多功能固态量子存储器取得新突破

周宗权, 李传锋*, 郭光灿

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

* 联系人, E-mail: cfli@ustc.edu.cn

New breakthrough of multifunctional solid state quantum memory

Zongquan Zhou, Chuanfeng Li* & Guangcan Guo

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

* Corresponding author, E-mail: cfli@ustc.edu.cn

doi: 10.1360/TB-2019-0245

由于不可克服的光纤传输损耗, 目前地面上的安全量子通信被限制在百千米量级. 如何实现千千米量级的长程量子通信是量子通信领域面临的重要难题之一. 目前物理上的解决方案有两种: 第一种是基于量子中继^[1], 利用短程的量子纠缠和量子存储器实现长程的量子纠缠, 再利用量子隐形传态等实现量子通信; 第二种是直接把量子信息存储到寿命超长的量子存储器^[2]中, 利用经典运输手段, 比如飞机、卡车和高铁等, 进行长途运输. 显然量子存储器是实现这两种长程量子通信方案的关键器件. 此外, 量子计算领域也需要高速的量子存储器(寄存器)来实现高速量子信息处理和线性光学量子计算等. 在此背景下, 我国于2014年启动了国家重大科研仪器设备研制专项“多功能固态量子存储器”, 项目由郭光灿院士负责, 中国科学技术大学承担. 经过5年艰苦努力, 本项目于2019年6月正式通过国家自然科学基金委员会验收, 研制的多功能固态量子存储器各项指标均达到或超过立项时的设计要求.

常见的量子存储器有热原子、冷原子、腔内单原子和稀土掺杂晶体. 稀土掺杂晶体具有性能稳定、易于扩展和加工等优点, 并且稀土离子的4f价电子被外层5s, 5p等电子屏蔽, 相干性保持得很好, 因此本项目选择利用稀土掺杂晶体研制多功能固态量子存储器. 利用原子频率梳技术^[3]实现存储过程, 这个技术与光学频率梳有些类似. 稀土离子的本征线宽只有10 kHz量级, 但是掺杂到晶体中后线宽会被晶体场非均匀展宽到几百MHz, 甚至THz. 利用光学烧孔的办法, 可以把稀土离子的下能级处理成等间隔的频率梳状结构. 当输入的光子脉冲被稀土离子吸收后, 由于自聚焦效应, 隔一段时间后光子脉冲会被释放出来, 存储时间反比于频率梳间距. 由于频率梳间距不可能小于稀土离子的本征线宽(10 kHz量级), 所以存储时间有限. 为了延

长存储时间, 需要另外一个下能级(通常寿命会很长, 目前的纪录是6 h). 当光子脉冲被吸收后, 利用一个 π 脉冲把稀土离子从上能级转到这个下能级上, 等到需要的时候再用另一个 π 脉冲把稀土离子转移到上能级, 然后继续自聚焦演化放出光子脉冲. 这样一个完整的原子频率梳存储过程, 存储时间取决于下能级的寿命, 原则上可以达到小时量级. 稀土元素共有17种, 原则上每种稀土离子都可以用来做量子存储. 常见的掺杂晶体有钒酸钇、硅酸钇等. 稀土掺杂晶体通常需要放在3 K以下的低温下, 0.1 T量级的磁场中工作. 根据价电子的配对情况, 稀土离子可以分为两种: 一种是Kramers离子, 有未配对电子. 如Er, Nd, Yb离子, 具有电子自旋, 一般具有较宽的存储带宽, 但是存储寿命受限于电子自旋与外场涨落的耦合. 另一种是非Kramers离子, 无未配对电子. 如Eu, Pr, Tm离子, 只有核自旋, 带宽一般受限于精细结构劈裂, 为10 MHz量级. 核自旋与环境耦合弱, 存储寿命较长. 根据稀土离子的分类, 研制的多功能固态量子存储器包括长寿命固态量子存储器和宽带固态量子存储器两部分(图1). 仪器结构主要包括围绕存储介质的光学系统、电学系统以及配套测试系统. 项目组重点突破了宽带量子存储、高保真量子存储及长寿命量子存储等关键技术. 经过持续优化改进, 所研制的多功能固态量子存储器存储寿命达2.067 ms(此前国际同行达到1.5 ms), 慢光传输速度达700 m/s, 存储带宽达1046 MHz, 存储保真度达99.8%(此前国际同行达到97.5%), 存储模式数达100个(此前国际同行达到64个), 匹配的光子对亮度达到3025光子对 s^{-1} (100 MHz) $^{-1}$. 各项技术指标均达到该领域国际一流水平.

依托该重大仪器, 项目组开展了一系列有国际影响力的实验研究: (1) 首次实现量子点发射的确定性单光子固

图 1 (网络版彩色)多功能固态量子存储器外观图. (a) 长寿命固态量子存储器. 存储寿命达 2.067 ms, 慢光传输速度达 700 m/s. (b) 宽带固态量子存储器. 存储带宽达 1046 MHz, 存储保真度达 99.8%, 存储模式数达 100 个, 匹配的光子对亮度达到 3025 光子对 s^{-1} (100 MHz) $^{-1}$

Figure 1 (Color online) Outside view of multi-functional solid state quantum memory. (a) Long-lived solid-state quantum memory. The storage time is 2.067 ms, the slowlight propagation speed is 700 m/s. (b) Wideband solid-state quantum memory. The storage bandwidth is 1046 MHz, the fidelity is 99.8%, the mode number is 100, and the brightness of matched photon pair is 3025 pairs s^{-1} (100 MHz) $^{-1}$

态量子存储器, 构建了基于两种异种固态系统的雏形量子网络^[4]; (2) 首次实现轨道角动量量子态以及高维纠缠态的固态量子存储^[5]; (3) 首次实现时间、空间、频率3个自由度并行复用的多功能固态量子存储, 并演示量子信息在不同模式间的变换^[6]; (4) 首次在毫米尺寸实现宏观实在性(Leggett-Garg不等式)的严格检验, 为解决薛定谔猫悖论

问题提供了新思路^[7].

该多功能固态量子存储器的成功研制, 对于可扩展大尺度量子网络构建提供了有力技术支撑, 其慢光功能也为研究量子力学与相对论的相容性等重要基础物理问题打下重要基础. 在此仪器基础上, 下一步将可以实现量子中继节点和量子加密优盘, 逐步推进长程量子通信的研究.

参考文献

- 1 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
- 2 Zhong M, Hedges M P, Ahlefeldt R L, et al. Optically addressable nuclear spins in a solid with a six-hour coherence time. *Nature*, 2015, 517: 177–180
- 3 de Riedmatten H, Afzelius M A, Staudt M U, et al. A solid-state light-matter interface at the single-photon level. *Nature*, 2008, 456: 773–777
- 4 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. *Nat Commun*, 2015, 6: 8652
- 5 Zhou Z Q, Hua Y L, Liu X, et al. Quantum storage of three-dimensional orbital-angular-momentum entanglement in a crystal. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 070502
- 6 Yang T S, Zhou Z Q, Hua Y L, et al. Multiplexed storage and real-time manipulation based on a multiple degree-of-freedom quantum memory. *Nat Commun*, 2018, 9: 3407
- 7 Zhou Z Q, Huelga S F, Li C F, et al. Experimental detection of quantum coherent evolution through the violation of Leggett-Garg-type inequalities. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 113002