

文章编号:0253-2395(2012)02-0231-12

## 光场压缩态与纠缠态的增强及量子信息网络

彭堃堦, 苏晓龙, 贾晓军, 谢常德

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

**摘 要:**光场压缩态和纠缠态是进行量子精密测量和量子信息研究的重要资源. 文章简要介绍光场压缩态和纠缠态的增强及其在量子密钥分发、连续变量多组分纠缠态光场的制备、量子通信网络和量子计算中的应用.

**关键词:**压缩态; 纠缠态; 量子密钥分发; 量子通信网络; 量子计算

**中图分类号:**O431      **文献标识码:**A

### 0 引言

由于海森堡测不准原理的制约,量子化电磁场不能同时具有完全确定的振幅和位相,这些物理量不可避免地存在量子起伏.理想的单模单频激光是相干态光场,它处于最小测不准态,即不包含任何经典噪声.相干态光场的量子起伏是经典光场所能达到的最低极限,被称为量子噪声极限(Quantum Noise Limit; QNL).量子噪声的存在从本质上限制了经典光学测量的灵敏度和经典光学通信的信息容量.非经典光场,例如压缩态光场和纠缠态光场,可以突破这一噪声极限,是最“安静”的光源.非经典光场的研究不仅有助于进一步揭示光场的量子本质,而且在光学精密测量、微弱信号检测、量子信息和量子计算等方面有非常广泛的应用.非经典光场是量子测量、量子信息和量子计算的重要资源,人们可以利用它在测量与信息领域完成经典物理不可能完成的工作<sup>[1-3]</sup>.

量子信息基于量子特性而具有独特的信息功能,在提高运算速度、确保信息安全、增大信息容量和提高检测精度等方面可以突破现有的经典信息系统的极限.量子信息科学根据所利用的量子系统的本征态具有分离谱或连续谱结构区分为分离变量与连续变量两大类.能够用可数(有限)维希尔伯特空间表征的量子变量为分离变量,如光子或光波场的偏振.另一类量子变量,如粒子的位置与动量,光波场的正交振幅与正交位相分量等,它们的每一个值对应不同的正交本征态,其本征态构成无限维希尔伯特空间,称为连续变量.量子信息科学首先在分离变量领域提出和发展<sup>[1]</sup>,后来扩展到连续变量领域<sup>[2-3]</sup>.

量子纠缠反映了一个系统中子系统之间的量子相关性与不可分性.当两个或两个以上的子系统构成的量子体系的态矢量,在任何量子力学表象中,都无法表示为组成它的各子系统量子态矢的直积形式时,这些子系统之间即表现出相互纠缠的不可分特性,即使将它们空间分离,对一个子系统的观测也必然影响其它子系统的测量结果.这种相互依存的非定域关联称为量子纠缠或简称纠缠.量子纠缠是量子信息和量子计算的重要资源,它是量子系统独有的特性,不存在任何经典类似.正因为利用纠缠,人们才能够突破经典电动力学的框架,从全新的视角去发展信息科学与技术.随着量子信息科学应用的发展,由多于两个子系统构成量子纠缠态,即多组分子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信的基础.

为了实现高质量的信息传递、进行远距离量子通信和提高多组分纠缠态光场的量子关联度,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.提高光场压缩态的压缩度和纠缠态的纠缠度有两种方法,一种是直接方法,主要是通过技术改进和提高光学元件的质量,来提高压缩度和纠缠度.例如,德国小组获得 11.5 dB 的压缩态光场<sup>[4]</sup>和山西大学光电研究所获得 6 dB 的 Einstein-Podolsky-Rosen(EPR)纠缠态

收稿日期:2012-01-09;修回日期:2012-01-16

基金项目:国家自然科学基金(60821004;11074157;11174188);国家 973 计划(2010CB923103)

作者简介:彭堃堦(1936—),男,四川广元人,教授,中国科学院院士. Email:kcpeng@sxu.edu.cn

光场<sup>[5]</sup>均是采用的直接方法.提高光场压缩态的压缩度和纠缠态的纠缠度的另一种方法是利用非线性光学操控手段,例如相敏放大器等,提高光场的压缩度和纠缠态光场的关联度,并按照不同的应用需求来操控光场的压缩及纠缠特性<sup>[6-8]</sup>.

以实验制备的压缩态光场和纠缠态光场为基本资源,目前已经实验实现了量子离物传态<sup>[9]</sup>、量子密集编码<sup>[10]</sup>、受控量子密集编码<sup>[11]</sup>、量子离物传态网络<sup>[12]</sup>、量子纠缠交换<sup>[13]</sup>、量子密钥分发<sup>[14]</sup>、制备各种连续变量多组分纠缠态光场<sup>[15-16]</sup>、量子通信网络<sup>[17]</sup>和量子计算<sup>[18-19]</sup>等许多重要的量子信息研究工作.本文第二部分介绍光场压缩态和纠缠态的增强.第三部分介绍连续变量量子密钥分发的实验进展.第四部分介绍多组分纠缠态的实验制备及其在量子通信网络和量子计算方面应用的研究进展.第五部分是小结和对未来研究的展望.

## 1 光场压缩态和纠缠态的增强

在量子光学中光场用湮灭算符 $\hat{a}$ 表示.湮灭算符 $\hat{a}$ 是非厄米的,不能被测量.光场的正交振幅和正交位相分量是厄米算符,可以被测量.量子化光场 $\hat{a}$ 的正交振幅( $\hat{X}_a$ )和正交位相( $\hat{Y}_a$ )分量定义为:

$$\begin{aligned}\hat{X}_a &= \frac{1}{2}(\hat{a} + \hat{a}^\dagger) \\ \hat{Y}_a &= -\frac{i}{2}(\hat{a} - \hat{a}^\dagger)\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $\hat{a}$ 与 $\hat{a}^\dagger$ 分别为光场的湮灭与产生算符.当光场为相干态或真空态时,其起伏方差为: $V(\hat{X}_a) = V(\hat{Y}_a) = 1/4$ ,即为 QNL.当光场的一个正交分量的量子起伏方差低于 QNL 时,则为压缩态光场.此时,光场的另一个正交分量的量子起伏方差高于 QNL.例如: $V(\hat{X}_a) < \text{QNL}$ ,为正交振幅压缩态光场; $V(\hat{Y}_a) < \text{QNL}$ ,为正交位相压缩态光场.压缩态光场包括正交振幅压缩态光场、正交位相压缩态光场、强度差压缩态光场等多种类型,被应用于微弱吸收测量、量子密钥分发等方面.纠缠态光场的纠缠特性体现为子系统正交分量之间的非局域量子关联.对于两束光场 $\hat{a}$ 和 $\hat{b}$ ,若其正交分量的量子起伏方差之间满足 $V(\hat{X}_a - \hat{X}_b) < \text{QNL}$ , $V(\hat{Y}_a + \hat{Y}_b) < \text{QNL}$ 时,则为正交振幅正关联、正交位相反关联的 EPR 纠缠态光场.反之,若 $V(\hat{X}_a + \hat{X}_b) < \text{QNL}$ , $V(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) < \text{QNL}$ ,则为正交振幅反关联、正交位相正关联的 EPR 纠缠态光场.

### 1.1 直接提高光场压缩态的压缩度和纠缠态的纠缠度

1985 年,Slusher 小组首次实验制备了压缩态光场<sup>[20]</sup>.此后,人们一直为提高压缩态光场的压缩度而努力.直到近来,德国小组通过技术改进,实验制备了压缩度为 11.5 dB 的压缩态光场<sup>[4]</sup>.1992 年 J. Kimble 小组首次从实验上实现了具有 4 dB 量子关联的 EPR 纠缠态光场<sup>[22]</sup>.多年来,EPR 纠缠态光场的纠缠度一直保持在 4 dB 左右.随着量子信息和量子计算实验的进展,对压缩态光场的压缩度和纠缠态光场的纠缠度提出了更高的要求.因此,科学家们广泛开展了提高光场压缩态的压缩度和纠缠态的纠缠度的实验研究.

