

面向远程量子通信的量子中继与量子 U 盘

周宗权^{1,2}, 李传锋^{1,2*}

1. 中国科学技术大学中科院量子信息重点实验室, 安徽合肥 230026;

2. 中国科学技术大学中科院量子信息与量子科技创新研究院, 安徽合肥 230026

* 通讯作者. E-mail: cqli@ustc.edu.cn

摘要: 量子不可克隆定律赋予了量子通信基于物理学原理的安全性, 其代价是长程传输的光子损耗不能使用传统的中继放大器来克服. 量子中继及量子 U 盘是实现远程量子通信的两条可行的技术路线, 近期本团队在这两条路线上都取得了显著进展: 首次基于吸收型存储器建立多模式量子中继, 并将相干光存储时间提升至 1 h. 本文介绍了量子通信、量子中继及量子 U 盘的基本原理, 在此基础上介绍近期本团队取得的相关成果.

关键词: 量子存储; 量子网络; 量子中继; 量子 U 盘

中图分类号: O431.2; O513 **文献标识码:** A

1 引言

从烽火狼烟、飞鸽传书到手机和互联网, 远距离通信已经成为我们生活中必不可少的一部分, 为我们的生产和生活提供了极大的便利. 每个人都有自己的秘密, 私密的沟通是人类对通信的基本需求之一. 尤其是在国防、外交、金融等敏感领域, 安全的加密通信是其根本需求. 如何实现加密的信息传输一直是通信领域的核心问题.

经典的加密手段大多都是依赖计算复杂度, 即用某一类目前难以快速求解的数学难题. 比如我们可以快速地计算 $337 \times 757 = ?$ 而如果问题变为 255109 分解为两个质因数, 这个问题的求解就会变难很多. 理论上说, 如果出现更高效的算法, 比如近年来研究非常火热的量子计算, 就可能破解这种加密方法. 值得庆幸的是, 量子信息科学不仅提供了可以攻破传统密码的“矛”—量子计算, 同时也提供了可用于加密通信的“盾”—量子通信.

量子信息利用量子力学的态叠加原理来编码信息, 即信息可以编码在 0 和 1 的量子叠加态上. 量子态的线性叠加特性可以导出一个重要的定理, 即未知量子态不能被精确复制^[1]. 这就是著名的量子不可克隆定理, 它使得量子信息与经典信息具有截然不同的特性.

量子通信最成熟的一个应用是量子密钥分发, 其目标是在通信双方之间共享一个由经典数据构成的密码本. 以常用的 BB84 协议为例, Alice 向 Bob 发送量子态, 并经过特定的测量和核对过程来建立密码本. 在量子态传输过程中如果被窃听, 那么量子态就会被改变, 双方会发现这个错误及窃听行为. 于是量子物理的基本原理确保了密码本的安全性, 从而进一步保证了加密信息的安全性. 与传统加密的显著区别在于, 这里安全性的保证来自量子物理的基本原理, 即便是将来诞生的实用化的量子计算机也无法攻破这种加密方法.

量子通信更高级的应用是建立量子网络, 其目标不再是传输一组经典数据, 而是直接实现量子叠加态和量子纠缠态的传送. 量子网络中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以及量子非局域性检测等所有已知的量子信息处理任务.

真空光速 (c) 高达 $3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 并且光的传输带宽大、损耗低、抗干扰能力强, 这些优良特性使得光成为经典通信和量子通信所共用的载体. 区别在于, 经典通信使用强激光脉冲编码 0 和 1 的比特信息, 而量子通信一般使用单个光子来编码量子叠加态.

尽管通信光纤的传输损耗因子低至 $0.2 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, 这个随着距离指数级增长的损耗在长程传输下

Citation: 周宗权, 李传锋. 面向远程量子通信的量子中继与量子 U 盘. 中国科学技术大学学报, 2021, 51(9): 647-653.

Zhou Zongquan, Li Chuanfeng. Towards long-distance quantum communication: Quantum repeaters and transportable quantum memories. J. Univ. Sci. Tech. China, 2021, 51(9): 647-653.

