

《关于对“量子通信与量子计算机”国家科技重大专项公开竞争类项目 2024 年度申报指南征求意见的通知》附件

# “量子通信与量子计算机”国家科技重大 专项公开竞争类项目 2024 年度 项目申报指南

(征求意见稿)

为进一步提升我国量子科技领域的研究水平，依据“量子通信与量子计算机”国家科技重大专项实施方案，现提出本重大专项 2024 年度公开竞争类项目申报指南。

本重大专项将在量子通信、量子计算、量子精密测量、量子材料器件与设备四个领域部属公开竞争类项目，拟支持 14 个研究方向（每个方向原则上支持 1 个项目），实施周期一般为 5 年。同时拟在上述四个领域支持青年科学家项目不超过 10 项，研究内容不受指南方向限制，实施周期一般为 5 年。

## 1. 量子通信

### 1.1 基于连续变量纠缠光场的量子通信网络关键技术研究

研究内容：面向城域量子通信网络，研究适用于量子网络的抗噪通信协议、纠缠提纯和分布式量子信息处理的新方法；研究基于连续变量确定性多组份纠缠光场构建量子通信网络的关键技术，实现单方设备无关量子密钥分发、光纤信

道连续变量纠缠提纯、多用户量子隐形传态等量子通信任务；发展复用型量子纠缠源的新技术，实现多通道、高信道容量的连续变量量子通信；研发连续变量量子通信集成芯片和纠缠光源集成芯片。

考核指标：实现光纤传输距离 $\geq 5$  km、密钥率 $\geq 100$  kbit/s 的单方设备无关量子密钥分发，实现光纤信道损耗 $\geq 10$  dB 的纠缠提纯，实现速率 $\geq 100$  kHz、传输距离 $\geq 20$  km 的光纤信道连续变量量子隐形传态，实现量子节点数 $\geq 6$  的城域量子通信网络和用户数 $\geq 4$  的光纤信道量子通信；发展纠缠容量 $\geq 60$  的复用型连续变量量子纠缠源新技术，实现通道数 $\geq 20$  的连续变量量子通信系统；研发连续变量量子密钥分发集成芯片和压缩度 $\geq 3$  dB 的纠缠光源集成芯片。

1.2 测量器件无关量子密钥分发的集成化和网络化关键技术研究

研究内容：研制基于薄膜铌酸锂集成芯片的高速编码模块，研制多通道、高计数率单光子探测器模块，实现紧凑型与高鲁棒性的测量设备无关型量子密钥分发系统；研究面向多用户的网络中心节点芯片集成方案，发展网络路由和单光子探测等核心功能的综合集成技术；研制适用于多用户场景的多波段高速稳相技术，实现多用户、可重构的测量设备无关型量子密钥分发网络。

考核指标：研制紧凑型测量设备无关型量子密钥分发系统，250 公里光纤码率 1 kbps，其中编码芯片集成调制器数

目大于 6，芯片尺寸小于  $2\text{ cm}^2$ ，探测器单通道计数率大于 1 GHz；研制出可重构的网络中心节点光路集成的光量子芯片，芯片直接用户接入数 $\geq 6$ ，同时工作的线路对数 $\geq 2$ ；实现收发端小型化、开放式、多用户可重构的测量设备无关型量子密钥分发网络，发端光学部分与收端探测部分在标准机柜里的高度均小于 3 U，异地光源间无需服务光纤实现频率跟踪和相位锁定。实验室环境：网络中用户数 $\geq 4$ ，相位反馈速率 $\geq 1\text{ MHz}$ ；场地光纤环境：网络中用户数 $\geq 3$ ，相位反馈速率 $\geq 0.5\text{ MHz}$ ，持续运行时间大于 12 h。

### 1.3 量子通信技术在公里级星光干涉及天文观测中的应用研究

研究内容：将量子通信技术应用于星光干涉，突破传统天文干涉面临的探测噪声极限和基线长度限制，针对不同天文观测对象探索量子增强星光干涉新方法和相应的量子参数估计算法；融合自由空间和光纤信道，研究高精度实时稳相和条纹追踪的新技术，实现远距离星光干涉；基于干涉阵列设计，开发数据处理与分析软件，实现对几类特殊恒星的角直径测量和距离标定，开展太阳系快移动天体仿真和实验研究。

考核指标：实现基线长度不小于 1 公里星光干涉测量；接收光学口径 $\geq 0.6\text{ m}$ ；30 m 光程差补偿范围内分辨率优于 2 nm、跟踪精度优于 100 nm；测量恒星数量 $\geq 50$ ，恒星角直径测量精度优于 5%。