2010 年,山西大学光电研究所通过技术改进,利用 II 类 KTP 晶体获得了正交振幅与正交位相关联分别为 $(6.08 \pm 0.18)$ dB 和 $(6.22 \pm 0.16)$ dB 的 EPR 纠缠态光场<sup>[5]</sup>.第一个技术改进是在泵浦光路中加入光学模清洁剂,改善光斑质量和过滤泵浦光的额外噪声.第二个技术改进是降低位相锁定系统的噪声起伏,将各处位相锁定的起伏控制在 $1.8^\circ$ .实验装置如图 1(P233)所示,激光器采用自行研制的内腔倍频稳频 Nd:YAP/KTP(Nd-doped YAlO<sub>3</sub> perovskite / potassium titanyl phosphate)四镜环形激光器,同时输出 2 W 的 540 nm 激光和 0.8 W 的 1080 nm 激光.其中 540 nm 的绿光用做 NOPA 腔的泵浦光,1080 nm 的红外光用做 NOPA 腔的注入光束.在 1080 nm 光路中加入一个三镜环形谐振腔作为模清洁剂来过滤光束的噪声并对光束进行空间整形.红外模清洁剂(MC1)的精细度为 700,带宽为 1 MHz.在绿光光路中加入一个模清洁剂(MC2)来过滤泵浦光的噪声,同时对绿光光束进行空间整形.EPR 光束的频率与注入光频率简并,偏振互相垂直.将信号光场和闲置光场(a 和 b)通过 NOPA 腔后的 PBS 分开.EPR 光束的正交振幅和正交位相之间的关联由一个双模平衡零拍探测系统(TMHD,即 Bell 态直接探测系统)测量<sup>[21]</sup>.能量相等的两束光场 a 和 b,以 $\pi/2$ 位相差在一个 50%分束器(图 1 中的 2 个偏振分束棱镜(PBS),一个半波片(HWP)代替了 50%分束器)上耦合,用两个探测器分别探测其输出光场.在 EPR 光束任意一路的导光镜上加入一个压电陶瓷

(PZT),用来锁定信号光束和闲置光束之间的相对位相差为  $\pi/2$ . 探测器输出的光电流经射频分束器(RF splitter)等分为两部分,两路光电流相加和相减后即可分别得到光场的正交振幅之和及正交位相之差. 将加、减之后的信号同时通入两台频谱分析仪 SA1 和 SA2 记录输出结果.

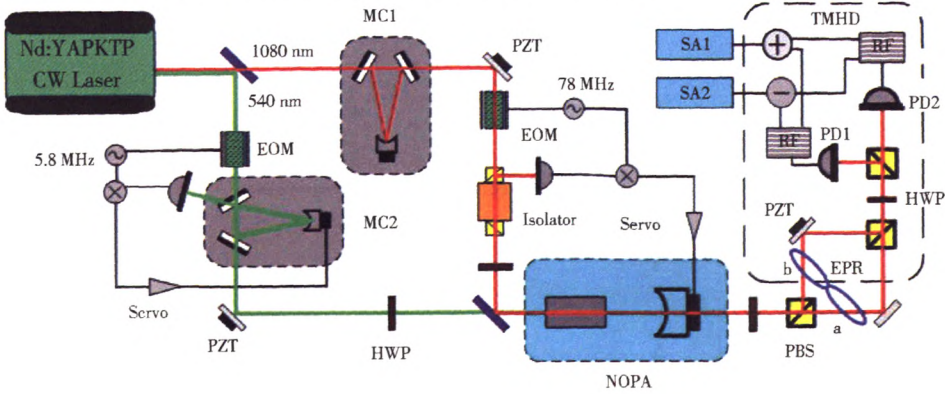


图 1 EPR 纠缠态光场实验产生系统

Fig. 1 Experimental generation system of EPR entangled optical field

实验结果如图 2 所示. 我们实验测得正交振幅  $V(\hat{X}_a + \hat{Y}_b)$  和正交位相  $V(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b)$  的关联噪声起伏分别低于相应的量子噪声极限 ( $6.08 \pm 6.18$  dB) 和 ( $6.22 \pm 0.16$  dB). 所制备的 EPR 纠缠态光束满足量子不可分判据  $V(\hat{X}_a + \hat{X}_b) + V(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) = 0.243 < 1$ .

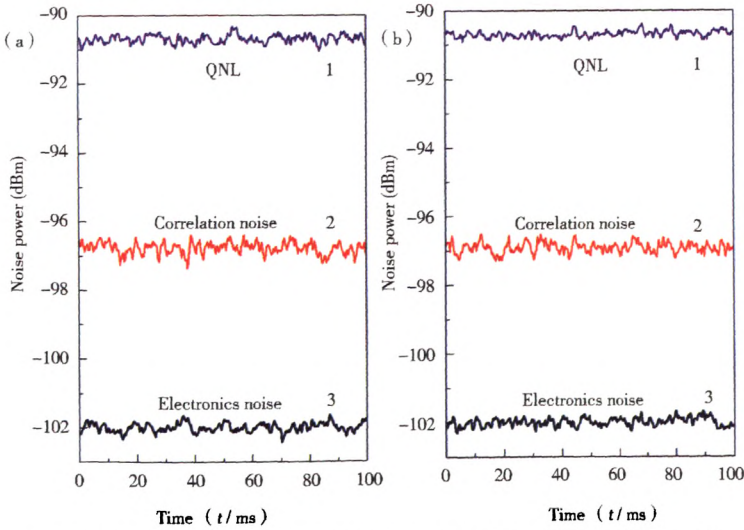


图 2 EPR 纠缠光量子关联噪声谱, (a): 正交振幅噪声 (b): 正交位相噪声

Fig. 2 Quantum correlation noise spectrum of EPR entangled optical field,

(a): noise spectrum of amplitude quadrature, (b): noise spectrum of phase quadrature

### 1.2 利用非线性光学操控实现光场压缩态和纠缠态的增强

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,操控光场的压缩和纠缠特性. R. Bruckmeier 等人将振幅压缩光注入光学参量振荡腔的输入端口,改善了量子非破坏测量的精度<sup>[23]</sup>. U. L. Andersen 等人实现了相干态光场的非相敏放大<sup>[24]</sup>. S. Agarwal 等人从理论上证明通过非简并光学参量放大器可以对压缩态光场实现放大和操控<sup>[25]</sup>. 山西大学光电研究所利用相敏简并光学参量放大器对注入压缩真空态光场进行操控和增强<sup>[6]</sup>, 利用非简并光学参量放大器提高了注入纠缠态光场的纠缠度<sup>[8]</sup>.

图 3(P234)所示是真空压缩态光场的增强及操控示意图. 将一束正交振幅压缩态光场注入一个光学参

量放大器(OPA)中,当 OPA 的抽运光和注入光之间的相位差为  $\phi=0$  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 3(a)所示.当抽运光和注入光之间的相位差为  $\phi=\pi/2$  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之上,而 Y 分量噪声减小至散粒噪声基准之下,如图 3(b)所示.

