

量子图像存储*

丁冬生 史保森[†]

(中国科学技术大学 中国科学院量子信息重点实验室 中国科学院量子信息与量子科技前沿卓越创新中心 合肥 230026)

2016-01-29收到

[†] email: drshi@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20160602

Storage of quantum images

DING Dong-Sheng SHI Bao-Sen[†]

(Key Laboratory of Quantum Information, Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 量子通讯的实现离不开量子存储器。量子存储器是一个能够按照需要存储和读出量子态的系统,而被存储的是非经典的量子态,如单光子、纠缠、压缩态等。多模存储能力是衡量量子存储器工作性能的一个重要指标。空间域的多模存储可以极大地减小对存储器存储时间的要求,因此空间多模存储引起了国内外学者的广泛关注,并在近几年取得了许多重要进展。文章简述了量子存储器的主要性质与评价指标,回顾了近年来量子存储的研究进程,特别介绍了量子图像存储方面的最新实验进展。

关键词 量子存储器, 量子图像存储, 量子中继

Abstract Quantum memories are indispensable for quantum communications. A quantum memory is able to realize the storage and retrieval of a quantum state, such as a single photon, entanglement, or a squeezed state, on demand. The ability to store multimode signals is an important property for a quantum memory. It is shown that a high spatial multimode capacity can significantly reduce the time required to store a quantum state, therefore the storage of spatial multimode signals has attracted wide attention worldwide and much progress has been achieved in recent years. In this paper we briefly introduce the main benchmarks for quantum memories and review the current state-of-the-art, in particular the latest experimental achievements in the storage of quantum images.

Keywords quantum memory, quantum image storage, quantum repeater

1 引言

量子力学与信息学的巧妙结合产生了一门新的交叉学科——量子信息学,它涵盖了量子通信、量子计算和量子测量学等诸多领域。利用量子力学的基本性质,如叠加性、纠缠性、非局域

性和不可克隆性等,量子信息技术可以突破现代信息技术的物理极限,开展经典信息技术无法实现的信息交流和计算方式,如理论上绝对安全的量子密钥分配,基于量子并行算法的大数因子分解或复杂量子系统的模拟,量子纠缠交换,量子隐形传态等。量子信息技术代表了未来信息技术发展的战略性方向,因而从它诞生时起就成为世界各国关注的研究焦点。

* 国家自然科学基金(批准号: 11174271, 61275115, 61435011)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2011CBA00200)资助项目

信息学是研究信息的处理、传输和存储的一门学科,同样量子信息学是研究量子信息的处理、传输及存储。现有的经典信息以比特(bit)作为信息单元,代表等概率的符号“0”和“1”中每一个符号携带的信息量。从物理角度讲,“0”和“1”可以由不同的物理体系来表示,如电压的高低、脉冲的强弱等。特点是一个经典的二进制比特在某个时刻只能处在一种可能的状态,即要么“0”,要么“1”。量子信息单元称为量子比特(qubit),一般来说它是两个基态的叠加, $|\psi\rangle = c_1|0\rangle + c_2|1\rangle$, $|c_1|^2 + |c_2|^2 = 1$, 经典比特可以看成为量子比特的特例($c_1=0$ 或 $c_2=0$)。量子态区别于经典态的最重要的性质就是它的相干叠加性。

量子信息技术的实现离不开一个关键器件:量子存储器。广义上说,量子存储器是一个能够按照需要存储和读出量子态的系统。如果量子态的制备或操控可以通过处于可见或近红外波段的光子实现,则这个量子存储器通常被称为光量子存储器。一个光量子存储器必须能够存储各种非经典态,比如单光子态、纠缠态或压缩态等。相对于量子存储器,一个经典存储器则通过测量和复制(measure-and-reproduction)步骤存储量子态:首先测量待保存的量子态,而后根据测量结果重构量子态。但是由于测量过程不可避免地造成态塌缩,改变了初始的量子态,因而经典存储器只能用于存储一组正交量子态。反观量子存储器,由于没有使用测量手段,因此存储过程不会对初始态产生任何影响,因而原则上可以存储一个任意量子态。

量子存储器是量子信息处理技术中不可或缺的一个关键器件。在目前最成熟、最接近实用化的量子信息处理应用——量子密钥分配中,传输信道中存在的不可避免的损耗和噪声使得信号强度随传输距离呈现e指数的衰减,严重地制约了量子态传输的距离。比如在光纤通信系统中,即使作为信息载体的光子波长处于光纤通信窗口1.5 μm左右,传输损耗只有0.2 dB/km左右,若密钥需要传输的距离为1000 km,初始密钥的产生率为1 GHz,则在通信双方之间直接传输时密钥

成功发送的几率仅为 10^{-10} Hz,也就是说,每3000年才能成功传输一个比特密钥,这显然是不现实的。在自由空间通信系统中,通信距离受限于视距和天气情况,这些因素在一定程度上可以通过建立卫星和地面站克服。但是如果密钥分配中的测量过程需要在卫星上完成,则密钥分配过程需要有第三方的参与,这无疑增加了密钥泄露的几率,降低了密钥分配的安全性。为了克服信道传输损耗和杜绝第三方泄露信息的可能性,人们需要借助于量子中继技术^[1],而其中的关键器件就是量子存储器。借助于量子存储器,采用量子中继技术,可以使信号随传输距离的衰减由e指数形式变为多项式形式,大幅度提高通信效率。同样,若密钥传输的距离为1000 km,初始密钥的产生率为1 GHz,通过采用适当的量子中继方案,可以使密钥成功传输的效率提高到Hz量级^[2]。除此之外,在基于线性光学的量子计算中^[3],量子存储器用于同步不同比特之间的时间,提高量子逻辑门成功的概率^[4];量子存储器还可以用于精密测量^[5]和单光子探测^[6];同时,实现量子存储时涉及到的光与物质之间的相互作用本身就是基础物理研究领域中的一个热点问题^[7]。

2 评价指标

评价一个量子存储器性能的主要指标有:(1)保真度。即读出态和输入态之间的交叠程度,它是判定存储器是否为量子存储器的一个主要判据。只有一个存储器的保真度大于一个经典存储器的最大保真度时,我们才能说这个存储器可以工作在量子区域,或者说这个存储器是量子存储器。比如量子信息编码在一个单光子上,只有存储器的保真度大于2/3时我们才能说这个存储器可以工作在量子区域^[8];对于平均光子数为1的弱相干态而言,这个保真度的界限为71%^[9];如果存储的是纠缠态,则最小的保真度界限是85.4%^[9]。(2)存储效率。简单讲,存储效率为输出和输入脉冲之间的能量比。对单光子存储而言,效率指的