仍然是不可接受的,它使得目前地面光纤量子通信的距离被限制在 500 km 以内.假设每秒发射一百亿个光子的高重复率光子源,在传输 500 km 后的速率就会降至 1 个/秒,而 1000 km 后只剩下 10^{-10} 个/秒,也就是说大概平均需要 300 年的时间才能接收一个光子.在经典通信中,这个问题可以通过中继放大器来解决,即每隔 80 km 左右放置一个信号放大器对衰减后的信号放大后继续传输.但是,中继放大器不适用于量子通信.这是由于量子不可克隆定理的限制,它保证了量子通信的安全性,代价是量子信号不可放大.

为了解决这一难题,学术界现有两条主要的技术路线.

一条路线是量子中继 (quantum repeater),它的基本思路是把长程的纠缠分发任务分解为多段短程的纠缠分发,然后基于量子存储和纠缠交换技术把短程纠缠扩展为长程纠缠^[2].其使用的信道包括光纤信道以及自由空间信道.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.现在许多国家都在支持量子中继及量子网络方向的重大项目.在卫星的帮助下,自由空间量子通信只会引入大气层垂直方向的传输损耗,这在长程传输下显著低于光纤损耗.中国科学技术大学潘建伟团队基于墨子号卫星已实现 1200 km 的纠缠分发,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进一步结合量子存储器,实现覆盖全球的高速量子通信.

另一条路线是可搬运的长寿命量子存储器^[3],即量子 U 盘 (transportable quantum memory).这个方案非常容易理解,与我们使用传统 U 盘的方式基本一致.我们可以把量子信息写入量子 U 盘中,然后使用汽车、高铁、飞机或卫星等运输量子 U 盘,即可传输量子信息到远处.量子 U 盘可以看作一种类似光纤的新型信道,延长其存储时间等价于进一步降低光纤的损耗因子.目前光纤的损耗因子已经逼近其理论极限,而量子 U 盘的存储寿命仍有极大的提升空间 (理论极限在 1 个月左右).量子 U 盘通信的独特优势在于灵活性,它摆脱了光纤网络或卫星地面站点的限制,其覆盖范围包括任何经典交通工具可以到达的地方.

要实现远程量子通信,无论走怎样的技术路线,量子存储器都是必需的核心器件.近期,本团队基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储器,在上述两条路

线上都取得了显著的进展,以下分别详细介绍.

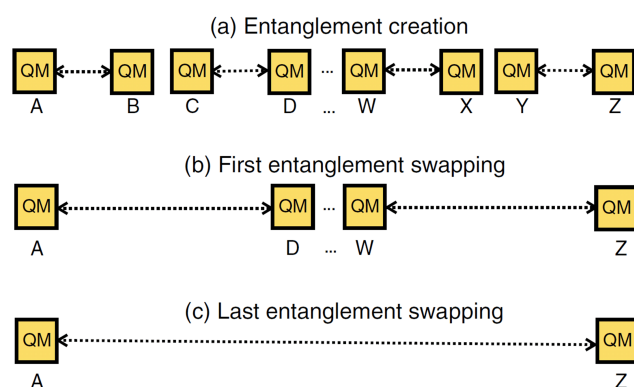


图 1 量子中继的基本原理^[2],主要分为基本链路内的纠缠建立过程 (entanglement creation) 和各级次的纠缠交换过程 (entanglement swapping),两个过程都需要量子存储器 (quantum memory, QM) 来进行同步.

Figure 1. The basic structure of a quantum repeater^[2] which includes the entanglement creation process and the entanglement swapping process.

2 量子中继:基于吸收型存储的多模式量子中继

量子中继是 1998 年由 Briegel 等提出的^[4],它用到的一个关键技术是纠缠交换.纠缠交换是量子纠缠众多违背直觉的性质之一:如果 AB 是纠缠的,CD 也是纠缠的,对 BC 执行贝尔态投影测量,一次成功的投影测量就“预报”了 AD 之间纠缠态的建立,尽管 AD 没有发生过直接的相互作用.

我们以图 1 为例解释量子中继的基本结构与实现过程.这里的目标是在远距离节点 A 和节点 Z 之间建立纠缠.首先将此距离分成若干短距离的基本链路,分别为 A 到 B, C 到 D, …… , W 到 X, Y 到 Z.首先在基本链路内建立两端的量子存储器之间的可预报纠缠,比如 AB 纠缠, CD 纠缠, …… , WX 纠缠, YZ 纠缠.在相邻的基本链路都成功建立了自身纠缠的条件下,接着在相邻链路之间执行纠缠交换,比如 BC 之间执行投影测量使得 AD 纠缠, …… , XY 之间执行投影测量使得 WZ 纠缠.依此类推,不断进行纠缠交换最终可实现 A 和 Z 之间的远程纠缠目标.量子存储器用于储存光子的纠缠态,是纠缠交换操作所必须的同步装置,它是量子中继能够实现纠缠分发加速的关键所在.

