

# 连续变量多色纠缠态光场

闫智辉 贾晓军\* 苏晓龙 谢常德 彭堃擢

(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** 具有正交振幅和相位分量量子关联的纠缠态光场是执行连续变量量子通信和量子计算研究的基本资源。随着量子信息科学的迅速发展,研究和构建可实用的量子信息网络已成为该领域科技工作者的主要目标。为了实现量子信息经由若干量子中继的远距离传送,第一步必须制备与原子存储及光纤通信波段相匹配的多色纠缠态。概述了连续变量纠缠态光场的概念和发展,介绍了产生双色及三色纠缠态光场的实验进展,最后从制备原理和实验方法方面详细描述了近期完成的与原子谱线和光纤传输窗口对应的三色纠缠态光场的研究。

**关键词** 量子光学;双色纠缠态光场;三色纠缠态光场;连续变量;非简并光学参量振荡腔;量子信息网络

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP50.080007

## Continuous Variable Multi-Color Entangled Optical Fields

Yan Zhihui Jia Xiaojun Su Xiaolong Xie Changde Peng Kunchi

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

**Abstract** The entangled states of light with quantum correlations of quadrature amplitude and phase components are the key resources for realizing the continuous variable quantum communication and quantum calculation. With the rapid development of quantum information science, researching and establishing practicable quantum information networks have become the main goal pursued by scientists in this field. For developing the long-distance transfer of quantum information via quantum repeaters, it is essential to prepare multipartite entangled states consisting of multi-color optical sub-modes respectively at fiber transmission and atomic transition frequencies. We briefly introduce the concept and the development of the continuous variable entangled optical fields firstly, then summarize the generation experiments of two-color and three-color entangled optical fields. At last the generation principle and the experimental method of three-color entangled optical fields at the atomic transition frequency and the communication window of optical fibers accomplished by our group recently are presented detailedly.

**Key words** quantum optics; two-color entangled optical fields; three-color entangled optical fields; continuous variable; non-degenerated optical parameter oscillator; quantum information network

**OCIS codes** 270.5570; 270.5585; 270.6570

## 1 引言

量子纠缠是进行量子信息和量子计算研究的重要资源,它是量子系统独具的物理特性,反映一个量子体系中各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他子系统的测量结果。这种非定域量子关联特性为人类提供了一种宝贵的资源,利用它们可以完成某些在经典物理框架下不可能完成的工作。例如,利用量子纠缠,原则上可以突破经典极限实现更安全的通信和更快速的计算。为此,从20世纪末

收稿日期: 2013-05-15; 收到修改稿日期: 2013-05-22; 网络出版日期: 2013-07-11

基金项目: 国家973计划(2010CB923103)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(61121064)、国家自然科学基金(11074157)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划

作者简介: 闫智辉(1983—),男,博士,讲师,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: zhyan@sxu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: jiaxj@sxu.edu.cn

到 21 世纪初, 科学界持续进行着各类纠缠态的制备研究。根据可观测物理量的本征值是分离的还是连续的, 量子变量被分为分离变量和连续变量两种类型。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<sup>[1-3]</sup>; 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相位分量等, 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<sup>[4-5]</sup>。在连续变量领域, 人们首先利用工作在阈值以下的光学参量放大器成功地在实验上得到了两组分正交分量纠缠态光场<sup>[6]</sup>, 并且将其应用到量子离物传态、量子密集编码及量子密钥分发等领域<sup>[7-12]</sup>。虽然利用两组分纠缠态光场可以实现基本的量子信息工作, 但是随着量子信息科学的深入发展和网络化需求, 人们需要利用更多组分的纠缠态去完成更复杂的量子信息任务。2003 年, van Loock 等<sup>[13]</sup>研究了连续变量多组分纠缠态的量子不可分判据, 为验证多组分纠缠态提供了依据。几个研究组利用工作在阈值以下的一组光学参量放大器输出的多束压缩态光场, 通过分束器阵列完成预定的么正变换已经制备出频率相同的多组分纠缠态<sup>[14-16]</sup>, 并用以实现了具有简单网络特性的量子信息工作<sup>[17-18]</sup>。然而, 为构建完善的量子信息网络, 必须要有由原子系统组成的量子存储器和信息处理器, 而可用的原子跃迁频率是自然确定的。因此制备多色纠缠态、建立原子与光场的纠缠应是当务之急。

