

基于四波混频过程产生介于锥形探针光和锥形共轭光之间的多模量子关联*

曹雷明¹⁾²⁾ 杜金鉴²⁾ 张凯²⁾ 刘胜帅²⁾ 荆杰泰^{2)3)4)†}

1) (洛阳师范学院物理与电子信息学院, 洛阳 471022)

2) (华东师范大学, 精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062)

3) (中国科学院超强激光科学卓越创新中心, 上海 201800)

4) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2022 年 1 月 11 日收到; 2022 年 4 月 9 日收到修改稿)

多模量子关联与纠缠在基础科学研究以及量子信息处理、量子通信等领域有着重要作用. 本文基于热铷原子系综中的四波混频过程, 通过构建具有空间结构的锥形泵浦光和锥形探针光, 在实验上产生具有量子关联的锥形探针光和锥形共轭光, 并测量到量子关联光束之间的强度差压缩约 -2.6dB. 通过改变单光子失谐、双光子失谐、泵浦光功率和铷原子池温度等实验参数, 研究量子关联光束之间的强度差噪声随实验参数的变化关系. 除此之外, 通过“整体衰减法”和“局部切割法”对量子关联光束进行不同方式的处理, 不仅实验测量了量子关联随透射率的变化关系, 而且深入研究了量子关联的多模特性. 本文的实验结果在量子信息处理以及量子通信领域有着潜在的应用价值.

关键词: 四波混频, 多模量子关联, 强度差噪声

PACS: 03.67.Mn, 03.67.Bg, 42.50.-p

DOI: 10.7498/aps.71.20220081

1 引言

多模量子关联与纠缠作为量子信息技术^[1]中的一种重要资源, 在量子计算^[2,3]和量子通信^[4,5]等领域扮演着重要角色. 在连续变量的量子系统中, 国内外众多研究组在产生多模量子关联与纠缠方面做了许多重要研究, 已经有大量产生多组份量子关联与纠缠态的方案在理论上提出并在实验上实现^[6-13]. 在这些方案中, 比较典型的方案是利用光学参量振荡器和线性分束器网络产生的独立单

模压缩光束来生成多组份纠缠态^[8]. 此外, 另一种有效且简单的方案是在时域^[14]和频域^[15-17]中利用复用技术产生大量连续变量簇态.

近年来, 四波混频过程凭借其输出光场在空间自然分离、强非线性效应以及空间多模特性等优点, 成为产生量子关联与纠缠态的有效方案, 在产生具有量子关联的双模压缩态^[18]、空间量子纠缠图像^[19]、可调延迟的 EPR(Einstein-Podolsky-Rosen,) 纠缠^[20]以及空间多模压缩态^[21]等方面取得重要进展. 我们课题组基于热铷原子蒸汽池中的级联四波混频过程, 理论计算并实验上实现多组份量子关

* 上海市教育委员会科研创新计划 (批准号: 2021-01-07-00-08-E00100)、国家自然科学基金 (批准号: 11874155, 11804141, 91436211, 11374140)、上海市自然科学基金 (批准号: 17ZR1442900)、上海市科学技术委员会科技创新行动计划基础研究领域项目 (批准号: 20JC1416100)、上海市科技创新行动计划 (批准号: 17JC1400401)、上海市市级科技重大专项 (批准号: 2019SHZDZX01)、上海市青年科技英才扬帆计划 (批准号: 21YF1410800)、闵行领军人才 (批准号: 201971)、111 计划 (批准号: B12024) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jtjing@phy.ecnu.edu.cn

联与纠缠态的产生^[22–27]. 除此之外, 四波混频体系还可以用于提升量子体系的信道容量^[28]、实现量子克隆^[29]以及全光量子态传输^[30,31]. Daems 等^[32,33]提出在参量下转换中使用多个倾斜泵浦光产生多组份量子纠缠的理论工作, 我们把这一方案应用于四波混频体系, 利用一束探针光和多束泵浦光(即“一对多”的模式)进行四波混频反应, 实验产生多组份量子关联与纠缠态^[34–36]. 为了进一步利用四波混频的空间多模特性, 我们专门制备一束具有空间锥形结构的泵浦光来模拟 N ($N \rightarrow \infty$) 束泵浦光的情况, 并利用一束探针光和一束锥形泵浦光(即“一对 N ”的模式)进行四波混频反应, 实验产生介于探针光和锥形共轭光之间的多模量子关联^[37]. 为了更充分地利用四波混频的空间多模特性, 并深入研究量子关联的多模特性, 本文不仅构建具有空间锥形分布的泵浦光, 而且构建出空间锥形分布的探针光, 在实验上利用锥形探针光和锥形共轭光(即“ N 对 N ”的模式)进行四波混频反应, 产生具有量子关联的锥形探针光和锥形共轭光, 并通过调节不同的实验参数, 测量了锥形探针光和锥形共轭

光之间的强度差压缩. 更重要的是, 通过“整体衰减法”和“局部切割法”对量子关联光束进行处理, 深入研究了锥形探针光和锥形共轭光之间量子关联的多模特性. 本文的实验结果在量子信息处理以及量子通信领域有着潜在的应用价值.

