

文章编号: 1007-6654(2012)02-0143-04

非简并光学参量放大器线宽对纠缠增强的影响

马文昱, 贾晓军[†]

(量子光学与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: 非简并光学参量放大器可以有效地增强其注入纠缠态光场的纠缠度。但是由于光学参量放大器具有一定的线宽, 所以不可能实现整个频率范围内的纠缠增强。为此, 在本文中我们分析了光学参量放大器线宽对纠缠增强效率的影响, 为今后开展宽频纠缠增强提供参考。

关键词: 纠缠增强; 非简并光学参量放大器; 线宽

中图分类号: O431 **文献标识码:** A

0 引言

量子纠缠态是进行量子信息研究的一种重要资源。它可以被用来进行高效地信息处理, 能够突破经典极限, 完成经典通信无法完成的任务。早在 1992 年, J. Kimble 研究小组就通过泵浦由 II 类匹配非线性晶体构成的光学参量放大器 (NOPA), 首次得到了具有振幅正关联、位相反关联的 Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) 纠缠态光场^[1]。2000 年, 山西大学光电研究所也利用工作于参量反放大状态的 NOPA 获得了关联度为 -4 dB 的振幅反关联、位相正关联的 EPR 纠缠态光场^[2]。利用量子纠缠态, 人们已经完成了一系列量子信息实验研究, 如量子离物传态^[3]、量子密集编码^[4]和量子纠缠交换^[5]等。在 1998 年首次完成的连续变量量子离物传态实验中, J. Kimble 研究小组利用自己制备的纠缠度为 2.23 dB 的纠缠态光场进行了相干态量子离物传态研究, 信息保真度为 $F=0.58 \pm 0.02$ ^[3]。为了进一步提高量子离物传态的保真度, 提高实验中利用的纠缠态光场的纠缠度是首要的。一种提高纠缠态光场

纠缠度的方法是优化实验系统的结构, 主要包括尽可能地减小泵浦光场自身的位相噪声起伏, 减少内腔损耗及使用有效非线性极化率更大的非线性晶体。2010 年, 山西大学光电研究所将 NOPA 直接输出的纠缠态光场的纠缠度提高至 6.0 dB^[6], 达到目前单个 NOPA 输出纠缠度最大的纠缠态光场。

但是由于技术条件的限制, 继续提高直接输出的连续变量纠缠态光场的纠缠度十分困难, 因此需要寻求其他的方法。2006 年 Agarwal 提出, I 类匹配的光学参量放大器可以实现对注入的压缩真空态的增强^[7]。同年, 山西大学光电研究在实验上证实了这一结论^[8]。2009 年, 山西大学光电研究所将这种思想推广到纠缠态光场领域, 发现运转于阈值以下的 II 类匹配光学参量放大器对注入的纠缠态光场同样具有增强作用^[9,10], 然后又通过实验实现了连续变量量子纠缠的二级级联增强, 将最终输出的 EPR 纠缠态光场的纠缠度由 5.3 dB 提高至 8.1 dB^[11]。

虽然大部分量子信息实验研究关注的只是一

收稿日期: 2012-03-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2010CB923103); 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(60821004); 国家自然科学基金(60736040, 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: 马文昱(1986—), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究领域: 量子光学、量子信息。

[†] 通讯作者: E-mail: jiaxj@sxu.edu.cn

个分析频率处光场的纠缠特性,但是随着量子信息研究的深入开展,在纠缠态光场上加载信息的时候,为了能扩大信道容量,一般会同时加载多个频率的信息,这就要求我们制备宽带的纠缠态光场,然而受NOPA线宽的影响,NOPA输出的各种非经典光场只能在一定频带范围内存在^[12]。同样,NOPA的线宽也会对纠缠增强产生影响,为此在本文中,我们分析了NOPA线宽对纠缠增强效果的影响,为今后开展宽频纠缠增强提供参考。

