

多模式固态量子存储

杨天书 周宗权 李传锋 郭光灿

Multimode solid-state quantum memory

Yang Tian-Shu Zhou Zong-Quan Li Chuan-Feng Guo Guang-Can

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 030303 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182207

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子存储研究进展

Research progress of quantum memory

物理学报. 2019, 68(3): 030307 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190039>

基于电磁诱导透明机制的压缩光场量子存储

Analysis of electromagnetically induced transparency based on quantum memory of squeezed state of light

物理学报. 2017, 66(7): 074201 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074201>

基于拉曼协议的量子存储

Raman protocol-based quantum memories

物理学报. 2019, 68(3): 034203 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182215>

量子计算与量子模拟

Quantum computation and quantum simulation

物理学报. 2018, 67(12): 120301 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180710>

噪声情况下的量子网络直接通信

Quantum network direct communication protocol over noisy channel

物理学报. 2015, 64(16): 160306 <https://doi.org/10.7498/aps.64.160306>

专题: 量子相干和量子存储研究进展

多模式固态量子存储*

杨天书¹⁾²⁾ 周宗权^{1)2)†} 李传锋^{1)2)‡} 郭光灿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, 量子信息和量子科技前沿创新中心, 合肥 230026)

(2018年12月16日收到; 2019年1月8日收到修改稿)

量子存储器是光子与物质系统之间的接口, 允许存入和读出加载了量子信息的光子, 是构建实用化量子网络的核心器件. 基于稀土掺杂晶体可以实现固态的量子存储器, 较长的相干时间和较宽的存储带宽使其成为目前最有潜力的量子物理系统之一. 本文综述近年来基于稀土掺杂晶体的多模式固态量子存储方面的实验进展. 主要内容包括频率自由度的多模式量子存储、时间自由度的多模式量子存储、空间自由度的多模式量子存储和多个自由度并行复用的多模式量子存储. 在多自由度复用的多模式存储的基础上进一步介绍基于量子存储器的量子模式变换和实时的任意操作. 该系列工作为构建高速率的实用化量子网络奠定基础, 其中超越存储器本身的脉冲操作功能有望在未来量子信息处理过程中获得广泛的应用.

关键词: 量子存储, 多模式复用, 量子模式变换, 量子网络

PACS: 03.65.Wj, 03.67.Hk, 42.50.Ex, 42.50.Ct

DOI: 10.7498/aps.68.20182207

1 引言

光子是一种理想的量子信息传递载体, 光子的频率、偏振或者相位等自由度都可以用来编码信息. 量子存储器可以吸收携带量子信息的光子并保存一段时间后再发射, 是量子信息处理过程的一个重要器件. 量子存储的应用包括: 在量子计算中实现不同操作的同步^[1]、将预报单光子变为确定性单光子^[2]、实现精密量子度量^[3]和验证量子物理基础问题^[4]等. 此外, 量子存储器作为量子中继的核心部件, 是长距离量子通信中必不可少的组成部分^[5]. 在长距离量子通信中, 基于光纤传输的量子信道传输损耗与光纤长度 L_0 的关系为 e^{-L_0} , 这种指数式的损耗使得通过发送单个光子直接在光纤内传输量子信息的距离被限制在百公里量级内^[5]. 1998年因斯布鲁克大学的 Briegel 等^[6]提出量子中继方案,

使用纠缠交换的方法可以克服这一问题. 通过量子中继方案, 指数式损耗通过分段建立在通信线路中的若干个量子中继变为多项式损耗, 这使得长距离量子通信成为可能.

如果存储器仅可以存储至多一个光子的一个模式, 将严重限制纠缠创建的速率. 为了达到实用化的通信速率, 必须使用多模式的量子存储^[7-9]. 如果多模式复用可以存储 M 个光子, 那么节点纠缠制备的速率就增加了 M 倍, 也就是通信速率增加了 M 倍^[8]. 这种多模式复用可以是时间、频谱或者空间等自由度, 并且多模式复用可以显著降低存储器寿命要求. 目前基于稀土掺杂晶体的多模式固态量子存储已经取得一些重要成果, 包括对弱相干光的 64 个时间模式的存储^[10], 确定性单光子的 100 个时间模式的量子存储^[11], 26 个频率多模式的量子存储^[12], 51 个空间多模式的量子存储^[13], 时

* 国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0304100) 和国家自然科学基金 (批准号: 61327901, 11774331, 11774335, 11504362, 11821404, 11654002) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zq_zhou@ustc.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: cfi@ustc.edu.cn

间、频率和空间三个自由度同时复用的 12 个模式的存储^[14].

本文介绍近年来多模式固态量子存储器方面的系列实验进展, 尤其是我国科研工作者在本领域做出的贡献.

2 稀土掺杂晶体存储系统

目前国际上广泛研究的量子存储系统包括冷原子、单原子、热原子和稀土掺杂晶体等^[3]. 量子存储器的主要衡量指标有存储保真度、存储时间、存储效率、存储模式数和工作波段等^[15]. 目前各种量子存储系统可以在个别指标上基本满足量子中继任务的技术需求, 但综合来看, 还没有一种量子存储系统可以满足实现量子中继的全部技术需求. 基于稀土掺杂晶体的固态量子存储器近年来发展较快, 本文重点介绍基于该系统的多模式量子存储.

稀土元素是镧系元素, 稀土元素的 4f 电子受到外层电子 5s 电子和 5p 电子的屏蔽, 具有一定的自由离子性质^[16]. 稀土离子掺杂晶体有以下三种特性: 1) 超长的相干寿命, 2015 年澳大利亚国立大学的 Zhong 等^[17]在 Eu:YSO 中观察到核自旋的相干寿命长达 6 h, 超长的相干寿命有望实现超长寿命的光子量子存储; 2) 从几百 MHz 到 THz 不等的非均匀展宽, 这种非均匀展宽天然地适合做频率自由度的多模式复用^[12]; 3) 稀土离子在掺杂晶体中被宿主晶体囚禁在晶格中无法运动^[18], 所以稀土掺杂晶体非常适合用作光子的空间模式的存储. 由于稀土掺杂晶体是块状晶体, 利于集成和加工, 加拿大卡尔加里大学的 Saglamyurek 等^[19]和西班牙光子科学研究所的 Seri 等^[20]在稀土掺杂晶体中进行了波导刻蚀并在波导中实现了下转换参量光的量子存储.