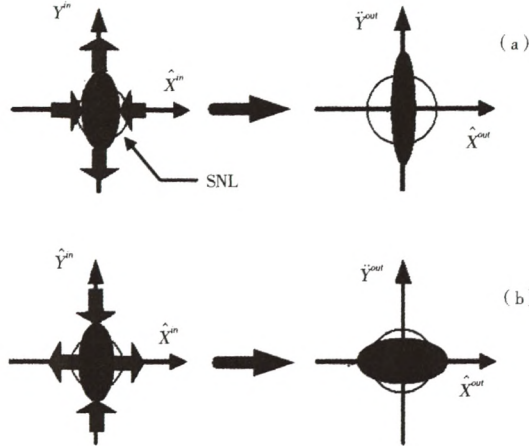


图 3 真空压缩态光场增强及操控示意图 (a) 压缩增强;(b) 压缩操控

Fig. 3 Schematic for enhancement and manipulation of squeezed vacuum field,

(a) enhancement of squeezing, (b) manipulation of squeezing

图 4 所示是真空压缩态光场增强及操控实验装置<sup>[6]</sup>. 双波长单频稳频激光器输出的 1064 nm 的激光经过光学模清洁器(Mode clean cavity)后分为两束,分别用做本地振荡光(LO)和匹配所需要的模拟光. 532 nm 激光分别作为光学参量振荡器(OPO)和 OPA 的抽运光. 我们将 OPO 产生的真空压缩态光场(squeezed vacuum)注入 OPA 中研究其对真空压缩光的增强及操控,OPA 腔输出光送入平衡零拍探测器(HD)进行采集和分析. 我们测量到真空压缩态光场的压缩度经过 OPA 后被增强.

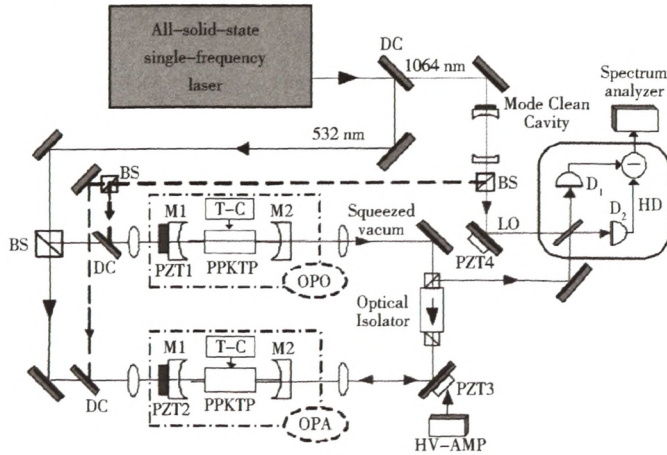


图 4 真空压缩态光场增强及操控实验装置

Fig. 4 Experimental setup for enhancement of manipulation of squeezed vacuum field

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 类非简并光学参量过程进行操控,我们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量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<sup>[7]</sup>,随后从实验上证实利用非简并光学参量放大器可以对输入的纠缠态光



场实现纠缠增强与操控<sup>[8]</sup>。在实验中,我们使用两个非简并光学参量放大器(NOPA),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量放大器都工作于参量反放大状态时,输出纠缠态光场的纠缠度由初始的2.4 dB左右提高到3.0 dB。(最近的实验结果是从输入的4.0 dB提高到5.5 dB。)当第二个非简并光学参量放大器工作状态不同时,由初始的振幅反关联,位相正关联的纠缠态光场变成了振幅反关联与位相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5所示,采用我们自行研制的双波长输出单频稳频Nd:YAP/KTP固体激光器作为泵浦源,540 nm的绿光和1080 nm的红外光分别作为抽运光,信号光和平衡零拍探测系统的本地光。NOPA1输出的量子关联度为4 dB的纠缠光束a1和a2,作为NOPA2的注入光场。当NOPA2工作在参量放大状态时,经过NOPA2后,纠缠光束a1和a2的量子关联度被提高到5.5 dB。

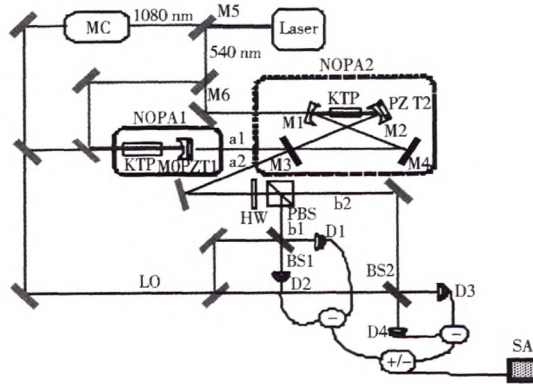


图5 EPR纠缠态光场增强实验装置图

Fig. 5 Experimental setup for enhancement of EPR entangled optical field

Laser: 激光器; MC: 模清洁剂; HW:  $\lambda/2$  波片; PBS: 偏振分束棱镜; BS1-2: 50/50 分束片;

PZT1-2: 压电陶瓷; D1-D4: 光电探测器; (+/-): 加、减法器; SA: 频谱分析仪

近期,我们利用两个非简并光学参量放大器对初始纠缠态光场进行了两级放大,获得了量子关联度为8.1 dB的纠缠态光场。初始纠缠态光场的量子关联度为5.3 dB,经过第一个非简并光学参量放大器后,量子关联度被提高到7.0 dB,经第二个非简并光学参量放大器后,量子关联度被提高到8.1 dB。

## 2 连续变量量子密钥分发

量子密钥分发以量子态为信息载体,利用量子力学原理,通过量子信道传输和公开对话,在通信双方之间建立共享密钥。量子力学的一些基本原理,例如测不准原理、量子不可克隆定理、纠缠粒子的相干性和非定域性等,为量子密钥分发提供了安全性的物理基础。一般而言,在建立密钥的过程中只要所有存在的窃听者均能被合法的通信双方发现,就认为这个信道是安全的。按量子力学基本原理,在量子系统上所执行的任何测量都不可避免的改变系统的状态,即是在原则上任何窃听者都会在量子系统上留下踪迹,从而被发现。

安全性是量子密钥分发的首要问题。对于连续变量量子密钥分发系统,通常考虑两种可能的攻击方式:单个攻击(Individual attack)和集团攻击(Collective attack)。单个攻击是指窃听者 Eve 独自与 Alice 发送的信号相互作用,且存储其作用后的结果。当 Alice 和 Bob 公布各自的测量基,即确定筛选码后,在密钥提取之前,Eve 对所存储的信号进行测量。集团攻击是指 Eve 窃听 Alice 和 Bob 进行密钥提取阶段的通信,然后对其所存储的系综进行最优化的集团测量,获取更多的信息。Alice 和 Bob 之间的互信息量为  $I_{AB}$ ,采用单个攻击时 Eve 的信息量为  $I_{AE}$ (正向调和协议)或  $I_{BE}$ (反向调和协议),由香农信息量决定;集团攻击时 Eve 的信息量为  $\chi$ ,由 Holevo 信息量决定。只有在 Alice 和 Bob 的信息量大于 Eve 的信息量( $I_{AB} > I_{AE}$ ( $I_{BE}$ )或  $I_{AB} > \chi$ )时,量子密钥分发方案才是安全的。通信双发所能提取的量子密钥速率为 Alice 和 Bob 的信息量与 Eve 的信息量之差, $\Delta I = I_{AB} - I_{AE}$ ( $I_{BE}$ )或  $K = I_{AB} - \chi$ 。

连续变量量子密钥分发方案中存在 3 dB 损耗限制<sup>[26]</sup>,即只有在信道损耗小于 3 dB 的时候才可以实现安全的量子密钥分发.后来人们将反向调和协议<sup>[27]</sup>(Reverse Reconciliation Protocol)和后续选择<sup>[28]</sup>(Post Selection)等经典技术与量子密钥分发相结合突破了 3 dB 损耗限制,使得在信道损耗大于 3 dB 时也可以完成安全的量子密钥分发.近年来连续变量量子密钥分发在理论和实验方面均取得了一系列进展,提出了各种基于相干态、压缩态和纠缠态光场的量子密钥分发方案<sup>[26,29-31]</sup>,并实验实现了利用相干光的量子密钥分发<sup>[32-35]</sup>.我们研究组于 2009 年实验实现了基于 EPR 纠缠态光场的连续变量量子密钥分发<sup>[14]</sup>.

