

轨道角动量光子的频率变换

周志远^{①②}, 史保森^{①②*}

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 量子信息与量子科技前沿协同创新中心, 合肥 230026

* 联系人, E-mail: drshi@ustc.edu.cn

2016-01-29 收稿, 2016-02-04 修回, 2016-02-04 接受, 2016-07-08 网络版发表

国家杰出青年科学基金(61525504)和国家重点基础研究发展计划(2011CBA00200)资助

摘要 轨道角动量(OAM)光束在精密测量、微小粒子的操控以及基础物理研究等领域具有重要的应用, 同时基于OAM编码的光信息处理由于其信道容量大、保密性高等优点已成为经典和量子通信领域的研究热点. 基于OAM编码构建高维量子网络是目前量子信息领域的一个重要研究方向, 在近几年已取得了许多突破性进展. 在量子通信中, 作为信息载体的光子需要在低损耗的通信窗口传输, 而作为信息存储和处理单元的物理体系其工作波长一般却不在通信窗口, 因此需要在两者之间建立量子接口以满足量子信息既可被存储又能长距离传输的基本要求. 基于非线性过程的光子频率变换就是建立量子接口的一种行之有效的方法. 本文在概述了OAM光束频率变换的发展现状后, 着重介绍了量子条件下OAM光子的频率变换研究进展. 这些进展迈出了未来构建高维量子信息网络的重要一步.

关键词 轨道角动量, 频率变换, 单光子

早在100多年前Poynting就认识到光子具有自旋角动量(SAM), 且SAM与光子的偏振相关: 一个具有圆偏振的光子携带一个 $\hbar$ 的SAM, 其中 $\hbar$ 是约化普朗克常数. 1992年Allen认识到光子也可以携带另外一种角动量-轨道角动量(OAM)^[1], 并指出一个具有 $e^{i\ell\theta}$ 角向位相的光束具有 $\ell\hbar$ 的OAM, 其中 ℓ 是一个任意整数. 由于携带OAM的光具有螺旋型相位, 且其光强分布呈现特殊的空间结构, 因而可以被用于囚禁和操控微小粒子^[2,3], 实现温度、角度、磁场等物理量的精密测量^[4~6]. 此外, 由于利用光子的OAM自由度可以构建无限维的正交基矢空间, 因而如果将信息编码在光子的OAM自由度, 则可以大幅度提高单个光子的信息携带量, 从而提高通信系统的信道容量. 基于此思想, 科研人员通过将光脉冲编码于OAM空间并结合偏振复用的方法成功地达到了THz

比特的信息传输率^[7], 引起了学术界的高度关注. 在量子信息领域, 人们同样可以利用光子的OAM自由度实现高维编码, 制备高维量子态, 提高单个载体的信息携带量, 增大量子信道的容量. 利用高维OAM量子态也可以实现坐标无关的量子密钥分配^[8], 研究高维量子系统的基本物理性质^[9,10]. 此外, 利用OAM纠缠态还可以实现量子密集编码^[11,12]和确定性多自由度量子隐形传态^[13]等. 因而光子的OAM特性及其应用研究是目前光物理及量子信息领域的一个热点方向.

光子的OAM产生于电磁波的螺旋相位面. 目前研究最广泛的OAM光束是拉盖尔-高斯模(Laguerre-Gaussian, LG), 这种光的波前是一个螺旋面(图1), 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, 同时这种光束的空

引用格式: 周志远, 史保森. 轨道角动量光子的频率变换. 科学通报, 2016, 61: 3238–3245

Zhou Z Y, Shi B S. Frequency conversion of orbital angular momentum carrying photons (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3238–3245, doi: 10.1360/N972016-00137

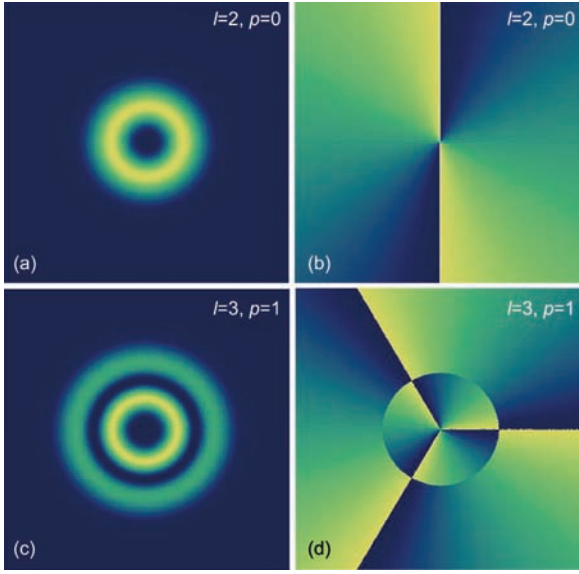


图 1 (网络版彩色)不同LG模在横截面内的强度((a),(c))和相位分布((b),(d))