目前在稀土掺杂晶体中实现的存储方案包括电磁致透明、受控可逆非均匀展宽和原子频率梳 (atomic frequency comb, AFC) 等^[15,21,22]. 其中 AFC 方案取得了众多的实验进展, 这里简单介绍此方案. 首先通过光谱烧孔的方法在稀土离子的下能级 g 制作频率间距为 Δ 的梳状吸收结构. 带宽匹配的信号光子与下能级 g 和上能级 e 共振, 进入晶体后被 AFC 吸收, 由于 AFC 频率的周期性结构, 光子在 AFC 上演化后将在时长为 $1/\Delta$ 之后发射出光子. 为了实现按需式读取和获取更长的存储时间, 可以在光子演化发射 ($1/\Delta$) 之前加一束控制光将光子转移到自旋态 s 上. 光子在自旋态上演化时长

T_s 后, 再加一束控制光将光子再激发回到光学上能级 e . 此时的整个序列总的存储时间为 $1/\Delta + T_s$, 这种存储方案被称为 AFC-自旋波存储. 基于 AFC 存储方案的时间模式复用数最多为梳的个数^[21], 不依赖晶体的吸收深度, 具有很高的多模式复用潜力.

3 多模式固态量子存储

3.1 频率自由度的多模式复用

频率自由度的多模式复用是利用稀土离子在掺杂晶体中的非均匀展宽. 2014 年加拿大卡尔加里大学的 Sinclair 等^[12]在 Ti:Tm:LiNbO 波导中制作了 26 个带宽为 100 MHz 的 AFC, 相邻 AFC 间隔 300 MHz, 实现了辅以频率选择性读出的 26 个频率多模式复用的量子存储. 他们将量子态编码在 Time-bin 上, 存储保真度达到 0.97, 验证了存储器的量子性.

3.2 时间自由度的多模式复用

Time-bin 型编码对信息传输导致的消相干非常不敏感, 利用时间自由度进行 Time-bin 型编码是传输量子信息的一个重要方式. 基于 AFC 方案, 在时间多模式方面已经取得了一些重要的成果, 2011 年, 法国巴黎第十一大学的 Bonarota 等^[23]在 Tm:YAG 晶体的 0.93 GHz 非均匀展宽上实现了 1060 个经典光脉冲的时间多模式存储, 存储效率为 1%, 存储时间为 1.6 μ s; 2010 年, 瑞士日内瓦大学的 Usmani 等^[10]在 Nd:YSO 中实现了对弱相干光的存储, 存储时间为 1.3 μ s, 存储了 64 个时间模式; 2016 年, 瑞士日内瓦大学的 Tiranov 等^[24]在 Nd:YSO 中实现了基于时间多模式的通信波段预报的偏振纠缠光子对的存储, 存储了 10 个时间模式, 存储寿命为 50 ns, 存储效率为 7%.

2015 年, 本团队^[11]在稀土掺杂晶体中实现了确定性单光子光源的存储. 实验所用的光源是半导体量子点光源, 是一种确定性单光子光源. 这种确定性单光子源原则上可以完全抑制多光子事件, 同时, 增强的光子发射概率可以极大提升量子中继的速率^[25]. 对于量子点发射的光子, 可以利用 HBT (Hanbury Brown and Twiss) 光子符合计数测试方法验证其反聚束性 $g^{(2)}(0) < 1$. 测量结果为 $g^{(2)}(0) = 0.14$, 证明了实验所用的光源是一个高质量的单光子源. 存储晶体是两块厚度为 3 mm、掺杂浓度为 5 ppm 的 Nd:YVO 晶体. 在两块存储晶

体中夹一块半波片形成三明治结构^[26], 通过这种结构测量 $|H\rangle + |V\rangle$ 态存储后的保真度为 0.913 ± 0.026 , 证明了存储器对单光子的偏振态相干性的保持. 图 1(a) 给出了单个光子脉冲 40 ns 的存储结果, 存储效率 20%. 图 1(b) 是输入了 20 个间距为 4.8 ns 的单光子脉冲并存储了 100 ns 的存储结果. 在 100—200 ns 的时间范围内, 可以清晰地看到 20 个存储后的信号. 进一步输入了 100 个脉冲间距为 4.8 ns 的单光子脉冲, 存储时间 500 ns. 存储结果如图 1(c) 所示, 500—1000 ns 的时间段内能看到光子的存储信号. 由于存储时间的延长导致制作 AFC 的对比度下降, 图 1(c) 中的存储效率是图 1(a) 中的 1/3. 图 1(d) 是图 1(c) 中方框部分的放大图, 通过图 1(d) 比较发现输入光子的透过峰信号和存储峰能一一对应, 证明了单光子的时间模式在存储过程中被保存得很好. 这里 100 个时间模式存储到

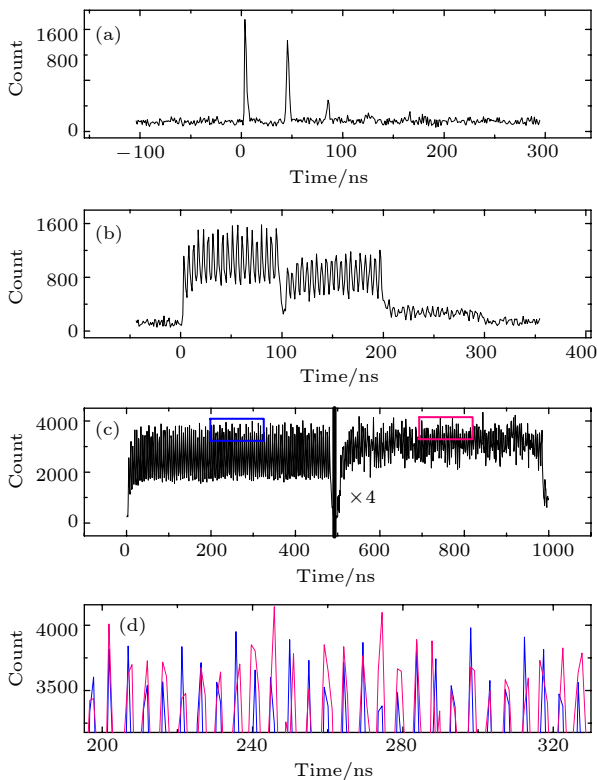


图 1 确定性真光子的多模式存储 (a) 1 个时间模式存储 40 ns 的时间谱; (b) 20 个时间模式存储 100 ns 的时间谱; (c) 100 个时间模式存储 500 ns 的时间谱; (d) 图 (c) 中方框部分的放大图^[11]