1998 年至今,围绕加速量子通信的目标,人们提出了大量的量子中继理论方案.量子中继包括基本链

路的纠缠建立过程和后续纠缠交换过程. 其中, 纠缠交换的成功概率由量子光学原理所决定, 一般难以改变. 为了加速量子中继的纠缠分发速率, 其主要任务就是提升基本链路纠缠建立的成功概率. 这一成功概率主要受到以下两点影响: ①量子纠缠源的发射概率, 就是当我们要求一次纠缠光子发射, 实际成功发射光子的概率有多大. 基于这一点, 我们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. 前者的发射概率为 100%, 后者为了避免多光子噪声, 其发射概率一般远低于 10%; ②基本链路的信道传输损耗以及探测器件损耗, 这些是实际应用中不可避免的损耗.

针对第一点, 应采用确定性纠缠光源. 为了从根本上避免多光子发射事件, 确定性光源一般要基于单个“原子”实现, 包括单原子、单离子、单个晶格缺陷、单个人造原子等. 针对第二点, 需要引入与经典通信中类似的复用技术来克服损耗. 基本链路的纠缠建立过程中, 如果一次尝试只发射 1 个纠缠光子, 我们假设信道和器件损耗是 99%, 则只有 1% 的概率可以成功传输并建立纠缠, 这个纠缠建立的概率过低. 如果一次尝试中我们发射 100 个时间上依次排开的纠缠光子, 并在本地储存 100 个对应的纠缠光子. 则经历同等传输和探测过程, 这 100 个纠缠光子中, 按照概率估计会丢失掉 99 个, 预期 1 个光子能成功到达. 根据到达光子的具体时间位置, 我们可以确定地从存储器中读取对应时间位置的纠缠光子出来. 这样就以逼近 100% 的概率, 成功建立起纠缠, 这个概率就令人满意了. 以上介绍的正是加速量子中继通信的两个主要手段, 即确定性纠缠源以及多模式复用. 如果把量子中继比作一个桥梁, 单模式量子中继就类似一个只有单车道的桥梁, 多模式量子中继则可以理解为一个具有多车道的桥梁.

在大量理论工作进展的同时, 实验上研制量子中继的进程也在不断推进中. 量子中继是个相对复杂的系统工程, 它对量子光源、量子存储、探测器和信道稳定性等都具有比较苛刻的技术需求, 目前距离实用化目标仍有较远距离. 当前实验研究主要聚焦于如何搭建高效率的基本链路, 即在两个分离的量子存储器之间建立可预报的两体纠缠.

基于冷原子系综和单“原子”系统(比如单原子, 单 NV 色心、单个囚禁离子), 国际上已有多个团队实现了量子中继的基本链路. 这些实验都是利用发射型的量子存储器. 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是同一个物理

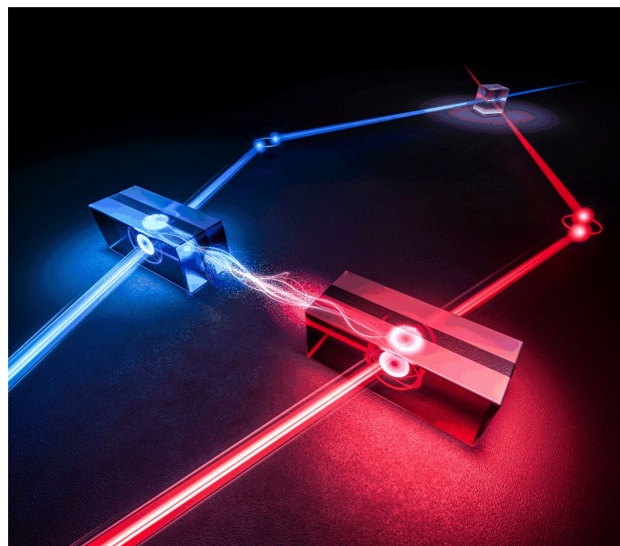


图2 基于三明治结构的吸收型量子存储器构建量子中继基本链路的示意图.