我们提出一种基于 EPR 纠缠的双向传输连续变量量子密钥分发方案<sup>[36]</sup>,如图 6 所示.产生正交振幅和正交位相关联 EPR 纠缠态光场的纠缠源放置于接收方 Bob 处. Bob 仅将 EPR 纠缠光束的一束(信号光)发送给 Alice,而保留另一束光场(闲置光),该光束永不公开. Alice 接收到 Bob 所发送的信号光后,将两组相互独立的高斯分布的随机数序列调制到光场的正交振幅和正交位相分量上,然后将被调制的信号光返回给 Bob. Bob 接收到返回的信号光后,在其所保留的闲置光的帮助下,利用平衡零拍探测,同时解码两组信号.我们证明了方案对于单个攻击的安全性.理论计算表明,在采用正向调和协议时,量子纠缠有助于突破连续变量量子密钥分发的 3 dB 损耗限制.

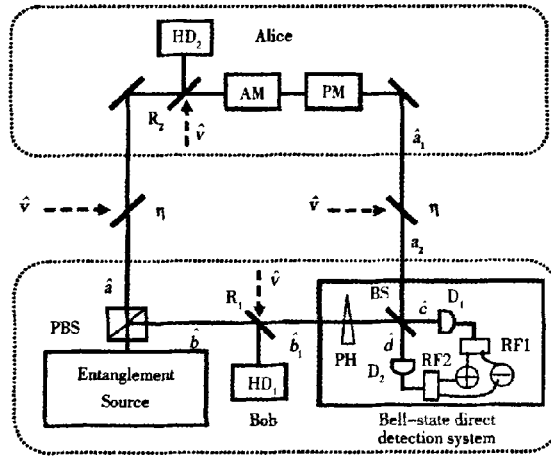


图 6 双向传输连续变量量子密钥分发方案

Fig. 6 Two-way quantum key distribution scheme with continuous variable

2009 年,我们利用光场 EPR 纠缠态实验实现了连续变量量子密钥分发,实验系统如图 7(P237)所示.发送方 Alice 制备 EPR 纠缠态光场 a 和 b,将信号光场 b 发送给接收方 Bob,自己保留闲置光场 a.随后, Alice 和 Bob 利用各自的平衡零拍探测系统同时随机测量各自光场正交振幅或正交位相分量的瞬时量子起伏,获得密钥.通信结束后, Alice 和 Bob 在公共信道进行比对.然后,通过后续选择、误差修正和私密放大过程,提取最终的安全密钥.我们理论计算了在单个攻击和集团攻击情况下后续选择的安全边界,分析了量子密钥分发方案的安全性.在实验中,经过后续选择、误差修正和私密放大后,在集团攻击下,信道效率为 80% 时,获得的安全密钥速率为 84 kbits/s,信道效率为 40% 时,安全密钥速率为 3 kbits/s.在各个数据处理阶段的密钥分发结果见表 1 (P237).

连续变量量子密钥分发目前已经完成了实验室的实验验证,正在向实用化发展.目前,连续变量量子密钥分发的最远通信距离是光纤中 25 km<sup>[35]</sup>.近来研究发现,利用分离调制的相干态量子密钥分发可以实现长距离安全通信<sup>[37]</sup>.提高量子密钥分发的通信距离,并构建量子密钥分发网络是连续变量量子密钥分发下一步研究的方向.

### 3 多组分纠缠态光场的实验制备及其应用

由多于二个子系统构成的量子纠缠态称为多粒子(Multiparticle)或多组分(Multipartite)纠缠态.多组分纠缠态是进行量子计算和量子网络通信的基础.现已发现存在着不同类型的多组分量子纠缠态,它们具有

不同的物理结构和物理特性,表征它们的波函数与量子不可分性判据也不相同. 根据不同的关联类型,多组分纠缠态的形式可以多种多样. 目前已经研究的连续变量多组分纠缠态主要包括以下几大类:Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)纠缠态<sup>[38]</sup>、cluster 纠缠态<sup>[39-40]</sup>、权重 Graph 纠缠态<sup>[41]</sup>等. 光学场连续变量类 GHZ 态是 N 个子系统正交振幅(位相)之总和及两两相对正交位相(振幅)之差的本征态. 在无限压缩时,GHZ 纠缠态光场的正交分量满足如下关系:

$$\begin{aligned} \hat{X}_1 + \hat{X}_2 + \dots + \hat{X}_n \rightarrow 0 & \quad \hat{X}_i - \hat{X}_j \rightarrow 0 \\ \hat{Y}_i - \hat{Y}_j \rightarrow 0 & \quad \text{或} \quad \hat{Y}_1 + \hat{Y}_2 + \dots + \hat{Y}_N \rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $i, j = 1, 2, \dots, N$ . 在无限压缩的情况下,连续变量 cluster 纠缠态中的每个模式  $\hat{a}_i$  的正交分量之间具有以下的关联关系式:

$$\hat{Y}_{a_i} - \sum_{a_j \in N_{a_i}} \hat{X}_{a_j} \rightarrow 0, a_i \in G \quad (3)$$

其中  $\hat{a}_i \in N_a$  表示  $a_i$  与模式相邻并具有相互作用的所有模式,模式  $\hat{a}_i \in G$  表示图态  $G$  中的任意模式. cluster 纠缠态是一种新型的单向量子计算模型的基本资源. 在实验制备 cluster 纠缠态的基础上,结合测量和测量结果的前馈,即可执行量子计算.

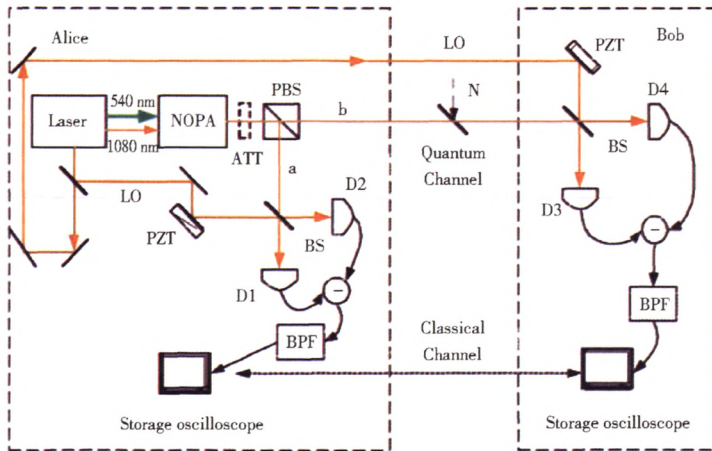


图 7 无信号调制连续变量量子密钥分发实验系统

Fig. 7 Experimental system of continuous variable quantum key distribution without signal modulation

表 1 量子密钥分发实验结果

Table 1 Experimental results of quantum key distribution

	80% Transmission efficiency							
	Collective attack				Individual attack			
	$I_{AB}$	$\chi$	$K$	Rate	$I_{AB}$	$I_{AE}$	$\Delta I$	Rate
Raw data	0.36	0.35	0.01	2 000	0.38	0.23	0.15	2 000
Post-selection	0.64	0.44	0.20	508	0.52	0.26	0.26	679
Reconciliation	~1	0.68	0.32	346	~1	0.51	0.49	436
Privacy amplification	~1	~0	~1	84	~1	~0	~1	109
	40% Transmission efficiency							
	Collective attack				Individual attack			
	$I_{AB}$	$\chi$	$K$	Rate	$I_{AB}$	$I_{AE}$	$\Delta I$	Rate
Raw data	0.18	0.44	-0.26	2 000	0.18	0.33	-0.15	2 000
Post-selection	0.69	0.63	0.06	46	0.44	0.35	0.09	180
Reconciliation	~1	0.89	0.11	34	~1	0.80	0.20	115
Privacy amplification	~1	~0	~1	3	~1	~0	~1	10