是从存储器读出光子的几率。只有存储效率大于90%时,才能利用量子中继技术实现量子信息的长距离传输^[10],低于这个界限则利用量子中继传输,相比于直接传输没有任何优势。存储效率对信息的传输率有很大影响,理论分析发现,效率提高1%,可以使信息的传输率提高7%—18%^[10]。如果利用纠错编码,即使效率低于50%的存储器仍然可以用于量子计算中^[11]。(3)存储带宽。它决定了存储器可以存储脉冲的最小时间宽度。短脉冲的存储可以提高信息处理的重复率,对量子计算尤为有利。(4)工作波段。实用化的存储器应该工作于低损耗的通信窗口。(5)存储时间。它是衡量一个存储器丢失所存信息的时间。对于量子中继通信的建立而言,一个存储器需要存储量子态的时间应大于通信双方通过中继器建立纠缠的时间,而这个时间与所采用的中继方案有关^[10],中继方案不同,存储器需要存储量子态的时间不同。(6)多模存储能力。它决定了在一个存储器中一次存储多个不同模式信号的能力,这些模式可以是时间、空间或频率域的。除了可以大幅度提高量子通信的重复率和效率外,多模存储还可以提高量子中继的工作效率。例如利用多模存储,采用量子中继方案,可以将存储器的存储时间要求从单模存储时的几百秒降低到秒量级(光子波长1.5 μm,光子脉冲重复率10 GHz,距离800 km)^[10]。除了以上主要指标以外,存储器的工作条件、经济价格等也是衡量一个存储器的重要指标。

3 存储介质

量子存储器的实现离不开存储介质,一个理想的存储介质应该具备以下特点:(1)较高的光学厚度,这可以使光信号与存储介质之间产生较强的相互作用,获得较高的存储效率;(2)较长的消相干时间,这可以使量子态保存较长的时间。常用的存储介质有原子系综和单原子体系两种。由于原子系综中的原子密度较大,因而具有较高的光学厚度。原子系综包括各种碱金属元素构成的冷原子系综、热原子系综和掺杂稀土元素的晶体

材料。冷原子系综主要通过激光冷却与囚禁技术获得,技术比较成熟,易于操控,可以利用电磁诱导透明效应(EIT)^[12]和远程量子中继(DLCZ)方案^[13]存储光信号。由于原子温度低,运动速度小,因而由原子之间的碰撞和原子扩散引起的消相干效应弱。基于冷原子的量子存储器具有高效率、高保真度、长存储时间等优点,其主要的限制是存储带宽较小,多模存储能力较弱。热原子系综体系简单、易于实现,但由于原子运动速度大,因而具有较大的非均匀展宽,原子运动和碰撞引起的消相干效应较强。热原子体系除了可以利用EIT和DLCZ方案实现存储外,也可以利用远失谐实现Raman存储^[14],还可以利用梯度回波技术实现存储^[15]。基于掺杂稀土元素的晶体材料具有较长的消相干时间和大的非均匀展宽特性,因而可以获得长的存储时间和实现多模存储功能^[16],缺点是光学厚度较小,需要低温设备。主要的存储方案有可控的非均匀展宽(CRIB)^[17]和原子频率梳^[18],也可以利用EIT效应实现存储。单原子体系主要利用单个原子实现单光子的存储。由于单原子的碰撞截面较小,为了提高单光子与单原子之间的相互作用强度,一般将原子置于腔内,通过谐振方式增加光子与原子之间碰撞的几率^[19]。金刚石中的氮空穴(NV)色心也可以实现光存储^[20],室温工作条件是它的一大优点。不同的存储介质和不同的存储方法具有各自的优缺点,单一指标都比较容易达到应用的要求,但综合指标难以面面俱到,因此在实际实现中利用何种介质,采用何种方案,可根据具体的应用目的和要求灵活决定。

4 空间图像存储

如前所述,多模存储能力是量子存储器的一个重要参数。理论研究表明,时间域内的多模存储可以大幅度提高量子中继过程中纠缠分配的速率^[18],同时空间域的多模存储可以极大地减小对存储器存储时间的要求^[21, 22],因此多模存储引起了国内外学者的广泛关注,并在近几年取得了许多重要进展^[23—36]。本文主要介绍空间多模的存储

研究进展。近年来,空间多模存储被高度关注的另一个主要原因是,具有特殊空间多模结构、携带轨道角动量的光场在量子信息领域具有重要应用前景,这是因为利用携带轨道角动量的光束能够实现高维编码,可以大幅度提高光子携带的信息量,提高信息传输和处理速率。

光子的轨道角动量产生于电磁波的螺旋相位面,最常见的携带轨道角动量的光是Laguerre—Gaussian (LG)模式光。1992年,Allen等人观察到处于不同LG模式的光子携带不同的轨道角动量^[37]。这种光的波前是一个螺旋面,如图1所示,因此也有人称其为光学漩涡(optical vortex)。围绕中心的奇点,光的位相是不断增加的,同时这种光束光强也具有特殊的空间分布。在柱坐标系下,归一化的LG模光的电场分布为

$$LG_p^l(r, \varphi, x) = \frac{\sqrt{2p!}}{\pi^{1/2} (|l|+p)!} \frac{1}{w(x)} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w(x)} \right)^{|l|} \cdot L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{w^2(x)} \right) \exp \left(-\frac{r^2}{w^2(x)} \right) \exp \left(ik \frac{r^2}{2R(x)} \right) \cdot \exp \left(-i[2p+|l|+1]\zeta(x) \right) \exp(-i\alpha) .$$

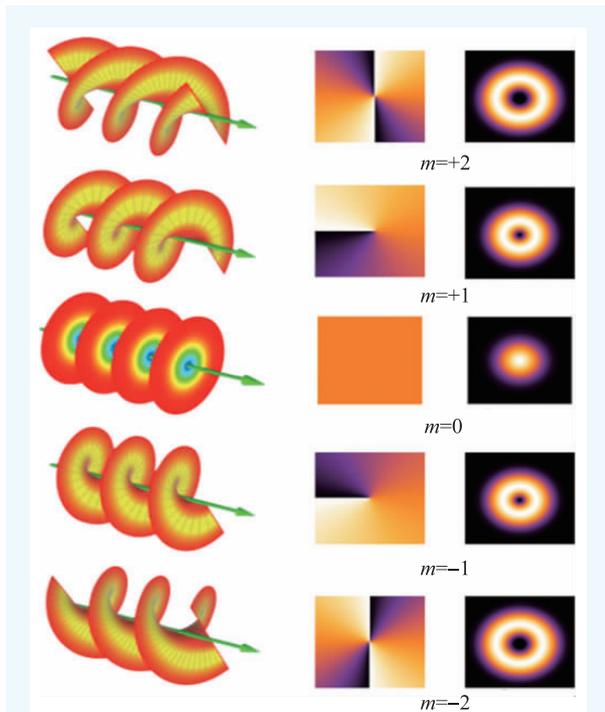


图1 携带轨道角动量的光其波前具有螺旋结构(左边和中间一栏),光强分布呈现圆环状(右边一栏)。不同阶数的轨道角动量态是正交的(所有的图均引自维基百科)

