

连续变量量子态的光学操控

彭堃堃 贾晓军 苏晓龙 谢常德

(山西大学光电研究所量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

摘要 量子态的光学操控是指在光场的传输、存储和频率变换等过程中用光学方法对光场的量子态进行操作与控制。量子态操控是量子通讯及量子态制备和应用的基础。在简要介绍连续变量多组份纠缠态光场制备的基础上, 概述基于多组份纠缠态光场的连续变量量子通讯网络及在执行压缩态和纠缠态光场操控方面的实验研究进展。

关键词 量子光学; 量子态; 光学操控

中图分类号 O431.2 文献标识码 A doi: 10.3788/ACS201131.0900107

Optical Manipulations of Quantum States with Continuous Variables

Peng Kunchi Jia Xiaojun Su Xiaolong Xie Changde

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract The optical manipulation of quantum states means to manipulate and control the quantum states of light in the processes of its transmission, storage, frequency-conversion and so on, based on optical schemes. The manipulation of quantum states is the important research subject in quantum information science. We briefly introduce the progress of the experimental investigation on the preparation of multipartite entangled states of optical field, quantum communication network as well as the optical manipulation of squeezed and entangled states of light.

Key words quantum optics; quantum state; optical manipulation

OCIS codes 270.2500; 270.5585; 270.6570

1 引 言

非经典光场(如压缩态, 纠缠态)的研究是近几十年来科学工作者关注的热点之一。非经典光场是量子信息和量子计算的重要资源, 人们可以利用它在信息与通讯领域完成经典物理不可能完成的工作^[1,2]。随着量子信息科学应用的发展, 由多于两个子系统构成的量子纠缠态, 即多组份量子纠缠态愈来愈显示出其重要性, 它是进行量子计算和量子网络通讯的基础。现已发现存在着不同类型的多组份量子纠缠态, 它们具有不同的物理结构和特性。目前已经实验实现的连续变量多组份纠缠态有 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 纠缠态^[3]、Cluster 纠缠态^[4]、权重 Graph 纠缠态^[5]等。根据多

组份纠缠态的多样性, 可以应用它们进行不同需求的量子信息课题的科学研究。通过对压缩态光场或者两组份 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠态光场进行有序的分束器分束组合, 可制备出各种不同类型的连续变量多组份纠缠态光场。

为了实现高质量的信息传递和远距离量子通讯及提高多组份纠缠态光场的关联度, 人们必须首先提高压缩态光场的压缩度及纠缠态光场的关联度。自从 1985 年 Slusher 等^[6]首次实验制备压缩态光场后, 人们一直为提高压缩态光场的压缩度而努力。2010 年 Mehmet 等^[7]获得了 11.5 dB 压缩度的真空压缩态光场, 这是目前达到的最好指标。对于纠缠态光场, 1992 年 Ou 等^[8]首次从实验上实现了具

收稿日期: 2011-07-08; 收到修改稿日期: 2011-07-19

基金项目: 国家 973 计划(2010CB923103) 和国家自然科学基金(60821004, 60736040, 11074157, 10804065) 资助课题。

作者简介: 彭堃堃(1936—), 男, 光学专家。2003 年当选为中国科学院院士。1985 年主持建立了山西大学光电研究所及量子光学与光量子器件国家重点实验室。在国内首先开展了连续变量非经典光场产生及应用的理论与实验研究, 研制了一系列单频稳频连续固体激光器。曾获国家技术发明二等奖, 国家自然科学基金二等奖等。2003 年获何梁何利科学和技术进步奖。2005 年当选为美国光学学会特殊资格会员(OA Fellow)。E-mail: kcpeng@sxu.edu.cn

有 4 dB 量子关联的 EPR 纠缠态光场。山西大学光电研究所于 2010 年利用 II 类 KTP 晶体获得了正交振幅与正交相位关联分别为 6.0 dB 的 EPR 纠缠态光场^[9]。目前除了设法直接提高获得的各种非经典光场的压缩度和关联度外, 还可以利用量子操控的方法提高光场的压缩度和纠缠态光场的关联度, 而且通过操控, 还可以按照不同的应用要求操控光场的压缩及纠缠特性。

利用分束器、平衡零拍测量等线性光学变换的手段对压缩态及纠缠态光场进行线性光学操控, 可以制备各种连续变量多组份纠缠态光场^[10-15], 并以此为基础执行一些量子逻辑操作^[16-19]。利用相敏放大器等非线性光学操控的手段, 可以提高光场的压缩度和纠缠态光场的关联度, 而且通过操控, 还可以按照不同的应用要求操控光场的压缩及纠缠特性^[20-23]。

本文先简要介绍 6.0 dB 连续变量 EPR 纠缠态光场的实验产生, 然后介绍利用压缩态光场及 EPR 纠缠态光场在分束器上干涉耦合获得连续变量多组份纠缠态光场的实验进展, 讨论利用完全三组份关联(TTPC)纠缠态光场去实现量子通讯网络, 最后介绍压缩态光场及 EPR 纠缠态光场的增强及操控的研究进展。

2 6.0 dB 连续变量 EPR 纠缠态光场的实验产生

理论和实验证明, 非简并光学参变放大器(NOPA)是产生高质量纠缠态光场最理想的方法之

一^[24,25]。1992 年, Ou 等^[8]首次从实验上证明了运转于阈值以下的 NOPA 输出的两个下转换真空模具有 EPR 量子关联特性。为了获得便于应用的明亮 EPR 光束, 山西大学光电研究所从理论上计算了注入场平均值不为零时 NOPA 输出场的特性^[25], 尔后在实验上通过运转于参变放大和反放大状态的 NOPA 分别获得了具有振幅正关联、相位反关联和振幅反关联、相位正关联的两类明亮 EPR 纠缠光束对。最近, 利用高精细度的光学模清洁器将抽运 NOPA 光束的正交振幅和正交相位分量的噪声压制到量子噪声极限水平, 即抽运光为完全相干光。其次, 所有锁定系统的相位噪声都被严格控制在 1.8° 之内^[9]。