2 实验系统

在本文的实验系统中, 光源由钛宝石激光器提供, 为了匹配四波混频的双“ Λ ”能级跃迁过程, 如图 1(a) 所示, 激光器频率调至相对于铷原子 D_1 线 ($5S_{1/2}$, $F=2 \rightarrow 5P_{1/2}$) 蓝失谐 1.2 GHz, 即单光子失谐(简记为 Δ). 如图 1(b) 所示, 从激光器中发射的光束经偏振光分束器 (polarizing beam splitter, PBS) 分为功率不同的两部分, 其中功率较大的光与单模光纤 (single-mode fiber, SMF) 耦合后, 垂直入射至反射效率为 75% 的锥形棱镜, 经反射后形成空间锥形分布的光束, 这束功率较大的锥形光将作为激发热铷原子池中四波混频的泵浦光. 另一束功率较弱的光, 经声光调制器 (acousto-optic

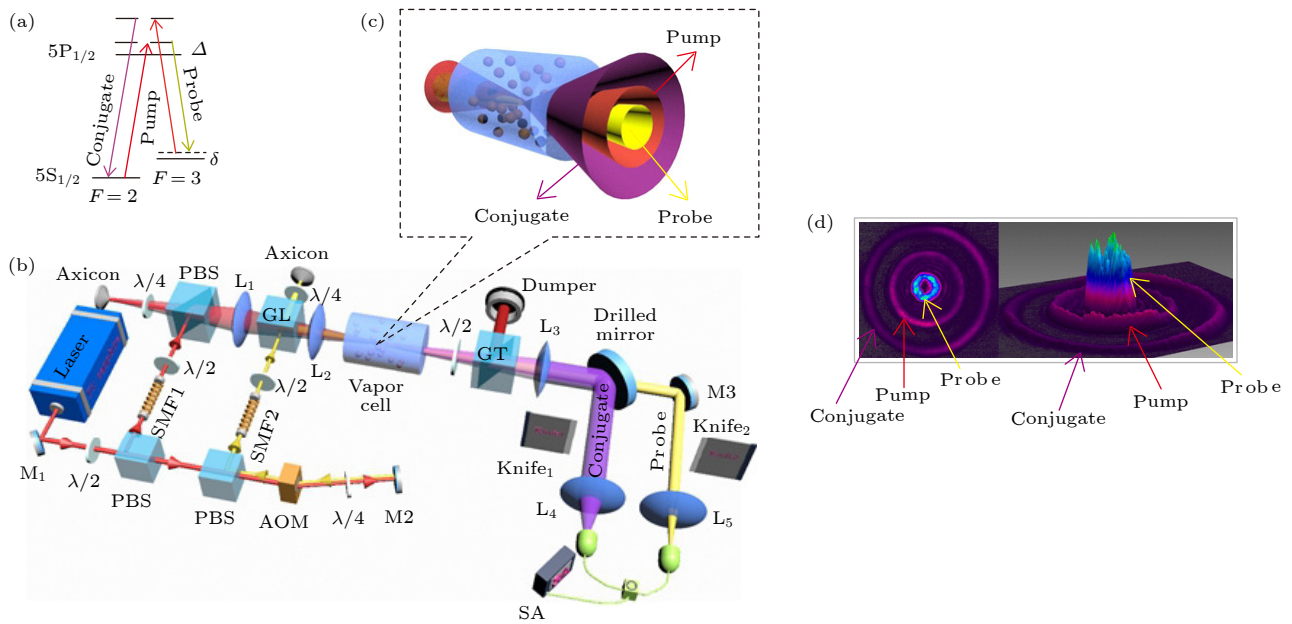


图 1 利用锥形泵浦光和锥形探针光产生和测量多模量子关联的实验系统 (a) 基于铷⁸⁵原子 D_1 线的双“ Λ ”能级跃迁示意图. Probe 是探针光; Conjugate 是共轭光; Pump 是泵浦光; Δ 是单光子失谐; δ 是双光子失谐. (b) 实验装置图. M_1 — M_3 是高反射率的平面反镜; L_1 — L_5 是透镜; Axicon 是锥形棱镜; GL 是格兰-激光偏振棱镜; GT 是格兰-托马斯棱镜; SA 是频谱分析仪; SMF 是单模光纤; PBS 是偏振光分束器. (c) 锥形泵浦光和锥形探针光通过四波混频反应产生锥形共轭光的示意图. (d) 经四波混频反应后的探针光、共轭光和经过滤后泵浦光在光斑分析仪上呈现的二维和三维图像

Fig. 1. Scheme for generating and detecting multimode quantum correlation: (a) Double- Λ energy level diagram of the ⁸⁵Rb D_1 line. (b) Experimental layout. M_1 — M_3 , high reflectivity mirrors; L_1 — L_5 , lenses; Axicon, metal axicon mirror; GL, Glan-Laser polarizer; GT, Glan-Thompson polarizer; SA, spectrum analyzer. (c) Schematic of the conical-pump-based FWM. (d) Two-dimensional and three-dimensional beam pattern captured by a laser beam profiler.