Figure 2. Constructing a quantum repeater segment based on sandwich-like absorptive quantum memories.

系统, 具有结构简单的优势, 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关键的通信加速技术. 以冷原子系综为例, 其发射过程是大量原子的自发拉曼散射过程, 本质上是概率性光源. 实际使用时为了避免多光子噪声, 发射概率一般控制在 1% 以下. 单“原子”系统原则上支持确定性光子发射, 但是由于存储器为单个原子, 不能一次性存储多个光子实现多模式复用.

已有理论研究表明, 基于吸收型量子存储器建立量子中继可以解决上述问题^[2]. 在这种中继架构中, 量子光源是与量子存储器是独立的, 一方面量子光源可以采用单“原子”系统实现确定性的纠缠光子发射, 另一方面, 存储器可以采用原子系统, 实现多模式复用的存储. 这一架构有效结合了这两种关键的通信加速手段, 是目前理论上传输速率最快的量子中继方案, 但它引入了异质光源与量子存储系统之间的对接难题, 至今没有实验演示.

本研究组从 2010 年起开始基于稀土掺杂晶体研制吸收型量子存储器. 2012 年设计并实现了独特的“三明治”结构的固态量子存储器, 解决了偏振量子比特存储的难题. 这一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, 而竖直偏振成分被存储在第二块晶体内. 这一结构紧凑而稳定, 存储保真度高达 99.9%. 这一工作为量子中继提供了可靠的量子存储器^[5]. 围绕基于吸

收型量子存储建立量子中继的目标,我们与中科院半导体所团队合作,于 2015 年实现了量子点(一种人造原子)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.这一工作证明了结合确定性量子光源和多模式存储的原理可行性^[6].

在以上系列工作的基础上,本研究组近期成功基于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(图 2).一个基本链路由两个分离的量子节点以及中间站点测量装置构成.每个量子节点包含一个“三明治”结构的固态量子存储器,以及基于参量下转换过程获得的一对纠缠光子源.实验中,每个纠缠光子对中的一个光子被量子存储器捕获并存储,另一个光子通过光纤传输至中间站点进行测量.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.量子中继基本链路的演示实验中实现了 4 个时间模式的复用,使得纠缠分发的速率提升了 4 倍,实测的纠缠保真度达到了 80.4%.该成果以封面故事文章的形式发表在国际期刊《自然》上^[7].

与量子计算机的研究现状类似,当前量子中继及量子网络的研究正处于多种技术路线及物理系统争鸣的阶段,并没有一个物理系统呈现出绝对的领先优势.该研究成果的一个重要意义在于证明基于吸收型量子存储建立量子中继这一路线的技术可行性,并直接展示多模式量子中继的加速效果.需要指出的是,目前该实验使用的外置量子光源仍然是基于自发参量下转换过程的概率性光源,这使得实验中最终的纠缠计数率仅 1.1 个/小时.接下来的研究目标一方面是采用确定性纠缠光源,另一方面是继续提升存储器的综合性能,从而大幅度提高纠缠分发的速率并拓展基本链路的距离,最终努力实现超越光纤直接传输性能的实用化量子中继.

3 量子 U 盘:相干光存储时间提升至 1 h

量子 U 盘作为一种新型信道,它为量子信息的远程传输提供了全新的解决方案(图 3).使用卡车运输 U 盘,来替代光纤实现信息传输,这个方案看起来很新奇.实际上,这并不是量子信息领域所独有的,类似的想法在经典通信已经应用了.经典通信中,光纤是无疑的最佳信道,正是光纤的发明,使得我们现在能够随时随地高速上网.然而,伴随着人们对更大数据量的需求,光纤的传输速率在一些特殊场合仍然不够.美国亚马逊公司考虑了大客户的大量数据如何迁

移的问题.假设有 1 EB(一百万 TB)的数据需要转移,如果使用标准光纤来传输,预期的耗时是 26 a.亚马逊公司提出一种意外的方案:利用卡车来运输硬盘.所需要的时间将降为 6 mth.从这个例子里我们看到,当经典数据量很大时,受限于光纤传输的带宽限制,“骑马送信”会超过看起来更优雅的光纤传输方案.