Figure 1 (Color online) Intensity ((a),(c)) and phase ((b),(d)) plots of different LG mode

间光强呈现同心圆环分布, 其光场数学表达形式如下:

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

其中, 其中 $L_p^{|l|}$ 是Laguerree多项式, $|l|$ 为轨道角动量量子数 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($(p+1)$ 则表示光在径向的节点数目). 不同的轨道角动量对应着不同的光强空间分布(图1).

在传统的光与物质相互作用的研究中科研人员主要考虑的是高斯光束. 由于OAM光束的奇异特性, OAM光与物质的相互作用引起了人们的广泛兴趣, 人们逐步开展了相互作用过程中空间位相的匹配条件、OAM的传输、变换特性以及OAM的守恒条件等研究, 这其中包括基于非线性晶体的二阶非线性过程^[14~16]、基于原子气体的三阶^[17~20]以及更高阶的非线性过程. 此外, 利用非线性过程还可以拓展OAM光束的波长覆盖范围, 实现OAM光束在不同波段的转换等. 这些研究不仅丰富了光与物质相互作用的

研究内容, 而且进一步拓展了OAM光的应用范围. 此外, 如前所述, OAM光束在量子信息领域也有重要应用: 在量子通信系统中人们需要借助于量子中继器才能实现长距离的信息交换, 而量子存储器是构成量子中继器的核心器件. 最近人们已利用不同的物理体系实现了基于OAM编码的量子态存储^[21~23], 然而目前使用的存储器所对应的工作波长与信息载体(如光子)传输的窗口(如大气或光纤通信窗口)工作波长并不兼容, 因此需要在两者之间建立接口以满足量子信息既可被存储又能长距离传输的基本要求. 能够实现该功能的转换器可称为量子波长变换器, 其基本要求是除了能够按照需要变换光子的频率之外, 最重要的是不能破坏原有量子态的量子关联与相干特性. 尽管人们已经利用非线性波导器件实现了高斯模光子的频率变换, 且转换效率可以接近100%^[24~27], 然而直到2014年还没有任何关于OAM光子的频率变换报道, 其主要原因是实现高斯光子频率变换用的非线性波导器件都是单模器件, 无法支持OAM模式, 因此用波导器件实现OAM光子的频率变换是行不通的. 至2014年为止能否实现和如何实现OAM光子的频率变换仍然是一个“open question”, 因而吸引着众多研究小组投身于此. 我们小组从量子信息研究的实际需求出发, 从2012年就开始了基于OAM的非线性频率变换研究, 取得了一系列进展^[18,28~31], 并在此基础上于2014年取得重要突破^[32]: 在国际上首次实现了OAM光子的频率变换, 从而迈出了基于波长变换器实现量子接口的关键一步.

实现量子波长转换器的关键是选取合适的变频材料和在此基础上实现高转换效率. 利用准相位匹配的周期性非线性晶体实现OAM光束频率变换是目前的一个研究热点, 这是因为准相位匹配晶体具有较高的有效非线性系数, 并且在相互作用过程中光束没有离散效应, 因而可以使用较长的晶体来进一步提高转换效率. 另外还可以通过使用体材料晶体克服波导器件不支持多模工作的缺点. 由于OAM量子波长变换器工作在非基模条件, 相比于基模工作方式其非线性转换效率一般比较低, 因此需要通过别的方法提高转换效率, 常用的一种手段就是采用外腔共振增强非线性转换效应的方法. 南京大学陆延青教授领导的研究小组率先在理论上研究了OAM光束在PPLN晶体中的和频变换与守恒特性^[33]. 我们