测量所产生 EPR 纠缠态光束的正交振幅和与正交相位差的噪声功率谱如图 1 所示^[9]。用两台谱仪同时测量其 2 MHz 频率处的量子噪声极限(QNL), 关联噪声和电子学噪声。图中曲线 1 为 QNL。图 1(a), (b) 分别为测量得到的正交振幅反关联 $\langle \delta^2(X_a + X_b) \rangle$ 和正交相位正关联 $\langle \delta^2(Y_a - Y_b) \rangle$ 的关联噪声起伏, 它们分别低于相应的 QNL(6.08 ± 0.18) dB 和 (6.22 ± 0.16) dB。探测器的电子学噪声比 QNL 低大约 11 dB。考虑电子学噪声的影响, 得到实际的量子关联起伏分别为

$$\langle \delta^2(X_a + X_b) \rangle = (7.30 \pm 0.18) \text{ dB},$$

$$\langle \delta^2(Y_a - Y_b) \rangle = (7.50 \pm 0.16) \text{ dB}.$$

所产生 EPR 纠缠态光束满足不可分判据 $\langle \delta^2(X_a + X_b) \rangle + \langle \delta^2(Y_a - Y_b) \rangle = 0.485 < 2$ 。

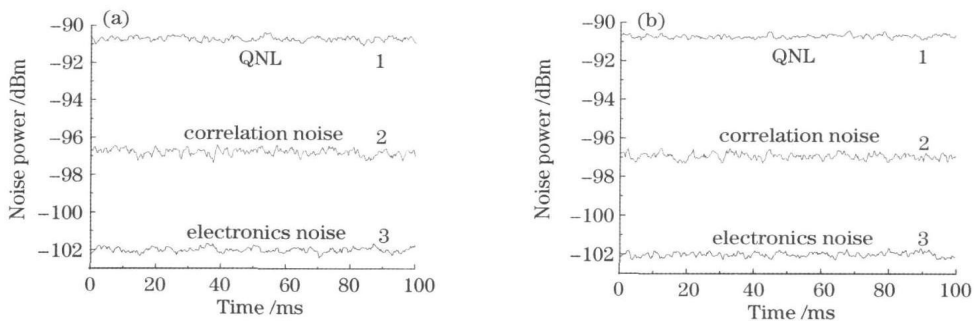


图 1 EPR 关联噪声功率谱。(a) 正交振幅和噪声功率; (b) 正交相位差噪声功率

Fig. 1 Measured correlation noise powers of EPR beams. (a) Noise power of amplitude sum; (b) noise power of phase difference

3 利用线性光学操控制备连续变量多组份纠缠态光场

多组份纠缠态是实现连续变量量子信息网络与

量子计算的基本资源。多组份纠缠态是相对于 EPR 纠缠态而言的, 它是指纠缠由两个以上的子系统共享的纠缠态。目前已经从实验上分别获得了四光子 Cluster 纠缠态, 五光子 GHZ 偏振纠缠态, 六

光子 GHZ 纠缠态和 Cluster 纠缠态以及八光子薛定谔猫态, 并利用四光子 Cluster 态演示了单量子计算^[26-29]。在连续变量方面, 利用光学分束器等线性光学变换手段, 对单模压缩态光场进行线性光学操控, 即可获得各种连续变量多组份纠缠态光场。几个研究组已产生了连续变量三组份纠缠态, 并将它们成功地应用于受控密集编码量子通讯, 量子离子物传送网络和量子秘密共享等^[10,11]。2007 年山西大学光电研究所设计了利用正交压缩态光场产生连续变量四组份纠缠态光场的实验系统, 并从实验上获得了四组份 GHZ 和 Cluster 纠缠态, 实验结果满足连续变量多组份纠缠的完全不可分判据^[13]。2008 年 Yukawa 等^[14]制备了线性及 T 型 Cluster 纠缠态光场。同年, 山西大学光电研究所提出了一种新型的四组份纠缠态, 其纠缠特性不同于普通的 GHZ 态和 Cluster 态, 而且到目前为止, 还没有相应的量子比特表达方式。它的纠缠判据不等式中, 每个不等式都包含有四个纠缠模式中三组份的正交振幅和正交相位组合, 因此称之为连续变量 TTPC 纠缠态^[15], 其结构如图 2 所示。

制备连续变量四组份 TTPC 纠缠态光场的实验

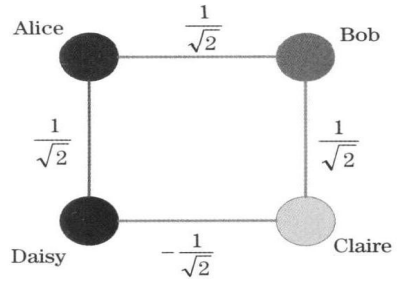


图 2 连续变量四组份 TTPC 纠缠态

Fig. 2 Four-partite entangled states with TTPC with continuous variables

装置如图 3 所示。Nd:YAP/KTP 激光器输出的 540 nm 的绿光和 1080 nm 的红外光分别注入两个非简并光学参变放大器(NOPA1 和 NOPA2)作为抽运场和注入信号场。当非简并光学参变放大器运转于参变反放大状态时, 输出场信号模与闲置模之间具有振幅反关联、相位正关联的 EPR 纠缠特性(分别由 a_1, a_2, a_3 和 a_4 表示), 然后 a_2 和 a_3 以 $\pi/2$ 的相位差在一个 50:50 分束器上耦合, 则输出光场 b_1, b_2, b_3 和 b_4 为四组份 TTPC 纠缠态光场。它们满足相应的纠缠不可分判据^[19,30]:

$$\begin{cases} V(\sqrt{2}X_{b_2} + Y_{b_3} + g_1X_{b_1}) + V(Y_{b_2} + \sqrt{2}X_{b_3} - g_4Y_{b_4}) = 1.11 \pm 0.01 < \sqrt{2} \\ V(X_{b_1} + Y_{b_3} + g_2X_{b_2}) + V(Y_{b_1} + X_{b_3} - g_4Y_{b_4}) = 0.94 \pm 0.01 < 1 \\ V(X_{b_2} + X_{b_4} + g_1X_{b_1}) + V(Y_{b_2} - Y_{b_4} + g_3X_{b_3}) = 0.97 \pm 0.01 < 1 \end{cases} \quad (1)$$

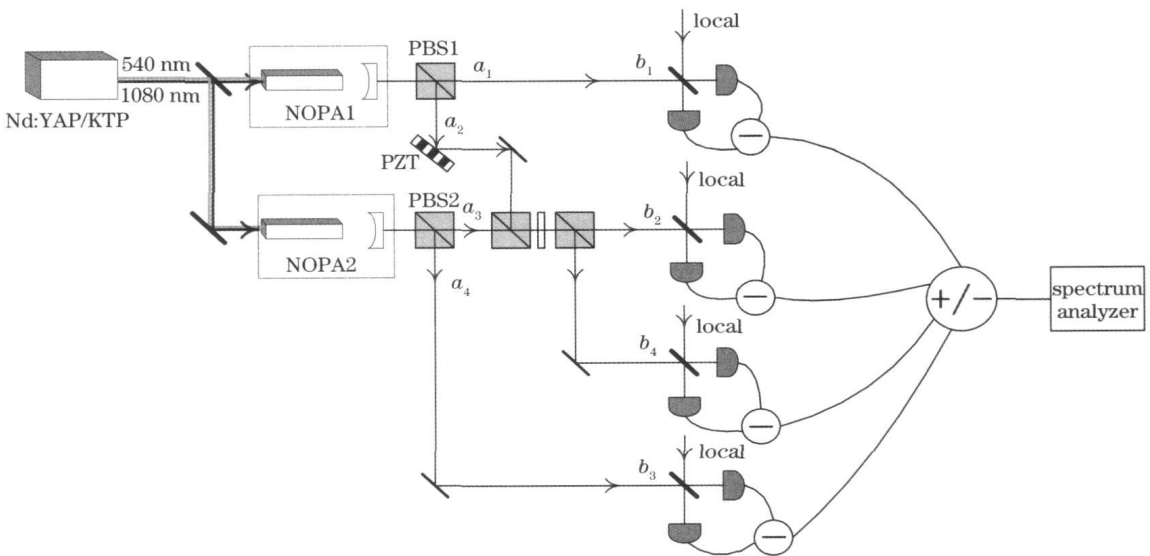


图 3 产生 TTPC 态的实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for the generation of TTPC entangled states

4 基于 TTPC 纠缠态光场的量子通讯网络

经典信息传输系统中,信息被编译为 0 或 1 的二进制数据串。如果想传递 2 bit 信息,通讯双方必须完成两次信息传递过程。随着量子信息概念的提出,研究者们开始考虑如何利用量子力学的原理提高传输信道容量。1992 年, Bennett 等^[31]提出通过纠缠粒子的引入可以突破经典限制,进而提高信息传输容量,即量子密集编码^[31]。它是指通过操控量子纠缠系统中的某一子系统实现 2 bit 信息的传递过程。1996 年, Mattle 等^[32]首先实现了分离变量的量子密集编码。之后, Braustein 等^[33]将量子密集编码扩展到连续变量领域,提出了相应的实验方案。2000 年,山西大学光电研究所利用明亮的 EPR 纠缠光束首次在实验上实现了连续变量量子密集编码^[34]。结果表明,基于量子纠缠的量子密集编码在通讯过程中可以增加信道容量,提高

信息传输效率。在此基础上本课题组提出一个基于 TTPC 纠缠态的四站量子密集编码通讯网络方案^[35],首先将 TTPC 纠缠态光场的四个子模 b_1, b_2, b_3 和 b_4 分发到四个相距很远的通讯用户 Alice, Bob, Claire 和 Daisy。图 4 (a) 表示两个相邻用户 (Alice 和 Bob) 之间通讯的情况, Alice 将要传递的信息分别利用振幅调制器与相位调制器调至在他拥有的子模 b_1 上, 随后将其发送给 Bob, 由于 TTPC 纠缠态光场需要至少三个参与者才能解调信息, 所以 Bob 为了获得 Alice 所传递的信息, 必须获得 Claire 和 Daisy 的帮助。图 4(b) 表示两个对角用户 (Alice 和 Claire) 之间通讯的情况, Alice 将要传递的信息分别利用振幅调制器与相位调制器调至在他拥有的子模 b_1 上, 随后将其发送给 Claire, Claire 必须将 Bob 或者 Daisy 传递给他的子模与自己所拥有的子模耦合, 然后对其进行联合测量, 才能得到 Alice 所传递的信息。