本文介绍了双色和三色纠缠态光场的实验进展, 并详细描述了本课题组的三色纠缠态光场制备原理和实验方法, 以较好地总结连续变量多色纠缠态的研究成果。

## 2 双色纠缠态光场

对于由阈值以上光学参量振荡腔产生的频率非简并非经典光场, 人们很早就理论预言它们之间存在量子纠缠, 但受到测量水平的限制, 直到 2005 年才由巴西的 Nussenzveig 研究组、山西大学光电研究所和美国的 Pfister 研究组利用不同的办法, 分别验证了光学参量振荡腔输出的双色光之间具有两组分量子纠缠<sup>[19-23]</sup>。一般地, 工作在阈值以上的非简并非光学参量振荡腔 (NOPO) 产生的两束下转换光场的频率不同, 难以找到合适的本地振荡光, 不能直接利用通常的平衡零拍测量技术判断纠缠。上述三个研究组分别通过单端分析腔<sup>[19]</sup>、非平衡马赫-曾德尔 (M-Z) 干涉仪<sup>[20]</sup>和加入声光调制器<sup>[21]</sup>等不同方式, 证明了不同频率光场之间存在量子纠缠。在这三个实验中, 所产生的不同频率纠缠光的波长差都很小, 纠缠光波长分别在 1060 nm<sup>[19,21]</sup>和 1080 nm<sup>[20]</sup>附近。

对于一个实用化量子信息网络, 需要获得与量子存储及光纤通信等系统相匹配的特定波长的纠缠态光场。2010 年, 山西大学光电研究所利用单个工作在阈值以上的非简并非光学参量振荡腔, 在实验上首先得到了波长分别为 800 nm 和 1500 nm 的双色纠缠态光场, 前者接近于铷原子的跃迁频率, 后者接近于光纤通信窗口<sup>[22]</sup>, 实验装置如图 1 所示。激光器输出的光场通过法拉第光学隔离器 (FI) 抽运非简并非光学参量振荡腔。非简并非光学参量振荡腔采用由 PPKTP 晶体和两片平凹镜组成的驻波腔结构。在波长为 526.5 nm 的激光抽运作用下, 非简并非光学参量振荡腔产生波长分别为 800 nm 和 1500 nm 的下转换光场, 通过双色分束片 (DBS) 将它们分开, 并且通过单端分析腔

A1, A2 进行测量。由于光场的载波和噪声边带的频率不同, 它们经过法布里-珀罗 (F-P) 腔反射后产生的相移不同, 因此, 噪声边带的正交相位可以转换为正交振幅, 这样就可以测量到特定频率处的噪声边带的正交相位噪声。半波片 (HWP) 和偏振分束棱镜 (PBS) 用作 50/50 分束器, 光电流用电子频谱分析仪 (SA) 记录。当分析腔远失谐时, 光电探测器 (PD) 输出光电流之和与差的噪声功率分别对应于正交振幅的噪声功率及相应的量子噪声极限。当分析腔锁定在共振峰高度的一半时, 注入光场的正交相位起伏转换为反射光场的正交振幅起伏, 探测器输出光电流之和与差的噪声功率分别对应于正交相位的噪声功率及相应的量子噪声极限。这

