

连续变量无条件纠缠交换*

——纠缠态的量子离物传送

谢常德[†] 贾晓军 苏晓龙 潘庆 郜江瑞 彭堃堃

(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 太原 030006)

摘要 利用自行设计的两台非简并光学参量放大器,获得了一对具有经典相干性且量子起伏相互独立的连续变量纠缠态光场,并用它完成了连续变量的无条件纠缠交换,即纠缠态的量子离物传送.通过联合贝尔态探测与纠缠塌缩,使两个初始不纠缠而又从未发生过直接相互作用的光场产生了量子纠缠,其正交振幅和位相分量的量子起伏关联方差被直接测量,其测量值分别低于散噪声极限 1.23dB 和 1.12dB. 理论计算与实验结果基本符合.

关键词 连续变量,量子信息,量子纠缠交换

Unconditional entanglement swapping of continuous variables

——quantum teleportation of entangled state

XIE Chang-De[†] JIA Xiao-Jun SU Xiao-Long PAN Qing GAO Jiang-Rui PENG Kun-Chi

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

Abstract A pair of entangled states of light with classical coherence and independent quantum fluctuations has been produced from two home-designed and home-made non-degenerate optical parametric amplifiers. Utilizing these entangled states we have experimentally demonstrated unconditional entanglement swapping for continuous variables, i. e. quantum teleportation of an entangled state. Based on the direct detection of Bell states and entanglement collapse, two optical beams which have never directly interacted with each other are entangled together. The degrees of quantum correlation resulting from the entanglement swapping have been determined by direct measurement to be 1.23dB and 1.12dB below the shot noise limit for the amplitude and phase quadratures, respectively. The theoretical calculation and experimental measurements are in reasonable agreement.

Keywords continuous-variable, quantum information, quantum entanglement swapping

在 20 世纪末与本世纪初蓬勃发展起来的量子信息科学中,人们开始利用量子系统的基本物理特性去开拓新兴的通信与信息处理技术.量子力学供给我们的最重要和最宝贵的“资源”是量子纠缠(entanglement).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,完成一系列经典通信不可能完成的工作,其中最引人注目的是量子态的离物传送(quantum teleportation)^[1-3]与量子密集编码(quantum dense coding)^[4-6].前者实现了未知量子态从一处到另一

处的远程离物传送,后者使通信系统的信道容量突破了经典光通信的最大极限.纠缠态是一种具有空间非定域关联(nonlocal correlation)特性的组合量子体系.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

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2001CB309304)资助项目;国家自然科学基金(批准号:60238010, 60378014, 10274045)资助项目

2005-01-11 收到

[†] 通讯联系人. Email: changde@sxu.edu.cn

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,对一个子系统的观察也必然影响其他子系统的测量结果.这种相互依存的非定域关联称为量子纠缠或简称纠缠.根据所利用的量子系统的本征态具有分离谱或是连续谱结构,量子信息科学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.二粒子系统的纠缠概念最早是在 Einstein, Podolsky 和 Rosen (EPR) 三位科学家于 1935 年联合发表的著名论文中提出的^[7],因此由两个子系统构成的纠缠态常常又被称为“EPR”对.虽然在 EPR 原始文献中所讨论的可观测量子变量为具有连续谱的正则坐标与动量^[7],但由于难于在量子水平上精确测定微观粒子的坐标与动量,所以早期验证 EPR 纠缠的实验都是用分离变量(粒子自旋或光子的偏振)执行的.实际上,在量子化电磁场中,电磁场的每一个模都类似于一个简谐振子,其正交振幅和位相分量起着谐振子正则位置与动量变量的作用,即电磁场的正交振幅和正交位相是一对正则变量,与 Einstein 等最初提出的正则位置与动量变量等价.1992 年,美国 J. Kimble 小组首次从实验上获得了纠缠态光场,实现了连续变量的 EPR 佯谬,真实地显示了连续变量“坐标”(正交振幅)与“动量”(正交位相)的非定域量子关联^[8].1998 年,他们用连续 EPR 纠缠态光场实现了相干态光场的量子离物传送^[2].本世纪初,我们实验室采用在非简并光学参量放大器(non-degenerate optical parametric amplifier, NOPA)中注入非零信号光的方式,获得了明亮的 EPR 纠缠光束,并将其应用于量子通信,完成了连续变量量子密集编码与受控密集编码量子通信网络实验研究^[5,6,9].