小组从2014年开展基于二阶非线性过程的OAM光束变频研究,在准相位匹配的PPKTP体材料晶体中分别实现了OAM光束的倍频与和频^[29,30],并通过腔增强效应提高了倍频效率^[31].这些研究为我们开展单光子OAM量子态的频率变换奠定了重要的基础.基于在强光下OAM光束频率变换的研究基础,我们设计了一个单共振的蝶形腔结构:泵浦光与腔共振,信号光子单次通过.我们利用非线性晶体中的自发参量下转换(SPDC)技术制备的标记单光子作为信号光子,并使其携带OAM信息.通过腔共振技术首次成功地将波长为1560 nm的携带OAM量子态的真实单光子频率上转换到525 nm^[32],且对OAM为 $1\hbar$ 的单光子其转换量子效率到达8.3%,并实验证明了光子的相干性在转换过程中保持不变.在系列实验中我们使用的泵浦光为连续激光,华东师范大学的曾和平教授领导的研究组研究了弱相干OAM光脉冲的频率变换技术^[34].另外国外也有OAM光束的非线性变频成果报道,但所涉及的都是强光场的频率变换^[14~16,19,20].下面我们主要介绍携带OAM量子态的单光子频率变换.

1 标记单光子OAM频率上转换

实验原理如图2所示.实验装置主要由单光子源和上转换模块两部分组成.实验所用的波长为1560 nm的标记单光子是利用共线简并的SPDC(spontaneous parametric down conversion, SPDC)过程,由

780 nm激光泵浦一块Type-II位相匹配的周期性非线性晶体PPKTP(periodically poled potassium titanyl phosphate, PPKTP)产生的非经典光子对获得.光子对的特性表征可以参考我们前期光子对制备的相关工作^[35~38].由SPDC产生的两个频率相同(1560 nm)、偏振正交的红外光子通过一个偏振分束器(polarized beam splitter, PBS)在空间分开,一个光子直接被InGaAs红外单光子探测器探测,用于产生一个trigger信号,另外一个单光子(标记单光子)被送到一个包含螺旋位相片(vortex phase plate, VPP)的Sagnac干涉仪用于产生偏振与OAM混合的纠缠态,然后该光子被输入到上转换模块进行频率转换.上转换模块主要由一个主动锁定的蝶形腔组成:该腔与795 nm泵浦光共振,而待转换的标记单光子可从两个凹面腔镜M3和M4单次通过.上转换晶体是一块Type-I位相匹配的PPKTP晶体.通过腔增强的和频过程将1560 nm标记信号光子上转换成波长为525.5 nm的可见光子.转换后的光子被耦合到单模光纤中,随后被可见单光子探测器探测.两个单光子探测器的输出信号被输入到符合计数电路用于测量双光子之间的量子关联特性.

1.1 相干光场输入

实验过程分为两个步骤:首先利用弱相干态代替单光子作为信号光进行上转换实验研究,用于寻找最优的工作条件,进而开展真实单光子的频率转换实验研究.在弱相干光实验中分别进行了单个

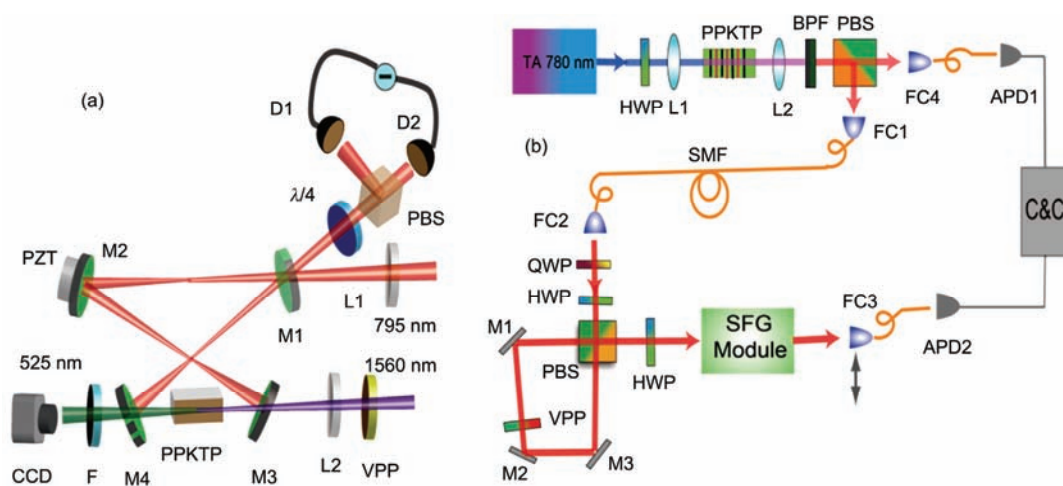


图2 (网络版彩色)(a) 上转换模块(SFG module)的设计简图; (b) 标记单光子OAM上转换实验装置简图. C&C: 符合电路; PZT: 压电陶瓷; CCD: 单光子阵列探测器; APD: 单光子探测器