量子信息的远程传输所遇到的问题不是数据量过大,而是信道的损耗过大.使用量子 U 盘“骑马送信”,在特定条件下也会超越光纤传输的效率.考虑现实的长程传输需求,量子 U 盘的存储时间一般要在小时量级乃至几天的水平.但是量子态非常脆弱,大多数光量子存储器的量子相干时间都是秒量级以下,长寿命的光存储是个长久以来的难题.

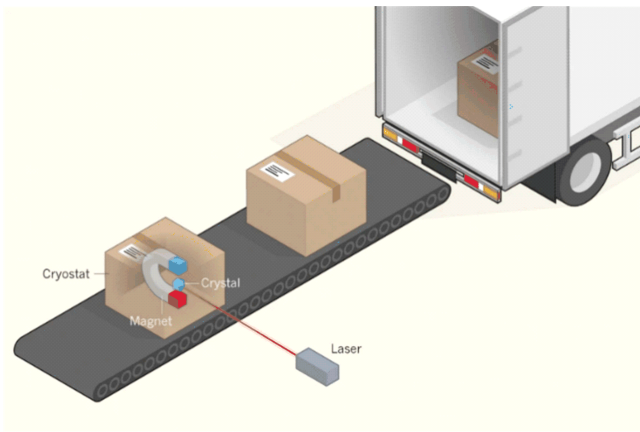


图 3 量子 U 盘的应用示意图^[8]

Figure 3. The concept of a transportable quantum memory^[8].

存储光场的第一步是让光速慢下来,即慢光.假设一个持续时间 $t = 1 \mu\text{s}$ 的脉冲,其在真空中的脉冲空间宽度 $L = ct = 300 \text{ m}$,这显然远远超过了存储介质的尺寸.所以必须让光速慢下来,我们才能把光脉冲装入一个合理尺寸的存储器及交通工具中.光在介质中传播的群速度 $v_g = c/n_{\text{eff}}$,其中 n_{eff} 是介质的等效折射率.在人工调控的强色散介质内,这个等效折射率可以远大于 1,从而极大地降低光速.早在 1999 年,美国哈佛大学团队利用冷原子系综的电磁感应致透明效应,把介质的折射率调高至一百万的量级,从而把介质内的光速降至 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.这一工作发表在国际期刊《自然》上,当期的封面是一个自行车骑手在和光在介质中赛跑.

存储光场的第二步是让光速停下来,即停光.即便光速变慢了,一个存储介质的尺度一般只有毫米量级,光还是会很快跑出来的,所以我们必须让光速降

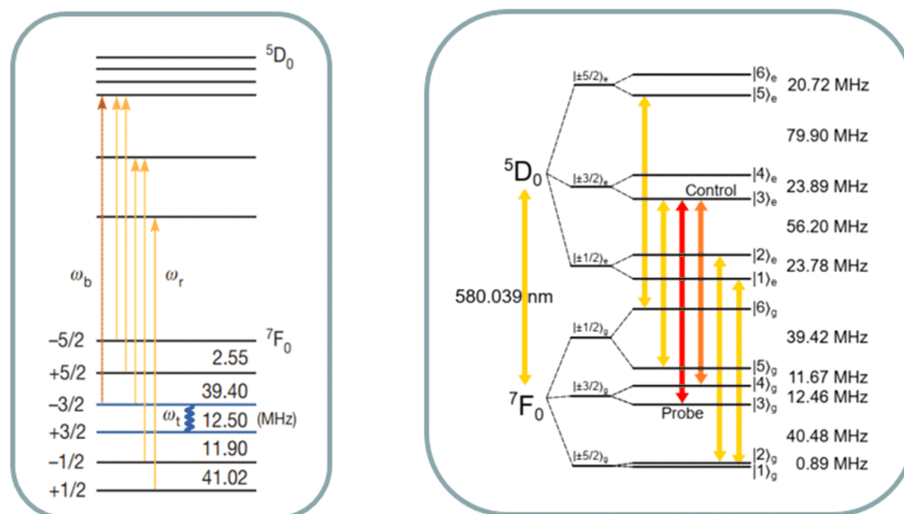


图 4 ZEFOZ 磁场下硅酸钇中铕离子能级结构, (a) 为澳大利亚国立大学给出的能级结构^[3], (b) 为本研究组测定的结果^[10].
Figure 4. Energy level structure of Eu:YSO at a ZEFOZ field. (a) is provided by a group from Australian National University^[3] and (b) is provided by our group^[10].