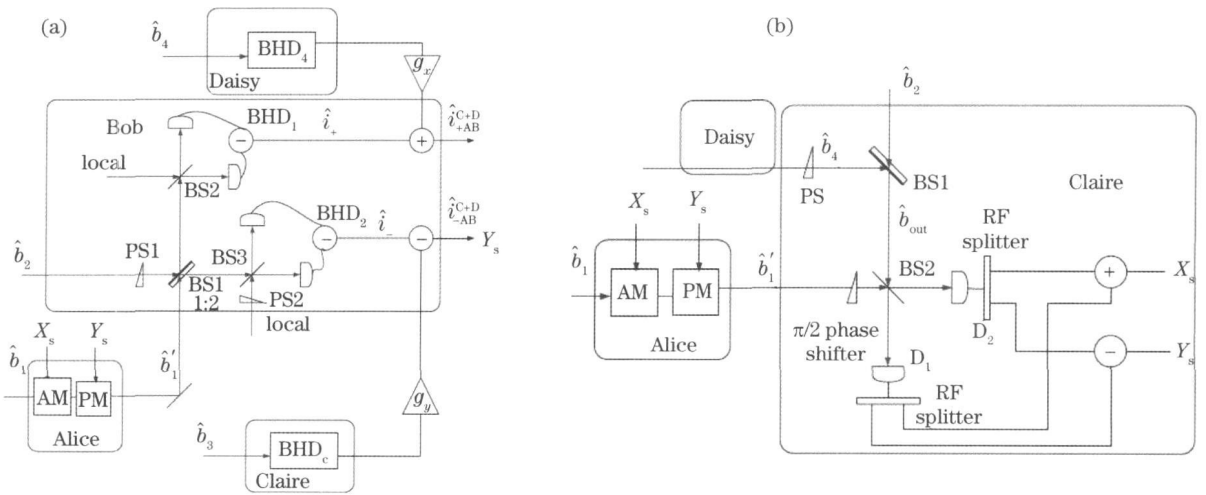


图 4 基于 TTPC 纠缠态光场的量子通讯网络。(a) 相邻用户之间的通讯原理示意图; (b) 对角用户之间的通讯原理示意图

Fig. 4 Quantum communication network based on TTPC entangled states. (a) Schematic diagram of communication between two neighbor users; (b) schematic diagram of communication between two diagonal participants

图 5 显示的是他们之间的信道容量随平均光子数的变化情况, 图 5(a) 描述了两个相邻用户之间通讯时的情况, 图 5(b) 则描述了两个对角用户之间通讯时的情况, 其中曲线 1 代表没有其他用户帮助的情况, 曲线 2 代表其他两个用户同时帮助的情况, 曲线 3 代表一个用户帮助的情况。可以看出对于两个相邻用户之间的通讯, 对于某一给定的平均光子数, 一个用户帮助是各种通讯网络中信道容量最高的一种结构, 也就是说, 使用单一控制者参与的通讯方案可获得最高的信道容量。对于两个对角用户之间的

通讯, 由两个控制者参与的情况和单一控制者参与情况, 信道容量基本相同, 仅从信道容量的角度来看, 这两种通讯网络传输信息的能力基本相同。

5 压缩态光场及纠缠态光场的非线性操控

随着研究工作的深入, 人们发现通过光学参变过程, 不但能够产生各种非经典光场, 而且通过控制参变过程还能实现非经典光场的放大与操控。1997 年, Bruckmeier 等^[36]在实验上使用振幅压缩光注入

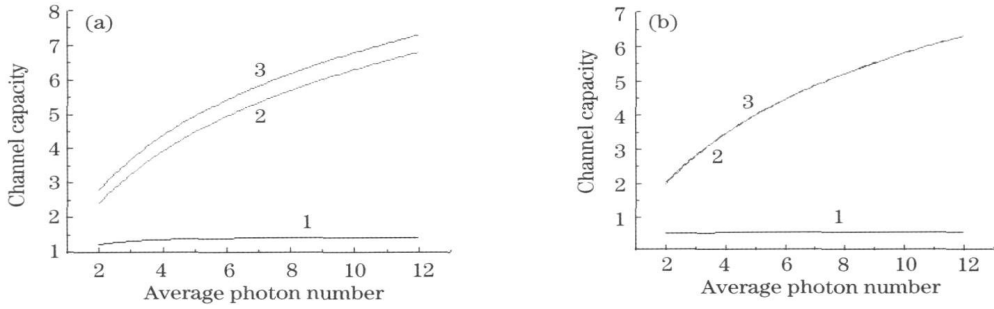


图 5 量子通讯网络信道容量随平均光子数的变化情况。(a) 相邻用户之间的通讯; (b) 对角用户之间的通讯
Fig. 5 Channel capacity as a function of the average photon numbers. (a) Communication between two neighbor users; (b) communication between two diagonal participants

到光学参变振荡器输入端口的方法实现了对量子非破坏测量的改进。2005年, Andersen 等^[37] 首先实现了相干态光场的非相敏放大。而通过控制相敏放大器的工作状态, 可以实现任意非经典光场的放大。2006年, Agarwal^[38] 从理论上研究了阈值以下运转的光学参变放大器对于注入量子态的作用, 证明了通过简并光学参变放大器(DOPA)可以对压缩态光场实现放大与操控, 并预言注入场和下转换谐波场的干涉作用会导致光谱的分裂。随后, 山西大学光电研究所从实验上研究了相敏DOPA对于注入的压缩真空态的操控, 实现了对真空压缩光的量子干涉^[20, 21], 如图6所示。当注入抽运光和信号光之间的相位差为 $\phi = 0$ 且在腔失谐为零时, 反射光场振幅方向(即 X 分量)上的噪声起伏对注入压缩态光场有放大作用, 而且随着抽运光的强度增大, 放大作用的强度也随之增大, 如图6(a)所示。当注入抽运光和信号光之间的相位差为 $\phi = \pi/2$ 时, 反射光场相位方向(即 Y 分量)上噪声起伏在腔失谐为零时, 量子干涉作用导致的放大作用使 X 分量噪声变大到散粒噪声基准(SNL)之上, 而 Y 分量噪声减小至散粒噪声基准之下, 如图6(b)所示。