Figure 2 (Color online) (a) Schematic of the up-converter module (SFG module); (b) setup for up-converting a herald single photon with OAM. C&C: coincidence circuit; PZT: piezoelectric transducer; CCD: single-photon-counting camera; APD: single photon detector

OAM模光 and 不同OAM模叠加光的变频实验, 结果如图3所示. 图3(a)表示不同OAM模式输入条件下上转换光与输入信号光之间的功率关系, 其中对OAM数为0, 1 $\hbar$, 2 $\hbar$ 的信号光其量子转换效率分别为0.224, 0.0833和0.0296. 进一步我们大幅度衰减信号光的强度, 研究伪单光子的频率上转换. 实验中衰减相干光的强度与典型的SPDC光源的亮度相当, 在每个探测门宽时间内的光子数约为0.002个. 图3(b)表示在强衰减相干光输入条件下不同OAM模式所对应的上转换光场的空间形状, 这些结果是用单光子阵列CCD(Andor, ICCD)测量得到的. 从图中可以看出: (1) 不同输入OAM模的空间形状在上转换过程可以被很好地保持; (2) 转换过程中不同OAM模之间的相干性保持不变.

1.2 单光子输入

随后开展了真实单光子的变频实验. 首先检验转换后单光子的空间结构是否发生变化. 对应于 $l=1\hbar$ 和 $l=2\hbar$ 单光子输入, 利用单光子阵列CCD测量得到的实验结果如图4(a)所示. 通过对比输入态我们发现变频过程对单光子的空间结构不会产生影响. 随后我们检验变频过程是否对光子的关联属性产生影响, 这可以通过检查信号光子与trigger光子之间的关联属性进行. 由于实验中的信号光子与trigger光子产生于SPDC过程, 因而二者之间具有非经典关联. 该关联可通过判定Cauchy-Schwarz不等式是否

被违反来检验. 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互关联和自关联函数, 下标 $s1$, $s2$ 分别表示信号光子和trigger光子(由于信号光子和trigger光子呈现热光场的统计行为, 因而 $g_{s1,s1}(0)=g_{s2,s2}(0) \approx 2$. 故只要互关联 $g_{s1,s2}(\tau)$ 大于2即可违反Cauchy-Schwarz不等式). 当信号光子为高斯模式时, 实验中变换前的双光子互关联 $g_{s1,s2}(\tau)$ 为162, 而变换后上转换光子与trigger光子之间的互关联为25(图4(b)), 显然转换前后Cauchy-Schwarz不等式均被违背, 因而变换过程中光子之间的关联属性没有改变. 当单光子携带单个OAM时, 我们采用一维扫描的方法测量上转换光子与trigger光子之间的互关联, 实验中测得输入信号分别为 $l=1\hbar$ 和 $l=2\hbar$ 时变频后的最大互关联分别为15.5和6.5(图4(c)和(d)), 也违背了Cauchy-Schwarz不等式. 变频后互关联数值下降主要由上转换过程中的噪声造成. 对OAM为 $1\hbar$ 的单光子其量子转换效率达到8.3%. 此外还开展了处于不同OAM模叠加态单光子的频率上转换实验(考虑 $(|1\rangle + e^{i\phi}| -1\rangle)\hbar$ 和 $(|2\rangle + e^{i\phi}| -2\rangle)\hbar$). 在该实验中利用阵列CCD观察到的上转换后信号光子的花瓣状空间分布与理论预言相符(图4(a)), 并且还测量了空间分布中一个花瓣的符合计数(trigger光子和上转换光子)随相位 ϕ 和 ϕ' 变化的干涉