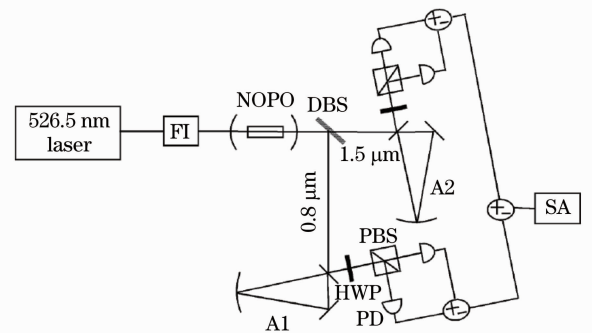


图 1 制备双色纠缠态光场的实验装置图<sup>[22]</sup>  
Fig. 1 Experimental setup for the generation of two-color entangled states of light<sup>[22]</sup>

种方法要求噪声测量的分析频率必须大于 $\sqrt{2}$ 倍分析腔线宽。使用两个分析腔,通过扫描腔长,测量得到波长为 800 nm 和 1500 nm 的双色纠缠态光场,其关联噪声功率谱如图 2 所示。图 2(a)和(b)分别表示正交振幅差和正交相位和的噪声功率谱。图中曲线(a)表示量子噪声极限;曲线(b)表示正交振幅差或正交相位和的噪声功率谱。它们的正交振幅差与正交相位和的关联噪声分别低于量子噪声极限 1.2 dB 与 0.7 dB。

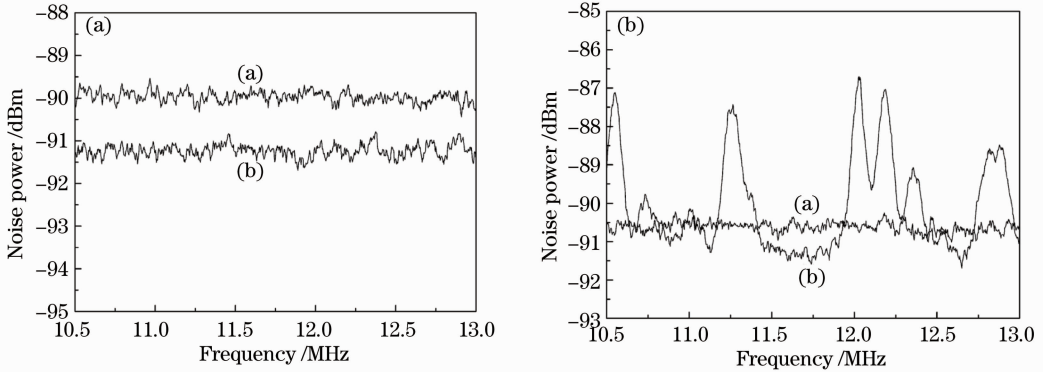


图 2 双色纠缠光场的(a)正交振幅差和(b)正交相位和关联噪声功率谱<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Correlation noise power of (a) the amplitude sum and (b) the phase difference of two-color entangled states of light<sup>[22]</sup>

### 3 三色纠缠态光场

为了建立量子信息网络,除双色纠缠之外,还需要获得多色纠缠态光场。巴西的 Nussenzweig 研究组首先利用单个工作在阈值以上的非简并光学参量振荡腔开展了三色纠缠态光场的研究工作。2006 年,他们理论分析了光学参量振荡腔的反射抽运光场及两束下转换光场之间的量子关联特性<sup>[23]</sup>。2009 年,他们通过单端分析腔对三束光的正交振幅及正交相位的量子噪声分别进行测量,证实了波长分别为 532. 251, 1062. 102, 1066. 915 nm 的三色光场之间存在量子纠缠。由于这个方案中与热起伏相关的声子噪声造成的影响较大,整个系统必须在 $-23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下工作才能观测到纠缠<sup>[24]</sup>。