相干态虽然是非正交的,但其特性非常接近于经典态,可以说它的特性介于量子态与经典态之间.继完成了单光子偏振态的纠缠交换^[10]与相干态的量子离物传送^[2]之后,实现真正非经典态(如纠缠态)的量子离物传送,即连续变量纠缠交换,就成为具有挑战性的前沿研究课题,它一直吸引着各国实验物理学家的研究兴趣^[11,12].近期,我们利用自行设计的贝尔态直接探测系统^[13]与两台运转于参量

反放大状态(de-amplification)的 NOPA^[14],实现了连续量子变量的无条件纠缠交换^[15].由于利用了连续波电磁场正交振幅与位相分量的决定性(determinant)的压缩态纠缠,该实验实时地观测了连续变量的无条件纠缠交换,无需执行一般单光子探测实验所需要的对“成功”事件的后续选择(post-selection)^[10,11].

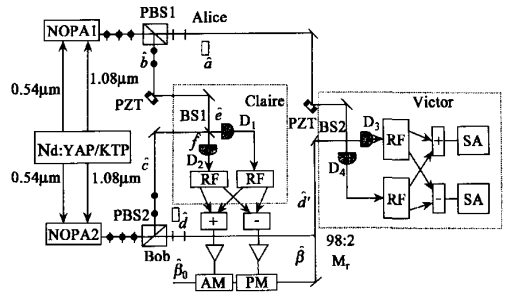


图 1 实验装置图

图 1 是实验装置.激光抽运源为一台自行研制的内腔倍频、稳频双波长输出连续波 Nd:YAP/KTP 激光器(其中 Nd:YAP 为 NdYAlO₃, KTP 为 KTiOPO₄)^[16].输出的基波与二次谐波波长分别为 1.08 μm 与 0.54 μm.该波长的优点是能在 α-切割的 II 类 KTP 晶体中实现 90°非临界相位匹配,从而能将偏振方向相互垂直的一对亚谐波模(subharmonic modes),即信号与闲置模之间的光束走离现象减小到最低限度,使二者在非线性晶体内共线传输,从而能极大地增强参量转换效率.激光器输出的二次谐波作为两台光学参量放大器(NOPA1 和 NOPA2)的抽运场,基频波为其注入信号.两台 NOPA 具有完全对称的结构,均由一块 α-切割的 KTP 晶体与一块凹面镜组成.KTP 晶体的前表面兼作输入耦合镜,对抽运光(0.54 μm)和注入红外信号(1.08 μm)的透射率分别为 95% 和 0.5%,晶体长度为 10mm.输出耦合镜为一凹面镜,曲率半径为 50mm,对红外光的透射率为 3.8% 左右,对绿光具有 100% 的反射率,它与晶体前表面构成半近共心型 F-P 光学参量振荡腔,腔长约 52mm.凹面镜装置在一块压电陶瓷上,借以通过电子学控制完成腔长扫描与腔长锁定.我们使两台 NOPA 均工作在参量反放大状态,即将抽运场与注入信号场的相对位相差锁定为反位相(π 的奇数倍).在这种情况下,抽运场在 KTP 晶体中,经由 II 类相位匹配非线性光学下转换,所产生的信号与闲置光具有相同的频率(1.08 μm)和正交的偏振方向,是一对具有正交振幅反关联与正交位相正

关联的 EPR 纠缠态光场,即它们的正交振幅和与正交位相差的量子起伏方差均小于相应的散粒噪声极限 SNL (shot noise limit)^[5]. 因为信号与闲置光的耦合模为正交振幅压缩态光场,所以这种类型的量子纠缠也被叫做压缩态纠缠^[9].