其中 $L_p^{|l|}$ 是Laguerre多项式, $|l|$ 为轨道角动量子数 l 的绝对值, l 的正负代表相位螺旋的方向, p 与光在径向的节点数相关($p+|l|$ 则表示光在径向的节点数目), i 为虚数。不同的轨道角动量对应着不同的光强空间分布(见图1),可以构成一个无限维的完备的Hilbert空间。如果能将光子编码在轨道角动量空间,若 d 是该Hilbert空间正交基矢的数目,则单个光子所能携带的信息量可由一个比特提高到 $\log_2 d$ 个比特。信息携带量增加,在通信速率不变的条件下可以大幅度提高信息传输速率。2012年, *Nature Photonics* 杂志^[38]报道了通过将光脉冲编码于轨道角动量空间的方式成功地实现了THz比特的信息传输率,引起了学术界的高度关注,目前利用该编码方式已将信息传输率提高到100 THz比特^[39]。在量子通信中,如果能够存储高维编码的光子态,实现量子纠缠交换,则可以建立高维量子中继,构建大信息量的量子通信网络。此外,在基于高维编码的量子密码中,密钥分配对误码率的容忍度随维数的增加而提高,因而可以实现安全性更高的密钥传输^[40],还可以实现诸如量子全息隐形态^[41]、量子镜像密集编码^[42]、全息量子计算^[43]等与二维编码不同的量子信息协议。此外,在量子力学的基础研究中,基于高维编码态的量子预言与经典预言之间的区别更加直接、明了,对噪声的抗干扰能力更强^[44];对EPR佯谬检验中探测器效率的要求更低^[45],等等。因而基于高维编码的量子信息和量子力学基本问题的研究是当前量子信息领域的一个研究热点。

空间多模的研究首先是从如何存储图像信息开始的:2007年,以色列魏兹曼科学研究所的Davidson小组^[25]通过EIT效应,在Rb原子蒸汽池中实现了具有空间结构、携带轨道角动量信息的光信号存储,并研究了原子的热运动引起的消相干效应所导致的图像模糊现象。随后,巴西Cidade大学的Tabosa小组利用EIT效应,实现了携带两个不同轨道角动量叠加信息的强光信号在铯冷原子系综中的存储^[26],同时他们还观测到存储过程中由于磁场的存在而产生的拉莫尔进动现象。

2008年,美国罗切斯特大学的Howell小组^[27],在Rb热原子系综中利用EIT效应和四波混频过程,实现了携带五缝结构的光信号存储,并讨论了如何消除原子热运动引起的扩散效应对图像存储质量的影响。同年,以色列魏兹曼科学研究所的Davidson小组^[28]在Rb蒸汽池中利用EIT效应,实现了携带数字结构光信号的存储,并通过存储携带三缝结构的光信号,研究了如何消除热运动引起的扩散效应对图像质量的影响。我们小组从2012年开始关注图像存储问题,开展了这方面的研究工作,利用EIT和四波混频效应,实现了携带空间特殊结构的光脉冲在冷原子系综中的存储^[29-31]。法国居里大学的Laurat小组也利用冷原子系综开展了存储携带轨道角动量光信号的实验研究^[32],利用EIT效应实现了携带轨道角动量的信号光在冷原子体系中的存储与读取。澳大利亚国立大学的Lam小组利用梯度回波技术实现了携带图像信息的光脉冲在热原子系综中的存储^[15]。在固态存储体系中也有图像信号存储的研究报道:德国Darmstadt技术大学的Halfmann小组利用冷却到4 K的 $\text{Pr}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体,采用EIT效应,实现了携带数字结构的光信号存储^[34],并在2013年将存储时间提高到1分钟^[36]。从2012年起,人们开始关注多个携带图像光信号的存储:美国国家标准技术研究所(NIST)的科研人员在热原子系综中,利用梯度回波技术实现了携带两幅不同空间图像的两个光脉冲序列的存储^[24],并且可以按照不同顺序读取存储信息,成功地模拟了存储微电影的功能,引起了学术界和媒体的广泛关注。我们小组也开展了多个空间图像的存储实验研究,基于EIT效应分别通过复用

角度和频率自由度的方法实现了两束携带空间信息的光束在一个原子团内的存储,并且证明图像相互之间不存在串扰^[29, 30]。2013年,美国NIST的科研人员利用空间复用的方法,采用梯度回波技术,实现了多个图像在热原子系综中的存储,并且实现了对每幅图像的独立存储与读出控制^[35]。

尽管近年来国际上已有很多小组分别实现了携带轨道角动量或者是特殊空间结构的光脉冲在不同物理体系下的存储^[25-36],但是在2013年以前所有的实验所使用的携带信息的光脉冲均为强光或衰减的相干光,没有任何携带空间信息的真实单光子在任何物理体系中的存储报道,换句话说,能否实现一个量子图像的存储依然是量子信息领域中一个没有解决的热点问题。