## 2. 量子计算

### 2.1 硅基核电共振的量子芯片制备和比特调控

研究内容：解决当前工艺无法放置 Sb 元素和离子注入位置不够精确的问题并制备硅基全电量子芯片。研究高保真度、高速率的电调控单比特门实现方案、电调控两比特门耦合方案。基于所制备的硅基全电量子芯片，所发展的电调控单比特门、两比特门以及自旋读取新技术，对若干重要量子基本问题和新型量子算法进行实验演示。

考核指标：硅基量子芯片制备方面，实现单原子级别的硅基核电共振等全电量子芯片制备，并构建大于 4 量子比特的全电硅基量子芯片。自旋相干时间方面，实现大于 100  $\mu$ s 的电子相干时间、大于 20 ms 的原子核相干时间；单比特门方面，实现电驱动速率大于 3 MHz 的电子比特量子门、电驱动速率大于 0.5 kHz 的原子核比特量子门，单比特门保真度大于 99.5%，自旋单发读取保真度大于 95%。两比特门方面，实现时长微秒级别、保真度大于 90% 的电驱动两比特门。原理性实验演示方面，至少实现 2 种重要量子基本问题或量子算法的原理性演示实验。

### 2.2 量子计算机的核心软件原理与方法

研究内容：研究超导量子芯片连接架构的量子态制备问题、组合优化问题的量子算法、量子算法线路综合优化与分布式量子算法，建立线路规模、比特数、通讯复杂度的权衡关系；研发量子软件开发工具平台和生态；研究对接量子硬

件的硬件描述语言和芯片设计软件，建立布局布线数学模型，设计布线、倒装焊柱布局等优化算法。

考核指标：针对超导芯片架构设计线路规模深度渐进最优的量子态制备线路；设计 2 种有多项式量级加速的量子组合优化搜索算法；设计有多项式加速、有效降低线路规模深度的分布式量子算法；设计支持并行与分布式程序设计的量子语言及编译系统，与 2 种不同路线国产量子硬件对接；开发可实用量子程序验证工具并证明 2 个算法或协议的正确性、安全性；研发 1 套超导量子芯片版图设计工具，支持 30 分钟万比特芯片全自动布局布线。

### 2.3 基于超冷偶极气体的长程相互作用物理问题研究

研究内容：通过激光冷却技术，实现分子的直接冷却和囚禁；发展高效分子蒸发冷却技术，制备接近玻色-爱因斯坦凝聚的超低温基态极性分子气体。制备低维极性分子和磁性原子样品，研究二维偶极玻色气体中的量子相变和动力学；在简并磁性原子中，研究偶极超固态量子相变和动力学。

考核指标：提高磁缔合制备的超冷分子数大于  $10^5$ ，获得温度低于 150 nK 的样品；制备数目超过  $10^5$  的磁性原子的玻色及费米量子简并气体；实现极性分子的磁光阱囚禁，获得温度为  $\mu\text{K}$  量级的冷分子样品。利用光晶格实现一维和二维偶极原子、分子气体样品，晶格填充系数大于 30%，样品寿命达到 10 s 量级；压缩磁性原子间的距离  $<100\text{ nm}$ ，获得  $>200\text{ Hz}$  的偶极相互作用。实现寿命  $>100\text{ ms}$  的超固体和量子液体

的低激发制备，并实现分辨率优于  $1\ \mu\text{m}$  的高分辨成像和束缚势阱调控。

### 3. 量子精密测量

#### 3.1 基于符合成像的分子极端超快精密测量

研究内容：发展低温冷分子动力学符合成像、纳米表面分子动力学成像、阿秒分子符合成像技术，实现孤立分子、团簇、纳米体系表面分子的极端超快动力学精密测量，开展时频多维精密控制的超快光场与极端条件下分子相互作用动力学研究，揭示分子内及分子之间量子态多体关联、限域空间分子光场响应、分子与超流液相环境相互作用的物理机制和调控机理。

考核指标：制备不同种类百 mK 量级冷分子与分子数可分辨的团簇体系，实现冷分子与超流液相环境相互作用动力学精密测量与调控；实现尺寸范围 50-300 nm 孤立纳米体系及表面分子动力学单帧成像高精度测量，调控精度优于 1 fs，采样及处理速率达到 1 kHz 以上，基于电子-离子符合测量甄别电子与离子来源；阿秒分子符合成像时间分辨优于 50 as，稳定度优于 40 as，电子能量分辨率优于 100 meV，实现电子离子三维动量  $4\pi$  空间立体角符合成像；发展适用于隧穿电离、越垒电离、分子解离以及分子间相互作用的时间反向演化理论与计算方法。