### 3.1 多组分纠缠态光场的实验制备

以单模压缩态光场为基础,经过一系列光学分束器变换,可以制备连续变量多组分纠缠态光场.目前,几个研究组已产生了连续变量三组分纠缠态,并将它们成功地应用于受控密集编码量子通信<sup>[11]</sup>、量子离物传送网络<sup>[12]</sup>等.2007年我们研究组设计了利用正压缩态光场产生连续变量四组分纠缠态光场的实验系统,并从实验上获得了四组分 GHZ 和 cluster 纠缠态<sup>[15]</sup>,实验结果满足连续变量多组分纠缠的完全不可分判据.随后,日本东京大学的研究组也实验制备了连续变量四组分 cluster 纠缠态光场<sup>[16]</sup>.2008年,我们研究组首先实验制备了四组分权重图态.由于其任意三组分之间均存在量子关联,我们称之为 TTPC(Total three-party correlation)纠缠态<sup>[42]</sup>,其产生系统和图形表示如图 8 所示.将两组 EPR 纠缠态光场 EPR1 和 EPR2 中的两束  $\hat{a}_2$  和  $\hat{a}_3$  以  $\pi/2$  位相差经过一个光学分束器耦合,则输出光场  $\hat{b}_1 - \hat{b}_4$  为四组分 TTPC 纠缠态光场.最近,美国弗吉尼亚大学的研究组实验制备了 15 个平行的光学频率梳四组分 cluster 纠缠态光场<sup>[43]</sup>.这向开展大尺度量子计算迈进了一步.为了演示连续变量量子计算,需要制备更多组分的连续变量多组分纠缠态.

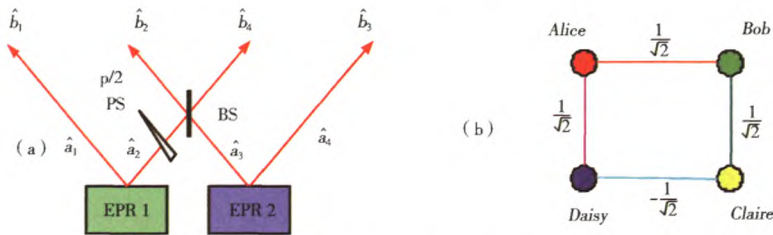


图 8 连续变量四组分 TTPC 纠缠态光场 (a):产生系统,(b):图形表示

Fig. 8 Continuous variable four-partite TTPC entangled optical field,

(a): generation system, (b): graph representation

### 3.2 量子通信网络

基于四组分 TTPC 纠缠态光场,我们提出了两种基于连续变量量子密集编码的四站量子通讯网络模型<sup>[17]</sup>.在此通信网络中,任意两个用户之间的通信被其余一个或两个用户控制.在两站点控制(例如相邻用户 Alice 和 Bob 之间的通信被 Daisy 和 Claire 控制,或对角用户 Alice 和 Claire 之间的通信被 Bob 和 Daisy 控制)的网络结构中,我们采用电子学反馈的方法将两控制者的信息发送给接收者,以便于接收者提取所传递的信息.然而,在单站点控制(例如相邻用户 Alice 和 Bob 之间的通信被 Daisy 控制,或对角用户 Alice 和 Claire 之间的通信被 Daisy 控制)的网络结构中,控制者通过将其所有的纠缠态子模光束直接与接收者所持有的子模直接进行光学耦合的方法来帮助接收方提取信息.计算结果表明,虽然相邻站点和对角站点间信息传输的信道容量有所不同,但均突破了经典光通信的散粒噪声极限.网络所需的四组分纠缠态可离线(off-line)制备,在线通讯操作仅依靠线性光学元件完成,利于实际应用.

### 3.3 基于多组分纠缠态的量子逻辑操作

量子力学使量子计算机有可能执行经典计算机所不能有效完成的某些计算工作.目前量子计算的模型主要有两种,一种是传统的量子线路模型<sup>[1]</sup>,另一种是基于测量的单向量子计算模型<sup>[44]</sup>.单向量子计算以 cluster 纠缠态为基本资源,通过对一些量子比特的测量和测量结果的前馈执行量子计算,后续测量基的选择依赖于以前的测量结果.

一个连续变量量子计算机更适合于模拟连续变化的量子系统.连续变量量子计算首先由 Lloyd 和 Braunstein 提出<sup>[45]</sup>.2006年,N. C. Menicucci 等提出了连续变量高斯 cluster 态 One-way 量子计算模型<sup>[46]</sup>,并设计了使用压缩光线性变换和平衡零拍探测执行 One-way 量子计算的理论方案.在这个方案中,只需要进行单模平衡零拍探测就可以对编码在 cluster 态上的信息进行多模高斯变换.在此基础上,再增加至少一个非高斯操作,就可以执行通用量子计算.随后,Loock 和 Gu 等人进一步细化了连续变量 cluster 态量子计算模型<sup>[40,47]</sup>.2009年,我们研究组以连续变量四组分 cluster 态为基础,通过理论计算,设计了不同类型的连续变量量子逻辑门<sup>[48]</sup>.

图 9(P239)是 cluster 态量子计算的示意图<sup>[47]</sup>.图 9(a)(P239)所示为任意一个多模么正变换可由一个



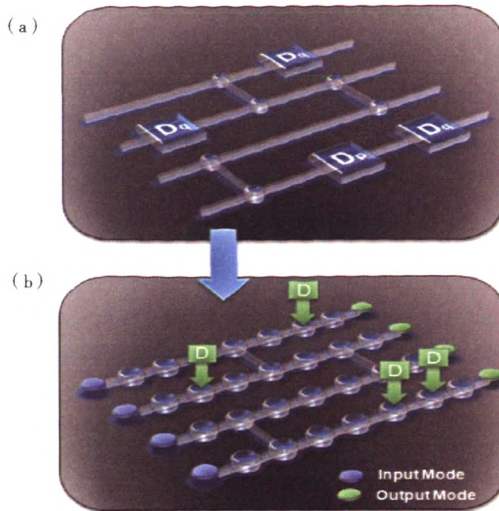


图 9 Cluster 态量子计算示意图

Fig. 9 Schematic of cluster state quantum computation

包含可控 Z 操作和在正交振幅或正交位相基下对角化的单模么正算符(D)的量子线路来表示. 此量子线路可通过在预先制备的多组分 cluster 纠缠态上, 执行合适的测量来实现, 如图 9(b) (P239) 所示. 量子离物态是 cluster 纠缠态量子计算的基本单元. 通过在特定的 cluster 态上组合基本的 teleportation 单元, 则可以执行量子计算.

与连续变量量子计算理论研究的突飞猛进相比, 实验研究发展还处于初步阶段. 实验中, 由于存在噪声和只能产生有限压缩度的压缩光, 所产生的 cluster 态不可能是理想的. 然而, 误差修正方案的提出和实验实现, 以及光场压缩度与纠缠度的不断提高, 为进行连续变量 cluster 量子计算实验研究提供了理论和技术支撑. 日本东京大学研究组实验演示了单模压缩操作和傅里叶变换等单模量子逻辑操作<sup>[19]</sup>. 我们研究组以线性四组分 cluster 纠缠态为基础, 结合量子离物态技术, 成功地执行了可控 X 逻辑操作<sup>[18]</sup>, 原则上证实了用 cluster 态实现量子逻辑运算的可行性.