5.1 压缩态光场的非线性操控

利用三共振简并光学参变放大腔对真空压缩态的操控的实验光路如图7所示, 采用山西大学光电研究所自行研制的双波长输出单频稳频 Nd:YVO₄/KTP 固体激光器作为抽运源^[39, 40], 从激光器出来后分为532和1064 nm 两束光, 1064 nm 的光射入模清洁剂并锁定, 出射的1064 nm 光分为两束, 分别用作本振光和匹配所需要的模拟光, 532 nm 光场分别作为光学参变放大器(OPA)和光学参变振荡器(OPO)的抽运光。将OPO产生的真空压缩光注入OPA中研究其对真空压缩光的增强

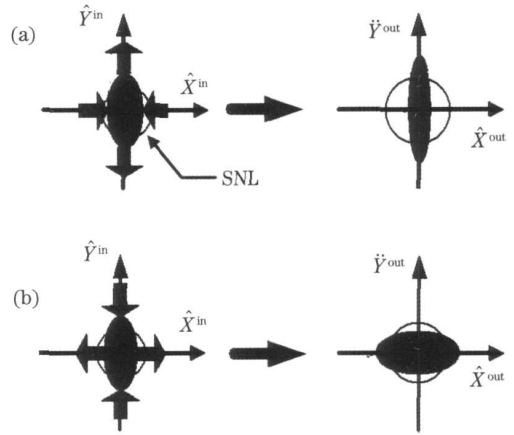


图 6 真空压缩光场增强及操控示意图。(a) 压缩增强; (b) 压缩操控

Fig. 6 Schematic diagram of enhancement and manipulation of squeezed states of light. (a) Enhancement of squeezed states of light; (b) manipulation of squeezed states of light

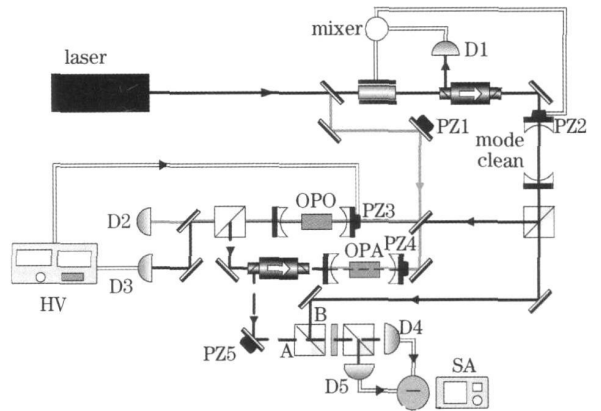


图 7 真空压缩态操控实验方案图

Fig. 7 Experimental setup for the manipulation of squeezed states of light

及操控, OPA 腔输出光送入平衡零拍探测器进行采集和分析, 实验结果如图8所示。图8(b)是将真空

压缩态光场注入到没有抽运光注入的 OPA 腔中, 测量 X 分量量子噪声的结果。这时可以测量 OPO 腔输出的压缩真空态光场的压缩度, 其噪声低于散粒噪声基准约 0.8 dB。图 8(e) 是测量 Y 分量量子噪声的结果。图 8(a) 是将真空压缩态光场注入到 OPA 腔中, 并在 OPA 腔的另一端口注入抽运光且使得 OPA 腔中压缩方向与压缩真空态光场的压缩分量(即 X 分量)一致, 测量 X 分量量子噪声的结果。可以看到与图 8(b)相比, 在无失谐 OPA 腔完全共振时, 测量到的压缩度并没有减小, 而是相比于远失谐时压缩度有所增加; 同时由于干涉所形成的双峰高度也相应增大。图 8(d) 是测量 Y 分量量子噪声的结果, 与图 8(b)相比, 在无失谐 OPA 腔完全共振时, 测量到的噪声相比于远失谐时噪声略有增

大。因此可以知道在这种条件下注入的压缩真空态光场被进一步压缩, X 分量的噪声被进一步压缩到更低的水平, 而 Y 分量噪声明显增加。图 8(c) 是将真空压缩态光场注入到 OPA 腔中, 并在 OPA 腔的另一端口注入抽运光且使得 OPA 腔中压缩方向与压缩真空态光场的压缩分量相正交, 测量 X 分量量子噪声的结果。与图 8(b)相比, 在无失谐 OPA 腔完全共振时, 测量到的噪声不再低于散粒噪声基准。图 8(f) 是测量 Y 分量量子噪声的结果, 与图 8(e)相比, 在无失谐 OPA 腔完全共振时, 测量到的噪声低于散粒噪声基准。因此可以知道在这种条件下注入的压缩真空态光场被反向压缩, Y 分量被压缩成为压缩分量, 而原来的压缩分量 X 不再压缩。