modulator, AOM) 两次移频后, 频率相对于泵浦光红失谐 3.044 GHz, 相对于铷原子基态能级的超精细结构分裂 (3.036 GHz) 失谐 8 MHz, 这称作双光子失谐 (简记为 δ). 经过移频的这束弱光与 SMF 耦合后, 也通过锥形棱镜反射得到锥形光束, 这束较弱的锥形光将作为四波混频的探针光. 实验中所用的铷原子池的长度是 12.5 mm, 实验中需将铷原子池的温度加热至 120°C. 实验中泵浦光的偏振方向是水平方向, 泵浦光的功率约为 250 mW, 腰斑直径是 360 μm , 发散角约为 10 mrad. 探针光的偏振方向是竖直方向, 功率约为 40 μW , 腰斑直径是 330 μm , 发散角约为 8 mrad. 锥形泵浦光和锥形探针光同轴且同向传输, 并经过透镜聚焦在热铷原子蒸汽池中心发生四波混频反应. 由于锥形探针光的发散角小于锥形泵浦光的发散角, 所以在热铷原子池中的整个传输过程, 始终保持锥形探针光在锥形泵浦光的内部. 经过四波混频反应, 探针光放大为原来的 2.5 倍, 即增益 $G = 2.5$, 与此同时, 产生了锥形共轭光. 经过四波混频反应后, 探针光和共轭光的功率分别为 100 和 76 μW . 如图 1(c) 所示, 经四波混频放大后的锥形探针光和新产生的锥形共轭光分别位于锥形泵浦光的内外两侧, 这种空间分布正是发生四波混频所要求的相位匹配条件. 图 1(d) 给出三束光的功率在光斑分析仪中的空间分布. 此时, 泵浦光几乎全部功率已经被格兰-托马斯棱镜 (Glan-Thompson polarizer, GT) 过滤. 为了测量和分析探针光和共轭光之间的量子关联和多模特性, 利用一个中空平面反镜让探针光从中心的圆孔完全透过, 且共轭光被圆孔边缘的反镜完全反射, 从而实现探针光和共轭光的空间分离. 分离后的锥形探针光和锥形共轭光经透镜聚焦在量子效率为 96% 的光电探测器中, 该光电探测器的放大倍数调至 10^4 V/A, 从光电探测器获得对应强度的光电流, 经减法器输入频谱分析仪, 从而测得相应的噪声强度.

3 测量结果与分析

3.1 量子关联的测量与分析

实验中测量的锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联如图 2(a) 所示. 图中所有光束对应的噪声功率都已归一化处理, 对应 0 dB 的红色曲线

A 即是散粒噪声极限 (shot-noise limit, SNL). 因此, 噪声功率在 SNL 以下, 意味着存在量子关联; 噪声功率在 SNL 以上, 则对应经典噪声. 由测量结果可以看出, 经过四波混频放大后的探针光的噪声 (橙色曲线 C) 和新产生的共轭光的噪声 (蓝色曲线 D) 都在 6 dB 以上, 即远高于对应的 SNL, 这表明经过四波混频的放大效果, 两束光本身的噪声非常高, 但探针光和共轭光的强度差噪声 (绿色曲线 B) 则低于相应的 SNL 约 2.6 dB, 即强度差压缩为 -2.6 dB. 这个实验结果清晰地证明实验中产生的锥形探针光和锥形共轭光具有量子关联. 如图 2(b) 所示, 为了更准确地测量探针光和共轭光

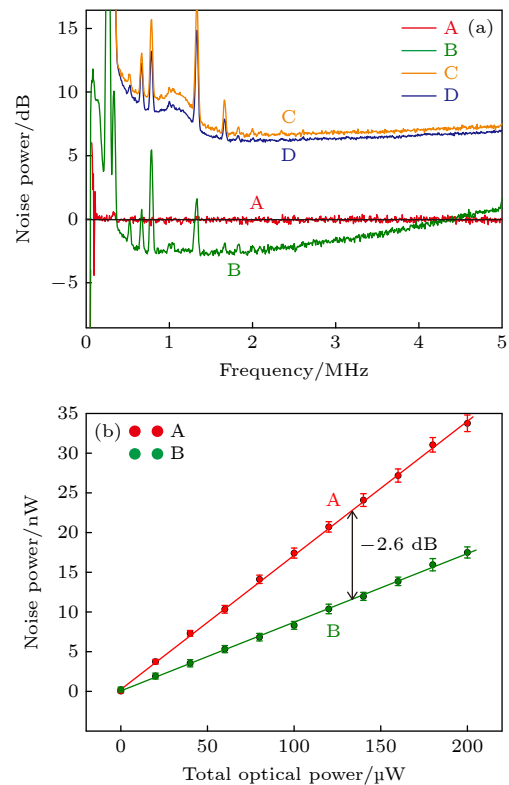


图 2 量子关联的实验测量结果 (a) 经四波混频反应后, 归一化的散粒噪声极限 SNL (曲线 A)、探针光和共轭光的强度差噪声功率 (曲线 B)、经四波混频放大后的探针光噪声功率 (曲线 C)、四波混频产生的共轭光的噪声功率 (曲线 D); (b) 频谱分析仪设置在 2 MHz 时, 实验测量到的强度差噪声 (直线 B) 和相应的 SNL (直线 A) 随总光功率的变化关系

Fig. 2. Experimental results of quantum correlations: (a) Normalized noise powers of the corresponding SNLs (trace A), intensity-difference noise power between the probe and the conjugate beams (trace B), probe beam (trace C) and conjugate beam (trace D); (b) intensity-difference noise power versus total optical power at 2 MHz. Red line: SNL (trace A), Green line: intensity-difference noise power between the probe and the conjugate (trace B).