Fig. 1. Multimode quantum storage of single photons: (a) The histogram of single photon storage in one temporal mode for 40 ns; (b) the histogram of single photon storage in 20 temporal modes for 100 ns; (c) the histogram of single photon storage in 100 temporal modes for 500 ns; (d) the enlarge of the rectangle regions in panel (c)^[11].

目前为止仍然是是单光子多模式量子存储的最高模式数.

该实验仅展现了确定性单光子的量子存储, 值得注意的是, 量子点还可以产生高质量的确定性纠缠光子对^[27]或与单个光子纠缠在一起的固体自旋量子比特^[28]. 这里的量子点和存储系统都是固态系统, 有利于进一步拓展和集成, 这一组合有望构建更实际且高效的量子中继器.

AFC 存储是一个预编程式的延时方案, 有存储时间较短、不能实现按需读出等缺陷, 还需要加入控制光实现按需式读取和延长存储寿命, 也就是所谓的 AFC-自旋波存储. 2013 年西班牙光子科学研究所的 Gündoğan 等^[29]在 Pr:YSO 晶体中实现了对经典光脉冲的 5 个时间多模式的 AFC-自旋波存储, 储存寿命为 14 μ s. 2015 年瑞士日内瓦大学的 Jobez 等^[30]在 Eu:YSO 中实现了单光子水平的 AFC-自旋波存储, 存储了 5 个时间模式, 存储寿命为 0.5 ms; 2016 年 Jobez 等^[31]又在 Eu:YSO 中演示了具有 50 个时间模式存储潜力, 存储时间为 0.541 ms 的 AFC-自旋波存储.

3.3 空间自由度的多模式复用

光子的空间自由度包括路径和空间分布等. 光子的轨道角动量 (orbital-angular-momentum, OAM) 是光子空间性质的波前横向分布, 理论上可以达到无穷维^[32]. 携带 OAM 的光子的波前“扭曲”可以由勒盖尔-高斯模式 (Laguerre-Gaussian, LG_{pl}) 来描述^[33], 这里 p 代表径向量子数, l 代表角量子数. 如果考虑 $p = 0$, 用 LG 模式来编码光子, 只需要考虑角量子数 l , 每个光子携带的轨道角动量为 lh . 轨道角动量的自由度属于空间自由度, l 越大, 维度越高, 同时光斑尺寸越大. 掺杂晶体的尺度可达几十毫米, 天然地适应存储轨道角动量, 支持上万个轨道角动量的模式^[13].

本团队所利用的实验光源是由非线性晶体 PPKTP (periodically poled potassium titanyl phosphate) 产生的下转换参量光, 窄带宽下转换纠缠光源的符合计数约为 500 个/s^[13]. 存储晶体是一块厚度为 3 mm、掺杂浓度为 5 ppm 的 Nd:YVO. 首先实验测得三维纠缠的存储保真度达到 0.991 ± 0.003 . 用 Bell 不等式来检验存储之后的三维纠缠态的纠缠特性, 测量结果为 $S = 2.152 \pm 0.033$. 测量结果 S 大于 2, 违背了局域实在论的预言极限^[34], 证明了存储器完美地保持了轨道角动量自由度的

三维纠缠特性. 为了探索这种固态量子存储器对于光子的轨道角动量的存储容量, 使用了如图 2(a) 所示的简化装置, 采用每个脉冲包含 0.5 个光子的弱相干光作为输入. 图 2(b) 是三维空间的量子过程层析重构的密度矩阵的实部^[35], 存储过程的保真度为 0.970 ± 0.001 . 对于更高维度的存储性能的分析, 量子过程层析不再是一个高效率的分析手段, 可以通过叠加态 $|\Psi_+(l)\rangle = (| -l\rangle + | l\rangle)/\sqrt{2}$ 的