为了产生与原子存储及光纤通信对应的多色纠缠态光场,并避免系统的低温运转,我们理论设计并实验实现了一种新的三色纠缠态光场的制备方案<sup>[25-26]</sup>,如图 3 所示。该方案利用两个级联的工作在阈值以上的非简并光学参量振荡腔的三束下转换光场获得三色纠缠态。在这个系统中,不需要考虑反射抽运光场与下转换光场之间的量子关联,从而减小了声子噪声的影响<sup>[26]</sup>。两个非简并光学参量振荡腔(NOPO1 和 NOPO2)都采用两片平凹镜和非线性晶体组成的驻波腔结构。由于两个光学参量振荡腔产生的信号光场和闲置光场的波长差较大,它们

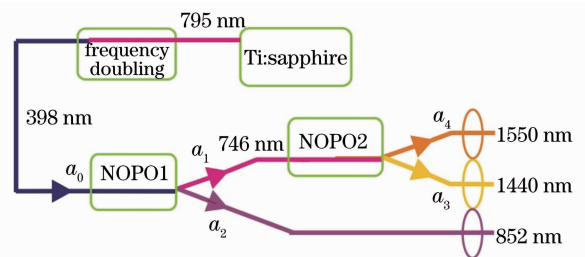


图 3 制备三色纠缠态光场的实验装置示意图

Fig. 3 Schematic setup of the generation of three-color entangled states of light

在非线性光学晶体中形成大的走离效应<sup>[27]</sup>,这将显著减小非线性作用长度。为此我们选用交替反转极化的铁电结构的周期极化晶体(PKTP 和 PPLN),极大地降低了走离效应对转换效率的影响。第一个非简并光学参量振荡腔(NOPO1)在波长为 398 nm 的激光抽运下产生波长分别为 746 nm 和 852 nm 的信号光场和闲置光场。其中波长为 746 nm 的信号光场再作为第二个非简并光学参量振荡腔(NOPO2)的抽运光场,NOPO2 产生波长分别为 1550 nm 和 1440 nm 的信号光场和闲置光场。这样,获得了波长分别为 852, 1550 和 1440 nm 的三色三组分纠缠态光场。多色纠缠光场的频率调谐可以通过分别改变两个非简并光学参量振荡腔中非线性光学晶体的温度来实现,灵活性比较大。

实验中,两个 NOPO 输出的不同波长的下转换光场分别用双色分束器将之分离,再通过由光纤、波片和偏振分束棱镜等组成的非平衡 M-Z 干涉仪测量其正交振幅及正交相位的量子噪声,非平衡 M-Z 干涉仪的

结构如图 4 所示<sup>[28]</sup>。当转动半波片 HWP1 使得光场只通过短臂光纤时,探测器输出光电流之和与差的噪声功率分别对应于入射光场正交振幅的噪声功率及相应的量子噪声极限。当转动半波片 HWP1 使得光场以 50/50 比例通过长臂光纤和短臂光纤,并且将两路光的相位差锁定在  $\pi/2 + 2k\pi$  ( $k$  为正整数) 时,探测器输出光电流之差与和的噪声功率分别对应于入射光场的正交相位的噪声功率及相应的量子噪声极限。测量要求边带噪声的分析频率  $f$  与干涉仪两臂的长度差  $\Delta L$  满足  $f = c/2n\Delta L$ , 其中  $c$  为光速,  $n$  为介质折射率(详细讨论参考文献[28])。为了测量 2 MHz 处的边带噪声,干涉仪由 2 m 和 50 m 的光纤构成<sup>[20]</sup>。将测量结果用加法及减法功率组合器按照要求组合,获得的关联噪声功率谱的测量结果如图 5 所示。图 5(a)~(f) 分别表示  $\langle \delta^2(X_3 - X_4) \rangle$ 、 $\langle \delta^2(g_1^{\text{opt}}Y_2 + Y_3 + Y_4) \rangle$ 、 $\langle \delta^2(X_2 - X_3) \rangle$ 、 $\langle \delta^2(Y_2 + Y_3 + g_3^{\text{opt}}Y_4) \rangle$ 、 $\langle \delta^2(X_2 - X_4) \rangle$ 、 $\langle \delta^2(Y_2 + g_2^{\text{opt}}Y_3 + Y_4) \rangle$  的关联噪声,它们分别低于量子噪声极限 4.1 dB、1.1 dB、3.2 dB、0.5 dB、3.2 dB、0.5 dB。图中曲线(a)表示量子噪声极限,曲线(b)表示正交振幅或者正交相位的关联噪声。它们的关联噪声和满足相应的不可分判据:

$$\begin{aligned} \langle \delta^2(X_3 - X_4) \rangle + \langle \delta^2(g_1^{\text{opt}}Y_2 + Y_3 + Y_4) \rangle &= 3.03 \leq 4, \\ \langle \delta^2(X_2 - X_3) \rangle + \langle \delta^2(Y_2 + Y_3 + g_3^{\text{opt}}Y_4) \rangle &= 3.68 \leq 4, \\ \langle \delta^2(X_2 - X_4) \rangle + \langle \delta^2(Y_2 + g_2^{\text{opt}}Y_3 + Y_4) \rangle &= 3.68 \leq 4. \end{aligned}$$

上述结果表明我们得到了一个具有 Greenberger-Horne-Zeilinger(GHZ)量子关联类型的三组份纠缠态光场<sup>[13]</sup>, 其中的 852 nm 与铯原子吸收线对应,而 1550 nm 与 1440 nm 分别对应和接近光纤通信窗口。所采用的级联非简并光学参量振荡腔结构还可以拓展为产生更多色纠缠态光场的系统,为发展连续变量量子信息网络提供了一种多色纠缠光源的设计原型。

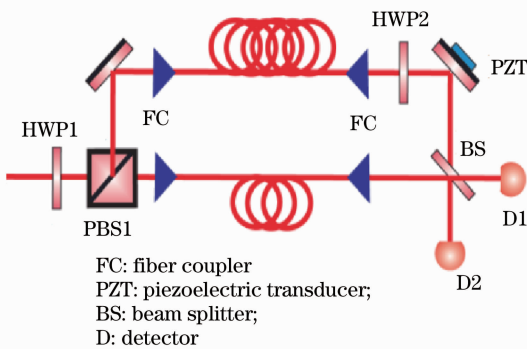


图 4 非平衡 M-Z 干涉仪的结构图

Fig. 4 Schematic of unbalanced M-Z interferometer

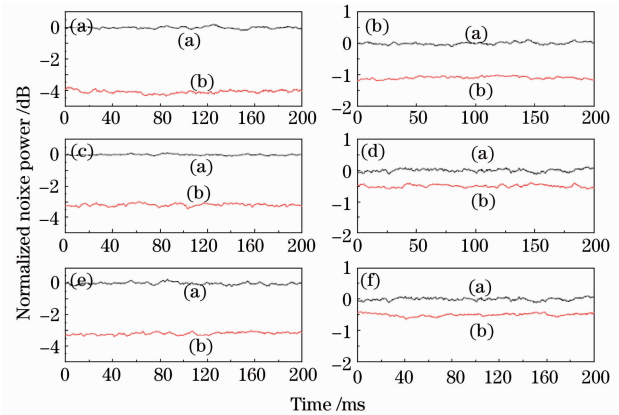


图 5 三色纠缠光场的关联噪声功率谱<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Correlation noise power of three-color entangled states of light<sup>[26]</sup>

## 4 结束语

本文介绍了连续变量多色多组分纠缠态光场的概念和实验制备进展。目前,量子通信和量子计算研究正在向纵深发展。制备不同波长的多色多组分纠缠态光场是发展量子中继的前提。本课题组近期实验制备的波长分别为 852, 1550 和 1440 nm 的三色三组分纠缠态光场,分别与原子存储和光纤通信波段相匹配。该系统不需要低温装置,便于实用,有希望发展为用于连续变量量子信息网络的量子纠缠光源。

## 参 考 文 献

- 1 D Bouwmeester, J W Pan, K Mattle, *et al.*. Experimental quantum teleportation [J]. Nature, 1997, 390(6660): 575-579.
- 2 R Horodecki, P Horodecki, M Horodecki, *et al.*. Quantum entanglement [J]. Rev Mod Phys, 2009, 81(2): 865-942.
- 3 J W Pan, Z B Chen, C Y Lu, *et al.*. Multiphoton entanglement and interferometry [J]. Rev Mod Phys, 2012, 84(2): 777-838.