由 NOPA1 和 NOPA2 所产生的二组 EPR 纠缠光学模 \hat{a} , \hat{b} 和 \hat{c} , \hat{d} 分别被送至 Alice 和 Bob 之后,他们各自用偏振分束器将纠缠的信号与闲置模分开. Alice 将模 \hat{b} , Bob 将模 \hat{c} 分别送给 Claire, 当 Claire 未对 \hat{b} 和 \hat{c} 执行联合测量时,模 \hat{a} 和 \hat{d} 毫无量子关联. 当 Claire 用 Bell 态直接探测系统^[13], 同时测量 \hat{b} 和 \hat{c} 两模的正交振幅和 [$\langle \delta^2(\hat{X}_b + \hat{X}_c) \rangle$] 与正交位相差 [$\langle \delta^2(\hat{Y}_b - \hat{Y}_c) \rangle$] 的起伏方差时,由于测量导致的纠缠塌缩,将使模 \hat{a} 和 \hat{d} 成为一对不可分的量子纠缠态. 任何在模 \hat{a} 和 \hat{d} 上的局域操作,如经典平移,均不会改变它们之间的纠缠. 对比量子态离物传送实验,我们可以暂不考虑模 \hat{a} , 只看 \hat{b} , \hat{c} 和 \hat{d} . 此时,这个操作相当于利用 \hat{c} 和 \hat{d} 之间的 EPR 纠缠,将量子态 \hat{b} 离物传送至 \hat{d} . Claire 在模 \hat{b} 和 \hat{c} 上执行的 Bell 态直接测量,将模 \hat{d} 塌缩为依附于 Claire 测量结果的条件量子态. 因此,当 Bob 接收到 Claire 送给他的测量结果时,就能够利用模 \hat{b} 和 \hat{c} 的和与差光电流(比例于 $\langle \delta^2(\hat{X}_b - \hat{X}_c) \rangle$ 和 $\langle \delta^2(\hat{Y}_b + \hat{Y}_c) \rangle$), 对模 \hat{d} 执行简单的相空间平移,在模 \hat{d} 上再现模 \hat{b} 的量子态特性,从而使模 \hat{d} 与模 \hat{a} 纠缠,完成纠缠交换. 在我们的实验中,从激光抽运源分出一支 1.08 μm 波长的基频相干光 $\hat{\beta}_0$, 作为本地 (local) 振荡光. 用 Claire 测量的和与差光电流,分别通过振幅 (AM) 和位相 (PM) 调制器对 $\hat{\beta}_0$ 执行振幅与位相调制,调制后的光学模 $\hat{\beta}$ 携带着 Claire 的测量信息,用它在一分束器 Mr 上(透射率 98%, 反射率 2%), 将光学模 \hat{d} 平移至 \hat{d}' , \hat{d}' 则为模 \hat{b} 的“重构”量子态^[2,15]. 为了确证纠缠交换已经被完成,我们将模 \hat{a} 与 \hat{d}' 送入检查站 (Victor), Victor 使用 Bell 态直接探测系统,测定模 \hat{a} 与 \hat{d}' 的和与差光电流, $\langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_{d'}) \rangle$ 和 $\langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_{d'}) \rangle$. 如果和与差光电流的起伏方差均低于相应的散粒噪声极限,则证明模 \hat{a} 与 \hat{d}' 处于 EPR 纠缠态.