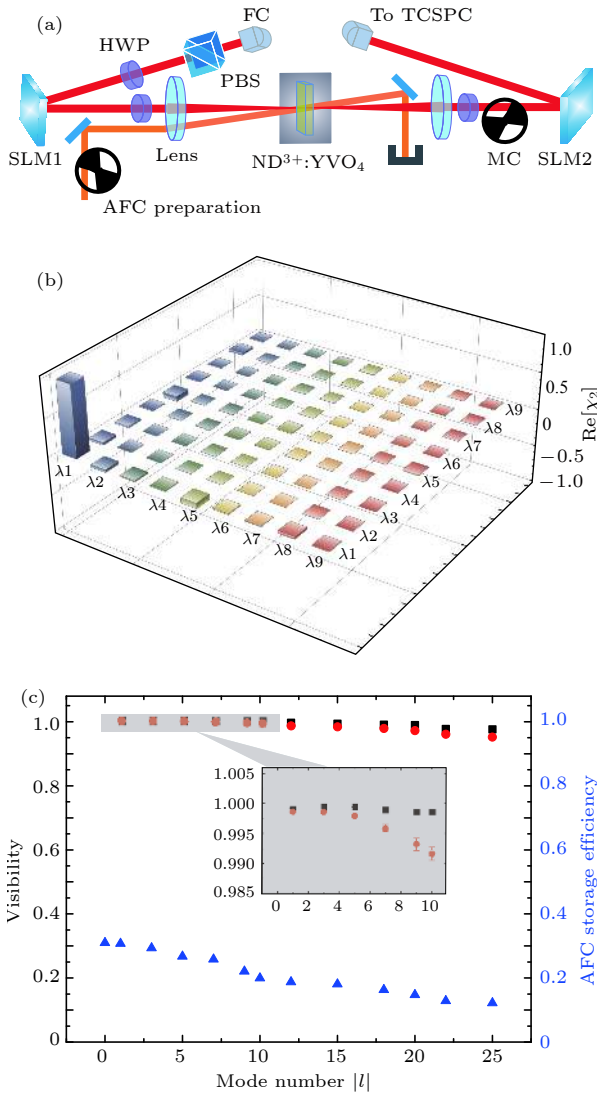


图 2 存储器的模式容量分析 (a) 研究多模式存储容量的实验装置; (b) 三维空间的 OAM 态通过量子过程层析重构密度矩阵 χ_2 的实部; (c) 高维叠加态 $|\Psi_+(l)\rangle$ 的存储结果^[13]

Fig. 2. The exploration of the multimode capacity in the spatial domain of the quantum memory: (a) The setup is used for exploration of the multimode capacity of the memory; (b) graphical representation of the real part of the reconstructed process matrix χ_2 in three dimensions; (c) the memory performance for quantum superposition states $|\Psi_+(l)\rangle$ ^[13].

可见度来衡量高维空间的量子存储的性质^[18]. 图 2(c) 的红色点是存储器的输出态可见度与维度 l 的关系, 当 $l = 25$ 时, 存储的可见度为 0.952 ± 0.008 , 证明了存储器可以存储高达 51 个维度的 OAM 量子态. 这里 l 越大, 存储效率会由于信号光斑变大但泵浦光斑未能完全覆盖信号光斑而下降, 如果使用空间分布均匀的大的泵浦光斑 (例如超高斯分布的泵浦光), 那么存储器可以对更高维度的 OAM 量子态实现高效的量子存储.

3.4 多个自由度的同时复用

同一个自由度的模式数复用都是以相加的形式增长, 但是不同自由度的模式同时复用则是按照乘积的形式增加. 比如时间自由度可以存储 M 个模式, 频率自由度可以存储 N 个模式、空间自由度可以存储 P 个模式, 那么可以同时实现 $M \times N \times P$ 个模式^[12,36,37]. 2018 年, Yang 等^[14]首次报道了基于时间、频率和空间三个自由度的多模式复用量子存储.

0.05% 掺杂的 3 mm 厚度的 Pr:YSO 作为存储晶体, 被放置于 3.2 K 的低温腔中. 采用的存储方案是 AFC-自旋波存储. 利用掺杂晶体中 Pr 的非均匀展宽, 在存储晶体的下能级上制作了 2 个间隔为 80 MHz 的 AFC 作为两个频段的频率多模式复用. 如图 3(a) 所示, 红线为存储晶体中的 AFC 结构, AFC 被制作在 $1/2g$ 上, 其中 $1/2g \rightarrow 3/2e$ 是对应输入光子的频率, $3/2g \rightarrow 3/2e$ 是对应输入控制光的频率; 黑线对应的是滤波晶体能级对应的跃迁吸收, $1/2g \rightarrow 3/2e$ 是信号光子透过带, 允许被存储后的信号光子透过. 这两个 AFC 的参数都是带宽为 2 MHz, 间距为 200 kHz, 对应的 AFC 存储时间为 5 μ s. 对于空间模式的复用, 采用了图 3(b) 所示的 3 个不同路径加载不同的 OAM 态作为三个独立空间模式的输入, 其中通过 s_1 的光子被空间光调制器 (spatial-light modulator, SLM) 加载了 $|L\rangle$ 态, 通过 s_2 的光子被一个螺旋相位片 (spiral phase plate, SPP) 加载了 $|R\rangle$ 态, s_3 是一个高斯模式 $|G\rangle$. 这里的 $|L\rangle$, $|G\rangle$ 和 $|R\rangle$ 对应了 LG 模式中的 $|LG_{p=0}^{l=-1}\rangle$, $|LG_{p=0}^{l=0}\rangle$ 和 $|LG_{p=0}^{l=1}\rangle$ 态. s_1, s_2 和 s_3 通过两个薄膜分束器 (pellicle beam splitters, BS) 合束进入存储器. 最终实现了 2 个时间模式、2 个频率模式和 3 个空间模式总共 12 个模式的存储, 如图 3(c) 所示.