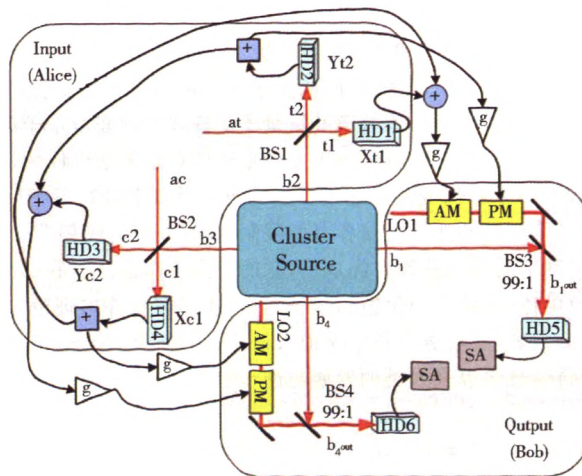


图 10 利用四组分线性 cluster 纠缠态实现可控 X 操作

Fig. 10 Realizing controlled-X operation with four-partite cluster entangled state

图 10 所示是利用四组分线性 cluster 纠缠态实现可控 X 操作的实验系统. 将两束输入光场 at 和 ac 与四组分线性 cluster 态的子模 b2 和 b3 模耦合, 用平衡零拍探测系统测量其输出光场的正交分量, 并将之反

馈到四组分 cluster 态的其余两个子模 b1 和 b4 的正交分量上,最后利用平衡零拍探测系统对输出光场进行测量,以验证可控 X 操作. 我们方案的优点在于采用 cluster 态可以实现非局部的量子操作,完成双模演化. 可控 X 操作的哈密顿量为:  $H = -\hat{X}_c \hat{Y}_t$ , 下标 c 和 t 分别表示控制模式和目标模式. 可控 X 操作理想的输入输出关系如下:

$$\begin{aligned} \hat{X}_c^{out} &= \hat{X}_c, \hat{X}_t^{out} = \hat{X}_t - \hat{X}_c \\ \hat{Y}_c^{out} &= \hat{Y}_c + \hat{Y}_t, \hat{Y}_t^{out} = \hat{Y}_t \end{aligned} \quad (4)$$

即输入的控制分量  $\hat{X}_c(\hat{Y}_t)$  被叠加到输出的目标模式  $\hat{X}_t^{out}(\hat{Y}_c^{out})$  上,而  $\hat{X}_c(\hat{Y}_t)$  保持不变. 对于有限压缩,输出模式正交分量的表达式如下:

$$\begin{aligned} \hat{X}_t^{out} &= \sqrt{\frac{5}{2}} e^{-r} \hat{X}_{a_2}^{(0)} - \sqrt{\frac{1}{2}} e^{-r} \hat{Y}_{a_4}^{(0)} + \hat{X}_t - \hat{X}_c \\ \hat{X}_t^{out} &= \sqrt{2} e^{-r} \hat{Y}_{a_2}^{(0)} + \hat{Y}_t \\ \hat{X}_c^{out} &= \sqrt{2} e^{-r} \hat{Y}_{a_4}^{(0)} + \hat{X}_c \\ \hat{X}_c^{out} &= -\sqrt{\frac{5}{2}} e^{-r} \hat{X}_{a_3}^{(0)} + \sqrt{\frac{1}{2}} e^{-r} \hat{Y}_{a_1}^{(0)} + \hat{Y}_t + \hat{Y}_c \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $a_1 - a_4$  是制备线性 cluster 纠缠态模式  $b_1 - b_4$  的输入态模式,上标 0 表示真空场的正交分量,  $r$  为压缩参数. 当  $r \rightarrow \infty$  时, (5) 式即为理想情况下可控 X 操作的输入输出关系. 我们利用表示实验获得的输出态  $\hat{\rho}_2$  和理想输出态  $\hat{\rho}_1$  之间重叠度的保真度公式  $F = \{\text{Tr}[(\sqrt{\hat{\rho}_1} \hat{\rho}_2 \sqrt{\hat{\rho}_1})^{1/2}]\}^2$  来定量描述可控 X 操作的执能. 当不使用 cluster 纠缠态 ( $r=0$ ) 时, 控制模式和目标模式的保真度均为 0.73. 当使用 cluster 纠缠态时, 我们实验获得的控制模式和目标模式的保真度均为 0.87, 比不使用 cluster 纠缠态时高 0.14.

目前实验演示的连续变量量子逻辑操作, 均为二阶以下的量子逻辑操作, 都属于高斯操作的范畴. 而三阶以上的量子逻辑操作, 需要非高斯操作. 同时, 如果要演示通用量子计算, 则需要加入一个非高斯操作. 因此, 三阶量子相位门就成为目前实验中的一个挑战. 由于有限压缩度的影响, 实验制备的 cluster 纠缠态光场不是理想的 cluster 纠缠态, 这会在量子计算过程中引入误码. 因此, 现阶段的一个重要研究方向是发展 cluster 量子计算的连续变量纠错. 另一个重要研究方向是发展连续变量 cluster 态量子计算的量子算法, 例如 Grover 算法、Deutsch-Jozsa 算法和 Shor 算法等.

#### 4 小结与展望

光场压缩态和纠缠态是进行量子信息和量子计算研究的基本资源. 本文简要介绍了光场压缩态的压缩度和纠缠态的纠缠度的增强, 连续变量量子密钥分发、量子通信网络、多组分纠缠态光场的实验制备以及连续变量量子计算的实验进展和发展方向. 目前分离变量量子信息和连续变量量子信息正在并行发展. 分离变量量子信息是条件性的, 效率低, 但是保真度高. 连续变量量子信息是无条件性的, 效率高, 但是保真度低. 混合型 (Hybrid) 量子信息处理结合了分离变量和连续变量的技术手段来进行量子信息处理, 同时利用分离变量和连续变量的优势, 绕开分量变量和连续变量各自的限制, 具有一定的优势<sup>[49]</sup>.

尽管量子计算机和量子网络的基本框架已经成型, 它的研究工作也已经取得日新月异、令人叹为观止的发展, 但最终要实现量子计算与有一定实用价值的量子通信, 还存在着许多理论与技术上尚待解决的问题. 我们相信, 随着理论与技术的成熟, 随着更多科学家加入该领域的研究, 量子计算与量子通信一定会得到突飞猛进的发展, 并且对未来科学技术以及人类的发展与进步起到巨大的推动作用.

#### 参考文献:

- [1] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum Computation and Quantum Information[M]. Cambridge University Press, 2000.
- [2] Braunstein S L, Van Loock P. Quantum Information with Continuous Variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, **77**: 513.
- [3] Wang X B, Hiroshima T, Tomita A, et al. Quantum Information with Gaussian States[J]. *Phys Rep*, 2007, **448**: 1-111.
- [4] Mehmet M, Vahlbruch H, Lastzka N, et al. Observation of Squeezed States with Strong Photon-number Oscillations[J]. *Phys Rev A*, 2010, **81**: 013814.
- [5] Wang Yu, Shen Heng, Jin Xiao-li, et al. Experimental Generation of 6 dB Continuous Variable Entanglement from a Non-