5 量子图像存储

从2012年开始,我们小组关注并致力于量子图像存储研究。首先我们利用二维磁光阱(MOT),通过激光冷却与囚禁技术,成功地制备了雪茄形、

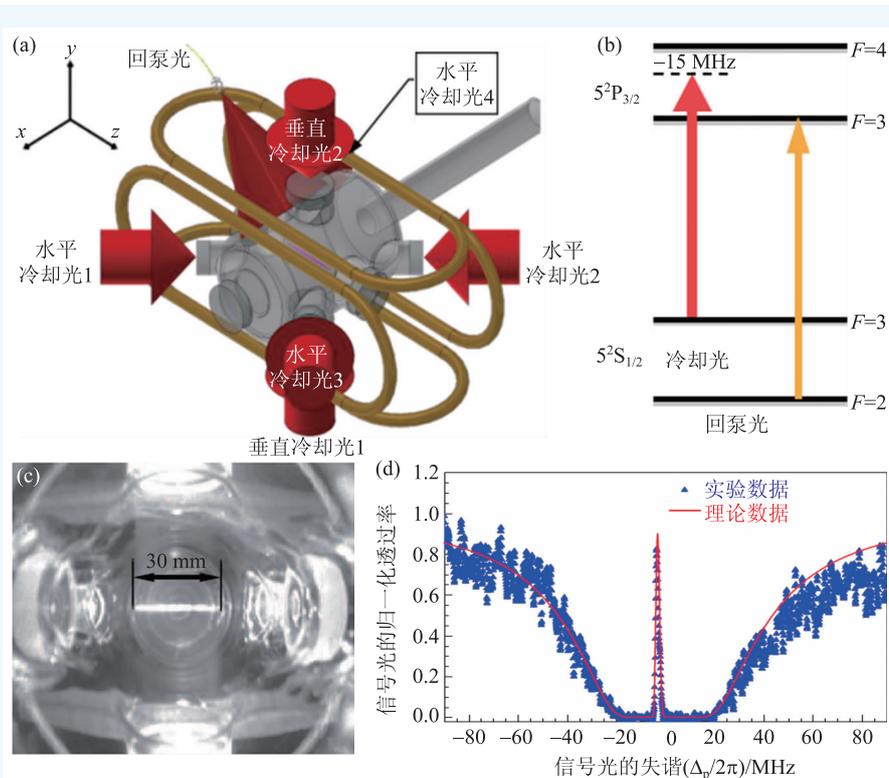


图2 (a)磁光阱系统简图;(b)激光冷却和囚禁利用的Rb原子简化能级图;(c)CCD相机拍摄的囚禁原子荧光图;(d)电磁诱导透明效应(EIT)光谱

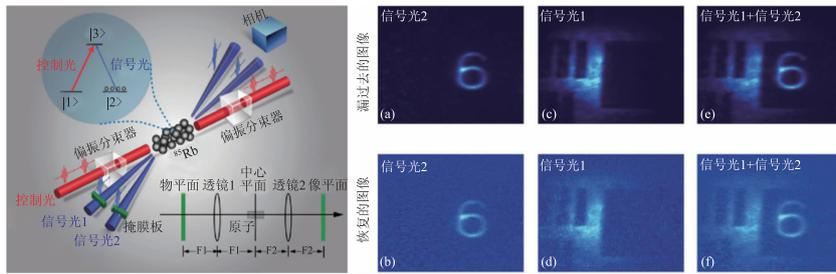


图3 左图为存储两束携带不同图像时的实验装置简图(F1和F2为透镜焦距);右图(a)和(b),(c)和(d),(e)和(f)分别表示存储过程中分别输入信号光1、信号光2和信号光1和2同时输入时的泄漏部分和存储后恢复出来的图像

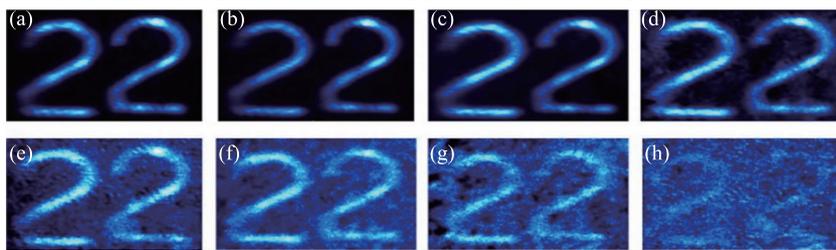


图4 存储过程中低平均光子数脉冲输入时的恢复图像。在每一张组图(例如(a))中,左图对应信号光1,右图对应信号光2。图(a)到图(h)分别对应的每个脉冲平均光子数为305,162,80,40,22,10,5.3和1.2个。所有记录的图像均减去了背景噪声,单光子阵列CCD曝光时间设置为1s

几何尺寸为 $30 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ 的 ^{85}Rb 冷原子团,并将其作为存储介质。原子团的厚度为 $38^{[46]}$ (见图2)。随后我们利用Rb原子的Lambda能级结构,通过EIT效应,成功地实现了携带具有数字空间结构的光脉冲在冷原子系综中的存储与读取,同时利用角度自由度,实现了两束携带不同空间信息的光束在一个原子团内的同时存储(见图3)。之后我们通过强烈衰减信号光获取伪单光子,实现了近单光子条件下具有空间结构光脉冲的存储 $^{[29]}$ (见图4)。2013年,我们利用EIT效应首次成功地实现了携带轨道角动量、具有空间结构的真实单光子脉冲在冷原子团中的存储与释放,证明了量子图像存储是完全可行的 $^{[47]}$ 。紧接着,法国居里大学的Laurat小组利用强烈衰减的相干光作为伪单光子,利用EIT效应,也实现了携带角动量信息的存储 $^{[48]}$,进一步证明了量子图像存储的可行性。下面我们主要介绍一下这两个突破性进展的工作。

我们实验的基本流程是:通过两个磁光阱分

别制备两个冷原子团,将其中一个冷原子团作为非线性介质,通过非线性过程制备标记单光子,并通过螺旋相位片使该标记单光子携带一定的轨道角动量、具有特殊的空间结构,而后利用EIT效应将其存储于另一个作为存储介质的冷原子团中。实验框架简图如图5所示,由标记单光子制备和存储两部分构成。实验过程分为以下几个步骤:(1)冷原子团的制备。实验制备的两个冷原子团均为雪茄形,其中一个冷原子团作为非线性介质。我们利用Rb原子的双Lambda能级结构,通过非简并自发四波混频效应制备了具有非经典关联的光子对(见图5

(a)),并将其中一个光子作为触发信号标记另一个光子。另一个原子团作为存储介质实现对标记单光子的存储(见图5(b));(2)单光子的存储。这部分试验包括两个步骤:首先研究了不携带空间信息的标记单光子存储(见图6),并通过判定Cauchy—Schwarz不等式是否被违反来检验存储过程中触发光子和标记光子之间的非经典关联是否仍然保持 $^{[49]}$ 。对于一个经典态, $R = \frac{[g_{s1, s2}(\tau)]^2}{g_{s1, s1}(0)g_{s2, s2}(0)} \leq 1$,其中 $g_{s1, s2}(\tau)$, $g_{s1, s1}(0)$ 和 $g_{s2, s2}(0)$ 分别为光子之间归一化的交叉关联和自关联函数,下标s1,s2分别表示信号光1和2。实验发现经过一定时间的存储后得到的Cauchy—Schwarz不等式因子R仍然远大于1,证明了光子对之间的非经典关联经过存储过程后仍然保持。随后我们通过Hanbury—Brown和Twiss实验检验存储过程中标记单光子的单光子特性是否保持不变 $^{[49]}$ 。实验得到存储后的反关联函数 $\alpha=0.32 < 0.5$,证明了存储过程中单光子特性保持不变。(存储前 $\alpha =$