实验中我们将 NOPA1 和 NOPA2 锁定于与注入信号场(1.08 μm) 共振,通过精确控制 KTP 晶体温度,使频率简并而偏振正交的两个非简并亚谐波模在腔内同时共振,并将抽运绿光与注入信号光的相对位相锁定于 $(2n + 1)\pi$. 当绿光抽运功率为 150mW (低于 NOPA 的振荡阈值 175mW), 腔前注入

信号光功率为 10mW 时,每一个 NOPA 输出约 70 μW 的 EPR 纠缠态光束, NOPA1 与 NOPA2 输出场的关联度分别约为 4.10dB 和 4.30dB, 即归一化的起伏方差为 $\langle \delta^2(\hat{X}_a + \hat{X}_b) \rangle = \langle \delta^2(\hat{Y}_a - \hat{Y}_b) \rangle = -4.10 \pm 0.20\text{dB}$ 和 $\langle \delta^2(\hat{X}_c + \hat{X}_d) \rangle = \langle \delta^2(\hat{Y}_c - \hat{Y}_d) \rangle = -4.30 \pm 0.20\text{dB}$.

图 2(a), (b), (c) 和 (d) 为用自零差 Bell 态探测系统测量的上述 4 个关联方差. 其中曲线 1, 2, 3 分别对应散粒噪声、关联噪声以及电子学噪声. 图 3(a) 和 (b) 分别为 Victor 所测量的模 \hat{a} 与 \hat{d}' 之间正交振幅与正交位相的关联方差. 曲线 1 为 Claire 未将测量结果送给 Bob 时,所测量的振幅和 [图 3(a)] 与位相差 [图 3(b)] 的噪声功率,它分别高于相应的 SNL (曲线 4) 4.48dB, 此时, \hat{a} 和 \hat{d}' 之间尚未显示出量子关联. 当用 Claire 的测量光电流调制 $\hat{\beta}_0$ 并用以平移 \hat{d} 后, \hat{a} 与 \hat{d}' 的关联噪声分别降到 SNL 以下 1.23dB [图 3(a) 曲线 5] 和 1.12dB [图 3(b) 曲线 5]. 扣除电子学噪声 (11.3dB, 低于 SNL, 图中未画出) 的影响,真实的正交振幅与正交位相关联度应分别为 1.34dB 和 1.22dB. 图 3(a) 和 (b) 中的曲线 2 分别为两台 NOPA 均不加抽运光场,仅注入信号场,当输出场功率为 70 μW 时, Victor 所测量的关联方差高于 SNL [图 3(a) 和 (b) 中的曲线 4] 1.89dB, 这就意味着从 Alice 和 Bob 到 Victor 的光学传输系统不是理想的,从而引入了 1.89dB 的额外噪声. 图 3(a) 和 (b) 中的曲线 3 分别是模 \hat{a} 和 \hat{d}' 各自的振幅噪声,它高于双光束的 SNL 1.16dB. 这说明 EPR 纠缠光束中每一个模自身的量子起伏都高于散粒噪声极限,但是由于它们彼此关联,所以关联方差低于 SNL. 实验结果与理论预测一致^[17].

图 4 是以我们实验系统的真实参量为基础,通过数值计算得到的纠缠交换结果与 NOPA1 和 NOPA2 的初始纠缠度 (γ_1 和 γ_2) 之间的函数关系^[14,15]. 图中 z 轴为归一化到 SNL 的纠缠交换后的关联方差 (Victor 测定的正交振幅和与正交位相差光电流起伏). 图中标出的星号点与实验结果相应,在那里, $\gamma_1 = 0.564$ 和 $\gamma_2 = 0.587$ 分别是由初始实验测定的 EPR 关联度 (-4.10dB 和 -4.30dB) 所计算的关联参量. 理论计算出的纠缠交换后的关联方差应为 -1.43dB, 略低于实验结果 -1.34dB 和 -1.22dB. 原因可能是计算中所取的探测效率略高于真实值. 此外,按理论计算,正交振幅和与正交位相差光电流的起伏方差应该相等,而实验测得的振幅关联却略优于位相关联,这是由于在零差探测中,分