之间的量子关联, 把频谱仪的分析频率设置在 2 MHz, 并测量不同功率时探针光和共轭光之间的强度差噪声 (绿色直线 B), 以及对应功率时的相干光噪声 (红色直线 A). 实验结果显示, 两条拟合直线的斜率之比约为 1.82, 恰好对应着探针光和共轭光之间的强度差压缩约为 -2.6 dB, 与图 2(a) 的实验结果相符合.

3.2 探究实验参数对量子关联的影响

在实验测量锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联后, 本文又设计实验研究不同实验参数对量子关联的影响. 实验中选择单光子失谐 Δ 、双光子失谐 δ 、泵浦光功率 PP 以及铷原子池温度 T 作为研究变量. 实验方法是保持其中 3 个实验参数不变, 改变第 4 个实验参数, 然后测量并记录锥形探针光和锥形共轭光之间的强度差噪声和四波混频的增益 G . 经过四波混频过程放大后的探针光和新产生的共轭光之间的量子关联通常可以用强度差压缩 (intensity-difference squeezing, IDS) 来描述,

即 $IDS = 10 \log[1/(2G - 1)]$. 因此, 如果只考虑理想条件下的四波混频, 那么增益 G 越大, 压缩度就越大, 即量子关联越强. 图 3 中的所有实验测量数据都已经归一化处理. 首先, 扫描实验参数 Δ , 测量的实验结果如图 3(a) 所示, 在 Δ 从 0.65 GHz 增加到 1.45 GHz 的过程中, 强度差噪声的数值先逐渐减小, 并低于相应的 SNL (图中大小为 0 dB 的红色虚线), 这是因为随着 Δ 的增加, 泵浦光的频率逐渐远离铷原子 D_1 线的共振频率, 铷原子池中光的吸收损耗逐渐减弱, 进而四波混频的增益效果增强, 使得测量的量子关联逐渐增强; 随着 Δ 进一步增加, 泵浦光的频率远远高于共振频率, 四波混频的增益效果减弱 (这一点可以从增益 G 的迅速降低看出), 因此, 随着四波混频反应的减弱和增益 G 的降低, 强度差噪声增大, 并高于 SNL, 即整个扫描过程中, 强度差压缩先增大, 然后减小, 在 $\Delta = 1.15$ GHz 附近, 取得最大强度差压缩. 随后, 扫描实验参数 δ , 测量的实验结果如图 3(b) 所示, 在 δ 从 -4 MHz 增加到 32 MHz 的过程中, 强度差噪

