

# 光量子存储

(清华大学 龙桂鲁、李涛 编译自 Mikael Afzelius, Nicolas Gisin, Hugues de Riedmatten. *Physics Today*, 2015, (12): 42)

光纤通信改变了人们感知信息的方式,人们可以充分利用网络获取或者交换信息。在量子领域,光纤内传输的单光子就是一种几乎理想的量子信息载体,它具有自由度多(包括极化、空间、相位和振幅等)、易探测、传输速度快、距离长、损耗低等优点。科学家们正致力于发展量子信息网络中的各类技术以便实现远距离加密传输、分布式量子计算以及量子感知等。为了实现这些远大目标,人们需要克服很多核心技术困难,包括紧凑的纠缠光子源、高效的单光子探测器和可操控频率、波形以及时空自由度的单光子传输设备等。此外,量子存储也是需要突破的核心技术之一,它可作为量子网络中的节点,暂时存储光子量子态,以便进行下一步的量子信息处理。

为了利用光量子存储技术同步量子网络中的各个通信节点,光量子存储需要满足如下条件:(1)存储时间需要与双方传输信息所需要时间相当。实际的量子网络中,节点间的距离可能是几百米到几百千米,对应的储存时间也由不到一微秒至十几毫秒不等。如果考虑复杂网络,则所需要的存储时间应达到秒的量级;(2)高效率,即存储成功的概率要尽可能高;(3)高保真度,即存储器读出的量子态要尽可能地与存储前的量子态相同。就目前而言,制备同时满足以上几点的量子存储装置仍然是非常

困难的。

## 光存储

利用光纤的延迟作用,配有光开关的光纤线圈可以作为短暂的光量子存储器。而此类存储器适用范围仅是微秒量级。当今,研究量子存储主要是基于量子态转移理论,即将动态光子的量子态转移到静态体系的激子态上。由此,量子存储的研究目标便演化成尽可能好地相干控制激子并避免其受到环境噪声的干扰。为此,物理学家们尝试了很多静态体系,如激光冷却的原子气和囚禁的单原子、粒子掺杂的晶体、半导体和光机械系统等。

量子存储器大致分为可读写量子存储、只写存储和只读存储三类。可读写量子存储,如图1(a)所示,它通过在强光控制(蓝色箭头)吸收单光子完成光量子态的写入,需要时,通过引入另一束读出激光恢复该光子。只写存储器吸收光子后,直接用于随后的信息处理而不再读取。只读存储器则利用强激光脉冲(蓝色箭头)激发静态系统产生一对纠缠的系统激子和单光子(绿色箭头),如图1(b)所示,并在随后的时间里将该激子转换成另一单光

子,最终得到一个纠缠光子对。该类只读存储器因结合了纠缠源和量子存储特性,在实现量子网络中具有非常重要的作用。

## 加强光与物质的相互作用

光与物质的相互作用强度决定了量子存储器的写入和读出的成功概率。虽然单原子是最理想的单光子量子存储器,但是其与光子的直接相互作用却极其微弱。增加单光子与原子之间的相互作用可以采用多种方式。其中一种是基于腔电动力学的理论,将单原子置于光学腔内,如图2(a)所示,利用两个腔镜对输入光子的数以万次的来回反射,可以显著增加原子对光子的吸收率,甚至实现单原子对单光子的确定性吸收。