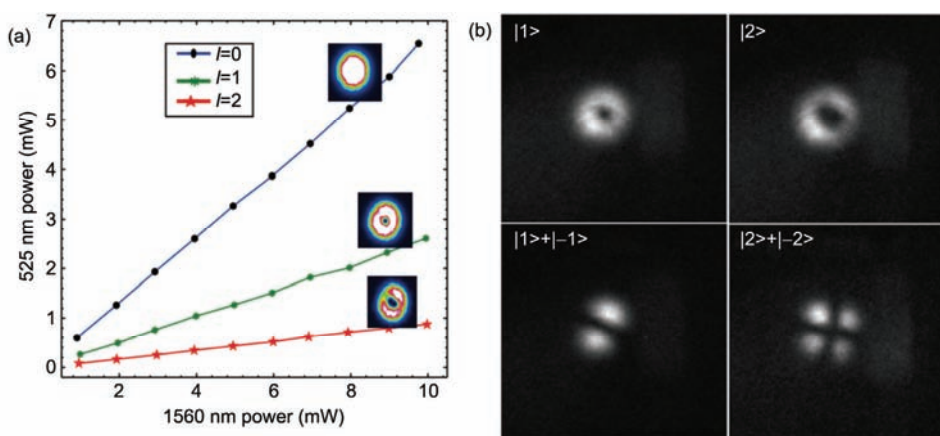


图3 (网络版彩色)相干光场输入下的实验结果. (a) 不同OAM光束输入条件下和频光与输入光之间的功率关系; (b) 衰减相干光场输入下和频光场的空间形状

Figure 3 (Color online) Experimental results with coherent light as input. (a) The relationships between the SFG output powers and the input signal powers respectively. The inserted images across the lines are the spatial shapes for the corresponding SFG light; (b) the up-converted images of light with single OAM and superposition input at single photon level respectively