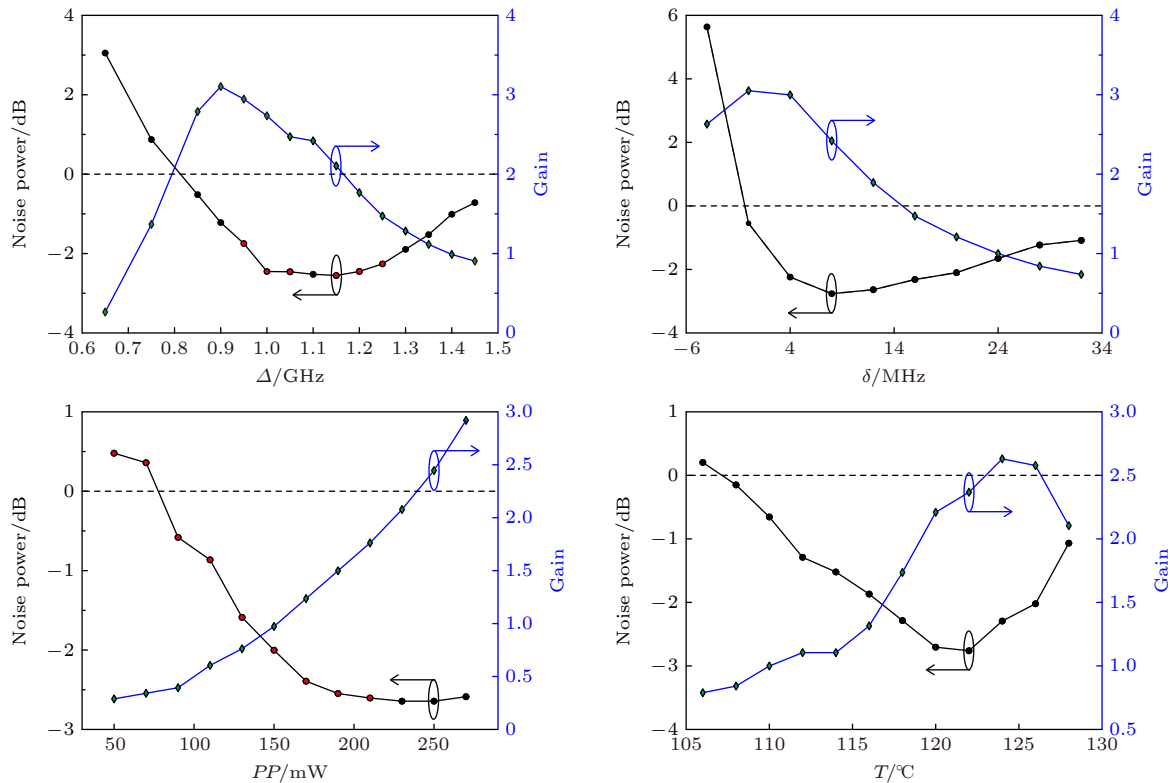


图 3 实验测量强度差噪声和四波混频的增益随单光子失谐 Δ 、双光子失谐 δ 、泵浦光功率 PP 以及铷原子池温度 T 等实验参数的变化关系

Fig. 3. Dependence of the intensity-difference noise and the power gain on (a) one-photon detuning, (b) two-photon detuning, (c) pump power and (d) temperature in vapor cell. The traces for the intensity-difference noise are plotted in red and the traces for the power gain are plotted in green.

声先迅速减小, 随后缓慢增加, 在 $\delta = 8$ MHz 时取得最小值, 即此时强度差压缩最大. 在双光子失谐 δ 小于 4 MHz 时, 强度差压缩度迅速消失的原因是其他非线性效应的产生, 导致量子关联被破坏; 当双光子失谐 δ 较大时, 又使四波混频的反应减弱, 增益也随之减小, 因此, 实验测到的量子关联也减弱. 接着, 改变实验参数 PP , 测量的实验结果如图 3(c) 所示, 随着 PP 的增加, 强度差噪声逐渐降低, 量子关联逐渐增强, 这是因为一定温度条件下, 原子池中的铷原子蒸汽的密度是稳定的, 当 PP 较小时, 铷原子没有充分参与反应, 随着 PP 的增加, 参与四波混频反应的铷原子增加, 因此可以看到增益 G 逐渐增大, 量子关联逐渐增强. 但是当 PP 增加到 200 mW 后, 泵浦光功率已经足够大, 原子池中的铷原子都已充分参与四波混频反应, 泵浦光的功率过剩, 因此我们看到强度差噪声进入稳定区域, 随着 PP 的增加, 强度差噪声只有较小的变化, 并在 $PP = 250$ mW 时取得强度差压缩的最大值. 最后, 改变实验参数 T , 测量到的实验结果如图 3(d) 所示, 当 T 从 106 °C 增加到 122 °C 的过程中, 原子池中铷原子密度增加, 泵浦光与铷原子的相互作用增强, 因此, 测量到强度差噪声逐渐减小, 量子关联逐渐增强; 当 T 从 122 °C 增加到 128 °C 的过程中, 由于铷原子池中温度的增加, 导致光的吸收显著增强, 损耗增加, 并且伴随其他高阶非线性效应的产生, 因此, 测到强度差噪声逐渐增大, 量子关联逐渐减弱. 测量结果显示, 该实验系统在 $\Delta = 1.15$ GHz, $\delta = 8$ MHz, $PP = 250$ mW, $T = 122$ °C 时, 实验中产生的锥形探针光和锥形共轭光之间的强度差压缩最大, 即此时锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联最强.

3.3 多模量子关联的测量与分析

以上实验研究中, 已经测量了锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联, 并深入研究了获得较强量子关联时的实验参数. 然而, 测量锥形探针光和锥形共轭光之间量子关联的多模特性以及探针光和共轭光之间量子关联的对应关系, 对深入了解多模量子关联有着重要意义. 在设计实验测量与分析多模量子关联时, 本文沿用之前工作^[37]中研究多模量子关联的方案, 该方案参考 Embrey 等^[21]研究基于四波混频产生空间多模压缩态的工作和 Marino 等^[38]研究双光束之间量子关联的空间分

布的工作, 并将这两个工作所用的研究方案与我们多模量子关联的实验相结合. 方案的基本思路是找到两种不同的衰减方式, 使量子关联随功率的降低表现出不同的变化趋势, 从而证明锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联具有空间多模特性.

为此, 利用“整体衰减法”和“局部切割法”设计了 4 组对照实验. 如图 4(a) 所示, 第一组实验通过“整体衰减法”进行测量, 其测量结果作为参考标准. 具体实验方法是: 将半波片和 PBS 置于光束进入光电探测器之前的路径上, 通过旋转半波片控制透射出 PBS 的光功率, 并利用光电探测器和频谱仪测量不同透射率时锥形探针光和锥形共轭光之间的强度差压噪声. 其余 3 组实验通过“局部切割法”进行测量, 具体实验方法是: 撤去上一组实验的半波片和 PBS, 将两组薄刀片和高精度的二维平移台置于光束进入光电探测器之前的路径上, 分别以同向、反向和垂直方向切割锥形探针光和锥形共轭光, 从而实现两束光功率的降低, 并将切割后的光束导入光电探测器, 用频谱分析仪测量锥形探针光和锥形共轭光之间的强度差压噪声.