0.025。对于一个纯的单光子态, $\alpha=0$; 对应一个双光子态, $\alpha=0.5$; 对于一个经典光场, $\alpha \geq 1$ 。)而后利用精心设计的 Sagnac 干涉仪(见图 7(a))制备了单光子任意偏振态并进行存储, 通过量子层析技术和干涉技术研究单光子偏振态的存储, 根据实验结果重构了光子偏振存储过程的密度矩阵, 并根据密度矩阵计算了存储保真度。对四个不同的单光子偏振态(电磁波振动方向), 水平(H)、垂直(V)、右旋($R=2^{-1/2}(H+iV)$)、对角($D=2^{-1/2}(H+V)$)分别得到 0.94、0.96、0.98、0.96 的高存储保真度(见图 7(b)); (3) 量子图像存储。我们通过螺旋位相片使标记单光子携带轨道角动量 $1\hbar$, 使其具有特殊的空间结构(donut 形状, 见图 8), 然后利用 EIT 效应将其存储于原子团中。空间结构是否能保持, 可通过比较存储前后图像的相似程度

$$R = \frac{\sum_m \sum_n A_{mn} B_{mn}}{\sqrt{\left(\sum_m \sum_n A_{mn}^2\right) \left(\sum_m \sum_n B_{mn}^2\right)}}$$

的值来判定(A 和 B 是两幅需要比较图像的灰度矩阵)^[24]。实验得到的相似度 R 的值为 0.996, 清楚地证明了单光子携带的轨道角动量可以被高保真地存储(见图 8); (4) 量子图像叠加的存储。借助于精心设计的 Sagnac 干涉仪, 我们使标记单光子携带了轨道角动量的叠加态 $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(e^{-i2\theta}|-l\rangle + ie^{i2\theta}|l\rangle)$, 其中 θ 是实验装置中一个 1/2 波片

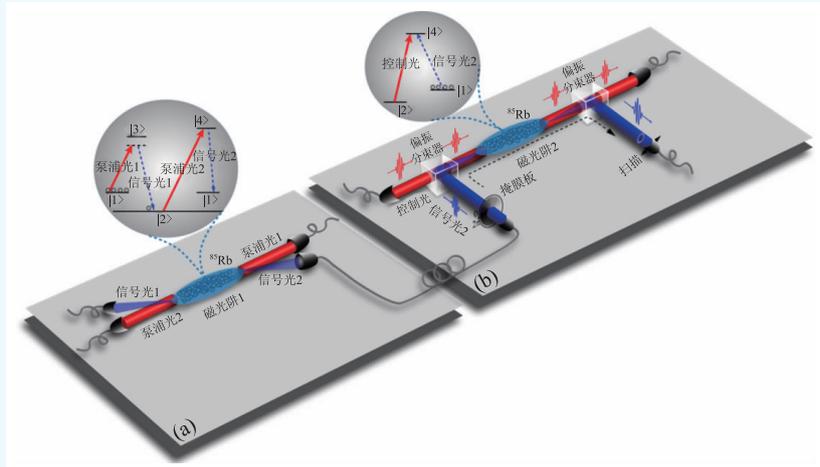


图5 (a)基于自发四波混频效应制备非经典光子对的实验装置简图; (b)单光子存储实验框架图

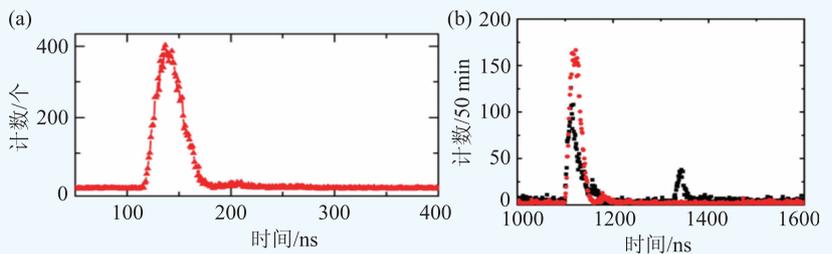


图6 (a)磁光阱1中制备的信号光子和触发光子的互关联计数; (b)在磁光阱2中经过存储后信号光子和触发光子的互关联计数, 其中左边峰(黑色)表示泄露信号光子与触发光子之间的互关联, 右边峰代表存储后的互关联, 红色为输入信号

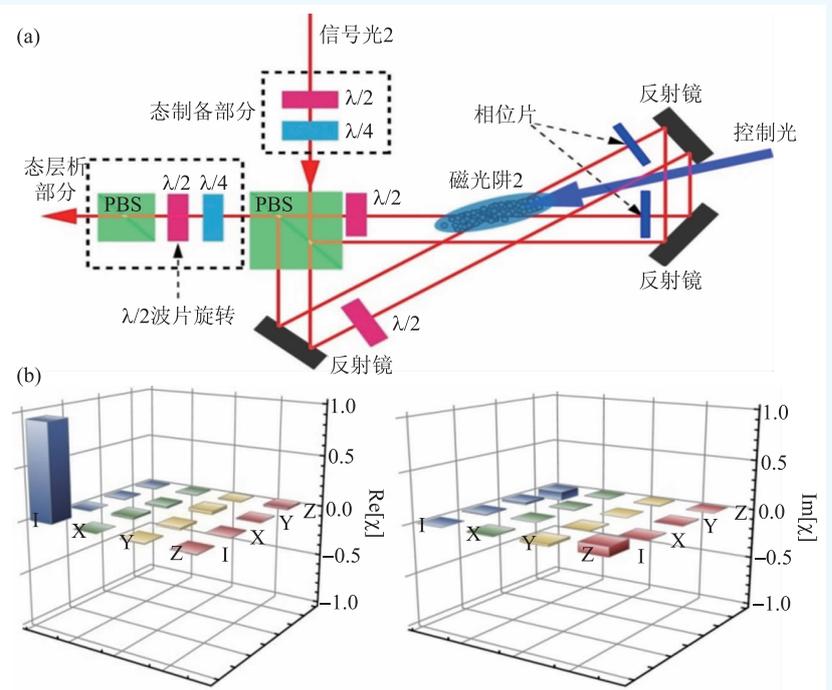


图7 (a)存储任意偏振单光子的实验框架简图(其中PBS为偏振分束器); (b)利用量子层析术并根据实验数据计算得到的存储过程密度矩阵 χ 的实部 Re 和虚部 Im