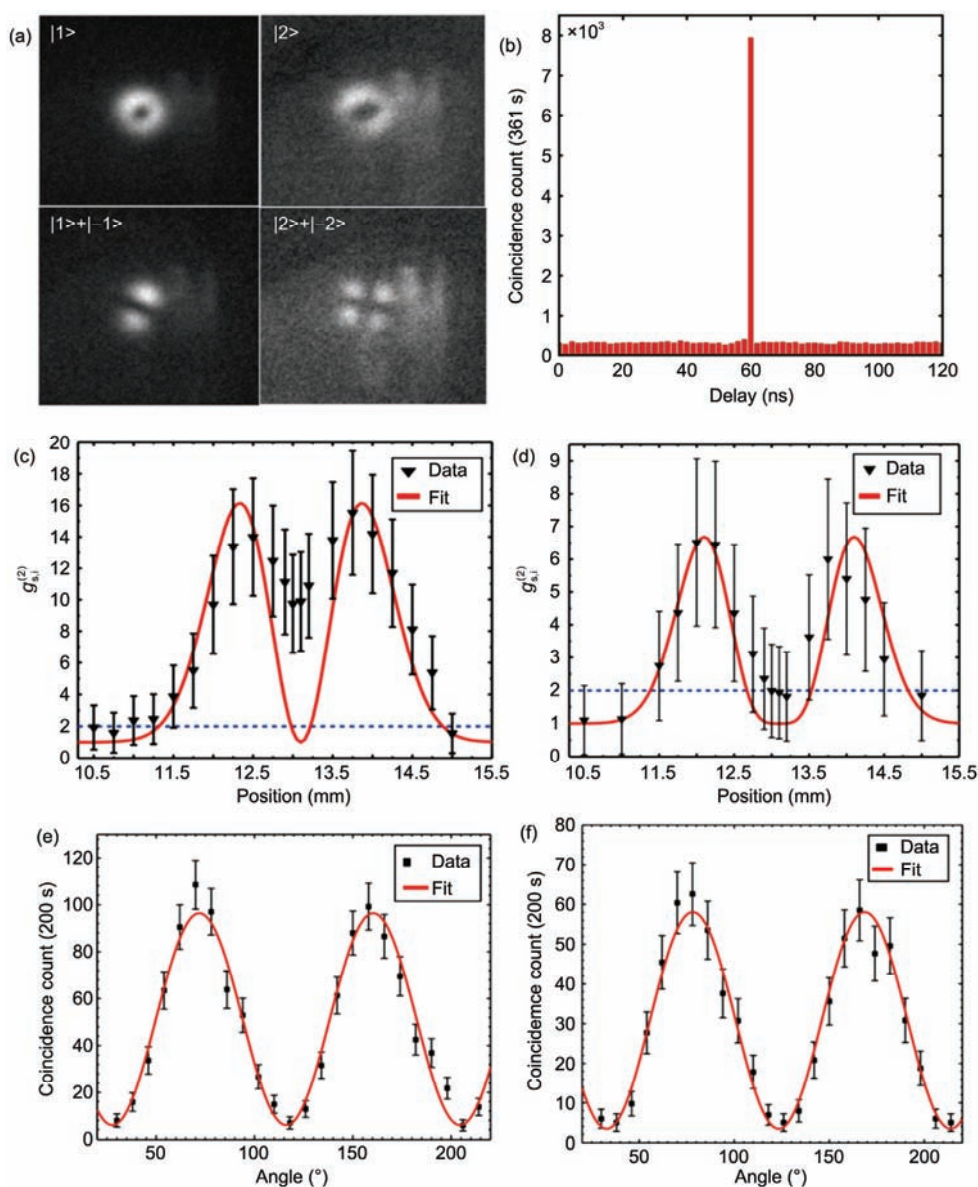


图 4 (网络版彩色)在不同轨道角动量标记单光子态输入下的上转换实验结果。(a) 变频后光子的空间形状; (b) 高斯模式下变频光子与trigger光子之间的互关联图; (c)和(d)分别表示输入信号为 $l=1\hbar$ 和 $l=2\hbar$ 模式下一维扫描双光子互关联图(上转换光子和trigger光子); (e)和(f)分别为输入信号 $(|1\rangle+e^{i\phi}|-1\rangle)\hbar$ 和 $(|2\rangle+e^{i\phi}|-2\rangle)\hbar$ 时单个花瓣的符合计数(上转换光子和trigger光子)随 ϕ 和 ϕ 变化的曲线图

Figure 4 (Color online) Experimental results for heralded single photon from SPDC. (a) SFG photon images for different input states; (b) coincidence counts between trigger photon and up-converted signal photon with the Gaussian spatial shape; (c) and (d) show one-dimensional scanning $g_{s,i}^{(2)}$ between trigger photon and up-converted single photon for input with $l=1,2$, respectively; (e) and (f) show the coincidence counts in a single spot against the phase ϕ and ϕ for input photon with $(|1\rangle+e^{i\phi}|-1\rangle)\hbar$ and $(|2\rangle+e^{i\phi}|-2\rangle)\hbar$, respectively

图 (图 4(e) 和 (f)), 得到的干涉可见度分别为 $89\%\pm 6\%$ ($(|1\rangle+e^{i\phi}|-1\rangle)\hbar$ 和 $89\%\pm 7\%$ ($(|2\rangle+e^{i\phi}|-2\rangle)\hbar$), 变换规律与理论预期相吻合, 并且根据实验数据计算得到两种态所对应的上转换保真度分别为 0.94 ± 0.03 和 0.95 ± 0.04 。所有这些实验数据清晰地证明了在上转化过程中 OAM 光子态的非经典关联特性和量

子相干性保持不变。

2 展望

我们在实验上首次实现了 OAM 光子态的频率上转换, 迈出了量子接口研究的重要一步, 为构建高维量子信息网络奠定重要的基础。尽管如此, 在关于

OAM光子态的频率变换研究中仍有许多方面需要进行进一步的深入研究,这主要包括以下几个方面:(1)需要进一步改进和优化实验设计,提高转换效率;(2)虽然完成了频率上转换实验,但频率下转换还没有实现,而它的实现对构建完整的高维OAM量子网络同样具有重要的作用;(3)目前仅仅研究了标记单光子OAM态的频率上转换,而OAM纠缠态的频率上转换还没有被实现。众所周知纠缠是量子信息技术的核心,是众多量子信息协议的基础,也是长距离量子通信成功实现的关键,因此实现OAM纠缠的变频无疑是构建高维量子网络必须解决的关键问题之一。我们拟采用Sagnac环制备位相稳定且亮度高的偏振

纠缠光源^[38],然后使用 Fickler等人^[39]提出的方法制备OAM纠缠态并实现其频率变换。此外需要强调的一点是我们的工作属于空间图像的频率变换范畴。由于红外图像信号在遥感、夜视、天文观测等领域具有非常重要的作用,因而红外图像的高精度探测尤为重要,但常用的红外探测存在设备精度低、分辨率不高、探测效率低且设备昂贵等一系列问题。如果能够将图像信号通过频率上转换至可见波段,利用精度高、灵敏度高且价格低廉的可见波段探测设备进行探测,则可以解决以上问题。我们在轨道角动量频率变换方面的研究成果对以上领域的研究无疑也具有重要参考价值。