图 4(b) 中曲线 A 是利用半波片和 PBS 进行“整体衰减法”测量的实验结果. 实验结果显示, 随着透射率的增加, 锥形探针光和锥形共轭光之间的强度差噪声以较好的线性逐渐减小, 在透射率为 1 时, 强度差噪声最小, 即量子关联最强, 而且整个测量过程中, 强度差噪声始终小于 0, 即量子关联始终存在. 图 4(b) 中曲线 B 是利用两个薄刀片沿同一方向切割锥形探针光和锥形共轭光时, 测量的强度差噪声随透射率的变化关系. 在保证每次切割的锥形探针光和锥形共轭光的功率相等时, 测量结果与“整体衰减法”测量的结果不同, 只有在 0.9 以上的透射率强度差噪声小于 0, 说明锥形探针光和锥形共轭光之间的量子关联具有空间多模特性.

除此之外, 为了进一步探究锥形探针光和锥形共轭光之间量子关联的对应关系, 进行了另外两种方式的测量, 即利用两个薄刀片分别沿着相反方向和垂直方向切割锥形探针光和锥形共轭光, 并测量不同透射率时的强度差噪声. 测量结果如图 4(b) 中的曲线 C 和曲线 D 所示, 可以清晰地看到, 曲线 C 和曲线 D 明显高于曲线 B, 即在透射率相同时, 强度差噪声明显高于同向切割时的噪声. 这意味着沿着相反方向和垂直方向切割会导致锥形探针光和锥形共轭光的量子关联更快地消失. 究其原

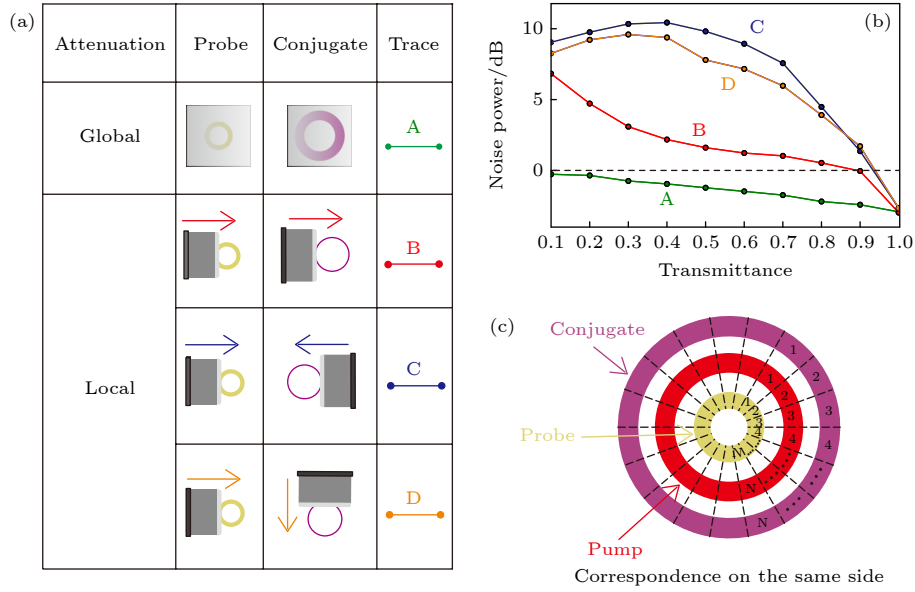


图 4 实验测量锥形探针光和锥形共轭光之间量子关联的多模特性 (a) 通过“整体衰减法”和“局部切割法”进行多模特性测量的实验方案示意图. (b) 实验测量的以不同的衰减方式减小功率时, 强度差压缩噪声随透射率的变化关系. 曲线 A 表示对两束光用半波片和 PBS 进行整体衰减时, 强度差噪声随透射率的变化关系; 曲线 B/C/D 分别表示对两束光用薄刀片进行同向、反向和垂直方向的局部切割时, 强度差噪声随透射率的变化关系. (c) 锥形探针光和锥形共轭光之间量子关联的同侧对应关系示意图

Fig. 4. Experimental measurement of multimode quantum correlations between the conical probe and the conical conjugate: (a) The schematic of global attenuation and local attenuation for experimentally measuring multimode quantum correlation. (b) The intensity-difference noise power as a function of the transmittance as the two beams are attenuated equally; Trace A, the two beams are globally attenuated with a variable beam splitter; Trace B/C/D, the two beams are locally attenuated with razor blades cutting from same direction, opposite direction and the perpendicular direction. (c) The schematic of multimode quantum correlations with correspondence on the same side.

因, 在反向切割时, 切除掉的是不具有量子关联的部分, 因此, 光电探测器测量的剩余光束也具有很多关联不对应的部分, 而不具有量子关联的部分都属于噪声的引入, 所以当以这两种方式切割光束时, 测量到的量子关联会迅速消失.