为零来实现长时间的光存储. 2013 年德国达姆施塔特大学团队利用掺镨硅酸钇晶体基于电磁感应致透明效应把光激发存储到了自旋能态中, 使得光停留了 1 min, 创下该领域的世界纪录, 然而这一光存储时间仍远低于量子 U 盘的寿命需求. 并且该存储时间已经达到这种材料的量子相干寿命的理论极限, 无法进一步提升.

2015 年, 澳大利亚国立大学的 Sellars 研究组在掺铕的硅酸钇晶体 ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$) 观测到了铕离子长达 6 h 的核自旋量子相干时间^[3], 这是目前物质体系中最长的量子相干时间, 让人们看到了长寿命光存储的希望. 该实验使用了两个重要的技术来保护铕离子的自旋相干性. 一是零一阶塞曼效应 (ZEFOZ) 磁场, 在这个大小约 1.3 T 的特殊磁场下, 铕离子对外部的磁场干扰很不敏感, 因此相干时间得以大幅提升, 这个磁场也被称作魔幻磁场. 二是动力学解耦技术 (DD). 即使在魔幻磁场下, 铕离子周围的环境仍在缓慢地变换着, 如果我们能让铕离子的自旋态高速翻转, 那么就可以把环境效应不断地正负相抵给平均掉, 这样 DD 就进一步提升了相干时间. 尽管这一工作证明了长寿命光存储的原理可行性, 铕离子在 ZEFOZ 磁场下的完整能级结构是复杂且未知的, 所以至今仍没有基于这种材料实现长寿命的光存储.

为了解决这一问题, 本研究组从 2015 年开始自制光学拉曼外差探测核磁共振谱仪, 专门用于稀土离子掺杂晶体的能级结构分析. 依托该仪器, 在 0.1 T

的弱磁场下, 研究组利用连续波的拉曼外差探测的核磁共振技术, 精确刻画了掺铕硅酸钇晶体光学跃迁的完整哈密顿量, 从而首先在理论上预测了 1.3 T 的 ZEFOZ 磁场下的能级结构^[9].

在该理论预言的基础上, 研究组进一步发展了脉冲波的拉曼外差探测核磁共振技术, 首次实验测定掺铕硅酸钇晶体在 ZEFOZ 磁场下的完整能级结构 (图 4). 在此基础上, 研究组结合了原子频率梳 (AFC) 光量子存储方案以及 ZEFOZ 磁场和 DD 技术, 成功实现了光信号的长寿命存储 (图 5). 实验中光信号首先被 AFC 吸收成为铕离子系综的光学激发, 接着被转移为自旋激发, 经历一系列自旋保护脉冲操作后, 最终被读取为光信号, 总存储时间长达 1 h. 为了展现该装置用于量子存储的潜力, 研究组把输入信号设置为类似 time-bin 量子比特编码的两个相位相干的相邻脉冲, 经历了 1 h 存储后, 测定读出 time-bin 存储的保真度高达 $96.4 \pm 2.5\%$. 这些结果表明该装置具有可靠的相干光存储能力以及用于量子态存储的潜力.

该工作将光存储时间从分钟量级推进至小时量级, 满足了量子 U 盘对光存储寿命指标的基本需求, 相关结果发表在国际期刊《自然-通讯》上^[10].

由于实验中的一些技术限制, 当前装置经历 1 h 存储后的存储效率仅有 5×10^{-5} , 尽管这个数值很小了, 我们可以拿它与光纤的传输效率做个原理性的对比. 假设使用 $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的高铁运输该光存储器, 则 1 h 后, 运送距离达 300 km 且传输效率为 5×10^{-5} .

