

基于光场量子态的量子信息研究

山西大学光电研究所在基于光场量子态的量子信息研究中,成功解决了一系列关键技术问题,研制出了通信距离可达 50 公里、密钥速率可达 0.005 比特 / 脉冲的集成化可自动运行的连续变量量子保密通信样机。

量

子信息科学是量子物理与信息科学交叉融合而迅速发展起来的一门新兴前沿学科。

由于它基于量子力学基本原理,可以完成经典物理无法实现的工作(例如:可能实现绝对的安全通信和超高速量子并行计算),各国政府和科技界均高度重视并广泛开展了这一前沿领域的研究与探索。量子光学是现代物理学中重要的基础学科之一,光和原子(分子)组成的量子系统在物理上相对易于控制。光是天然的飞行量子信息载体,用光传递信息,用原子存储信息,可以构成完美的量子网络。连续变量量子通信具有独特的技术优越性,利用量子光学的成熟技术可以高效率地完成量子信息的全过程,也能为量子通信提供大的频带宽度。在物理上连续变量纠缠态光场具有

“无条件性”的特点,即纠缠的产生与探测均是确定性的。目前,量子连续变量已经作为发展量子通信和信息处理的一种新颖工具,利用量子化光场正交位相振幅分量代替分离化的标准量子比特的概念,为量子信息注入了新的内容,展开了更为诱人的发展蓝图。

量子纠缠是量子信息的重要资源。量子纠缠态光场的产生、控制、传输和测量,在量子信息和量子计算的发展中扮演了十分重要的角色。虽然经过近三十年的努力,已经取得很好的进展,但对真实应用量子通信和量子计算这一目标来讲,还有许多重要的物理和技术上的问题有待解决。目前,我国量子信息科学领域关心的是,如何从实验上构建稳定、可扩展、易操控的量子信息处理物理系统,获取新的核心技术及

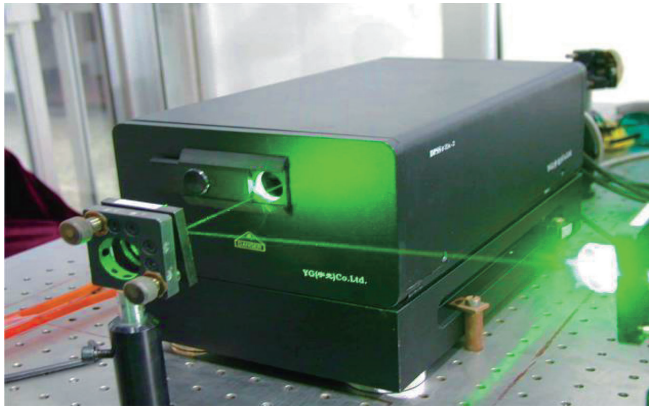
探索量子态光场和原子、分子相互作用可能产生的量子信息处理的新思想和新方法。

山

西大学光电研究所量子光学与光量子器件重点实验室的研究团队于 2010 年开展了

基于光场量子态的量子信息研究,目标是研制实用化纠缠态光源,并使该光源与光通信波段(1342 纳米、1550 纳米)和原子吸收波段(800 纳米)相匹配;提高连续变量纠缠态光场纠缠度;利用量子光学、原子物理实现光与原子量子界面(接口);建立具有两个节点的量子中继,开展量子通信网络的基础研究;同时,探索利用超导量子电子学进行连续变量量子信息处理的新方法。

具有实用价值的纠缠态光源的泵



540 纳米 / 1080 纳米双波长、输出功率 8 瓦 / 1.2 瓦激光器



连续变量量子纠缠源样机

浦源是高功率稳定连续单频激光器，泵浦源的优劣对纠缠光产生至关重要。为此，研究团队设计和研制了系列高功率全固态连续单频激光器。包括中心波长分别为 1342 纳米、1550 纳米，输出功率达瓦级的全固态连续单频激光器；高功率全固态连续单频 532 纳米绿光激光器，并利用该激光器泵浦掺钛蓝宝石晶体，获得输出功率达 1 瓦、波长可从 750 纳米调谐至 810 纳米的原子吸收波段低噪声连续单频钛宝石激光器。

采用上述连续单频激光光源作为泵浦光，通过光学参量振荡过程获得了连续变量光通信波段压缩真空态，实测 1.5 微米光通信波段非经典光场压缩度达 6.8 ± 0.2 分贝；实测 1.34 微米光通信波段非经典光场压缩度达 6.1 分贝。为将量子纠缠源实用化，研究团队在非经典光场产生技术积累的基础上，设计并研制出首台具有自主知识产权的小型连续变量量子纠缠源样机。该样机将纠缠光装置中的高功率频率稳定激光光源、光学参量放大器（OPA）和零拍探测系统集成于一体，可以连续稳定输出纠缠态光场，其正交振幅和及正交位相差量子关联度均低于散粒噪声 5 分贝。目前，该纠缠源样机已开始小批量生产，并已提供给南京大学使用。