- degenerate Optical Parametric Amplifier[J]. *Optics Express*, 2010, **18**:6149-6155.
- [6] Zhang Jing, Ye Cheng-guang, Gao Feng, *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**:233602.
- [7] Chen Hai-xia, Zhang Jing. 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**:063826.
- [8] Shang Ya-na, Jia Xiao-jun, Shen Yu-me, *et al.* Continuous Variable Entanglement Enhancement and Manipulation by a Subthreshold Type-II Optical Parametric Amplifier[J]. *Opt Lett*, 2010, **35**:853-855.
- [9] Furusawa A, Sorensen J L, Braustein S L, *et al.* Unconditional Quantum Teleportation[J]. *Science*, 1998, **282**:706.
- [10] Li Xiao-ying, Pan Qing, Jing Jie-tai, *et al.* Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Rosen beam[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**:047904.
- [11] Jing Jie-tai, Zhang Jing, Yan Ying, *et al.* Experimental Demonstration of Tripartite Entanglement and Controlled Dense Coding for Continuousvariables[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**:167903.
- [12] Yonezawa H, Aoki T, Furusawa A. Demonstration of a Quantum Teleportation Network for Continuous Variables[J]. *Nature*, 2004, **431**:430.
- [13] Jia Xiao-jun, Su Xiao-cong, Pan Qing, *et al.* Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**:250503.
- [14] Su Xiao-long, Wang Wen-zhe, Wang Yu, *et al.* Continuous Variable Quantum Key Distribution Based on Optical Entangled States Without Signal Modulation[J]. *Europhys Lett*, 2009, **87**:20005.
- [15] Su Xiao-long, Tan Ai-hong, Jia Xiao-jun, *et al.* Experimental Preparation of Quadripartite Cluster and Greenberger-Horne-Zeilinger Entangled States for Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**:070502.
- [16] Yukawa M, Ukai R, Van Loock P, *et al.* Experimental Generation of Four-mode Continuous-variable Cluster States[J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**:012301.
- [17] Shen Heng, Su Xiao-long, Jia Xiao-jun, *et al.* Quantum Communication Network Utilizing Quadripartite Entangled States of Optical Field[J]. *Phys Rev A*, 2009, **80**:042320.
- [18] Wang Yu, Su Xiao-long, Shen Heng, *et al.* Toward Demonstrating Controlled-X Operation Based on Continuous-variable Four-partite Cluster States and Quantum Teleporters[J]. *Phys Rev A*, 2010, **81**:022311.
- [19] Ukai R, Iwata N, Shimokawa Y, *et al.* Demonstration of Unconditional One-way Quantum Computations for Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **106**:240504.
- [20] Slusher R E, Hollberg L W, Yurke B, *et al.* Observation of Squeezed States Generated by Four-wave Mixing in an Optical Cavity[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**:2409-2412.
- [21] Zhang Jing, Peng Kun-chi. Quantum Teleportation and Dense Coding by Means of Bright Amplitude-squeezed Light and Direct Measurement of a Bell State[J]. *Phys Rev A*, 2000, **62**:064302.
- [22] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J, *et al.* Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**:3663-3666.
- [23] Bruckmeier R, Schneider K, Schiller S, *et al.* Quantum Nondemolition Measurements Improved by a Squeezed Meter Input[J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **78**:1243-1246.
- [24] Andersen U L, Josse V, Leuchs G. Unconditional Quantum Cloning of Coherent States with Linear Optics[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **94**:240503.
- [25] Agarwal G S. Interferences in Parametric Interactions Driven by Quantized Fields[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**:023601.
- [26] Grosshans F, Grangier P. Continuous Variable Quantum Cryptography with Coherent States[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**:057902.
- [27] Grosshans F, Grangier P. Reverse Reconciliation Protocols for Quantum Cryptography with Continuous Variables[Z]. quant-ph/0204127.
- [28] Silberhorn C, Ralph T C, Lutkenhaus N, *et al.* Continuous Variable Quantum Cryptography; Beating the 3 dB Loss Limit [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**:167901.
- [29] Hillery M. Quantum Cryptography with Squeezed States[J]. *Phys Rev A*, 2000, **61**:022309.
- [30] Reid M D. Quantum Cryptography with a Predetermined Key, Using Continuous Variable Einstein-Podolsky-Rosen Correlations[J]. *Phys Rev A*, 2000, **62**:062308.



- [31] Silberhorn C, Korolkova N, Leuchs G. Quantum Key Distribution with Bright Entangled Beams[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**:167902.
- [32] Grosshans F, Van Assche G, Wenger J, et al. Quantum Key Distribution Using Gaussian-modulated Coherent States[J]. *Nature*, 2003, **421**:238.
- [33] Lorenz S, Korolkova N, Leuchs G. Continuous-variable Quantum Key Distribution Using Polarization Encoding and Post Selection[J]. *Appl Phys B*, 2004, **79**:273.
- [34] Lance A M, Symul T, Sharma V, et al. No-switching Quantum Key Distribution Using Broadband Modulated Coherent States[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**:180503.
- [35] Lodewyck J, Bloch M, Garcia-Patron R, et al. Quantum Key Distribution over 25 km with an All-fiber Continuous-variable System[J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**:042305.
- [36] Su Xiao-long, Jing Jie-tai, Pan Qing, et al. Dense-coding Quantum key Distribution Based on Continuous-variable Entanglement[J]. *Phys Rev A*, 2006, **74**:062305.
- [37] Leverrier A, Grangier P. Unconditional Security Proof of Long-distance Continuous-variable Quantum Key Distribution with Discrete Modulation[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **102**:180504.
- [38] Van Loock P, Braunstein S L. Multipartite Entanglement for Continuous Variables; a Quantum Teleportation Network [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **84**:3482-3485.
- [39] Zhang J, Braunstein S L. Continuous-variable Gaussian Analog of Cluster States[J]. *Phys Rev A*, 2006, **73**:032318.
- [40] Van Loock P, Weedbrook C, Gu M. Building Gaussian Cluster States by Linear Optics[J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**:032321.
- [41] Zhang J. Graphical Description of Local Gaussian Operations for Continuous-variable Weighted Graph States[J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**:052307.
- [42] Tan Ai-hong, Wang Yu, Jin Xiao-li, et al. Experimental Generation of Genuine Four-partite Entangled States with Total Three-party Correlation for Continuous Variables[J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**:013828.
- [43] Pysher M, Miwa Y, Shahrokhshahi R, et al. Parallel Generation of Quadripartite Cluster Entanglement in the Optical Frequency Comb[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **107**:030505.
- [44] Raussendorf R, Briegel H J. A One-way Quantum Computer[J]. *Phys Rev Lett*, 2001, **86**:5188-5191.
- [45] Lloyd S, Braunstein S L. Quantum Computation Over Continuous Variables[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **82**:1784-1787.
- [46] Menicucci N C, Van Loock P, Gu M, et al. Universal Quantum Computation with Continuous-variable Cluster States[J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**:110501.
- [47] Gu M, Weedbrook C, Menicucci N C, et al. Quantum Computing with Continuous-variable Clusters[J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**:062318.
- [48] Tan Ai-hong, Xie Chang-de, Peng Kun-chi. Quantum Logical Gates with Linear Quadripartite Cluster States of Continuous Variables[J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**:042338.
- [49] Van Loock P. Optical Hybrid Approaches to Quantum Information[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, **5**:167-200.

## Squeezing and Entanglement Enhancement and Quantum Information Network

PENG Kun-chi, SU Xiao-long, JIA Xiao-jun, XIE Chang-de  
(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,  
Institute of Opto-electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** Optical squeezed state and entangled state are important resources for quantum precision measurement and quantum information. In this paper, we briefly introduce the experimental schemes to enhance the squeezing and the entanglement of optical field, firstly. Moreover, the applications of the squeezed states and entangled states in quantum key distribution, preparation of multipartite entangled state, quantum communication network and quantum computation are summarized.