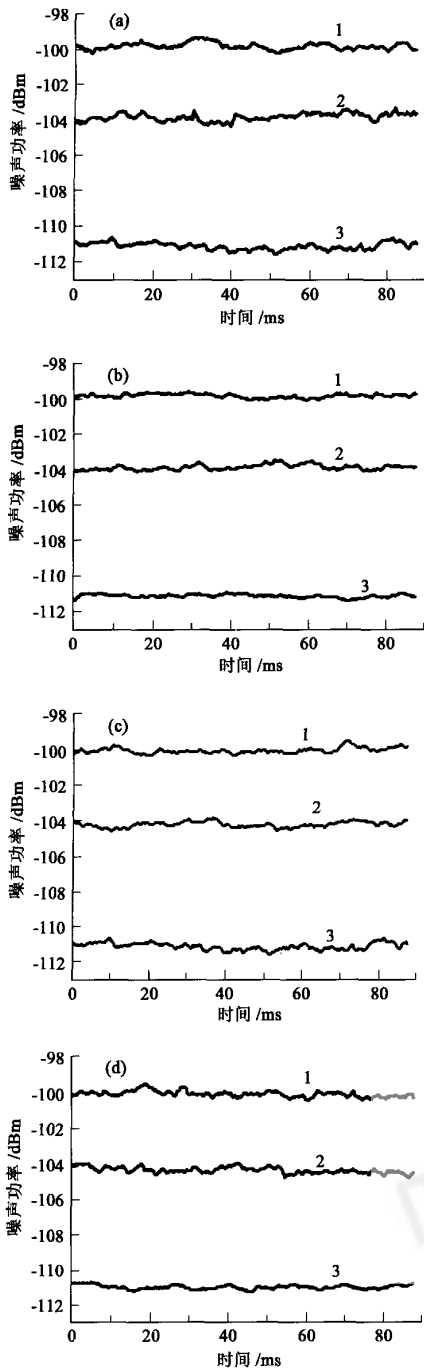


图2 NOPA1与NOPA2信号模与闲置模正交振幅与正交位相差的噪声功率

束器引入的真空噪声只降低位相分量的测量值却不影响振幅分量的测量结果^[18]。

综上所述可以看到,我们首次利用明亮的 EPR 纠缠态光场完成了连续量子变量的无条件纠缠交换. 通过 Bell 态测量, 将从未相互作用的两个非纠

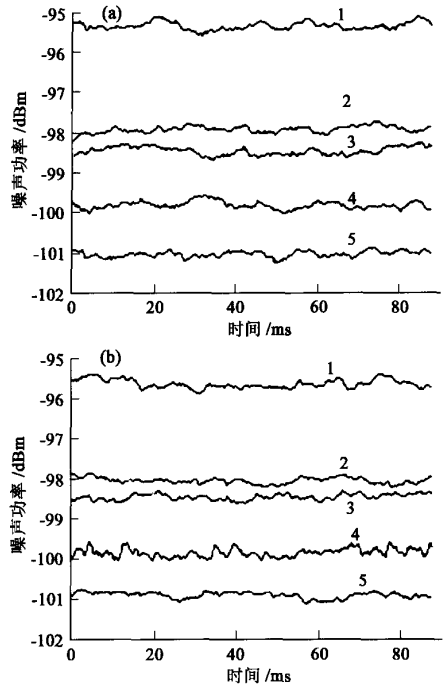


图3 Victor 所测 \hat{a} 与 \hat{a}' 的和与差光电流的起伏方差

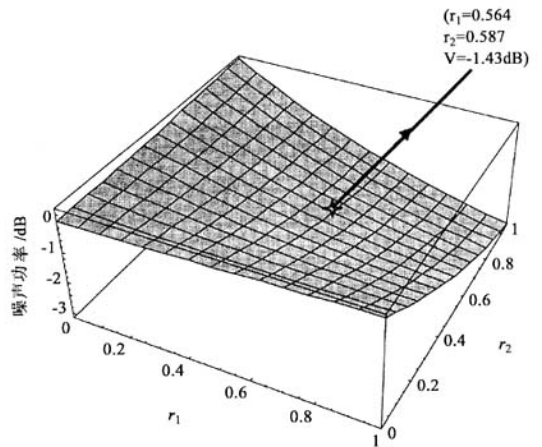


图4 纠缠交换结果与 NOPA1 和 NOPA2 的初始纠缠度 (γ_1 和 γ_2) 之间的函数关系

缠光场投影到一个纠缠态上, 完成了纠缠态的量子离物传送. 此项工作, 将在未来的量子信息网络中获得应用.

参考文献

[1] Bouwmeester D *et al.* Nature, 1997, 390:575
 [2] Furusawa A *et al.* Science, 1998, 282:706
 [3] Huang Y F, Ren X F, Zhang Y S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93:240501

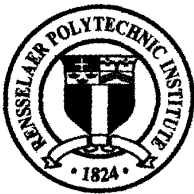
- [4] Mattle K, Weinfurter H, Kwiat P G *et al.* Phys. Rev. Lett., 1996, 76:4656
- [5] Li X Y, Pan Q, Jing J T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 047904
- [6] Jing J T, Zhang J, Yan Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 167903
- [7] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Phys. Rev., 1935, 47: 777
- [8] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1992, 68:3663
- [9] Zhang Y, Wang H, Li X Y *et al.* Phys. Rev. A, 2000, 62: 023813
- [10] Pan J W *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80:3891
- [11] van Loock P, Braunstein S L. Phys. Rev. A, 2000, 61: 10302
- [12] Glockl O *et al.* Phys. Rev. A, 2003, 68:012319
- [13] Zhang J, Peng K C. Phys. Rev. A, 2000, 62:064302