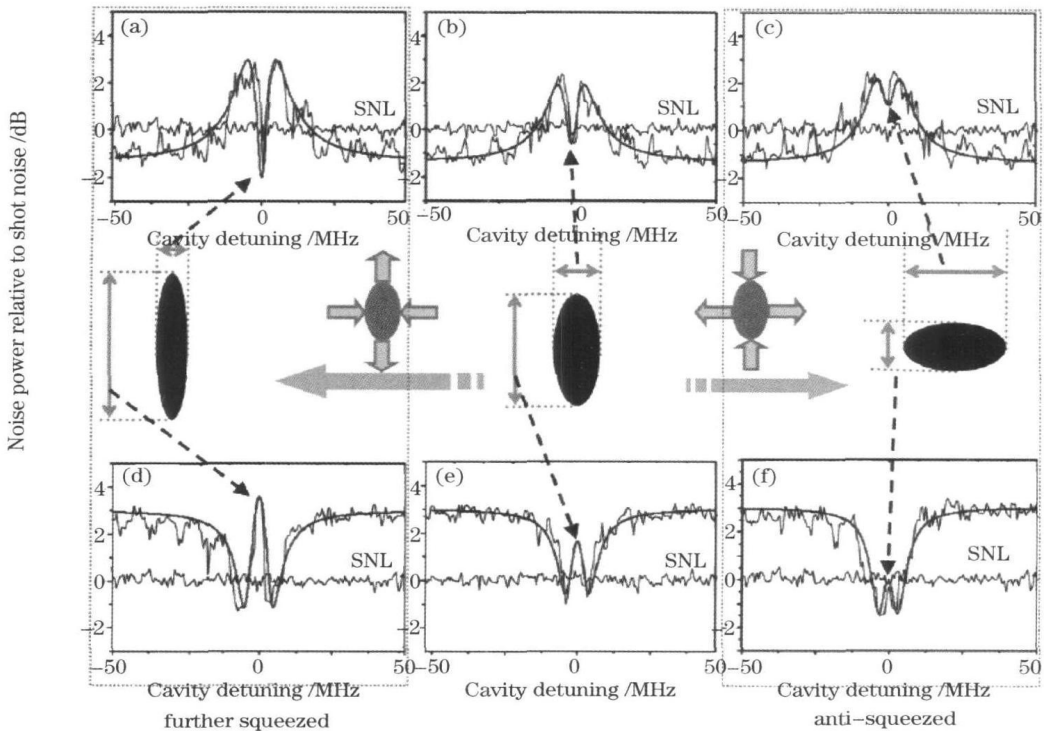


图 8 利用简并光学参变放大器对真空压缩态进行操控的实验结果

Fig. 8 Experimental results for the manipulation of squeezed states of light

5.2 纠缠态光场的非线性操控

除压缩态光场外, 纠缠态光场也可以由运转于阈值以下的 II 类非简并光学参变过程进行操控。首先从理论上证明了通过一个运转于阈值以下的非简并光学参变放大器可以对其注入的具有 EPR 纠缠特性的纠缠态光场进行纠缠增强与操控^[21], 随后从实验上证实利用非简并光学参变放大器可以对输入的纠缠态光场实现纠缠增强与操控^[23]。在实验中使用两个非简并光学参变放大器, 一个用于产生初始 EPR 纠

缠光束, 另一个用于对注入的纠缠光束进行纠缠增强与操控。当两个非简并光学参变放大器都工作于参变反放大状态时, 输出纠缠态光场的纠缠度由初始的 4.0 dB 左右提高到 5.5 dB; 当工作状态不同时, 由初始的振幅反关联、相位正关联的纠缠态光场变成了振幅反关联、相位正关联的纠缠态光场, 纠缠关系发生了明显改变。实验光路如图 9 所示, 采用的是自行研制的双波长输出单频稳频 Nd: YAP/KTP 固体激光器。540 nm 的绿光和 1080 nm 的红外光分别作为抽

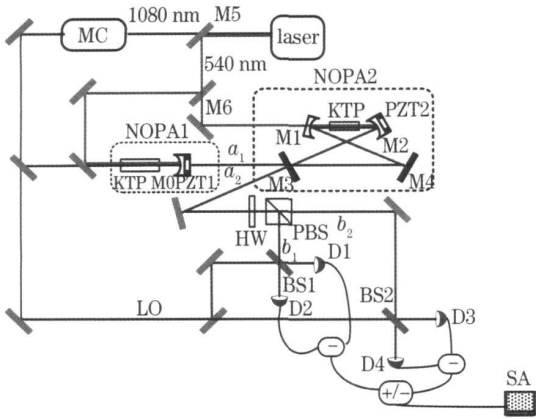


图9 EPR 纠缠态光场操控实验装置图

Fig.9 Experimental setup for the manipulation of EPR entangled states of light

运光, 信号光和平衡零拍探测系统的本地光。

首先用一个对 1080 nm 红外光高透并对 540 nm 绿光全反的分束片 M5 把激光器输出的红外光和绿光分成两路。红外光通过模清洁器(MC)后被分为两束, 一束用作光学参变放大器的注入信号光, 另一

束用作平衡零拍探测系统的本地光。输出的绿光也由分束片 M6 分为两束, 分别用作两个光学参变放大器的抽运光。从 NOPA1 输出的纠缠光作为信号光注入到 NOPA2 中。从 NOPA2 输出的信号光和闲置光由偏振分束棱镜 (PBS) 分开后, 分别进入一套平衡零拍探测系统测量其正交分量噪声, 再通过加减法器后输入到频谱分析仪 (SA), 就可以测量输出信号场和闲置场的正交振幅和正交相位的关联噪声。首先, 锁定抽运场和注入到 NOPA1 的信号场之间的相对相位为 π , 即使 NOPA1 工作于参变反放大状态, 这时, NOPA1 输出的是正交振幅反关联与正交相位正关联的纠缠光束。当系统稳定运转时, 产生的 EPR 纠缠光束的功率为 50 μ W。在分析频率为 3 MHz 时, 测量得到的 NOPA1 输出 EPR 纠缠态光场的正交振幅和与正交相位差的关联噪声谱分别如图 10(a), (b) 所示, 其中曲线 1 为 SNL, 曲线 2 分别为正交振幅和与正交相位差的关联噪声, 可以看出它们分别低于相应的 SNL (4.0 ± 0.2) dB 和 (3.9 ± 0.2) dB。