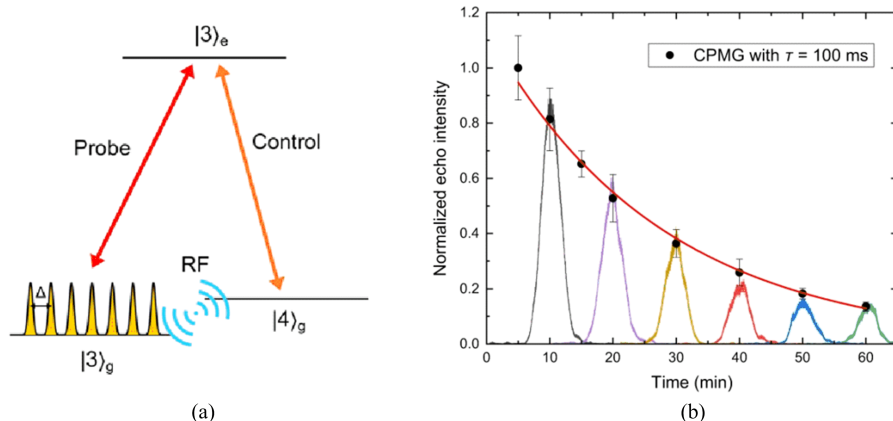


图 5 (a) 为 1 h 相干光存储的实验方案示意图, 信号光场 (probe) 被梳状的原子吸收谱吸收, 并被控制光场 (control) 存储为自旋激发, 在射频 (RF) 场的操控下延长存储时间, 最终读取为光信号。(b) 为读出光脉冲信号强度与存储时间的关系^[10]。

Figure 5. Coherent storage of light for 1 h. (a) is the simplified level structure of atoms where the probe light is absorbed by the atomic frequency comb and transferred to spin coherence by the control light. The spin coherence is protected by RF pulses and finally retrieved as optical signal. (b) present the echo traces at different readout times.

如果使用 300 km 的通信光纤直接传输光, 则传输效率大约是 10^{-6} 。也就是说, 当前使用的存储器原则上已经有望超越光纤。当然这里只是比较了传输效率, 实际上要真正超越光纤的通信速率是很难的, 必须要结合多模式复用技术, 大幅度地提升存储容量。

为了满足量子 U 盘的应用需求, 接下来的任务仍然十分具有挑战性, 要想实现可移动的单光子存储, 目前的存储效率是远远不够的, 存储效率要提升至 10% 左右。另外, 存储装置的噪声也要压制到远低于单光子水平, 这对存储器的自旋跃迁操控精度也提出了十分苛刻的要求。考虑实际的运输需求, 还需要仔细评估运输的实际环境对量子存储性能的影响。如果基于高铁运输, 要满足数千千米甚至更远的量子通信需求, 量子存储时间还需要进一步延长。

尽管这些问题都十分具有挑战性, 但是量子 U 盘在原理上是完全可行的, 国际学术界对这一装置的研究兴趣也在不断增强。文献 [10] 发表后, 澳大利亚悉尼大学有团队提出了基于这种量子 U 盘构建“甚长基线光学干涉仪”天文望远镜的理论方案^[11]。其基本思想是, 利用两台相距很远的望远镜分别捕捉星光, 各自存储到量子 U 盘中并运输到一起进行干涉观测, 这样可以极大提升干涉仪基线的长度, 有望上千倍地提升光学望远镜的分辨率。

量子 U 盘作为一种新型的光通信信道, 其应用的场景很可能远远超出量子信息领域本身。大多数使用到相干光场的远程传输及长时间保存的场合, 量子 U 盘都可能会有用武之地, 我们对其未来应用充满信心。

4 结论

面向远程量子通信的重大需求, 无论是走量子中继还是量子 U 盘路线, 接下来的一个里程碑工作都是证明其相比光纤直接传输量子态的优越性。也就是说, 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, 其难度也许不亚于研制出一台实用化的量子计算机。

本课题组近期取得两项进展, 为该领域的下一步发展打下基础。在量子中继路线上, 指明了吸收型量子存储构建多模式量子中继的发展方向; 在量子 U 盘路线上, 大幅度刷新了相干光存储时间的世界纪录, 为量子 U 盘的实现带来了希望。

未来的全球量子通信很可能是依托卫星及光纤杂化的量子中继网络, 并结合量子 U 盘实现全球无死角的覆盖。基于稀土离子掺杂晶体的固态量子存储器有望在其中扮演重要的角色。