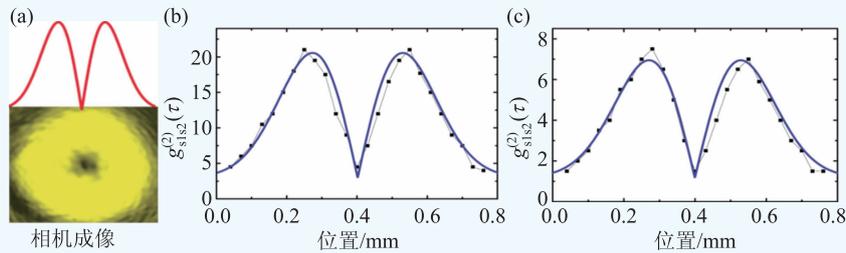


图8 (a)信号光穿过螺旋相位片后的空间轮廓；(b)空间横向扫描输入信号光子时与触发光子的互关联(纵坐标 g 是双光子关联函数值, g 下标分别表示信号光1和2, 上标代表双光子二阶关联)；(c)经过存储后恢复的信号光子和触发光子的互关联。图中的实线是理论模拟

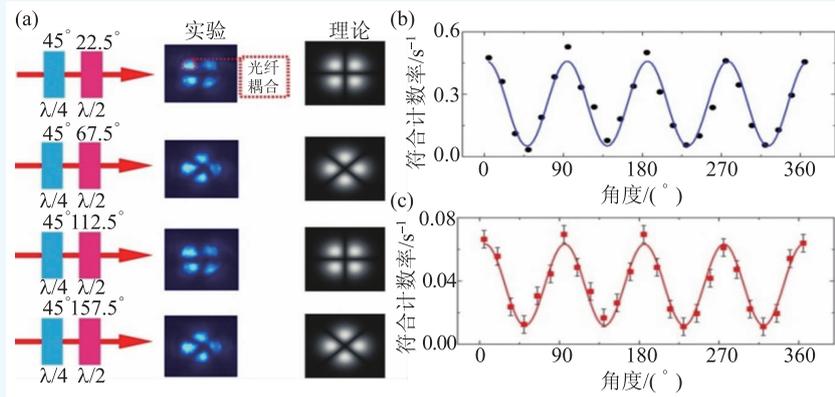


图9 (a)强轨道角动量叠加信号光输入时1/2波片的角度与干涉图像之间的关系图；(b)和(c)表示单光子条件下一个干涉花瓣内信号光子的强度随1/2波片角度变化的图像, 其中(b)表示存储前, (c)表示存储后, 蓝色和红色的实线是正弦函数拟合的结果, 背景噪声已经被去除

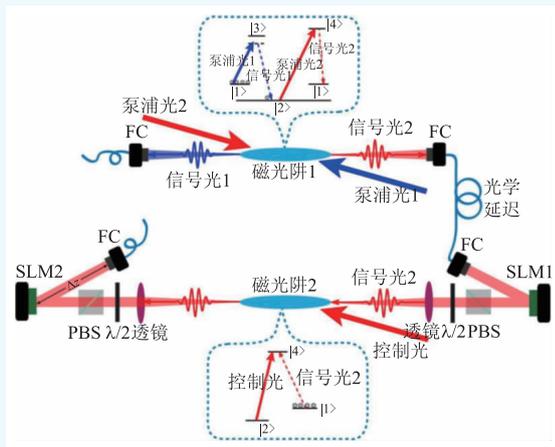


图10 存储一个三维单光子叠加态的实验框架图(PBS为偏振分束器, FC为光纤耦合头, SLM为空间光调制器)

的角度, 此时轨道角动量 $l=2$ 。叠加性可以通过旋转 θ 改变干涉图像的方法加以证明。实验结果显示出于干涉图像随角度 θ 的变化而变化, 清晰地证明了单光子轨道角动量的叠加性也可以在存储

过程中很好地保持(见图9)。而态的叠加特性是量子信息之所以不同于经典信息的根本之处。

这项工作的主要成果可以归纳如下: 我们证明了在存储过程中, 光子有如下特性: (1)光子之间的非经典关联可以保持; (2)单光子特性保持不变; (3)光子所携带的空间结构保持不变; (4)单光子的相干性保持不变。这项工作的研究成果在学术界引起广泛关注: MIT的Technology Review网站以《第一个存储单光子形状的量子存储器在中国揭开面纱》为题进行了积极评价^[50], 随后多家网站进行了转载和评述。同时该成果也被*Nature Photonics*以标题“Spatial memory”作为Research Highlights重点推荐^[51]。

在我们的研究成果发表之后, 法国居里大学的Laurat小组报道了与我们类似的工作^[48]: 他们利用强衰减的相干光模拟真实单光子, 利用SLM使伪单光子携带轨道角动量并具有特殊的空间结构, 而后利用EIT效应在冷原子系统中实现了轨道角动量的存储, 并且通过量子层析技术重构了密度矩阵, 验证了叠加性在存储过程中保持不变。

尽管在上述工作中^[47, 48]实现了携带轨道角动量并具有空间结构的单光子存储, 但从信息编码的角度来说光子仍然被编码于二维空间, 没有充分利用轨道角动量可构成高维编码空间的特性, 因而能否真正利用轨道角动量自由度实现一个高维量子态的存储仍然是一个没有解决的难题, 也是我们下一个关注的问题。随后, 我们通过SLM将光子编码于一个轨道角动量构成的三维空间中

(该空间由轨道角动量为 $-\hbar$, 0 , $+\hbar$ 构成), 以存储一个编码于三维空间的单光子态为例开展了这方面的研究(见图 10): 我们将存储过程看成为一个量子处理过程, 通过量子过程层析技术成功地重构了存储三维量子态过程的密度矩阵^[52], 并通过该矩阵计算了存储过程的保真度为 85%(见图 11)。进一步我们考虑了两个特殊的三维单光子态 $|\Psi_1\rangle = (|L\rangle + |G\rangle + |R\rangle)/3^{1/2}$ 和 $|\Psi_2\rangle = (|L\rangle - |G\rangle + |R\rangle)/3^{1/2}$ 的存储(其中 $|L\rangle$, $|G\rangle$ 和 $|R\rangle$ 分别代表光子携带的轨道角动量, 其值分别为 $-\hbar$, 0 , $+\hbar$)。我们利用 EIT 效应分别存储了这两个三维态, 重构了密度矩阵, 并计算得到了相应的保真度分别为 77% 和 80%(见图 12)。实验结果初步证明了存储一个编码于三维空间的单光子态是完全可行的^[52]。

