

基于吸收型量子存储器的多模式量子中继

刘肖^{1,2} 周宗权^{1,2,†} 李传锋^{1,2,††}

(1 中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

(2 中国科学技术大学 中国科学院量子信息与量子科技创新研究院 合肥 230026)

2021-06-25 收到

† email: zq_zhou@ustc.edu.cn

†† email: cfli@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210705

量子网络的基本资源是远程的量子纠缠态，它可以支持包括量子密钥分发、量子计算机互联、分布式量子精密测量等众多量子信息的应用^[1]。光子是量子信息传输的最佳载体，然而由于不可避免的信道损耗，目前基于光纤的纠缠分发距离被限制在百千米量级^[2]。在经典通信中，这个问题可以通过中继放大器对经典信号不断放大来解决。不幸的是，由于量子不可克隆定理的限制，即未知的量子态不能被精确复制，传统的中继放大器不适用于量子通信。远程量子纠缠分发也就成为了量子信息领域的核心挑战之一。

对于这一难题，一种可能的解决方案是量子中继^[3, 4]，它的基本思路是将一段长距离分为多段短距离的基本链路，先在基本链路的两个末端节点间建立纠缠，然后基于量子存储和纠缠交换技术把短程纠缠扩展为远程的纠缠。其中，量子存储器用于储存光子的纠缠态，作为不同链路内纠缠建立以及纠缠交换过程的同步装置，是量子中继能够实现纠缠分发加速的关键。基本链路内使用的信道包括光纤以及自由空间信道。光纤量子中继的整体结构和经典光纤通信类似，是最有望达成量子网络目标的技术路线。量子中继并不能消除光子损耗，但可以把通过光纤直接传输的指数损耗转变为可以容忍的多项式量级的损耗，这在远程通信中会展现显著的优势。而自由空间信道损耗低于光纤，我国已利用墨子号卫星实现了长达 1200 km 的远程纠缠分发^[5]，这一演示尚未引入量子存储器。已有理论研究表明，未来量子通信卫星可以结合量子存储器^[6]，来实现覆盖全球的高速量子通信。

量子中继包括基本链路的纠缠建立和后续纠缠交换过程。纠缠交换过程的成功概率是由量子

光学基本原理确定的，一般难以提升。为了实现高速的量子中继通信，基本链路纠缠建立的成功概率就变得至关重要。这一概率有两个主要的制约因素，一是量子纠缠源的发射概率，即一次纠缠光子发射，实际成功发射光子的概率。基于这一点，可以把量子光源划分为确定性量子光源和概率性量子光源。前者的发射概率原则上可达 1，后者在实际使用时为了避免多光子噪声，保证纠缠保真度，发射概率一般控制在 0.1 以下。二是信道传输损耗以及探测器件损耗，光子发射以后经历短程信道传输以及探测过程，会不可避免地引入损耗。第一个问题使用确定性光源即可解决，为了避免多光子发射事件，确定性光源一般要基于单量子系统实现，具体包括单原子、量子点、单个晶格缺陷等。解决第二个问题则需要引入与经典通信中类似的复用技术，即一次性存储多个光子，这要求基于原子系综的量子存储器。在基本链路的纠缠建立过程中，如果同时使用 N 个模式，则处于 N 个模式的光子只要有一个模式成功即可建立节点间的纠缠，可以大幅提高纠缠

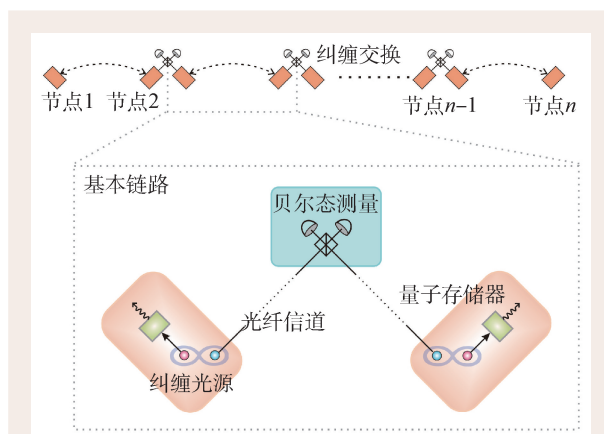


图1 基于吸收型量子存储器的量子中继基本链路示意图^[12]

建立的成功概率并提升最终的纠缠分发的速率。以上介绍的正是量子中继通信加速的两个核心技术手段，即确定性纠缠源以及多模式复用。

量子中继对量子光源和量子存储器性能以及探测器效率和信道稳定性等都有非常高的需求，是很复杂的系统工程，目前距实用化的目标仍有较远距离。现阶段实验研究主要还在探索如何搭建高效率的基本链路，即在两个节点量子存储器之间建立可预报的两体纠缠。目前国际上量子中继基本链路的演示已在多种物质系统中实现，包括冷原子气体系统^[7]和单量子系统，比如单个囚禁离子^[8]、单原子^[9]、单NV色心^[10]等。这些实验中所用到的量子存储器均为发射型。发射型存储器的纠缠光子是由存储器直接发射出来的，其纠缠光源与存储器一体，故结构简洁，但兼容性较差，难以同时满足确定性量子光源及多模式复用这两个量子中继中关键的通信加速技术。以冷原子气体系统为例，其发射过程是原子系统的自发拉曼散射过程，本质上是概率性光源。单量子系统则可以支持确定性光子发射，但是由于存储器为单个量子系统，无法存储多个光子实现多模式复用。