参考文献

- Allen L, Beijersbergen M W, Spreeuw R J C, et al. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes. *Phys Rev A*, 1992, 45: 8185–8189
- Padgett M, Bowman R. Tweezers with a twist. *Nat Photon*, 2011, 5: 343–348
- Parterson L, Macdonald M P, Arlt J, et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles. *Science*, 2001, 292: 912–914
- D'Ambrosio V, Spagnolo N, Del Re L, et al. Photonics polarization gears for ultra-sensitive angular measurements. *Nat Commun*, 2013, 4: 2432
- Lavery M P J, Speirits F C, Barnett S M, et al. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum. *Science*, 2013, 341: 537–540
- Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. An optical fan for light beams for high-precision optical measurements and optical switching. *Opt Lett*, 2014, 39: 5098–5101
- Wang J, Yang J Y, Fazal I M, et al. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photon*, 2012, 6: 488–496
- Vallone G, D'Ambrosio V, Sponselli, et al. Free-space quantum key distribution by rotation-invariant twisted photons. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 060503
- Leach J, Jack B, Romero J, et al. Quantum correlations in optical angle-orbital angular momentum variables. *Science*, 2010, 329: 662–665
- Dada A C, Leach J, Buller G S, et al. Experimental high-dimensional two-photon entanglement and violations of generalized Bell inequalities. *Nat Phys*, 2011, 7: 677–680
- Bourennane M, Karlsson A, Björk G. Quantum key distribution using multilevel encoding. *Phys Rev A*, 2001, 64: 012306
- Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G. Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding. *Nat Phys*, 2008, 4: 282–286
- Wang X L, Cai X D, Su Z E, et al. Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon. *Nature*, 2015, 518: 516–519
- Dholakia K, Simpson N B, Padgett M J, et al. Second-harmonic generation and orbital angular momentum of light. *Phys Rev A*, 1996, 54: R3742–R3745
- Courtial J, Dholakia K, Allen L, et al. Second-harmonic-generation and the conservation of orbital angular momentum with high-order Laguerre-Gaussian modes. *Phys Rev A*, 1997, 56: 4193–4196
- Lin Y C, Huang K F, Chen Y F, et al. The formation of quasi-nondiffracting focused beams with second-harmonic generation of flower Laguerre-Gaussian modes. *Laser Phys*, 2013, 23: 115405
- Chen Q F, Shi B S, Zhang Y S, et al. Entanglement of orbital angular momentum states of photon pairs generated in a hot atomic ensemble. *Phys Rev A*, 2008, 78: 053810
- Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, et al. Image transfer through two sequential four-wave-mixing processes in hot atomic vapour. *Phys Rev A*, 2012, 85: 053815
- Walker G, Arnold A S, Franke-Arnold S. Trans-spectral orbital angular momentum transfer via four-wave mixing in Rb vapour. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 243601

- 20 Garipey G, Leach J, Kim K T, et al. Creating high-harmonic beams with controlled orbital angular momentum. *Phys Rev Lett*, 2014, 113: 153901
- 21 Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, et al. Single-Photon-level quantum imaging memory based on cold atomic ensembles. *Nat Commun*, 2013, 4: 2527
- 22 Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, et al. Toward high-dimensional-state quantum memory in a cold atomic ensemble. *Phys Rev A*, 2014, 90: 042301
- 23 Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, et al. Quantum storage of orbital angular momentum entanglement in an atomic ensemble. *Phys Rev Lett*, 2015, 114: 050502
- 24 Curtz N, Thew R, Simon C, et al. Coherent frequency down-conversion interface for quantum repeaters. *Opt Express*, 2010, 18: 22099–22104
- 25 Zaske S, Lenhard A, Keßler C A, et al. Visible-to-telecom quantum frequency conversion of light from a single quantum emitter. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 147404
- 26 Takesue H. Erasing distinguishability using quantum frequency up-conversion. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 173901
- 27 Rakher M T, Ma L J, Slattery O, et al. Quantum transduction of telecommunications-band single photons from a quantum dot by frequency upconversion. *Nat Photon*, 2010, 4: 786–791
- 28 Ding D S, Zhou Z Y, Shi B S, et al. Linear up-conversion of orbital angular momentum. *Opt Lett*, 2012, 37: 3270–3272
- 29 Zhou Z Y, Ding D S, Jiang Y K, et al. Orbital angular momentum light frequency conversion and interference with quasi-phase matching crystals. *Opt Express*, 2014, 22: 20298–20310
- 30 Li L, Zhou Z Y, Ding D S, et al. Sum frequency generation with two orbital angular momentum carrying laser beams. *J Opt Soc Am B*, 2015, 32: 407–411
- 31 Zhou Z Y, Li Y, Ding D S, et al. Highly efficient second harmonic generation of a light carrying orbital angular momentum in an external cavity. *Opt Express*, 2014, 22: 23673–23678
- 32 Zhou Z Y, Li L, Ding D S, et al. Orbital angular momentum photonic quantum interface. *Light Sci App*, 2016, 5: e16019
- 33 Shao G H, Wu Z J, Chen J H, et al. Nonlinear frequency conversion of fields with orbital angular momentum using quasi-phase-matching. *Phys Rev A*, 2013, 88: 063827
- 34 Tang R, Li X, Wu W, et al. High efficiency frequency upconversion of photons for a quantum information interface. *Opt Express*, 2015, 23: 9796–9802
- 35 Zhou Z Y, Jiang Y K, Ding D S, et al. An ultra-broadband continuously-tunable polarization entangled photon-pair source covering the C+L telecom bands based on a single type-II PPKTP crystal. *J Mod Opt*, 2013, 60: 720–725
- 36 Zhou Z Y, Jiang Y K, Ding D S, et al. Actively switchable nondegenerate polarization entangled photon pair distribution in dense wave-division multiplexing. *Phys Rev A*, 2013, 87: 045806
- 37 Zhou Z Y, Ding D S, Li Y, et al. Cavity-enhanced bright photon pairs at telecom wavelengths with a triple-resonance configuration. *J Opt Soc Am B*, 2014, 31: 128–134
- 38 Li L, Zhou Z Y, Ding D S, et al. CW-pumped telecom band polarization entangled photon pairs generation in a Sagnac interferometer. *Opt Express*, 2015, 23: 28792–28800
- 39 Fickler R, Lapkiewicz R, Plick W N, et al. Quantum entanglement of high angular momenta. *Science*, 2012, 338: 640–643