本实验所用的 Pr:YSO 有 5 GHz 的非均匀展宽, 可以支持超过 60 个独立的频率模式. 对于

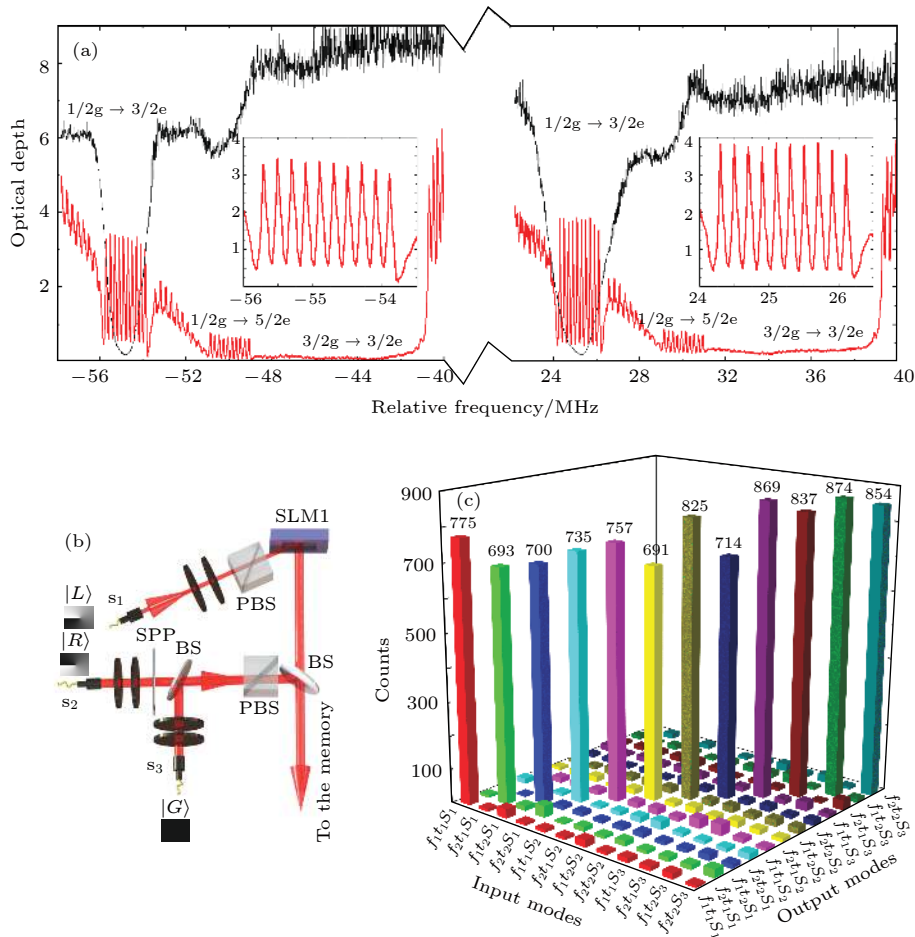


图 3 单光子水平的多自由度复用的自旋波存储 (a) 在存储晶体的非均匀展宽上制作的两个间距为 80 MHz 的 AFC (红色) 和滤波晶体的吸收线(黑色); (b) 3 个独立的空间模式的输入; (c) 时间、频率和空间自由度同时复用的自旋波存储 [14]
 Fig. 3. Multiplexed storage in multiple-degree-of-freedom at single photon level: (a) The double AFC structure (red) in the memory crystal and the double filter structure (black) in the filter crystal; (b) three independent spatial modes carrying different OAM states are employed for spatial multiplexing; (c) a demonstration of temporal, spectral and spatial multiplexed storage for single-photon level input [14].

AFC 的自旋波存储, Jobez 等 [31] 在 Eu:YSO 中演示了达到 50 个独立的时间模式的自旋波存储. 本团队 [13] 在 Nd:YVO 中实现了 51 个模式的 OAM 存储, 结合这些存储技术, 有望实现 $60 \times 50 \times 51 = 153000$ 个模式, 展示了稀土掺杂晶体的非常大的模式容量潜力.

4 多功能量子存储器

量子存储器不仅能够存储量子信息, 为了加快量子信息的传递速率或者量子信息的处理效率 [38-40], 还需要存储器能够对量子信息进行一些必要的操作. 例如量子存储器可以用作可编程处理器, 即实时任意地操作量子态的模式, 其应用包括量子密码学、量子网络和量子计算等 [39]. 2014 年加拿大卡尔加里大学的 Saglamyurek 等 [39] 在 Tm:LiNbO 晶体

中用 AFC 方法实现了对信号脉冲的排序、分束、压缩、展宽、延时和滤波等功能的演示. 该工作中演示的功能都是预编程操作而不是实时的操作, 很多量子信息处理过程需要实时的任意操作. 在此前多自由度复用的多模式存储的基础上, 本团队在固态量子存储系统中完成了量子模式转换和实时任意操作的演示 [14].

4.1 量子模式转换

量子模式转换就是将任意模式的光子模式转换到需要的目标模式并且不破坏其携带的量子态信息. 在量子信息处理过程中, 光子通过各种器件可能会导致模式失配的现象. 量子模式转换具有广泛的应用, 例如在量子通信的纠缠交换过程中, 贝尔态测量要求光子的不可区分性, 量子模式转换能够将模式失配的光子变为模式匹配的光子, 从而加

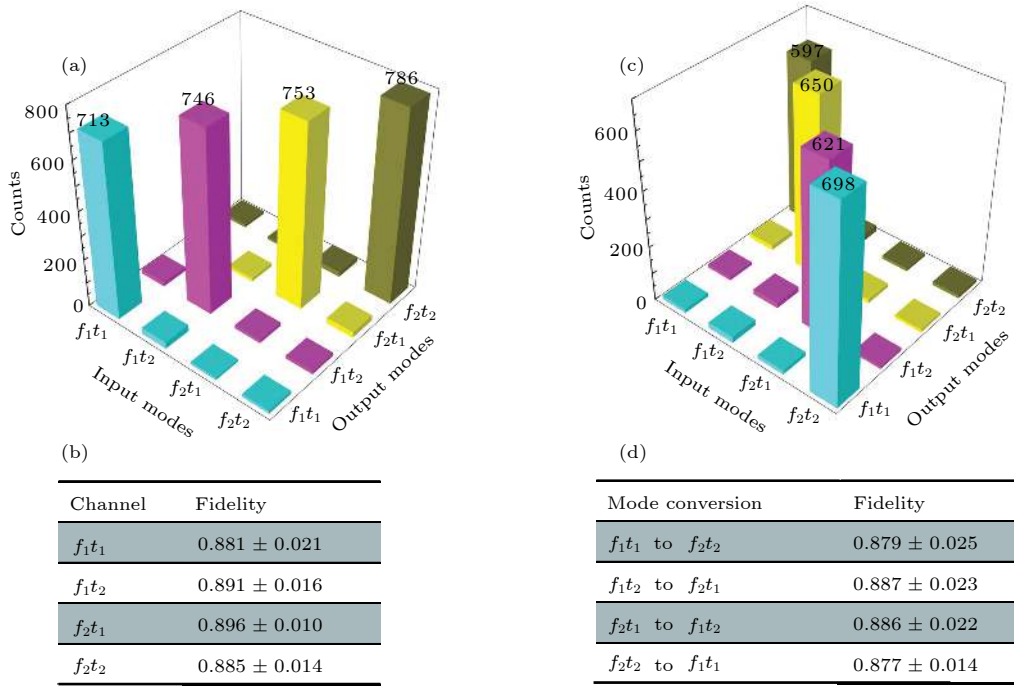


图 4 将时间和频率自由度作为“信道”，将空间自由度使用 qutrit 态编码的多路复用存储 (a), (b) 和量子模式转换 (c), (d)^[14]
 Fig. 4. (a), (b) Multiplexed storage and (c), (d) quantum mode conversion for spatial encoded qutrit state using four temporal and spectral channels^[14].