综合 4 组实验结果来看, 同向切割时的实验结果 (曲线 B) 最接近整体衰减时的实验结果 (曲线 A), 并且和反向切割 (曲线 C) 和垂直方向切割 (曲线 D) 的实验结果明显不同. 图 4(c) 中相同数字编号的部分对应同一组四波混频反应, 只有当量子关联具有这种同侧的对应关系时, 才能与实验测量的结果相符合. 因此, 本文的实验结果清楚地证明, 锥形探针光和锥形共轭光之间具有同侧对应的多模量子关联.

4 结 论

本文基于热铷原子系综中的四波混频过程, 通过构建具有空间锥形结构的泵浦光和探针光, 在实验上产生具有量子关联的锥形探针光和锥形共轭

光, 通过改变单光子失谐 Δ 、双光子失谐 δ 、泵浦光功率 PP 和铷原子池温度 T 等实验参数, 研究量子关联光束之间强度差压缩随实验参数的变化关系, 找到了最佳实验参数, 并测量了此时量子关联光束之间的强度差压缩度约 -2.6 dB. 另外, 通过“整体衰减法”和“局部切割法”对量子关联光束进行不同方式的处理, 对比量子关联随透射率的变化趋势, 证明了本文系统中产生的锥形探针光和锥形共轭光之间具有同侧对应的多模量子关联. 本文中的实验方法和测量结果不仅为产生多模量子关联的研究提供了有效方案, 而且在量子信息处理以及量子通信领域有着潜在的应用价值.

参考文献

- [1] Weedbrook C, Pirandola S, Patrón R G, Cerf N J, Ralph T C, Shapiro J H, Lloyd S 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 621
- [2] DiVincenzo D P 1995 *Science* **270** 255
- [3] Lloyd S, Braunstein S L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1784
- [4] Braunstein S L, van Loock P 2005 *Rev. Mod. Phys.* **77** 513
- [5] Weedbrook C, Pirandola S, García-Patrón R, Cerf N J, Ralph T C, Shapiro J H, Lloyd S 2012 *Reviews of Modern Physics* **84** 621

- [6] Jing J T, Zhang J, Yan Y, Zhao F G, Xie C D, Peng K C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 167903
- [7] Yonezawa H, Aoki T, Furasawa A 2004 *Nature* **431** 430
- [8] van Loock P, Braunstein S L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3482
- [9] Coelho A S, Barbosa F A S, Cassemiro K N, Villar A S, Martinelli M, Nussenzveig P 2009 *Science* **326** 823
- [10] Armstrong S, Wang M, Teh R Y, Gong Q, He Q, Janousek J, Bachor H A, Reid M D, Lam P K 2015 *Nat. Phys.* **11** 167
- [11] Cassemiro K N, Villar A S 2008 *Phys. Rev. A* **77** 022311
- [12] Su X L, Hao S H, Deng X W, Ma L Y, Wang M H, Jia X J, Xie C D, Peng K C 2013 *Nat. Commun.* **4** 2828
- [13] Wang X L, Chen L K, Li W, Huang H L, Liu C, Chen C, Luo Y H, Su Z E, Wu D, Li Z D, Lu H, Hu Y, Jiang X, Peng C Z, Li L, Liu N L, Chen Y A, Lu C Y, Pan J W 2016 *Phys. Rev. Lett.* **117** 210502
- [14] Armstrong S, Wang M, Teh R Y, Gong Q, He Q, Janousek J, Bachor H A, Reid M D, Lam P K 2015 *Nature Physics* **11** 167
- [15] Cassemiro K N, Villar A S 2008 *Physical Review A* **77** 022311
- [16] Yokoyama S, Ukai R, Armstrong S C, Sornphiphatphong C, Kaji T, Suzuki S, Yoshikawa J I, Yonezawa H, Menicucci N C, Furasawa A 2013 *Nat. Photonics* **7** 982
- [17] Roslund J, De Araujo R M, Jiang S F, Fabre C, Treps N 2014 *Nat. Photonics* **8** 109
- [18] McCormick C F, Boyer V, Arimondo E, Lett P D 2007 *Opt. Lett.* **32** 178
- [19] Boyer V, Marino A M, Pooser R C, Lett P D 2008 *Science* **321** 544
- [20] Marino A M, Pooser R C, Boyer V, Lett P D 2009 *Nature* **457** 859
- [21] Embrey C S, Turnbull M T, Petrov P G, Boyer V 2015 *Phys. Rev. X* **5** 031004
- [22] Qin Z Z, Cao L M, Wang H L, Marino A M, Zhang W P, Jing J T 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 023602
- [23] Cao L M, Qi J, Du J J, Jing J T 2017 *Phys. Rev. A* **95** 023803
- [24] Liu S S, Wang H L, Jing J T 2018 *Phys. Rev. A* **97** 043846
- [25] Cao L M, Wang W, Lou Y B, Du J J, Jing J T 2018 *Appl. Phys. Lett.* **112** 251102
- [26] Wang H L, Zheng Z, Wang Y X, Jing J T 2016 *Opt. Express* **24** 23459
- [27] Lv S C, Jing J T 2017 *Phys. Rev. A* **96** 043873
- [28] Chen Y X, Liu S S, Lou Y B, Jing J T 2021 *Phys. Rev. Lett.* **127** 093601
- [29] Liu S S, Lou Y B, Chen Y X, Jing J T 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 060503
- [30] Liu S S, Lou Y B, Jing J T 2020 *Nat. Commun.* **11** 3875
- [31] Lou Y B, Liu S S, Jing J T 2021 *Phys. Rev. Lett.* **126** 210507
- [32] Daems D, Bernard F, Cerf N J, Kolobov M I 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 447
- [33] Daems D, Cerf N J 2010 *Phys. Rev. A* **82** 032303
- [34] Zhang K, Wang W, Liu S S, Pan X Z, Du J J, Lou Y B, Yu S, Lv S C, Treps N, Fabre C, Jing J T 2020 *Phys. Rev. Lett.* **124** 090501
- [35] Wang H L, Fabre C, Jing J T 2017 *Phys. Rev. A* **95** 051802
- [36] Liu S S, Wang H L, Jing J T 2018 *Physical Review A* **97** 043846
- [37] Cao L M, Du J J, Feng J L, Qin Z Z, Marino A M, Kolobov M I, Jing J T 2017 *Opt. Lett.* **42** 1201
- [38] Marino A M, Boyer V, Pooser R C, Lett P D, Lemons K, Jones K M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 093602