致谢

本文工作得到国家重点研发计划 (No. 2017YFA0304100) 资助。

利益冲突

作者声明本文没有利益冲突。

作者信息

周宗权, 男, 中国科学技术大学副教授。1990 年出生于安徽, 2010 年在合肥工业大学获得学士学位, 2015 年在中国科学技

术大学获得博士学位. 担任国家重点研发计划项目课题负责人、主持国家自然科学基金面上项目及青年科学基金项目等多项. 周宗权基于稀土离子掺杂晶体开展固态量子存储及量子网络的实验研究. 代表性成果包括: 提出“无噪声光子回波”原创量子存储方案; 实现首个多模式量子中继; 所研制的固态量子存储器多项技术指标(保真度 99.9%、多模式容量 100、维度 51、光存储寿命 1 h) 处于国际领先水平. 作为第一作者及通讯作者发表 Nature 1 篇(封面故事), Nature 子刊 4 篇, Physical Review Letters 4 篇等研究论文, 在固态量子存储及量子网络领域授权中国发明专利 7 项及美国专利 1 项.

李传锋(通讯作者), 男, 中国科学技术大学教授. 1973 年出生于山东, 1990 年考入中国科学技术大学读本科与研究生, 1999 年获得博士学位. 先后入选国家杰出青年基金项目(2013 年)、教育部长江学者特聘教授(2014 年)以及万人计划领军人才(2016 年). 长期从事量子光学与量子信息领域的实验研究, 在搭建基于光学的量子纠缠网络及利用量子信息技术研究量子物理等方向取得系列重要成果. 已发表 SCI 论文 300 余篇, 包括 Nature 1 篇, Nature 子刊 20 篇, Science Advances 6 篇, Physical Review Letters 51 篇.

参考文献

- [1] Wootters W K, Zurek W H. A single quantum cannot be cloned. *Nature*, 1982, 299: 802–803.
- [2] Sangouard N, Simon C, de Riedmatten H, et al. Quantum repeaters based on atomic ensembles and linear optics. *Rev. Mod. Phys.*, 2011, 83: 33–80.
- [3] Zhong M, Hedges M, Ahlefeldt R, et al. Optically addressable nuclear spins in a solid with a six-hour coherence time. *Nature*, 2015, 517: 177–180.
- [4] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, et al. Quantum repeaters: The role of imperfect local operations in quantum communication. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 81: 5932–5935.
- [5] Zhou Z Q, Lin W B, Yang M, et al. Realization of reliable solid-state quantum memory for photonic polarization qubit. *Phys. Rev. Lett.*, 2012, 108: 190505.
- [6] Tang J S, Zhou Z Q, Wang Y T, et al. Storage of multiple single-photon pulses emitted from a quantum dot in a solid-state quantum memory. *Nature Communications*, 2015, 6: 8652.
- [7] Liu X, Hu J, Li Z F, et al. Heralded entanglement distribution between two absorptive quantum memories. *Nature*, 2021, 594: 41–45.
- [8] Morton J J L, Molmer K. Spin memories in for the long haul. *Nature*, 2015, 517: 153–154.
- [9] Ma Y, Zhou Z Q, Liu C, et al. A Raman heterodyne study of the hyperfine interaction of the optically-excited state 5D_0 of Eu^{3+} : Y_2SiO_5 . *Journal of Luminescence*, 2018, 202: 32–37.
- [10] Ma Y, Ma Y Z, Zhou Z Q, et al. One-hour coherent optical storage in an atomic frequency comb memory. *Nature Communications*, 2021, 12: 2381.
- [11] Bland-Hawthorn J, Sellars M J, Bartholomew J G. Quantum memories and the double-slit experiment: Implications for astronomical interferometry. *Journal of the Optical Society of America B*, 2021, 38(7): A86–A98.

Towards long-distance quantum communication: Quantum repeaters and transportable quantum memories

ZHOU Zongquan^{1,2}, LI Chuanfeng^{1,2*}

1. CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
2. CAS Center for Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China
* Corresponding author. E-mail: cflf@ustc.edu.cn

Abstract: The non-cloning theorem provides the unconditional security for quantum communication but forbids the use of classical amplifiers. Therefore, the inevitable channel loss prevents the long-distance quantum communication. Protocols involving quantum memories can overcome this problem through the approach of quantum repeaters and transportable quantum memories. Based on rare-earth-ion doped crystals, we recently demonstrate an elementary link of a quantum repeater based on absorptive quantum memories and extend the optical storage time to 1 h. Here we provide a brief introduction to quantum communication, quantum repeaters and transportable quantum memories. Based on this, we review our recent achievements in this field.

Keywords: quantum memories; quantum network; quantum repeater; transportable quantum memory