**Key words:** squeezed state; entangled state; quantum key distribution; quantum communication network; quantum computation

作者: [彭堃焯](#), [苏晓龙](#), [贾晓军](#), [谢常德](#), [PENG Kun-chi](#), [SU Xiao-long](#), [JIA Xiao-jun](#),  
[XIE Chang-de](#)  
作者单位: [量子光学与光量子器件国家重点实验室山西大学光电研究所, 山西太原, 030006](#)  
刊名: [山西大学学报\(自然科学版\)](#) [ISTIC](#) [PKU](#)  
英文刊名: [Journal of Shanxi University\(Natural Science Edition\)](#)  
年, 卷(期): 2012, 35(2)

## 参考文献(49条)

1. Nielsen M A; Chuang I L [Quantum Computation and Quantum Information](#) 2000
2. Braunstein S L; Van Loock P [Quantum Information with Continuous Variables](#)[外文期刊] 2005
3. Wang X B; Hiroshima T; Tomita A [Quantum Information with Gaussian States](#) 2007
4. Mehmet M; Vahlbruch H; Lastzka N [Observation of Squeezed States with Strong Photon-number Oscillations](#)[外文期刊] 2010
5. Wang Yu; Shen Heng; Jin Xiao-li [Experimental Generation of 6 dB Continuous Variable Entanglement from a Nondegenerate Optical Parametric Amplifier](#) 2010
6. Zhang Jing; Ye Cheng-guang; Gao Feng [Phase-sensitive Manipulations of a Squeezed Vacuum Field in an Optical Parametric Amplifier Inside an Optical Cavity](#)[外文期刊] 2008
7. Chen Hai-xia; Zhang Jing [Phase-sensitive Manipulations of the Two-mode Entangled State by a Type-II Nondegenerate Optical Parametric Amplifier Inside an Optical Cavity](#)[外文期刊] 2009
8. Shang Ya-na; Jia Xiao-jun; Shen Yu-me [Continuous Variable Entanglement Enhancement and Manipulation by a Subthreshold Type-II Optical Parametric Amplifier](#) 2010
9. Furusawa A; Sorensen J L; Braustein S L [Unconditional Quantum Teleportation](#)[外文期刊] 1998
10. Li Xiao-ying; Pan Qing; Jing Jie-tai [Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Rosen beam](#)[外文期刊] 2002
11. Jing Jie-tai; Zhang Jing; Yan Ying [Experimental Demonstration of Tripartite Entanglement and Controlled Dense Coding for Continuousvariables](#)[外文期刊] 2003
12. Yonezawa H; Aoki T; Furusawa A [Demonstration of a Quantum Teleportation Network for Continuous Variables](#)[外文期刊] 2004(7007)
13. Jia Xiao-jun; Su Xiao-cong; Pan Qing [Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables](#)[外文期刊] 2004
14. Su Xiao-long; Wang Wen-zhe; Wang Yu [Continuous Variable Quantum Key Distribution Based on Optical Entangled States Without Signal Modulation](#)[外文期刊] 2009
15. Su Xiao-long; Tan Ai-hong; Jia Xiao-jun [Experimental Preparation of Quadripartite Cluster and GreenbergerHorne-Zeilinger Entangled States for Continuous Variables](#)[外文期刊] 2007
16. Yukawa M; Ukai R; Van Loock P [Experimental Generation of Four-mode Continuous-variable Cluster States](#)[外文期刊] 2008
17. Shen Heng; Su Xiao-long; Jia Xiao-jun [Quantum Communication Network Utilizing Quadripartite Entangled States of Optical Field](#)[外文期刊] 2009
18. Wang Yu; Su Xiao-long; Shen Heng [Toward Demonstrating Controlled-X Operation Based on Continuous-](#)

[variable Four-partite Cluster States and Quantum Teleporters](#)[外文期刊] 2010

19. [Ukai R;lwata N;Shimokawa Y](#) [Demonstration of Unconditional One-way Quantum Computations for Continuous Variables](#)[外文期刊] 2011

20. [Slusher R E;Hollberg L W;Yurke B](#) [Observation of Squeezed States Generated by Four-wave Mixing in an Optical Cavity](#) 1985

21. [Zhang Jing;Peng Kun-chi](#) [Quantum Teleportation and Dense Coding by Means of Bright Amplitude-squeezed Light and Direct Measurement of a Bell State](#)[外文期刊] 2000

22. [Ou Z Y;Pereira S F;Kimble H J](#) [Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox for Continuous Variables](#) 1992

23. [Bruckmeier R;Schneider K;Schiller S](#) [Quantum Nondemolition Measurements Improved by a Squeezed Meter Input](#) 1997

24. [Andersen U L;Josse V;Leuchs G](#) [Unconditional Quantum Cloning of Coherent States with Linear Optics](#) [外文期刊] 2005

25. [Agarwal G S](#) [Interferences in Parametric Interactions Driven by Quantized Fields](#)[外文期刊] 2006

26. [Grosshans F;Grangier P](#) [Continuous Variable Quantum Cryptography with Coherent States](#)[外文期刊] 2002

27. [Grosshans F;Grangier P](#) [Reverse Reconciliation Protocols for Quantum Cryptography with Continuous Variables](#)

28. [Silberhorn C;Ralph T C;Lutkenhaus N](#) [Continuous Variable Quantum Cryptography:Beating the 3 dB Loss Limit](#)[外文期刊] 2002

29. [Hillery M](#) [Quantum Cryptography with Squeezed States](#)[外文期刊] 2000

30. [Reid M D](#) [Quantum Cryptography with a Predetermined Key,Using Continuous Variable Einstein-Podolsky-Rosen Correlations](#) 2000

31. [Silberhorn C;Korolkova N;Leuchs G](#) [Quantum Key Distribution with Bright Entangled Beams](#)[外文期刊] 2002

32. [Grosshans F;Van Assche G;Wenger J](#) [Quantum Key Distribution Using Gaussian-modulated Coherent States](#)[外文期刊] 2003

33. [Lorenz S;Korolkova N;Leuchs G](#) [Continuous-variable Quantum Key Distribution Using Polarization Encoding and Post Selection](#)[外文期刊] 2004

34. [Lance A M;Symul T;Sharma V](#) [No-switching Quantum Key Distribution Using Broadband Modulated Coherent States](#)[外文期刊] 2005

35. [Lodewyck J;Bloch M;Garcia-Patron R](#) [Quantum Key Distribution over 25 km with an All-fiber Continuous-variable System](#)[外文期刊] 2007

36. [Su Xiao-long;Jing Jie-tai;Pan Qing](#) [Dense-coding Quantum key Distribution Based on Continuous-variable Entanglement](#)[外文期刊] 2006

37. [Leverrier A;Grangier P](#) [Unconditional Security Proof of Long-distance Continuous-variable Quantum Key Distribution with Discrete Modulation](#)[外文期刊] 2009

38. [Van Loock P;Braunstein S L](#) [Multipartite Entanglement for Continuous Variables:a Quantum](#)



39. Zhang J;Braunstein S L Continuous-variable Gaussian Analog of Cluster States[外文期刊] 2006
40. Van Loock P;Weedbrook C;Gu M Building Gaussian Cluster States by Linear Optics[外文期刊] 2007
41. Zhang J Graphical Description of Local Gaussian Operations for Continuous-variable Weighted Graph States[外文期刊] 2008
42. Tan Ai-hong;Wang Yu;Jin Xiao-li Experimental Generation of Genuine Four-partite Entangled States with Total Three-party Correlation for Continuous Variables[外文期刊] 2008
43. Pysher M;Miwa Y;Shahrokhshahi R Parallel Generation of Quadripartite Cluster Entanglement in the Optical Frequency Comb[外文期刊] 2011
44. Raussendorf R;Briegel H J A One-way Quantum Computer[外文期刊] 2001(22)
45. Lloyd S;Braunstein S L Quantum Computation Over Continuous Variables[外文期刊] 1999(8)
46. Menicucci N C;Van Loock P;Gu M Universal Quantum Computation with Continuous-variable Cluster States[外文期刊] 2006
47. Gu M;Weedbrook C;Menicucci N C Quantum Computing with Continuous-variable Clusters[外文期刊] 2009
48. Tan Ai-hong;Xie Chang-de;Peng Kun-chi Quantum Logical Gates with Linear Quadripartite Cluster States of Continuous Variables[外文期刊] 2009
49. Van Loock P Optical Hybrid Approaches to Quantum Information 2011

引用本文格式：彭堃堃, 苏晓龙, 贾晓军, 谢常德, PENG Kun-chi, SU Xiao-long, JIA Xiao-jun, XIE Chang-de 光场压缩态与纠缠态的增强及量子信息网络[期刊论文]-山西大学学报（自然科学版） 2012(2)