量等方面继续部署项目，拟优先支持 18 个研究方向（每个方向拟支持 1-2 个项目），国拨总经费 10 亿元（其中，拟支持青年科学家项目不超过 10 个，国拨总经费不超过 5000 万元）。

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一体化设计。鼓励围绕一个重大科学问题或重要应用目标，从基础研究到应用研究全链条组织项目。鼓励依托国家重点实验室等重要科研基地组织项目。项目应整体申报，须覆盖相应指南方向的全部考核指标。

项目执行期一般为 5 年。一般项目下设课题数原则上不超过 4 个，每个项目所含单位数控制在 4 个以内。

青年科学家项目可参考重要支持方向组织项目申报，但不受研究内容和考核指标限制。

## 1. 关联电子体系

### 1.1 关联量子体系的新效应及调控

研究内容：强关联量子效应及其物理机理和外场调控，包括：铜氧化物及铁基高温超导，强自旋轨道耦合体系及表面等低维强关联体系中的量子衍生现象。

考核指标：建立基于重正化群思想的多体量子计算方法，发展能达到 5GPa 高压 9T 磁场的比热测量、能达到 16T 磁场的红外光学和 NMR 测量、及其它关联量子态的表征和多场调控技术，发现一类新的具有奇特量子效应的超导、强自旋轨道耦合或表面关联电子材料，揭示关联电子体系中多自由度竞争和量子相变的普适规律及其微观机理。

### 1.2 新型二维层状非常规超导体

研究内容：具有二维层状结构的新型非常规超导体及其反常物性和调控机理。

考核指标：设计和构筑具有二维层状结构单元和由不同二维层状结构单元复合构成的（不同于  $\text{CuO}_2$  和  $\text{FeAs/Se}$  结构单元）新型非常规超导材料体系，探索拓扑超导体；利用多种量子调控技术获得液氮温区的高温超导电性；揭示其电子结构、普遍存在的反常物性及其机理，以及在磁场、压力、载流子和维度等多参量调控下的物理相图及其量子相变。发展固体离子技术调控载流子方法，从而发现新型二维层状超导体家族。

### 1.3 重费米子体系

研究内容：重费米子体系中的衍生量子态及其调控。

考核指标：发现一类具有奇异量子性质的新型重费米子材料体系，揭示重费米子态的形成和演化规律以及重费米子超导的序参量及其配对机制；利用高压、磁场、维度等多种调控手段，揭示不同类型量子临界点的多样性和普适性，以及中心对称破缺、自旋轨道耦合对关联电子态的影响。

## 2. 小量子体系

### 2.1 拓扑磁性结构及其异质结的输运和器件

研究内容：拓扑磁性斯格明子的物理特性及调控，磁性分子、团簇对拓扑材料的物性调控。

考核指标：发现若干室温稳定的磁性斯格明子等拓扑磁结构；基于磁性分子和团簇构筑新型拓扑磁性异质结；建立拓扑磁性结构的表征技术；阐明强磁场条件下拓扑磁结构的自旋动力学和输运规律；构筑 3-5 种基于拓扑磁结构的低能耗存储与逻辑器件原型。

### 2.2 拓扑复合小量子体系中的自旋、电荷调控

研究内容：二维 InAs/GaSb 拓扑量子材料的生长，拓扑边态的螺旋 Luttinger 液体性质，以及基于拓扑材料的各种复合小量子体系的新奇量子自旋和电荷现象。

考核目标：制备高迁移率的 InAs/GaSb 拓扑量子材料；揭示拓扑边态的螺旋 Luttinger 液体的特性；构筑基于拓扑材料的各种复合小量子体系，揭示其电荷和自旋量子输运规律；构筑拓扑-超导耦合小体系，设计并构筑基于拓扑小体系的新型量子器件。

### 2.3 新型低维极性异质结构

研究内容：新型低维极性材料异质结构的制备、调控和新原理器件。

考核指标：制备高质量新型低维极性材料体系及其异质结构，建立局域的精确定位表征技术；揭示界面极化场和量子尺寸效应的竞争机制及其对量子态的影响，理论设计极性界面在主流半导体系统实现拓扑半金属相与拓扑绝缘体相。研究金属等离激元与半导体激子强耦合体系超快共振能量转移与宏观量子效应；建立涵盖经典到量子过渡区间的等离激元全量子理论模型，分别利用等离激元与激子的 Fano 效应和 Rabi 共振实现强耦合体系的荧光增强(30 倍左右)。利用等离激元的量子效应实现对光电流和光催化等纳米尺度能量转移的有效增强。制备基于新型低维极性材料及其异质结构的原型器件。