1 理论分析

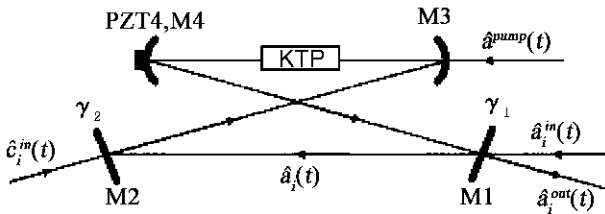


图1 NOPA结构示意图
Fig. 1 Schematics of the NOPA

用于进行纠缠增强的NOPA(图1)由II类匹配的非线性KTiOPO₄晶体(KTP)和四镜环形谐振腔组成。M1作为注入信号光与闲置光的输入输出镜对注入光透射率为γ₁,其余三镜都是注入光的高反镜。泵浦光由M3镜耦合入NOPA,并且所有镜子对泵浦光都镀有减反膜。腔内的单模量子化光场可以用湮灭算符 $\hat{a}_i(t)$ ($i = 1, 2$ 分别表示信号光与闲置光)及其共轭算符 $\hat{a}_i^\dagger(t)$ 来表示,它们分别与经典光场的复振幅和其正交量相关。注入场 $\hat{a}_i^{\text{in}}(t)$ 和输出场 $\hat{a}_i^{\text{out}}(t)$ 与腔内本征场 $\hat{a}_i(t)$ 通过输入输出镜M1耦合。由于存在内腔损耗,真空噪声不可避免地耦合进腔内,为了简单起见,我们假设所有损耗均由M2镜耦合进腔内,其损耗用γ₂表示。据此我们可以得到运转于参量反放大状态(即泵浦光与注入光位相差为 $(2n+1)\pi$)时,NOPA本征场 $\hat{a}_i(t)$ 的Langevin方程为,

$$\begin{cases} \tau \frac{d\hat{a}_1}{dt} = -\kappa\hat{a}_1^\dagger - (\gamma_1 + \gamma_2)\hat{a}_1 + \sqrt{2\gamma_1}\hat{a}_1^{\text{in}} + \sqrt{2\gamma_2}\hat{c}_1^{\text{in}} \\ \tau \frac{d\hat{a}_2}{dt} = -\kappa\hat{a}_2^\dagger - (\gamma_1 + \gamma_2)\hat{a}_2 + \sqrt{2\gamma_1}\hat{a}_2^{\text{in}} + \sqrt{2\gamma_2}\hat{c}_2^{\text{in}} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\kappa = \beta\chi$, χ 为有效二阶非线性系数, $\beta = \sqrt{\frac{P_{\text{pump}}}{P_{\text{th}}}}$ 为泵浦参量, P_{pump} 为NOPA的实际泵浦功率, P_{th} 为NOPA的泵浦阈值。将方程(1)做Fourier变换后,联合边界条件 $\hat{a}_i^{\text{out}}(\omega) = \sqrt{\gamma}\hat{a}_i(\omega) - \hat{a}_i^{\text{in}}(\omega)$,即可算出输出场的关联起伏,

$$\begin{aligned} & \delta(\hat{X}_1^{\text{out}} + \hat{X}_2^{\text{out}}) \\ &= \frac{-\kappa + \gamma_1 - \gamma_2 - i\omega\tau}{\kappa + \gamma_1 + \gamma_2 + i\omega\tau} \delta(\hat{X}_1^{\text{in}} + \hat{X}_2^{\text{in}}) + \frac{2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}}{\kappa + \gamma_1 + \gamma_2 + i\omega\tau} \delta(\hat{C}_{x_1}^{\text{in}} + \hat{C}_{x_2}^{\text{in}}) \\ & \delta(\hat{Y}_1^{\text{out}} - \hat{Y}_2^{\text{out}}) \\ &= \frac{-\kappa + \gamma_1 - \gamma_2 - i\omega\tau}{\kappa + \gamma_1 + \gamma_2 + i\omega\tau} \delta(\hat{Y}_1^{\text{in}} - \hat{Y}_2^{\text{in}}) + \frac{2\sqrt{\gamma_1\gamma_2}}{\kappa + \gamma_1 + \gamma_2 + i\omega\tau} \delta(\hat{C}_{y_1}^{\text{in}} - \hat{C}_{y_2}^{\text{in}}) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 ω 为分析频率, τ 为光在腔内循环一周的时间。假设注入光场为振幅反关联、位相正关联的EPR纠缠态光场,即 $\langle \delta(\hat{X}_1^{\text{in}} + \hat{X}_2^{\text{in}}) \rangle = \langle \delta(\hat{Y}_1^{\text{in}} - \hat{Y}_2^{\text{in}}) \rangle = e^{-2r}$,其中 r 为注入EPR纠缠态光场的关联参量,则可以算出此时NOPA输出场的关联噪声谱,