Experimental generation of multimode quantum correlations between a conical probe and a conical conjugate based on a four-wave mixing process^{*}

Cao Lei-Ming¹⁾²⁾ Du Jin-Jian²⁾ Zhang Kai²⁾

Liu Sheng-Shuai²⁾ Jing Jie-Tai^{2)3)4)†}

1) (*Physics and Electronic Information College, Luoyang Normal College, Luoyang 471022, China*)

2) (*State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China*)

3) (*CAS Center for Excellence in Ultra-intense Laser Science, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

4) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 11 January 2022; revised manuscript received 9 April 2022)

Abstract

Multimode quantum correlations and entanglements has drawn much attention recently due to its importance for both fundamental science and the future development of quantum information processing and quantum communication. Here, by using a four-wave mixing process with a conical pump beam and a conical probe beam, we experimentally generate the multimode quantum correlations between a conical probe beam and a conical conjugate beam, and we also observe about -2.6 -dB intensity-difference squeezing between these two conical beams. In addition, we find the optimal value of each parameter in this scheme for further applications. Besides, the multi-spatial-mode nature of the generated quantum correlated beams is shown by comparing the variation tendencies of the intensity-difference noise of the probe and conjugate beams under global attenuation and local cutting attenuation. Our scheme may find potential applications in quantum information processing and quantum communication.

Keywords: four-wave mixing, quantum correlation, intensity-difference noise

PACS: 03.67.Mn, 03.67.Bg, 42.50.-p

DOI: 10.7498/aps.71.20220081

^{*} Project supported by the Innovation Program of Shanghai Municipal Education Commission, China (Grant No. 2021-01-07-00-08-E00100), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11874155, 11804141, 91436211, 11374140), the Natural Science Foundation of Shanghai, China (Grant No. 17ZR1442900), the Basic Research Project of Shanghai Science and Technology Commission, China (Grant No. 20JC1416100), the Program of Scientific and Technological Innovation of Shanghai, China (Grant No. 17JC1400401), the Shanghai Municipal Science and Technology Major Project, China (Grant No. 2019SHZDZX01), the Shanghai Sailing Program, China (Grant No. 21YF1410800), the Minhang Leading Talents, China (Grant No. 201971), and the 111 Project, China (Grant No. B12024).

[†] Corresponding author. E-mail: jtjing@phy.ecnu.edu.cn

基于四波混频过程产生介于锥形探针光和锥形共轭光之间的多模量子关联

曹雷明 杜金鉴 张凯 刘胜帅 荆杰泰

Experimental generation of multimode quantum correlations between a conical probe and a conical conjugate based on a four-wave mixing process

Cao Lei-Ming Du Jin-Jian Zhang Kai Liu Sheng-Shuai Jing Jie-Tai

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 160306 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220081

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220081>

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

基于级联四波混频过程的量子导引

Quantum steering based on cascaded four-wave mixing processes

物理学报. 2021, 70(16): 160301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201981>

基于四波混频过程的纠缠光放大

Amplification of entangled beam based on four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211324>

基于四波混频过程和线性分束器产生四组份纠缠

Generation of quadripartite entanglement based on four-wave mixing process and linear beam splitter

物理学报. 2020, 69(9): 090303 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200040>

四波混频光相位运算器原理及其噪声性能研究

Principle and noise performance of optical phase arithmetic devices using four wave mixing

物理学报. 2018, 67(9): 094208 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172638>

级联四波混频系统中纠缠增强的量子操控

Quantum manipulation of entanglement enhancement in cascaded four-wave-mixing process

物理学报. 2019, 68(9): 094205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181837>

空频复用光纤中四波混频过程的解析分析方法

Analytical method for four wave mixing in space-frequency multiplexing optical fibers

物理学报. 2019, 68(11): 114207 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182129>