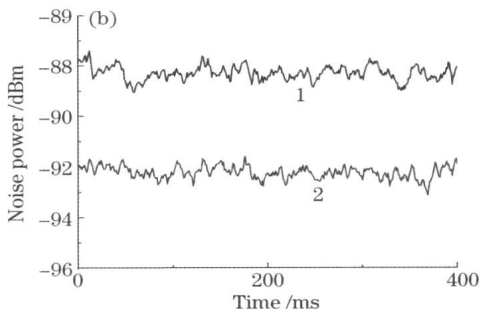
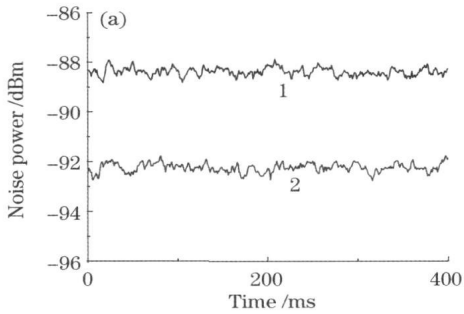


图 10 EPR 纠缠态光场增强实验结果。初始 EPR 纠缠态光场的正交振幅和 (a) 及正交相位差 (b) 的关联噪声谱

Fig.10 Experimental results for the enhancement of EPR entangled states of light. Noise powers of the correlation variances of the initial EPR beams (a) for amplitude sum and (b) for phase difference

接下来测量经 NOPA2 放大以后输出的 EPR 纠缠态光场的关联度。取出腔中的挡光片使得

NOPA1 输出的 EPR 纠缠态光场可以耦合进 NOPA2。同时打开 NOPA2 的抽运光 (功率约为

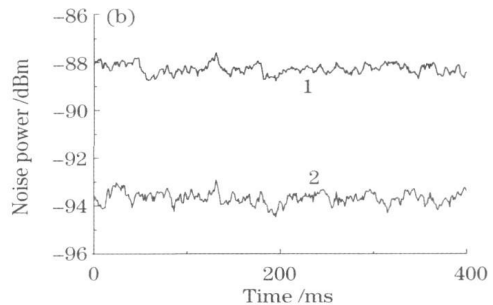
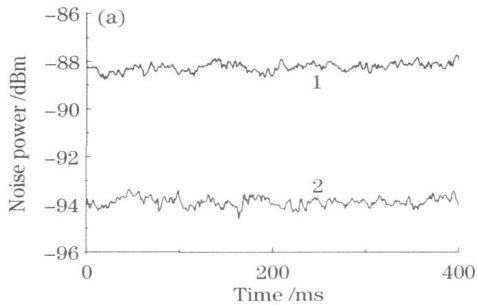


图 11 EPR 纠缠态光场操控实验结果。NOPA2 输出的纠缠态光场的正交振幅和 (a) 及正交相位差 (b) 的关联噪声谱

Fig.11 Experimental results for the manipulation of EPR entangled states of light. Noise powers of the correlation variances of the output beams from NOPA2 (a) for amplitude sum and (b) for phase difference

180 mW), 同样将注入光与抽运光之间的相对相位锁定为 π , 即 NOPA2 同样工作于参变反放大状态。NOPA2 输出的信号光与闲置光的振幅和与相位差分量在 3 MHz 分析频率处的关联噪声谱分别如图 11(a), (b) 所示。图中曲线 2 为 NOPA2 锁定与注入光共振时实验测得的正交振幅和及正交相位差关联噪声, 曲线 1 为相应的 SNL。可以看出, 输出光束的振幅和与相位差噪声分别低于 SNL (5.6 ± 0.2) dB 和 (5.5 ± 0.2) dB。与原始 EPR 纠缠态光场相比有较大提高。

6 总 结

简要介绍了通过量子态的线性和非线性光学操控, 制备连续变量多组份纠缠态光场, 构建量子通信网络操作, 提高光场的压缩度和纠缠度的实验研究进展。利用参变放大器对压缩态光场及纠缠态光场进行增强是提高其压缩度及关联度的一个有效方法, 而且通过操控, 还能够按照不同的应用要求改变压缩态光场的压缩分量及纠缠态光场的关联类型。随着多组份连续变量量子纠缠产生系统的日趋完善以及各类量子通讯网络和量子计算理论设计方案的问世, 量子信息科学研究必将向实用化目标拓展。