- 4 S L Braunstein, Peter van Loock. Quantum information with continuous variables [J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77(2): 513–577.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 A Furusawa, J L Sørensen, S L Braunstein, *et al.*. Unconditional quantum teleportation [J]. *Science*, 1998, 282(5389): 706–709.
- 8 H F Hofmann, T Ide, T Kobayashi, *et al.*. Fidelity and information in the quantum teleportation of continuous variables [J]. *Phys Rev A*, 2000, 62(6): 062304.
- 9 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.
- 10 J Mizuno, K Wakui, A Furusawa, *et al.*. Experimental demonstration of entanglement assisted coding using a two-mode squeezed vacuum state [J]. *Phys Rev A*, 2005, 71(1): 012304.
- 11 C Silberhorn, N Korolkova, G Leuchs. Quantum key distribution with bright entangled beams [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(16): 167902.
- 12 X L Su, W Z Wang, Y Wang, *et al.*. Continuous variable quantum key distribution based on optical entangled states without signal modulation [J]. *Europhys Lett*, 2009, 87(2): 20005.
- 13 P van Loock, A Furusawa. Detecting genuine multipartite continuous-variable entanglement [J]. *Phys Rev A*, 2003, 67(5): 052315.
- 14 T Aoki, N Takei, H Yonezawa, *et al.*. Experimental creation of a fully inseparable tripartite continuous-variable state [J]. *Phys Rev Lett*, 2003 91(8): 080404.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 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.
- 18 H Yonezawa, T Aoki, A Furusawa. Demonstration of a quantum teleportation network for continuous variables [J]. *Nature*, 2004, 431(7007): 430–433.
- 19 A S Villar, L S Cruz, K N Cassemiro, *et al.*. Generation of bright two-color continuous variable entanglement [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(24): 243603.
- 20 X L Su, A H Tan, X J Jia, *et al.*. Experimental demonstration of quantum entanglement between frequency-nondegenerate optical twin beams [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(8): 1133–1135.
- 21 J T Jing, S Feng, Russell Bloomer, *et al.*. Experimental continuous-variable entanglement from a phase-difference-locked optical parametric oscillator [J]. *Phys Rev A*, 2006, 74(4): 041804.
- 22 Y M Li, X M Guo, Z L Bai, *et al.*. Generation of two-color continuous variable quantum entanglement at 0.8 and 1.5  $\mu\text{m}$  [J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(3): 031107.
- 23 A S Villar, M Martinelli, C Fabre, *et al.*. Direct production of tripartite pump-signal-idler entanglement in the above-threshold optical parametric oscillator [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, 97(14): 140504.
- 24 A S Coelho, F A S Barbosa, K N Cassemiro, *et al.*. Three-color entanglement [J]. *Science*, 2009, 326(6): 823–826.
- 25 A H Tan, C D Xie, K C Peng. Bright three-color entangled state produced by cascaded optical parametric oscillators [J]. *Phys Rev A*, 2012, 85(1): 013819.
- 26 X J Jia, Z H Yan, Z Y Duan, *et al.*. Experimental realization of three-color entanglement at optical fiber communication and atomic storage wavelengths [J]. *Phys Rev Lett*, 2012, 109(25): 253604.
- 27 R W Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. San Diego; Academic Press, 1992.
- 28 O Glöckl, U L Andersen, S Lorenz, *et al.*. Sub-shot-noise phase quadrature measurement of intense light beams [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(16): 1936–1938.