Frequency conversion of orbital angular momentum carrying photons

ZHOU ZhiYuan^{1,2} & SHI BaoSen^{1,2}

¹Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

²Synergetic Innovation Center of Quantum Information & Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Light carrying orbital angular momentum (OAM) has exciting applications, including the studies of fundamental quantum physics, optical manipulation and trapping of particles, astrophysics, high-precision optical measurements and optical communication, etc. In quantum information field, a photon encoded with information in its OAM degrees of freedom enables networks to carry significantly more information and increase their capacity greatly due to the inherent infinite degrees of freedom for OAM. Therefore it is no surprise that many groups and researchers are active in building up a high-dimensional quantum network and many important progresses have been achieved during the past years. To realize a long-distance quantum communication, a quantum repeater has to be used to overcome the problem of communication fidelity decreasing exponentially with the channel length, where, quantum memories for photons, used for storing quantum information, which have been realized successfully during the past decade in many systems such as a cold/hot atomic system, a solid matter, a diamond, and others, are key components consisting of a quantum repeater. Photons acted as information candidates can connect different quantum repeaters. Long distance quantum communication requires the wavelengths of photons are situated in the low-loss communication windows, but most quantum memories currently being developed for use in a quantum repeater work at different wavelengths, only few memories can work in low-loss communication windows. Furthermore, the signal stored is an attenuated coherent light and has the Gaussian mode. Though the storage of photonic entanglement at telecom wavelength is realized in an erbium-doped optical fibre recently, the spatial mode used is Gaussian mode. Quantum memories for photons with OAM have recently been realized, but all work at different wavelengths. So a quantum interface to bridge the wavelength gap is necessary.

There are some experimental realizations of quantum interfaces for single photons with Gaussian shapes, either by using second order nonlinear processes in nonlinear crystals or by third-order nonlinear processes in atomic ensembles. Frequency conversion using nonlinear crystals is much more attractive for practical applications because it can offer wide phase-matching wavelength range, in contrast to using atomic ensembles. So far, such an interface for OAM-carried photons has not been realized yet. Recently, our group focused on the realization of frequency conversion of light with OAM, and reported the first experimental realization of an OAM photonic quantum interface. In this review, after briefly showing the state of the art, we focus on the experimental progresses on the quantum interface achieved in our group recently. The progress achieved will pave the way for high-dimensional quantum information processing, creating a link between different quantum systems that work in different wavelengths by using OAM degree of freedoms of photons. Our results will also have potential applications in many other fields, such as biology, astrophysics, night-vision technology, and chemical sensing.

orbital angular momentum, frequency conversion, single photon

doi: 10.1360/N972016-00137