理论研究表明，基于吸收型量子存储器的量子中继可以解决上述问题^[4]，其示意图如图1所示。其中量子光源与量子存储器相是独立的，一

方面量子光源可以采用单量子系统实现确定性纠缠发射，比如基于量子点产生的确定性偏振纠缠源，其目前性能已达到较好水平^[11]；另一方面，存储器可以采用原子系统，可以实现多模式复用。这一架构是目前理论上传输速率最快的量子中继方案，但是引入了异质光源与量子存储系统之间的对接难题，因此至今没有实验演示。在最近的工作中，我们成功使用吸收型量子存储器建立了量子中继的基本链路，并首次演示了多模式量子中继^[12]，实验装置如图2所示。一个基本链路由两个分离的量子节点(节点A和节点B)以及中间站点贝尔态测量装置构成。每个量子节点包含一个“三明治”结构的固态量子存储器，以及在周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体波导中基于参量下转换过程获得的偏振纠缠光源。“三明治”结构包括一前一后两块一样的稀土掺杂晶体($\text{Nd}^{3+}:\text{YVO}_4$)，中间夹着一块 45° 的半波片。单光子的水平偏振成分被存储在第二块晶体内，而垂直偏振成分被存储在第二块晶体内。这一结构紧凑而稳定，可以解决各向异性吸收的晶体中偏振量子比特存储的难题，实现偏振比特的高保真度存储^[13]。为了匹配量子存储器的存储带宽(1 GHz)，纠缠光源的带宽被干涉滤光片和标准具等滤波器件压窄到1 GHz，亮度达到了每秒约6000个光子对。

在量子中继基本链路的演示实验中，每对对

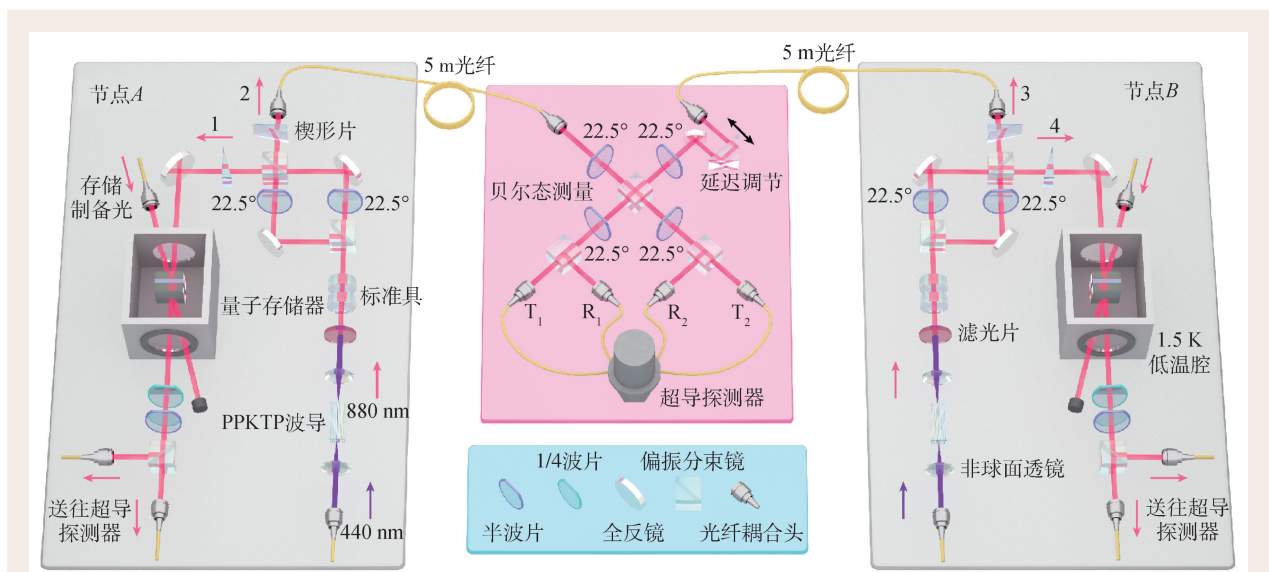


图2 多模式量子中继实验装置图^[12]