### 2.4 局域外场下的小量子体系

研究内容：纳腔等离激元的量子特征及表征方法，对小量子体系的电子态、自旋态和光子态的有效调控。

研究指标：建立系统描述局域等离激元量子特性的多尺度理论方法和相应的计算程序包；揭示局域等离激元场对单一或多个耦合的分子、电子、声子、自旋等小量子体系量子态的调控规律；建立基于局域场非线性电子散射新概念的超敏复合谱学实验平台；制备新型磷光和二维材料点缺陷单光子光源。

## 2.5 复杂氧化物的异质界面

研究内容: 基于复杂氧化物的高质量异质界面的设计和制备, 界面微观结构和动力学特性对电子态的影响, 以及宏观物性的调控机理。

考核指标: 实现几种复杂功能材料薄膜外延生长的精确控制, 获得原子级明锐的异质界面; 建立动量分辨的高精度电子与声子测量方法, 揭示界面原子尺度晶格结构和电子-声子耦合调控电子态的一般规律; 在高达 $1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 的范围调控界面电子浓度, 并进一步实现对二维电子体系自旋、轨道等有序态的控制。

## 3. 人工带隙体系

### 3.1 人工微结构中的量子、类量子效应及功能集成光子芯片

研究内容: 人工微结构中的新量子及类量子效应, 光子态的按需产生及调控, 以及功能集成的光子芯片的研制。

考核指标: 建立模块化、易集成、可扩展、低噪声的非经典光子态及多量子比特制备平台; 基于人工微纳结构实现光子的频率、位相、自旋和轨道角动量等的多维度调控; 揭示特征光子态、声子态与人工微结构相互作用导致的量子、类量子效应; 实现量子光隔离器、量子光开关、量子传感器、片上光子存储器等量子信息处理单元器件和类量子信息处理器件; 研制出有源光量子芯片(能集光子、纠缠光子产生、调制等 3 项或以上功能), 关键指标: 中心波长可调范围超过

200 nm, 单光子产率不低于  $107 \text{ Hz nm}^{-1}\text{mW}^{-1}$ , 偏振纠缠源的产率不低于  $105 \text{ Hz nm}^{-1}\text{mW}^{-1}$ , 偏振纠缠度大于 96%。

### 3.2 特殊空间结构光场和光量子态

研究内容: 特殊空间结构光场和光量子态的产生, 与微结构相互作用导致的新效应及其调控, 以及远超衍射极限的远场聚焦、光自旋-轨道耦合、非线性效应等。

考核指标: 建立具有拓扑和分形等结构的特殊空间结构光场和光量子态的制备与调控的原理和关键技术; 揭示特殊空间结构光场与物质和微纳结构相互作用的规律; 揭示新颖的传输动力学、远超衍射极限的远场聚焦、光自旋-轨道耦合、非线性和量子效应等及其基本物理规律; 实现突破远场衍射极限的远场聚焦乃至成像; 实现自由空间中, 大于 100 米的远程自聚焦乃至定位; 研制相关的原理器件。

## 4. 量子通信

### 4.1 天地一体化广域量子通信网络技术

研究内容: 系统性发展城域测量器件无关量子密钥分发组网技术、满足城际远距离量子中继需求的冷原子量子存储技术、基于卫星平台的全天时广域自由空间量子通信技术, 探索地面城域网络、城际量子中继和广域自由空间信道之间的互连互通, 初步具备构建天地一体化广域量子通信网络的能力。

考核指标: 实现多节点、百公里成码率大于 1kbps、最远光纤密钥分发距离可达 400 公里的测量器件无关量子密钥分发网络; 实现可确定性产生纠缠、可支持城际量子中继距

离大于 500 公里的冷原子量子存储器；研制全天时诱骗态量子通信星载光源和地面站平台，实现安全距离可穿透大气层等效厚度 (>20 公里水平大气) 的全天时自由空间量子通信。

#### 4.2 高性能单光子探测 (SPD) 技术

研究内容：针对远距离城际量子密钥分发和城域高速量子密钥分发等不同应用需求，发展具有自主知识产权的 InGaAs/InP 雪崩二极管、SNSPD、TES、参量上转换等高性能 SPD 器件及其相关技术。

考核指标：InGaAs/InP 雪崩二极管 SPD：1550nm 工作波长，探测效率 $\geq 20\%$ 、暗计数 $\leq 2000\text{cps}$ 、重复频率 $\geq 1\text{GHz}$ ；低暗计数高探测效率 SNSPD 器件：1550nm 工作波长，探测效率 $\geq 90\%$ 、暗计数 $\leq 100\text{cps}$ ；高速度高探测效率 SNSPD 器件：1550nm 工作波长，探测效率 $\geq 90\%$ 、重复频率 $\geq 300\text{MHz}$ ；光子数可分辨 TES 器件：探测效率 $\geq 90\%$ 、暗计数 $\leq 100\text{cps}$ 、光子数分辨能力 $\geq 10$  个；TES SQUID 读出电路：串联阵列放大器中 SQUID 数量 $\geq 10$ 、放大电路电流噪声水平优于  $10\text{pA/Hz}^{1/2}$ ；参量上转换单光子探测器：1550nm 工作波长，探测效率 $\geq 50\%$ 、暗计数 $\leq 1000\text{cps}$ 。