快通信速率^[12]；在量子计算中的玻色采样过程中，由于光纤的长度或者光源的抖动导致了模式失配^[41,42]，通过量子模式转换可以解决这个问题，加快玻色采样的速度。

对于此前^[14]的多自由度的模式复用，原则上每个自由度都可以携带量子信息，这里通过 SLM 把三维叠加量子态 $|\psi_1\rangle = (|L\rangle + |G\rangle + |R\rangle)/\sqrt{3}$ 加载到空间自由度上，将时间和频率自由度作为信道 $f_i t_j$ 。图 4(a) 是各个信道的测量结果。本团队还通过量子态层析方法重构了输入量子态和存储后量子态的密度矩阵并计算其保真度^[35]。图 4(b) 是保真度的测量结果，该结果证明了存储器的时间-频率信道对空间叠加态的量子性的保持。进一步地，如图 4(c) 所示，本团队演示了 $t_i - t_j$ 的时间模式转换和 $f_i - f_j$ 的频率模式转换。实验测量了输入量子态和模式转换之后的量子态之间的保真度，结果如图 4(d) 所示，证明了模式变换操作过程中的量子态保护能力。这里的噪声远低于转换信号，证明了模式转换的操作不受模式串扰的影响。

4.2 任意操作

除了上述的量子模式转换外，本团队进一步演示了基于量子存储器对存储脉冲在时间模式和频率模式实时的任意操作。所谓实时的操作就是在光

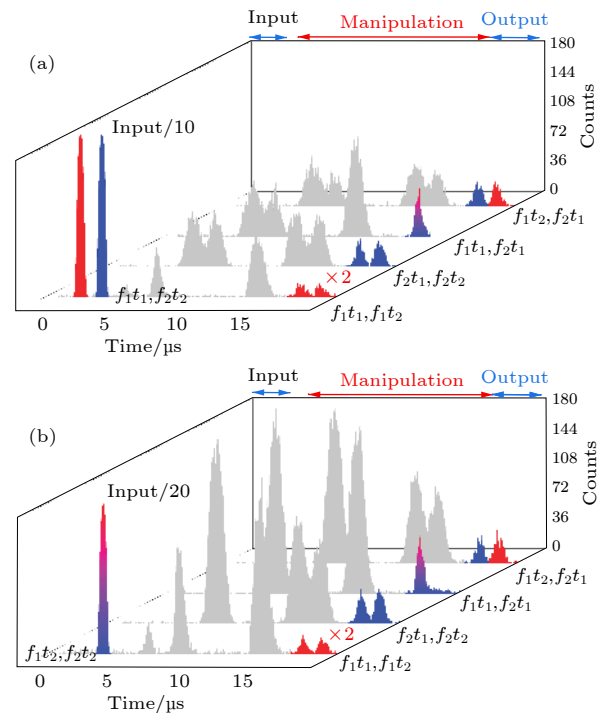


图 5 时间和频率模式的实时任意操作 (a) 轨道角动量的 qutrit 态 $|\psi_1\rangle$ 加载在 f_1t_1 和 f_2t_2 模式上；红色代表频率为 f_1 的光子，蓝色代表频率为 f_2 的光子；(b) 轨道角动量的 qutrit 态 $|\psi_2\rangle$ 加载在 f_1t_2 和 f_2t_2 模式上^[14]

Fig. 5. Arbitrary temporal and spectral manipulations in real time: (a) The OAM qutrit state $|\psi_1\rangle$ is encoded on the f_1t_1 and f_2t_2 modes; (b) the OAM qutrit state $|\psi_2\rangle$ is encoded on the f_1t_2 and f_2t_2 modes^[14].

子已经被存储后再决定做何种操作, 具有及时处理各种突发问题的功能.

作为一个例子, 实验演示了把输入态的空间自由度加载了一个量子态 $|\psi_1\rangle$ 并且编码到 $f_1 t_1$ 和 $f_2 t_2$ 模式上. 如图 5(a) 从上到下所示, 实验演示了四个典型的操作: 交换 f_1 和 f_2 光子的读出时间, 可以作为排序功能; 同时读出光子, 可以作为合束功能; 对 f_1 光子进行移频到 f_2 同时 f_2 的频率不移动, 可以作为选择性移频功能; 滤波 f_2 的光子同时将 f_1 的光子进行时间的分束, 包含了选择性滤波和时间上的分束. 如图 5(b) 所示, 在输入态的空间自由度加载了另一个量子态 $|\psi_2\rangle = (|L\rangle + |G\rangle - i|R\rangle)/\sqrt{3}$ 并且编码到 $f_1 t_2$ 和 $f_2 t_2$ 模式上, 同时展示了如图 5(a) 所示的相同输出. 此外, 本团队还测量了输入量子态和存储、操纵后的量子态之间的保真度, 这些结果证明了实时任意操作的量子性.

5 结 论

本文介绍了基于稀土掺杂晶体的多模式量子存储的最新进展, 以及基于多自由度的多模式量子存储的一些典型应用. 目前存储器的综合技术指标还不能满足构建远程量子中继网络的需求^[5], 尤其是目前在单光子存储的存储效率、存储时间以及信噪比方面都还需要进一步优化, 还需要其他有用的技术进一步改善量子存储器的性能. 目前稀土离子掺杂晶体的存储性能提升的研究主要聚焦在以下三个方面: 1) 生长高品质的稀土晶体^[43,44], 比如 2017 年澳大利亚国立大学的 Ahlefeldt 等^[44]生长了 $\text{EuCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶体, 其吸收深度约为 4000 cm^{-1} , 这种超强的吸收支持高效率的光存储; 2) 对晶体性质的深入研究^[45,46], 寻找具有很长相干寿命的稀土离子工作环境, 比如 2015 年澳大利亚国立大学的 Zhong 等^[17]通过一阶塞曼响应为零的工作磁场以及动态解耦合实现了核自旋长达 6 h 的相干寿命; 3) 可集成的波导型存储器以及纳米晶体的研究^[19,20,47,48], 以便于实现可集成及易拓展的实际应用. 到目前为止, 通过使用不同的存储介质、不同的存储方案和不同的通信协议已经获得了种种优异的性能^[49,50]. 仍然面临的挑战是如何将这些指标结合到同一个存储单元中以供实际使用.