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \langle \delta(\hat{X}_1^{\text{out}} + \hat{X}_2^{\text{out}}) \rangle \\ &= \langle \delta(\hat{Y}_1^{\text{out}} - \hat{Y}_2^{\text{out}}) \rangle \\ &= \frac{(-\kappa + \gamma_1 - \gamma_2)^2 + (\omega\tau)^2}{(\kappa + \gamma_1 + \gamma_2)^2 + (\omega\tau)^2} e^{-2r} + \frac{(2\sqrt{\gamma_1\gamma_2})^2}{(\kappa + \gamma_1 + \gamma_2)^2 + (\omega\tau)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

由于我们要考虑NOPA腔线宽对纠缠增强的影响,所以我们将关联噪声谱归一化到腔线宽 $B = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2\pi\tau}$ 上,

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \frac{4\pi^2(-\kappa + \gamma_1 - \gamma_2)^2 + \left(\frac{\omega}{B}\right)^2(\gamma_1 + \gamma_2)^2}{4\pi^2(\kappa + \gamma_1 + \gamma_2)^2 + \left(\frac{\omega}{B}\right)^2(\gamma_1 + \gamma_2)^2} e^{-2r} + \end{aligned}$$

$$\frac{4\pi^2 (2\sqrt{\gamma_1 \gamma_2})^2}{4\pi^2 (\kappa + \gamma_1 + \gamma_2)^2 + \left(\frac{\omega}{B}\right)^2 (\gamma_1 + \gamma_2)^2} \quad (5)$$

图 2 为关联参量 $r = 0.57$ 时, NOPA 腔线宽取不同值时 NOPA 输出场的关联噪声随分析频率变化的曲线, 其中, 曲线(1)、(2)、(3)、(4)和(5)对应的 NOPA 线宽分别为 1 MHz、2 MHz、5 MHz、10 MHz 和 50 MHz。从图中可以看出, 由于腔线宽的限制, 使得输出纠缠态光场的关联噪声随分析频率的增大而增大, 而在同一分析频率处, NOPA 腔线宽越大, 则对纠缠增强的影响越小。

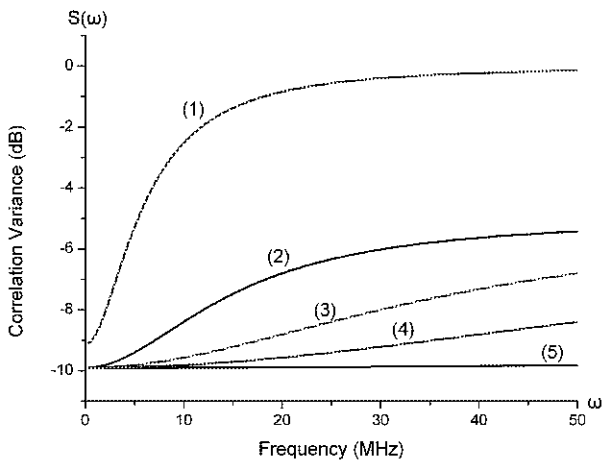


图 2 关联噪声随分析频率的变化关系
Fig. 2 Dependence of the correlation variance on the analyzed frequency ω

图 3 中(a)、(b)分别为分析频率 $\omega = 2$ MHz 和 $\omega = 10$ MHz 时, NOPA 腔线宽取不同值时 NOPA 输出场的关联噪声随注入纠缠态光场关联参量变化的曲线, 其中, 曲线(1)、(2)、(3)和(4)对应的 NOPA 线宽分别为 1 MHz、2 MHz、5 MHz 和 10 MHz。由图中可以看出, 在同一分析频率处, 腔线宽越大, 其对纠缠增强的影响越小。通过两个图对比可以看出, 在低于 NOPA 腔线宽的分析频率处, 腔线宽对纠缠增强的影响会显著降低。

参考文献:

[1] 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.
[2] ZHANG Y, WANG H, LI X, *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**: 023813.