另一种增加单光子与原子之间相互作用强度的方法是,利用原子系综与单光子相互作用时的集体激发效应,如图2(b)所示。当系综内

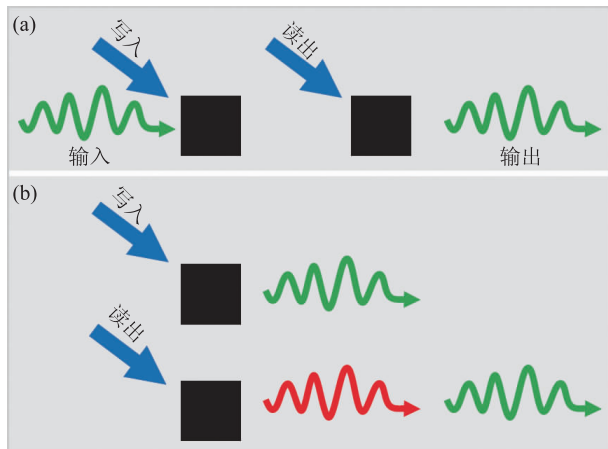


图1 量子存储器示意图

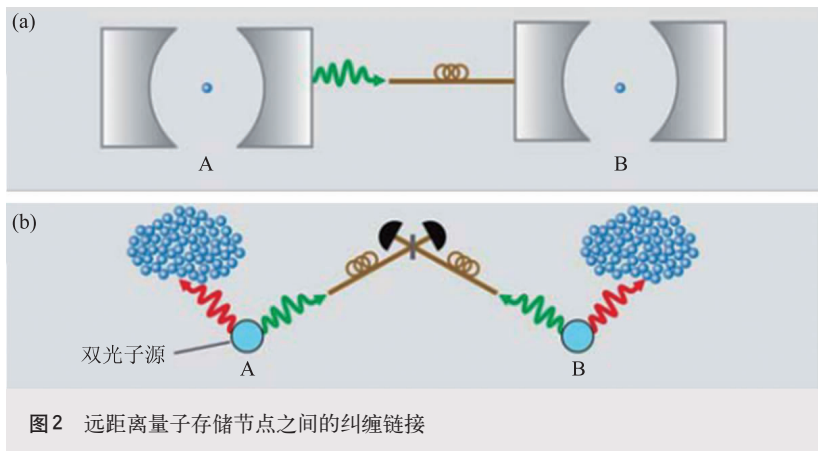


图2 远距离量子存储节点之间的纠缠链接

所有原子都处于基态，每个原子均有一定的概率吸收光子，共享产生的激子，形成一种集体叠加态。当光子的吸收过程可逆，且色散和退相位可以忽略时，该集体态可以重新转变成确定的单光子。此时，量子存储的读出效率可以由读出的光子强度与写入的光子强度比确定，且与原子系综内原子数目有关。目前，该类量子存储的存储效率可高达 80%，在这方面成就突出的有澳大利亚国立大学的 Buchler 小组，新竹清华大学的余怡德小组以及中国科技大学的潘建伟小组。

基于腔电动力学和集体激发效应的量子存储各有利弊。单原子的优点是，它可以与其他原子发生可控相互作用，进而实现原子间的逻辑量子门。同时，科学家已展示了具有预警功能的单原子存储器。以上两种性质可以赋予量子网络更加强大的功能。但是，囚禁单原子的技术以及制作高质量腔镜的技术复杂，储存在单原子上的量子态对环境的退相位也非常敏感，这就使得单原子存储器的应用受到了限制。而集体激发效应的量子存储对环境的退相位具有较强的鲁棒性，且可以同时存储多个光子，但其缺点是

很难实现基于系综的量子存储器间的可控相互作用。

#### 存储器寿命

光量子态通常存储在量子存储器的自旋叠加态上，该叠加态的保存时间可定义为相干时间。若自旋量子态对磁场敏感，则磁场的波动会引起自旋量子态退相位效应，消除体系的相干性。因此，科学家提出利用磁场不敏感的自旋跃迁，即原子钟跃迁来降低磁场波动对自旋的退相位效应。除此之外，利用动力学解耦将系统与环境隔离开的方法也能有效地消除磁场波动的影响。目前，只写量子存储和可读写量子存储的存储时间只有几个毫秒，而只读量子存储的存储时间可高达 100 ms，但只读量子存储的存储效率仅有 10%。尽管这些存储时间已经很接近可用的时间范围，有望在将来实现长距离量子网络，但是在同一量子存储设备中实现较长的存储时间和较高的存储效率仍是当今研究的重要课题。

#### 保真度

理想情况下，经量子存储器存储后读出光子的量子态应该与待存储光子的量子态完全相同。所以，我们可定义存储过程的保真度为输入态与输出态的重叠概率。若量子

存储器有效，则量子存储器的保真度必然高于任何经典存储器所能达到的最高保真度(量子比特在经典存储下的保真度上限是 2/3)。目前，很多小组已经展示了保真度高达 90% 的量子比特存储。

#### 量子网络

建立量子信息网络需要实现远距离量子存储节点之间的纠缠和信息交换。实现这一目标的基本要素是光子与量子存储器件之间的纠缠。因为光子可以将纠缠分发到量子网络中的各个节点，并利用光子纠缠转移或只写光存储来建立远距离节点间的关联，如图 2 所示。Kimble 小组和潘建伟小组首批实现了基于冷原子系综的单链接量子网络。当然，基于其他材料的量子网络也取得了十分令人瞩目的进展。

#### 展望

在过去的十年里，科学家们在量子存储的实现以及单光子层面光与物质相互作用的物理机制两个方面的研究都得到了飞跃式的发展。尽管实验达到的各个光存储参数(包括效率、寿命、保真度等)在单项上都已经接近实际应用所需的要求，但是成功构建一个同时满足各个参数的量子存储器仍然有很漫长的路要走。为了最终建立大尺度的量子网络，科学家们需要研发便于复制和链接光源的存储系统。固态系统较之原子气更加利于芯片集成并能通过波导链接节点。将来利用不同量子存储器之间形成的杂化系统来实现量子网络，也许是一个更加可行的方案。此外科学家努力研制量子存储器不仅是为了实际应用，而且也是为了研究像量子力学和经典力学的边界这样神秘而重要的基本科学问题。