#### 3.2 基于片上集成量子压缩光源的精密测量

研究内容：发展基于铌酸锂波导和高折射率硅玻璃微腔

的非线性光学和量子光学技术，在片上产生单/双光子态、压缩态及 EPR 纠缠态等量子光源；构建片上量子纠缠干涉仪以实现量子操控；研究片上量子测量的过程；实现光源、操控和测量的全量子片上集成系统；以该全量子集成系统为基础，发展量子超精密测量及量子感应技术，实现超越经典极限的测量精度。

考核指标：设计并研制基于铌酸锂波导和高折射率硅玻璃微腔的参量放大器量子光学器件，达到 10 dB 以上的放大倍数；发展片上量子测量技术并实现对量子态的低损耗片上测量；研制片上量子光源如压缩态和 EPR 纠缠光源，噪声压缩或纠缠在铌酸锂波导片上测量达到-8 dB、在微环片上测量达到-5 dB；设计并研制片上非线性量子干涉仪，达到超越经典极限 6 dB 的测量精度。

### 3.3 多参数全局优化的量子增强精密测量

研究内容：发展多参数协同估值的量子精密测量新理论、新方法，探索其在矢量场探测、光学成像、多模式干涉仪等方面的应用；设计最优量子探测态、量子控制和量子集体测量，实现各参数均达到海森堡极限的多参数协同估值；发展基于固态多体自旋系统的多参数量子精密测量技术，实现矢量磁场三维分量的同时精密测量；发展达到量子极限的干涉成像方案，实现高对比度目标的超分辨成像；制备正交相位振幅可调控的多模压缩光场，实现突破标准量子极限的分布式多相位联合测量。

考核指标：实现基于固态多体自旋系统的矢量磁场精密测量方案，在-10 mT - 10 mT 的测量范围内，磁探测灵敏度优于  $100 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ ，三轴非正交度的误差小于  $\pm 0.05^\circ$ 。实现基于多参数量子精密测量的干涉成像系统，峰值信噪比相比传统干涉成像提高 50%以上，实现对亮度对比度不低于 100:1 的目标分辨能力突破衍射极限 3 倍以上。构建模式数不少于 6 的多模量子干涉仪，达到超越标准量子极限 70%的信噪比，并在相敏功率不高于 100 微瓦下同时测量 6 个位移信号的灵敏度谱密度达到  $2 \times 10^{-15} \text{ m/Hz}^{1/2}$ 。

#### 3.4 多物理场跨尺度极微弱目标量子探测技术

研究内容：针对跨尺度极微弱目标探测和成像的难题，开展基于量子技术的多物理场信息获取理论与方法研究，突破多维信息增益量子成像、极微弱信号超灵敏解译与感知、室温固态微波激射等关键技术，实现可见、红外至微波大跨度电磁波量子探测成像，提升在亚微米级显微成像至大场景远距离遥感的应用能力。

考核指标：实现光量子成像多维度信息增益，空间分辨增益  $\geq 4$ ，信息量增益  $\geq 8$ ，动态范围增益  $\geq 50$ ；实现场景特定区域的自适应光子调制与目标增强，调制不均匀度  $> 50$ ；建立低信噪比光子信号超灵敏解译方法，完成低信噪比目标感知技术验证实验，信噪比增益  $\geq 3$ ，检测概率  $\geq 90\%$  @ 信噪比  $< 1$ ，荧光强度  $\leq 0.02$  光子/激光脉冲；最小可探测微波信号功率  $\leq -100 \text{ dBm}$ ，室温下噪声温度  $\leq 30 \text{ K}$ ，增益  $> 10 \text{ dB}$ ，增益带宽  $>$



2 MHz, 测磁灵敏度达到  $1 \text{ pT/Hz}^{1/2}$ , 空间分辨率达到亚微米级别。围绕以上考核指标, 实现极暗、极弱、极小目标的超灵敏量子探测与识别, 解决电磁频谱对抗、深空探测、生物威胁应对等领域的战略亟需。

### 3.5 非定域性与量子临界增强的多参数量子精密测量

研究内容: 探索利用量子非定域性和量子临界性增强量子灵敏测量技术的新原理和新方法; 研究如何利用多组分纠缠和非定域的量子互文性提高量子精密测量的精度; 在杂化量子体系中将结合不同量子系统的优势, 探索量子多参数同时精密测量的有效新方案, 在理论和实验上研究能够同时放大信号和抑制噪声的量子非互易传感。