长寿命的量子存储除了在量子通信中作为量子中继之外, 还带来了一种很有前景的新型量子比特传输方法: 物理传输含有量子比特的晶体而不是使用光纤发送量子比特, 也就是所谓的“量子

U 盘”(quantum memory stick)^[51]. 类似于经典世界中将信息通过移动硬盘或者闪存等传递信息的方式, 2015 年的《Nature》论文提出将量子信息写入晶体的核自旋^[17, 51], 然后将晶体等装置装进一辆普通的货车里通过经典运输的方式传输量子信息.

基于量子存储器的实时任意操作有望为存储器提供更为广泛的应用场合. 比如可以通过调节控制光的比例和相位来实现一个任意的时间分束器^[52]和相位调制器^[53], 这些功能可以执行对单 qubit 的任意操作^[54]. 2017 年, 西班牙光子科学研究所的 Kutluer 等^[55]和瑞士日内瓦大学的 Laplane 等^[56]分别在稀土掺杂晶体内实现了预报单光子源, 结合以上这些功能, 有望基于物质系统实现 Knill-Laflamme-Milburn 型量子计算^[57].

参考文献

- [1] Kok P, Munro W J, Nemoto K, Ralph T C, Dowling J P, Milburn G J 2007 *Rev. Mod. Phys.* **79** 135
- [2] Lvovsky A I, Sanders B C, Tittel W 2009 *Nat. Photon.* **3** 706
- [3] Heshami K, England D G, Humphreys P C, Bustard P J, Acosta V M, Nunn J, Sussman B J 2016 *J. Mod. Opt.* **63** 2005
- [4] Zhou Z Q, Huelga S F, Li C F, Guo G C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 113002
- [5] Sangouard M, Simon C, de Riedmatten H, Gisin N 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 33
- [6] Briegel H J, Dur W, Cirac J I, Zoller P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932
- [7] Wehner S, Elkouss D, Hanson R 2018 *Science* **362** 9288
- [8] Collins O A, Jenkins S D, Kuzmich A, Kennedy T A B 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 060502
- [9] Simon C, de Riedmatten H, Afzelius M, Sangouard N, Zbinden H, Gisin N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 190503
- [10] Usmani I, Afzelius M, de Riedmatten H, Gisin N 2010 *Nat. Commun.* **1** 12
- [11] Tang J S, Zhou Z Q, Wang Y T, Li Y L, Liu X, Hua Y L, Zou Y, Wang S, He D Y, Chen G, Sun Y N, Yu Y, Li M F, Zha G W, Ni H Q, Niu Z C, Li C F, Guo G C 2015 *Nat. Commun.* **6** 8652
- [12] Sinclair N, Saglamyurek E, Mallahzadeh H, Slater J A, George M, Ricken R, Hedges M P, Oblak D, Simon C, Sohler W, Tittel W 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 053603
- [13] Zhou Z Q, Hua Y L, Liu X, Chen G, Xu J S, Han Y J, Guo G C 2015 *Phys. Rev. Lett.* **115** 070502
- [14] Yang T S, Zhou Z Q, Hua Y L, Liu X, Li Z F, Li P Y, Ma Y, Liu C, Liang P J, Li X, Xiao Y X, Hu J, Li C F, Guo G C 2018 *Nat. Commun.* **9** 3407
- [15] Zhou Z Q, Li C F 2013 *Chin. Sci. Bull.* **58** 287 (in Chinese) [周宗权, 李传锋 2013 科学通报 **58** 287]
- [16] Liu G, Jacquier B 2005 *Spectroscopic Properties of Rare Earths in Optical Materials* (Beijing: Tsinghua University Press, Springer Press) pp11–126
- [17] Zhong M, Hedges M P, Ahlefeldt R L, Bartholomew J G, Beavan S E, Wittig S M, Longdell J J, Sellars M J 2015