参 考 文 献

- 1 S. L. Braunstein, P. van Loock. Quantum information with continuous variables [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2005, **77**(2): 513~ 577
- 2 X. B. Wang, T. Hiroshima, A. Tomita *et al.*. Quantum information with Gaussian states [J]. *Phys. Rep.*, 2007, **448**: 1~ 170
- 3 P. van Loock, S. L. Braunstein. Multipartite entanglement for continuous variables: a quantum teleportation network [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(15): 3482~ 3485
- 4 J. Zhang, S. L. Braunstein. Continuous-variable Gaussian analog of cluster states [J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**(3): 032318
- 5 J. Zhang. Graphical description of local Gaussian operations for continuous-variable weighted graph states [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(5): 052307
- 6 R. E. Slusher, L. W. Hollberg, B. Yurke *et al.*. Observation of squeezed states generated by four-wave mixing in an optical cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, **55**(22): 2409~ 2412
- 7 M. Mehmet, H. Vahlbruch, N. Lastzka *et al.*. Observation of squeezed states with strong photon-number oscillations [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(1): 013814
- 8 Z. Y. Ou, S. F. Pereira, H. J. Kimble *et al.*. Realization of the einstein-podolsky-rosen paradox for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(25): 3663~ 3666
- 9 Y. Wang, H. Shen, X. L. Jin *et al.*. Experimental generation of 6 dB continuous variable entanglement from a nondegenerate optical parametric amplifier [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(6): 6149~ 6155
- 10 J. T. Jing, J. Zhang, Y. Yan *et al.*. Experimental demonstration of tripartite entanglement and controlled dense coding for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**(16): 167903
- 11 H. Yonezawa, T. Aoki, A. Furusawa. Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables [J]. *Nature*, 2004, **431**(7007): 430~ 433
- 12 N. C. Menicucci, P. Van Loock, M. Gu *et al.*. Universal quantum computation with continuous-variable cluster states [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(11): 110501
- 13 X. L. Su, A. H. Tan, X. J. Jia *et al.*. Experimental preparation of quadripartite cluster and greenberger-horne-zeilinger entangled states for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**(7): 070502
- 14 M. Yukawa, R. Ukai, P. van Loock *et al.*. Experimental generation of four-mode continuous-variable cluster states [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(1): 012301
- 15 A. H. Tan, Y. Wang, X. L. Jin *et al.*. Experimental generation of genuine four-partite entangled states with total three-party correlation for continuous variables [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(1): 013828
- 16 J. Yoshikawa, Y. Miwa, A. Huck *et al.*. Demonstration of a quantum nondemolition sum gate [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(25): 250501
- 17 T. Aoki, G. Takahashi, T. Kajiya *et al.*. Quantum error correction beyond qubits [J]. *Nature Physics*, 2009, **5**(8): 541~ 546
- 18 Y. Miwa, J. Yoshikawa, P. van Loock *et al.*. Demonstration of a universal one-way quantum quadratic phase gate [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(5): 050303
- 19 Y. Wang, X. L. Su, H. Shen *et al.*. Toward demonstrating controlled-X operation based on continuous-variable four-partite cluster states and quantum teleporters [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(2): 022311
- 20 J. Zhang, C. G. Ye, F. Gao *et al.*. Phase-sensitive manipulations of a squeezed vacuum field in an optical parametric amplifier inside an optical cavity [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(23): 233602
- 21 K. Di, C. D. Xie, J. Zhang. Coupled-resonator-induced transparency with a squeezed vacuum [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2011, **106**(15): 153602
- 22 H. X. Chen, J. Zhang. Phase-sensitive manipulations of the two-mode entangled state by a type-II nondegenerate optical parametric amplifier inside an optical cavity [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **79**(6): 063826
- 23 Y. N. Shang, X. J. Jia, Y. M. Shen *et al.*. Continuous variable entanglement enhancement and manipulation by a subthreshold Type II optical parametric amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(6): 853~ 855
- 24 M. D. Reid, P. D. Drummond, W. P. Bowen *et al.*. Colloquium: the einstein-podolsky-rosen paradox: from concepts to applications [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2009, **81**(4): 1727~ 1751
- 25 Y. Zhang, H. Wang, X. Y. Li *et al.*. Experimental generation of bright two-mode quadrature-squeezed light from a narrow-band nondegenerate optical parametric amplifier [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **62**(2): 023813
- 26 Z. Zhao, Y. Chen, A. Zhang *et al.*. Experimental demonstration of five-photon entanglement and open-destination teleportation [J]. *Nature*, 2004, **430**(6995): 54~ 58
- 27 P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph *et al.*. Experimental one-way quantum computing [J]. *Nature*, 2005, **434**(7030): 169~ 176
- 28 C. Y. Lu, X. Q. Zhou, O. Gühne *et al.*. Experimental entanglement of six photons in graph states [J]. *Nature Physics*, 2007, **3**(2): 91~ 95
- 29 X. Yao, T. Wang, P. Xu *et al.*. Observation of eight-photon

- entanglement [OL]. arXiv: 1105.6381v1 [quant-ph]
- 30 P. van Loock, A. Furusawa. Detecting genuine multipartite continuous-variable entanglement [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(5): 052315
- 31 C. H. Bennett, S. J. Wiesner. Communication via one- and two-particle operators on einstein-podolsky-rosen states [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(20): 2881~ 2884
- 32 K. Mattle, H. Weinfurter, P. G. Kwiat *et al.*. Dense coding in experimental quantum communication [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(25): 4656~ 4659
- 33 S. L. Braunstein, H. J. Kimble. Dense coding for continuous variables [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(4): 042302
- 34 X. Y. Li, Q. Pan, J. T. Jing *et al.*. Quantum dense coding exploiting a bright einstein-podolsky-rosen beam [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **88**(4): 047904
- 35 H. Shen, X. L. Su, X. J. Jia *et al.*. Quantum communication network utilizing quadripartite entangled states of optical field [J]. *Phys. Rev. A*, 2009, **80**(4): 042320
- 36 R. Bruckmeier, K. Schneider, S. Schiller *et al.*. Quantum nondemolition measurements improved by a squeezed meter input [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(7): 1243~ 1246
- 37 U. L. Andersen, V. Josse, G. Leuchs. Unconditional quantum cloning of coherent states with linear optics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(24): 240503
- 38 S. Agarwal. Interferences in parametric interactions driven by quantized fields [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **97**(2): 023601
- 39 Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou *et al.*. Progress of all solid state single frequency lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1635~ 1642
郑耀辉, 李凤琴, 张宽收等. 全固态单频激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1635~ 1642
- 40 Zheng Yaohui, Lu Huadong, Li Fengqin *et al.*. All solid state high-efficiency high-power Nd: YVO₄/KTP laser of single frequency operation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 739~ 742
郑耀辉, 卢华东, 李凤琴等. 全固态高输出功率单频 Nd: YVO₄/KTP 激光器 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 739~ 742