#### 4.3 固态量子存储器

研究内容：面向长程量子纠缠分发的需求，研制基于固态介质的单光子量子存储器。。

考核指标：优化稀土掺杂晶体等固态介质的样品设计、工作环境及控制方法，提升固态量子存储器的光子存储寿命到 5ms，且效率超过 20%；实现存储器在时间、频率及空间



三个自由度并行复用，且复用模式数超过 12 个；制备两个空间分离的固态量子存储器之间的纠缠态，完成基于固态量子存储的量子中继节点功能演示；研制面向量子加密 U 盘的超长寿命量子存储器，自旋态相干寿命超过 10 小时。

## 5. 量子计算与模拟

### 5.1 基于光晶格超冷量子气体的量子模拟

研究内容：在超冷原子、极性分子气体中利用光晶格技术实验研究多体强关联系统的奇异量子相和相变临界行为。

考核指标：在超冷碱金属气体中利用 Feshbach 共振调节相互作用，发展亚微米成像及操控技术，结合光晶格动态操控，实现奇异量子相并探测相变临界行为；在超冷碱土金属气体中发展相干精密调控技术（光谱相干时间 10~20 秒，空间分辨率 1~2 微米），制备具有高对称性的新型量子多体系统，并精确探测与调控其中的强关联效应；利用不同构型的光晶格发展探测光晶格量子磁性和拓扑参数（陈数、贝利曲率等）的技术，探测其中的量子相变和临界行为；制备双组分原子的 Feshbach 分子和基态极性分子气体，并利用光晶格操控其中长程偶极相互作用并探测其诱导的奇异量子行为。

### 5.2 具有量子纠错和存储功能的多超导量子比特集成系统

研究内容：设计制备网格状排布的超导量子比特芯片，实现量子纠错以及量子纠错保护的量子存储，进行量子编程，演示关键量子算法。

考核指标：设计制备并测试立体封装的超导量子芯片，实现量子比特网格格点间的近邻耦合，集成比特数目超过 $5 \times 5$ 个；能够对量子芯片的全面高相干性长时序测控，在完成连续50次以上随机的各种量子门运算后，量子信息的保真度高于80%；获得读取时间在100纳秒量级的高效单发量子非破坏性读出以及存储时间 $>200$ 微秒的量子存储；实现量子芯片的量子编程、量子纠错码，演示高度可扩展的关键量子算法。

### 5.3 金刚石自旋量子计算

研究内容：基于金刚石自旋的量子计算与量子模拟。

考核指标：在金刚石芯片上相干操控6-12个固体自旋量子比特，实现5-10个固体自旋比特的量子纠缠和量子并行算法；验证量子指数加速，实现对拓扑材料的量子模拟；将量子纠缠在常温固体中的相干存贮时间提高到10毫秒以上；实现金刚石芯片上自旋量子比特的集成加工工艺，制造可扩展的固体自旋量子比特阵列；实现金刚石芯片量子比特与光子之间、不同金刚石芯片之间的量子耦合，奠定规模化固体量子计算的基础。

## 6. 量子精密测量

### 6.1 高精度原子光钟

研究内容：基于囚禁离子和冷原子的高精度原子光钟、光钟比对及应用。

考核指标：解决影响光频测量灵敏度和系统误差的关键物理和技术问题，在实验室环境中实现2~3种稳定度或不

确定度进入  $10^{-18}$  量级的囚禁离子（如  $\text{Ca}^+$ 、 $\text{Al}^+$  等）和光晶格原子（如  $\text{Yb}$  等）光钟；发展高精度光频率传递与比对技术，实现同一实验室不同种光钟、不同实验室同种光钟和不同实验室中两种或两种以上光钟之间光频率比值的精确测量，频率比值测量精度不低于  $10^{-17}$  量级；发展可集成、小型化、可靠的光钟部件，实现一种精度和重复性不低于  $10^{-17}$  量级的可搬运光钟。

## 6.2 基于少体量子关联态的精密测量

研究内容：可控少体量子关联态的制备、表征及在突破标准量子极限精密测量中的应用。

考核指标：发展基于少体量子关联态的精密测量新方法和新技术，制备光子、原子、离子或声子等系统的少体（粒子数  $N \sim 10$ ）量子关联态，利用该量子态实现量子增强的精密测量，以突破被测物理量的标准量子极限（ $N^{-1/2}$ ）。