Nature **517** 177

- [18] Zhou Z Q 2015 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [周宗权 2015 博士学位论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [19] Saglamyurek E, Sinclair N, Jin J, Slater J A, Oblak D, Bussi eres F, George M, Ricken R, Sohler W, Tittel W 2011 *Nature* **469** 512
- [20] Seri A, Corrielli G, Lago-Rivera D, Lenhard A, de Riedmatten H, Osellame R, Mazzer a M 2018 *Optica* **5** 934
- [21] Afzelius M, Simon C, de Riedmatten H, Gisin N 2009 *Phys. Rev. A* **79** 052329
- [22] de Riedmatten H, Afzelius M, Staudt M U, Simon C, Gisin N 2008 *Nature* **456** 773
- [23] Bonarota M, Gou et J L L, Chaneli ere T 2011 *New J. Phys.* **13** 013013
- [24] Tiranov A, Strassmann P C, Lavoie J, Brunner N, Huber M, Verma V B, Nam S W, Mirin R P, Lita A E, Marsili F, Afzelius M, Bussi eres F, Gisin N 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 240506
- [25] M uller M, Bounouar S, J ons K D, Gl assl M, Michler F 2014 *Nat. Photon.* **8** 224
- [26] Zhou Z Q, Lin W B, Yang M, Li C F, Guo G C 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 190505
- [27] Huber D, Reindl M, da Silva S F C, Schimpf C, Mart ın-S anchez J, Huang H Y, Piredda G, Edlinger J, Rastelli A, Trotta R 2018 *Phys. Rev. Lett.* **121** 033902
- [28] Morse K J, Abraham R J S, DeAbreu A, Bowness C, Richards T S, Riemann H, Abrosimov N V, Becker P, Pohl H J, Thewalt M L W, Simmons S 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700930
- [29] G undoğan M, Mazzer a M, Ledingham P M, Cristiani M, de Riedmatten H 2013 *New J. Phys.* **15** 045012
- [30] Jobez P, Laplane C, Timoney N, Gisin N, Ferrier A, Goldner P, Afzelius M 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 230502
- [31] Jobez P, Timoney N, Laplane C, Etesse J, Ferrier A, Goldner P, Gisin N, Afzelius M 2016 *Phys. Rev. A* **93** 032327
- [32] Erhard M, Fickler R, Krenn M, Zeilinger A 2018 *Light Sci. Appl.* **7** 17146
- [33] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, Woerdman J P 1992 *Phys. Rev. A* **45** 8185
- [34] Collins D, Gisin N, Linden N, Massar S, Popescu S 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 040404
- [35] O'Brien J L, Pryde G J, Gilchrist A, James D F V, Langford N K, Ralph T C, White A G 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 080502
- [36] Hua Y L, Zhou Z Q, Li C F, Guo G C 2018 *Chin. Phys. B* **27** 020303
- [37] Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G 2008 *Nat. Phys.* **4** 282
- [38] Hosseini M, Sparkes B M, Gabriel H, Longdell J J, Lam P K, Buchler B C 2009 *Nature* **461** 241
- [39] Saglamyurek E, Sinclair N, Slater J A, Heshami K, Oblak D, Tittel W 2014 *New J. Phys.* **16** 065019
- [40] Reim K F, Nunn J, Jin X M, Michelberger P S, Champion T F M, England D G, Lee K C, Kolthammer W S, Langford N K, Walmsley I A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 263602
- [41] Motes K R, Gilchrist A, Dowling J P, Rohde P P 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 120501
- [42] Motes K R, Dowling J P, Gilchrist A, Rohde P P 2015 *Phys. Rev. A* **92** 052319
- [43] Ahlefeldt R L, Zhong M, Bartholomew J, Sellars M 2013 *J. Lumin.* **143** 193
- [44] Ahlefeldt R L, Hush M R, Sellars M J 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 250504
- [45] Ahlefeldt R L, Hutchison W, Manson N, Sellars M J 2013 *Phys. Rev. B* **88** 184424
- [46] Ma Y, Zhou Z Q, Han Y J, Liu C, Yang T S, Tu T, Xiao Y X, Liang P J, Li P Y, Hua Y L, Liu X, Li Z F, Hu J, Li X, Li C F, Guo G C 2018 *J. Lumin.* **202** 32
- [47] Zhong T, Kindem J M, Bartholomew J G, Rochman J, Craiciu I, Miyazono E, Bettinelli M, Cavalli E, Verma V, Nam S W, Marsili F, Shaw M D, Beyer A D, Faraon A 2017 *Science* **357** 1392
- [48] Zhong T, Kindem J M, Miyazono E, Faraon A 2015 *Nat. Commun.* **6** 8206
- [49] Hedges M P, Longdell J J, Li Y, Sellars M J 2010 *Nature* **465** 1052
- [50] Liu X, Zhou Z Q, Hua Y L, Li C F, Guo G C 2017 *Phys. Rev. A* **95** 012319
- [51] Morton J J, M ølmer K 2015 *Nature* **517** 153
- [52] Timoney N, Usmani I, Jobez P, Afzelius M, Gisin N 2013 *Phys. Rev. A* **88** 022324
- [53] G undoğan M, Ledingham P M, Kutluer K, Mazzer a M, de Riedmatten H 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 230501
- [54] Humphrey P C, Metcalf B J, Spring J B, Moore M, Jin X M, Barbieri M, Kolthammer W S, Walmsley I A 2013 *Phys. Rev. Lett.* **111** 150501
- [55] Kutluer K, Mazzer a M, de Riedmatten H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 210502
- [56] Laplane C, Jobez P, Etesse J, Gisin N, Afzelius M 2017 *Phys. Rev. Lett.* **118** 210501
- [57] Knill E, Laflamme R, Milburn G J 2001 *Nature* **409** 46

SPECIAL TOPIC—Advances in quantum coherence and quantum storage

Multimode solid-state quantum memory^{*}Yang Tian-Shu¹⁾²⁾ Zhou Zong-Quan^{1)2)†} Li Chuan-Feng^{1)2)‡} Guo Guang-Can¹⁾²⁾

1) (CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2) (Synergetic Innovation Center of Quantum Information and Quantum Physics,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 16 December 2018; revised manuscript received 8 January 2019)

Abstract

The faithful storage and coherent manipulation of single photon state in a matter-system are crucial for linear-optical quantum computation, long-distance quantum communication, and quantum networking. To reach useful data rate in a large-scale quantum network, highly multimode quantum memories are required to build a multiplexed quantum repeater. Rare-earth-ion doped crystal (REIC) is very promising material as a candidate for multimode quantum storage due to the wide inhomogeneous broadening and long optical coherence time. In this article, we review the recent advances in multimode quantum memories based on REICs. First, we briefly introduce the properties of REIC and the atomic frequency comb protocol based on REIC. Next, we review the achievements of multimode quantum memories based on REIC in recent years, including frequency, temporal and spatial multimode storage. Afterwards, we review our experimental work on multiplexed storage based on a multiple degree-of-freedom quantum memory. Finally, we introduce the quantum mode converter and real-time arbitrary manipulations based on the multiple degree-of-freedom quantum memory. The combination of storage and real-time manipulation in a device should enable the construction of a versatility quantum repeater. This review highlights that multimode quantum memories based on REIC can be found to possess some practical applications in developing the optical quantum information processing in the near future.

Keywords: quantum memory, multimode, quantum mode converter, quantum network**PACS:** 03.65.Wj, 03.67.Hk, 42.50.Ex, 42.50.Ct**DOI:** 10.7498/aps.68.20182207

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0304100) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61327901, 11774331, 11774335, 11504362, 11821404, 11654002).

† Corresponding author. E-mail: zq_zhou@ustc.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: cfl@ustc.edu.cn