6 下一步需要探索和研究的问题

尽管人们在量子图像存储和基于高维编码的量子信息领域已取得了许多重要研究进展, 但总体而言, 该领域的研究仍处于初始阶段, 尤其是高维编码态的量子存储方面依然处于起步阶段, 仍然存在大量的基本问题需要进行深入探索和研究, 比如说一个存储体系能够存储的单光子所能携带的最大轨道角动量量子数是多少, 存储保真度、存储时间等与实验条件和参数的关系等。由于一个存储体系实际能够存储的光子轨道角动量量子数的大小决定了一个光子能够被编码

的空间维数, 决定了一个光子能够携带的信息量大小, 因而以上问题的研究对构建高维网络系统具有重要指导意义。除此之外, 能否实现轨道角动量纠缠态的存储、轨道角动量纠缠态之间的纠缠交换等一系列问题也无任何相关报道, 而这些问题是实现高维量子中继, 进而构建大信息量量子网络的基础和关键。最近我们已成功地实现了光子轨道角动量两维纠缠的量子存储^[53], 并进一步将存储量子纠缠的维数提高到 7 维^[54], 迈出了高维纠缠存储的关键一步。此外另一个需要关注的问题是, 在大信息量量子通信网中, 光子主要在自由空间传输。为了减小传输损耗, 光子的波长必须处于大气窗口。目前常用的大气窗口在

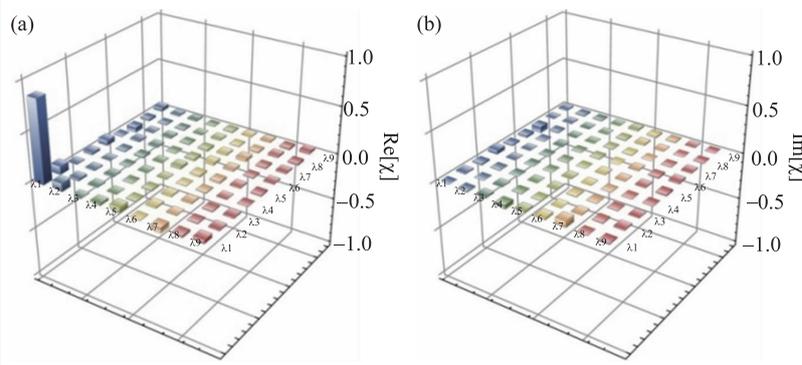


图 11 重构量子存储过程的密度矩阵, 分别是密度矩阵 χ 的实部(a)和虚部(b)

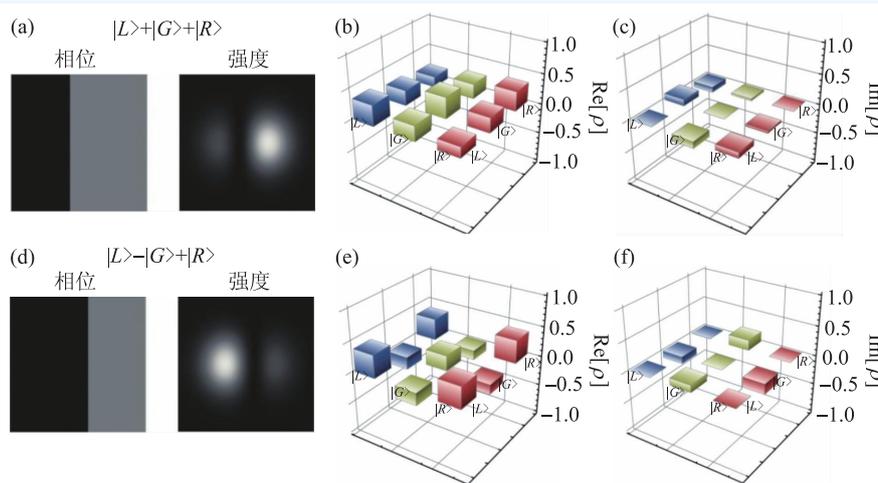


图 12 (a)三维光子态 $|\Psi_1\rangle = (|L\rangle + |G\rangle + |R\rangle)/3^{1/2}$ 的相位(左)和强度(右)分布; (b)和(c)分别是经过存储后重构的三维态 $|\Psi_1\rangle$ 的密度矩阵 ρ 的实部(Re)和虚部(Im); (d), (e), (f)分别对应三维光子态 $|\Psi_2\rangle = (|L\rangle - |G\rangle + |R\rangle)/3^{1/2}$ 的实验结果

800 nm 波段左右。由于有些存储体系(如 Na 原子系统或 $^{151}\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ 晶体等), 其原子特征波长并不处于大气窗口, 因此需要在原子特征波长和大气窗口之间实现光子频率转换, 以满足信息既可实现存储又能长距离传输的要求。在图像频率变换领域, 我们已开展了一系列研究, 并取得了一些进展: 利用热原子系综作为非线性介质, 通过四波混频效应, 实现了携带角动量信息或空间结构信息的光脉冲在红外波段和可见波段之间的频率转换, 并证明了变换过程的线性关系^[55-57], 主要结果在 Technology Review 网站以 *Chinese physicists demonstrate a practical system for converting infrared images directly into visible ones* 为题发表

评论^[58], 同时在很多网站转载或发表评论。我们最近首次利用周期性晶体实现了携带轨道角动量光脉冲(轨道角动量量子数 $l=100\hbar$)的二次谐波过程(795 nm—397.5 nm), 证明了轨道角动量在转换过程中的守恒性, 给出了二次谐波实验过程详细的理论描述, 且理论预测和实验结果完全吻合^[59], 同时我们也通过和频过程实现了携带角动量信息的 795 nm 光到 532 nm 光的转换^[60]。最近我们已成功地实现了携带轨道角动量单光子的频率上转换^[61], 下一步将开展轨道角动量纠缠态的频率变换研究。我们认为, 只有以上问题得到解决之后, 量子图像存储和高维量子中继才能真正应用于实践中。