研究团队还完成了波长分别位于

光通信波段和原子吸收线的双色连续变量纠缠态光场的制备，正交振幅和及正交位相差量子关联度均低于散粒噪声 3.3 分贝；研制完成了集成化可自动运行的连续变量量子密钥分发样机，在单模光纤中密钥传输距离达 50 公里，密钥速率达 0.005 比特 / 脉冲。完成了 C 波段全光纤台式关联光子对源样机的研制，光子对亮度可达每秒 106 对。利用微纳光纤在室温下产生波长为 800 纳米和 1310 纳米波段的双色高纯度光子对，符合计数与随机符合计数之比可达 530。

同时，团队进行了量子纠缠态光场纠缠度增强的研究。非简并光学参量是产生 EPR 纠缠态光场的有效装置，但由于受到晶体损耗和其它技术原因的限制，一般难于获得高纠缠度的纠缠态光场。为了提高连续变量纠缠态光场的纠缠度，人们提出了纠缠纯化的方案，但该方案需借助于比较复杂的单光子测量等非高斯操作实验系统，且纯化效果受探测器效率的限制，难以取得理想结果。团队研究人员在研究中发现通过降低实验系统噪声或采用级联 OPA 放大技术，可有效实现纠缠增强。采用上述方法，实验上将 EPR 纠缠态光场的纠缠度提高到了 8 分贝以上，达到目前国际上单腔产生的 EPR 纠缠态光场的最大纠缠度。

量子计算和量子信息网络是量子信息领域两个重要的研究内容。研究团队以光场的正交分量为量子信息处理的基本单元，开展了连续变量量子计算和量子信息网络的研究。利用连续变量 Cluster 纠缠态完成了双模量子逻辑操作；制备了迄今为止最大尺寸的空间分离的连续变量八组份 Cluster 纠缠态光场，为进行单向量子计算的研究提供了基础；在获得八组份纠缠态光场的基础上，在实验上实现了包含单模压缩门和可控位相门的连续变量量子逻辑门序列。这个工作为构建由逻辑门序列组成的真实量子计算机提供了理论依据和实验参考，向实现连续变量量子计算迈出了坚实的一步。实验制备了两个连续变量四组份束缚态光场，然后将束缚纠缠态分别发送到两个不同的站点，并对其拥有的模式进行联合测量和经典反馈，实现了连续变量束缚态光场的超激活。该实验研究成果可应用于建立复杂量子信息网络，同时，通过超激活能将无纠缠的量子态提纯出纠缠，完成量子网络中节点间的纠缠提纯。实验还制备出分别与原子存储及光纤通讯相对应的三色三组分纠缠态光场，为实现包括光纤长距离通信和量子存储器件的量子信息网络提供了必须的量子资源。通过弥补光学参量腔内非线性晶体对高阶横模的象

散，获得了同时具有自旋和轨道角动量纠缠的连续变量超纠缠态，该连续变量超纠缠态能被用于构建多通道量子信息网络，高效传递连续变量量子信息。

长寿命高保真度任意偏振光量子存储是实现远距离量子通信和执行量子计算的重要基础，但由于磁场起伏导致的退相干效应，致使自旋波存储寿命受到了限制。之前，国际上最长的单光子偏振量子比特存储寿命为 470 微秒，而实现远距离（千公里）的量子通信，要求获得毫秒量级的任意偏振光量子存储。研究团队通过在电磁感应透明介质中子存储的获得子存储的获得法施加一个中等强度的磁场（13G）并采用相位补偿的方法，完成了高保真度（98.6%）、长寿命（4.5 毫秒）单光子水平任意偏振光量子存储。该存储方案可应用于存储由参量下转换产生的偏振纠缠光子对，进而可以完成在多原子系综间建立

量子纠缠的任务，为实现量子信息网络提供了技术支撑。

在 解决系列关键技术问题的基础上，团队研制了集成化可自动运行的连续变量量子保密通信样机，通信距离可达 50 公里，密钥速率可达 0.005 比特/脉冲。这一量子通信技术成果未来有望应用于国防、军事、政务、金融等需要高度安全通信的领域，为国家通信安全提供一种有效解决方案。鉴于我们在该领域的工作积累和成果，华为技术有限公司中央研究院致函我们，希望就量子通信领域开展技术合作。

此外，研究团队还制备了品质因子达到国际先进水平的超导共面波导谐振器（最高品质因子达到 116 万）；搭建了极低温超导单光子探测实验系统，并实验研究了基于超导微波谐振器，超

导约瑟夫森结，和超导转移边缘传感技术的弱光乃至单光子的探测技术，实现了 0.1pW（纯水蒸气压）的频域弱光探测。

在基于光场量子态的量子信息研究中，山西大学光电研究所主要完成了实用化纠缠态光源的研制并实现了纠缠增强，实现了包含单模压缩门和可控位相门的连续变量量子逻辑门序列，制备了两个连续变量四组份束缚态光场并实现了其超激活，制备了分别与原子存储及光纤通讯相对应的三色三组分纠缠态光场，完成了长寿命高保真度任意偏振光量子存储。所有这些工作为下一步利用实用化的纠缠光源进行精密测量，实现混合型量子信息处理及多体原子系综的研究等打下了良好基础。

作者：王海

（王海教授，山西大学光电所量子光学与光量子器件重点实验室主任）