- [14] Zhang J, Xie C D, Peng K C. Phys. Lett. A, 2002, 299:427
- [15] Jia X J, Su X L, Pan Q *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 250503
- [16] 延英, 罗玉, 潘庆等, 中国激光, 2004, 31:513 [Yan Y, Luo Y, Pan Q *et al.* Chinese J. of Lasers, 2004, 31:513 (in Chinese)]
- [17] Reid M D, Drummond P D. Phys. Rev. Lett., 1988, 60: 2731
- [18] 贾晓军, 苏晓龙, 潘庆等. 物理学报, 2005, 54:2717 [Jia X J, Su X L, Pan Q *et al.* Acta Phys. Sin., 2005, 54:2717 (in Chinese)]

封面说明

将金属像塑料一样在开水中自由的变形,这是长期以来材料研究人员的梦想.最近中国科学院物理研究所的张博、赵德乾、潘明祥、汪卫华等人成功地开发出了一种新的大块金属玻璃,它具有接近室温的玻璃化转变温度,在开水中表现出超塑性,可轻松地实现弯曲、拉伸、压缩和复写等变形,因此被命名为金属塑料.该金属塑料由我国含量丰富的稀土铈和普通的铝和铜合金组成,具有潜在的应用价值,也为人们认识和研究过冷液体及玻璃的物理本质特供了新的材料,主要结果发表在 Phys. Rev. Lett., 2005, 94: 205502 上.封面显示的分别是该材料的 X 射线衍射结果,该材料在开水中弯曲变形过程和在开水中用该材料压印复写的中国科学院物理研究所所徽图案.

(中国科学院物理研究所 汪卫华)

· 招生招聘 ·



Rensselaer

美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy, New York, U. S. A.

August, 2005

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research: Terahertz Imaging and spectroscopy, Terascale Electronics and photonics, Nano-Particles Physics, Bio-physics, Origins of Life, Astronomy, Elementary Particles Physics. Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

Application: <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

Information: <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

Email: gradphysics@rpi.edu