参考文献

- [1] Briegel H J, Dür J W, Cirac J I *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 81: 5932
- [2] Sangouard N, Simon C, Zhao B *et al.* Phys. Rev. A, 2008, 77: 062301
- [3] Knill E, Laflamme R, Milburn G J. Nature, 2001, 409: 46
- [4] Ladd T D, Jelezko F, Laflamme R *et al.* Nature, 2010, 464: 54
- [5] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Nature Photonics, 2011, 5: 222
- [6] Imamoglu A. Phys. Rev. Lett., 2012, 89: 183601
- [7] Hofmann J, Krug M, Ortelge N *et al.* Science, 2012, 337 (6090): 72
- [8] Massar S, Popescu S. Phys. Rev. Lett., 1995, 74: 1269
- [9] Specht H P, Nolleke C, Reiserer A *et al.* Nature, 2011, 473: 190
- [10] Sangouard N, Simon C, de Riedmatten H *et al.* Review Mod. Physics, 2011, 83: 33
- [11] Varnava M, Browne D E, Rudolph T. Phys. Rev. Lett., 2006, 97: 120501
- [12] Fleischhauer M, Lukin M. Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 5094
- [13] Duan L M, Lukin M D, Cirac J I *et al.* Nature, 2001, 414: 413
- [14] Rein K F, Nunn J, Lorenz V O *et al.* Nat. Photon., 2010, 4: 218
- [15] Higginbottom D B, Sparkes B M, Rancic M *et al.* Phys. Rev. A, 2012, 86: 023801
- [16] Tittle W, Afzelius M, Chaneliere T *et al.* Laser Photonics Rev., 2010, 4: 244
- [17] Alexander A L, Longdell J, Sellar M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2006, 96: 043602
- [18] Afzelius M, Simon C, de Reidmatten H *et al.* Phys. Rev. A, 2009, 79: 052329
- [19] Kimble H J. Nature, 2008, 453: 1023
- [20] Togan E, Chu Y, Trifonov A S *et al.* Nature, 2010, 466: 730
- [21] Lan S Y, Radnaev A G, Collins O A *et al.* Opt. Express, 2009, 17: 13639
- [22] Collins O, Jenkins S, Kuzmich A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 060502
- [23] Hosseini M, Sparkes B M, Hetet G *et al.* Nature, 2009, 461: 241
- [24] Glorieux Q, Clark J B, Marino A M *et al.* Optics Express, 2012, 20(11): 12350
- [25] Pugatch R, Shuker M, Firstenberg O *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 203601
- [26] Moretti D, Felinto D, Tabosa J W R. Phys. Rev. A, 2009, 79: 023825
- [27] Vudyasethu P K, Camacho R M, Howell J C. Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 123903
- [28] Shuker M, Firstenberg O, Pugatch R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 223601
- [29] Ding D S, Wu J H, Zhou Z Y *et al.* Phys. Rev. A, 2013, 87: 013835
- [30] Ding D S, Wu J H, Zhou Z Y *et al.* Phys. Rev. A, 2013, 87: 053830
- [31] Wu J H, Liu Y, Ding D S *et al.* Phys. Rev. A, 2013, 87: 013845
- [32] Veissier L, Nicolas A, Giner L *et al.* Opt. Lett., 2013, 38: 712
- [33] Sparkes B M, Bernu J, Hosseini M *et al.*, New. J. Phys., 2013, 15: 085027
- [34] Heinze G, Rudolf A, Beil F *et al.* Phys. Rev. A, 2010, 81: 011401 (R)
- [35] Clark J B, Glorieux Q, Lett P D. New Journal of Physics, 2013,

- 15:035005
- [36] Heinze G, Hubrich C, Halfmann T. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 111: 033601
- [37] Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C *et al.* *Phys. Rev. A*, 1992, 45: 8185
- [38] Wang J, Yang J Y, Fazal I M *et al.* *Nature Photon.*, 2012, 6: 488
- [39] Huang H, Xie G D, Yan Y *et al.* *Opt. Lett.*, 2014, 39: 197
- [40] Cerf N J, Bourennane M, Karlsson A *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88: 127902
- [41] Sokolov I V, Kolohov M I, Gatti A *et al.* *Opt. Commun.*, 2001, 193: 175
- [42] Golubeva T Y, Golubev Y M, Sokolov I V *et al.* *J. Mod. Opt.*, 2006, 53: 699
- [43] Tordrup K, Negretti A, Mølmer K. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, 101: 040501
- [44] Kaszlikowski D, Gnaniński P, Żukowski M *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2000, 85: 4418
- [45] Vértési T, Pironio S, Brunner N. *Phys. Rev. Lett.*, 2010, 104: 060401
- [46] Liu Y, Wu J H, Shi B S *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2012, 29: 024205
- [47] Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S *et al.* *Nat. Commun.*, 2013, 4: 2527
- [48] Nicolas A, Veissier L, Giner L *et al.* *Nat. Photonics*, 2014, 8: 234
- [49] Kuzmich A, Bowen W P, Boozer A D *et al.* *Nature*, 2003, 423: 731
- [50] <http://www.technologyreview.com/view/514921/first-quantum-memory-that-records-the-shape-of-a-single-photon-unveiled-in-china/>
- [51] Horiuchi N. *Nature Photonics*, 2013, 7: 939
- [52] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 2014, 90: 042301
- [53] Ding D S *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2015, 114: 05502
- [54] Ding D S, Zhang W, Shi S *et al.* Quantum storage of high-dimensional entanglement. *Light: Science & Applications*, accepted
- [55] Ding D S *et al.* *Phys. Rev. A*, 2012, 85: 053815
- [56] Ding D S *et al.* *Phys. Rev. A*, 2012, 86: 083803
- [57] Ding D S *et al.* *Opt. Lett.*, 2012, 37: 3270
- [58] <http://m.technologyreview.com/blog/arxiv/27685/>
- [59] Zhou Z Y *et al.* *Opt. Express*, 2014, 22: 20298
- [60] Li Y, Zhou Z Y, Ding D S *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B*, 2015, 32: 407
- [61] Li Y, Zhou Z Y, Ding D S *et al.* *Light: Science & Applications*, 2016, 5: e16019

ILOPE“24年”光电行业专业展会品牌，助力企业价值跃升



ILOPE
www.ilope-expo.com

北京光电周

第二十一届中国国际激光、光电子及光电显示产品展览会
同期展会:第十三届中国国际机器视觉展览会暨机器视觉技术及工业应用研讨会

2016年10月17日-19日
北京·中国国际展览中心(静安庄馆)

◆激光 ◆红外 ◆光学材料 ◆光电显示及照明

展位抢定，请立即洽询：
☎ 010-84600314 / 84600836

展馆地址：北京市朝阳区北三环东路6号

ILOPE新版网站全面升级，欢迎登陆 www.ilope-expo.com 了解参展参观详情！





官方微信 欢迎关注