考核指标: 提出量子多体非定域性和临界增强的多参数及精密测量新机理和具体方案, 厘清何种非定域性及临界性能有效提高测量精度; 实现量子相变, 动力学相变和稳态相变中的终极量子极限; 结合量子互文性, 提出最优临界增强方案, 多参数测量精度达到海森堡极限同时压低噪声影响, 得到多参数测量精度之间的权衡关系不等式; 实现量子增强优势的协同分布式量子精密测量方案; 在杂化量子体系中给出量子非互易度与传感灵敏度之间的确定性关系, 在实验上实现噪声免疫的单向量子传感。

## 4. 量子材料器件与设备

### 4.1 面向量子信息应用的 $^{28}\text{Si}$ 同位素外延片制备及应用

研究内容: 基于国内级联离心机气氛分离提纯能力, 获

得高纯度  $^{28}\text{Si}$  同位素气源，生长高品质、高纯度  $^{28}\text{Si}$  同位素外延层，建立高纯度  $^{28}\text{Si}$  材料微纳结构（包括量子点、线、阱和超晶格等）的制备工艺平台。

考核指标：获得高纯度同位素  $^{28}\text{Si}$ （5 个 9）前驱气源，硅源气体达到电子级特气标准；在 4 英寸以上常规硅晶圆衬底上，生长制备 500 nm 以上的高纯度、高品质外延片，外延层中  $^{28}\text{Si}$  含量高于 99.99%，硼元素背景浓度低于  $5 \times 10^{14}/\text{cm}^3$ ；制备高纯度  $^{28}\text{Si}$  微纳结构，并展示长自旋相干量子态（相干寿命  $>10$  ms）。

#### 4.2 探索研发基于混合量子系统的量子计算元器件

研究内容：通过在包含 NV 色心自旋系综的金刚石表面制备超导量子电路元件以实现两者间的直接耦合；发展相应的混合量子系统操控与探测技术，探索 NV 色心自旋系综的色散读取方法；在不同架构的混合量子系统中演示不同子系统间的量子态传输和交换；探索基于 NV 色心自旋系综混合量子系统的微波单光子探测器的可行性。

考核指标：实现超导谐振腔与不少于 3 个超导量子比特、不少于 2 个金刚石 NV 色心自旋系综的混合量子系统；NV 色心自旋系综以及整个混合量子系统的弛豫时间提升至  $10 \mu\text{s}$  量级，实现自旋系综与超导量子电路的强耦合；实现 NV 色心自旋系综与超导量子比特间的量子态传输，传输保真度  $>70\%$ ；实现自旋系综的色散位移探测，探测保真度  $>70\%$ ；完成基于混合量子系统的微波波段单光子探测器的原理性

探索研究。

#### 4.3 超灵敏和超高空间分辨的扫描 SQUID 显微系统的研制

研究内容：发展扫描超导量子干涉仪 (SQUID) 显微技术，实现具有高空间分辨率、高磁场灵敏度、极低磁噪声的微型扫描 SQUID 探针的精密制造；开发适用于扫描 SQUID 显微系统的超灵敏反馈控制系统和高效的数据采集与处理程序，提升扫描 SQUID 显微系统的测量效率、准确性和可重复性；利用自主研制的扫描 SQUID 显微系统，研究超导量子电路、量子磁体和二维量子材料等前沿研究领域的基础物理。

考核指标：自主研制，系统扫描探针上 SQUID 线圈最小直径不大于 100 nm，SQUID 探针和样品之间的距离控制在  $50\pm 0.5$  nm；SQUID 探针的工作温度范围可覆盖从 300 mK 到 6 K，最大适用磁场为 1 T，待测样品的温度和磁场适用范围相同；SQUID 探针最大扫描范围可达  $20\times 20$   $\mu\text{m}^2$ ，磁场探测灵敏度优于  $10$  nT/Hz<sup>1/2</sup>，空间分辨率优于 100 nm (横向)；系统探测信号频率范围可覆盖从直流到千兆赫兹；基于该显微系统，可实现对超导量子芯片磁性杂质的空间分布表征、量子磁体中千兆赫兹自旋激发态的探测以及二维磁性材料中斯格明子的定量表征。