缠光子中的一个光子被存入量子存储器中，另一个光子通过 5 m 光纤传输至中间站点进行贝尔态测量。中间站点一次成功的探测事件，则预报相距 3.5 m 的两个量子存储器被纠缠起来。最后我们将两个存储器中存储的光子读取出来进行纠缠目击和保真度测试，实验结果如图 3 所示。测得的纠缠目击以 14 个标准差违背可分态的预期值，证明了两个存储器处于真正的两体纠缠态上，纠缠保真度实测达到了 $(80.4 \pm 2.2)\%$ 。当前存储器可支持的最大时间模式数为 56，受限于脉冲激光器的重复频率，实验上我们实现了 4 个时间模式的复用，使得纠缠分发的速率提升了 4 倍。

该研究成果 6 月 2 日以封面故事文章的形式发表在 *Nature* 上。这一工作证明了基于吸收型量子存储建立量子中继的可行性，并直接展示了多模式量子中继的通信加速效果。当前量子中继及量子网络的研究仍处于多种物理系统及技术路线争鸣的阶段，尚未有某一种物理系统呈现出绝对优势。接下来一个里程碑工作是证明其相比光纤直接传输量子态的优越性，即在同等的量子通信距离下，展现出更高的量子通信速率，这是一个十分艰巨的任务。本工作的一个重要意义在于，指明了基于吸收型量子存储构建多模式量子中继这样一个潜力巨大的技术路线。目前该实验中使用的外置量子光源仍然是基于参量过程的概率性光源，使得实验中有效的四体符合计数率仅每小时 1.1 个，同时存储器的存储效率和存储时间还

参考文献

- [1] Popkin G. *Science*, 2021, 372: 1026
- [2] Wengerowsky S, Joshi S K, Steinlechner F *et al.* *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2019, 116: 6684
- [3] Briegel H J, Dür W, Cirac J I *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 5932
- [4] Sangouard N, Simon C, De Riedmatten H *et al.* *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 33
- [5] Yin J, Cao Y, Li Y H *et al.* *Science*, 2017, 356: 1140
- [6] Gündoğan M, Sidhu J S, Henderson V *et al.* 2020, arXiv: 2006.10636
- [7] Yu Y, Ma F, Luo X Y *et al.* *Nature*, 2020, 578: 240
- [8] Mochring D L, Maunz P, Olmschenk S *et al.* *Nature*,

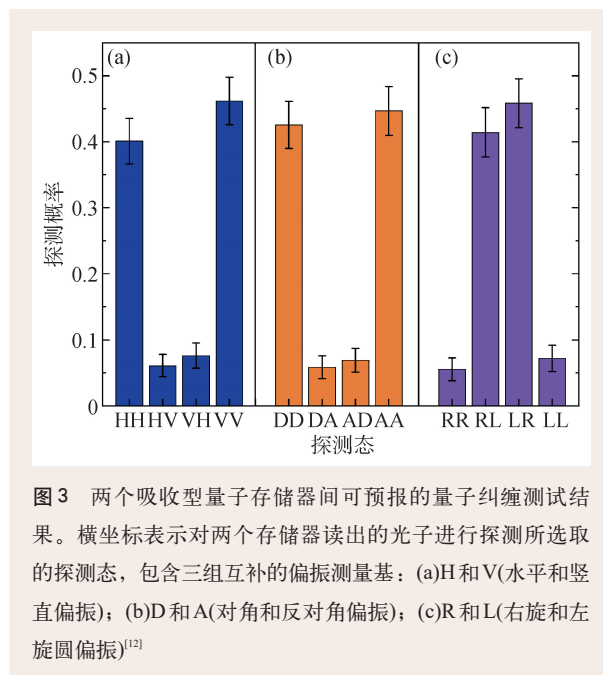


图 3 两个吸收型量子存储器间可预报的量子纠缠测试结果。横坐标表示对两个存储器读出的光子进行探测所选取的探测态，包含三组互补的偏振测量基：(a)H和V(水平和垂直偏振)；(b)D和A(对角和反对角偏振)；(c)R和L(右旋和左旋圆偏振)^[12]

有很大的提升空间。围绕基于吸收型量子存储建立量子中继的目标，本研究组与中国科学院半导体研究所团队合作，于 2015 年实现了量子点发射的单光子在“三明治”固态量子存储器中的多模式存储，时间域复用存储的光子数达到 100 个^[14]，证明了结合确定性单光子源和多模式存储的原理可行性。下一步，我们将采用确定性纠缠光源并提升存储器的综合技术指标，以期大幅提高纠缠分发的速率以及基本链路的长度，努力实现超越光纤直接传输性能的实用化量子中继器。

2007, 449: 68

- [9] Hofmann J, Krug M, Ortengel N *et al.* *Science*, 2012, 337: 72
- [10] Hensen B, Bernien H, Dréau A E *et al.* *Nature*, 2015, 526: 682
- [11] Schimpf C, Reindl M, Basso Basset F *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118: 100502
- [12] Liu X, Hu J, Li Z F *et al.* *Nature*, 2021, 594: 41
- [13] Zhou Z Q, Lin W B, Yang M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 190505
- [14] Tang J S, Zhou Z Q, Wang Y T *et al.* *Nat. Commun.*, 2015, 6: 1