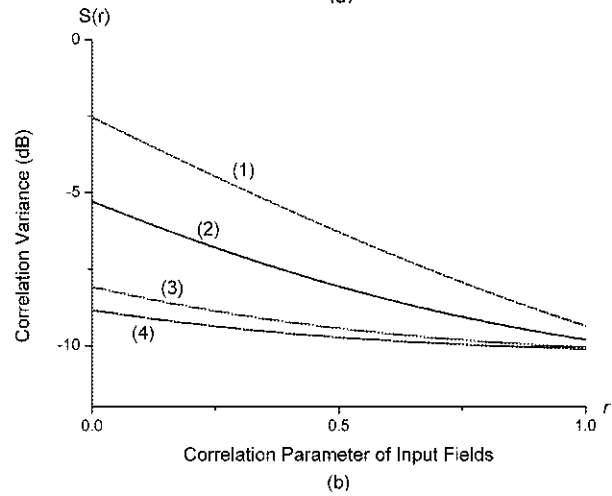
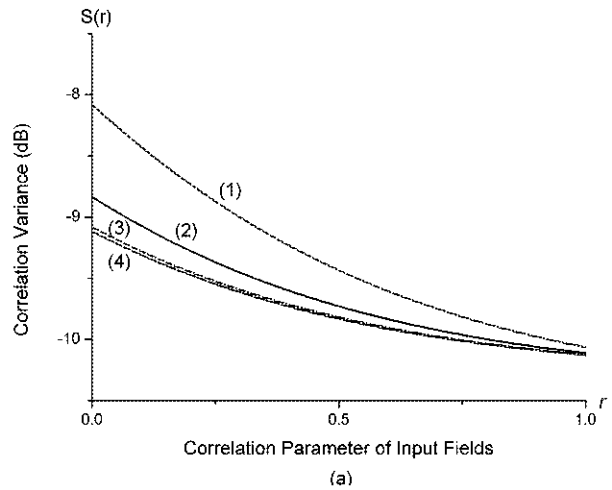


图 3 关联噪声随关联参量的变化关系
Fig. 3 Dependence of the correlation variance on the correlation parameter r

2 结论

本文分析了 NOPA 腔线宽对连续变量纠缠增强的影响, 由理论计算可以看出光学参量放大器的线宽对连续变量量子纠缠放大的带宽有很大影响, 这将为今后设计宽带纠缠增强的实验系统提供参考。

- [3] FURUSAWA A, SØRENSEN J L, BRAUNSTEIN S L, *et al.* Unconditional Quantum Teleportation [J]. *Science*, 1998, **282**: 706.
- [4] JIA X J, SU X L, PAN Q, *et al.* Experimental Demonstration of Unconditional Entanglement Swapping for Continuous Variables [J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 250503.
- [5] LI X Y, PAN Q, JING J T, *et al.* Quantum Dense Coding Exploiting a Bright Einstein-Podolsky-Rosen Beam [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **88**: 047904.
- [6] WANG Y, SHEN H, SU X L, *et al.* Experimental Generation of 6 dB Continuous Variable Entanglement from a Nondegenerate Optical Parametric Amplifier [J]. *Opt Express*, 2010, **18**: 6149-6155.
- [7] AGARWAL G S. Interferences in Parametric Interactions Driven by Quantized Fields [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**: 023601.
- [8] ZHANG J, YE C G, GAO F, *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.
- [9] CHEN H X, ZHANG J. 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.
- [10] SHANG Y N, JIA X J, SHEN Y M, *et al.* Continuous Variable Entanglement Enhancement and Manipulation by a Sub-threshold Type II Optical Parametric Amplifier [J]. *Opt Lett*, 2010, **35**: 853-855.
- [11] YAN Z H, JIA X J, SU X L, *et al.* Cascaded Entanglement Enhancement [J]. arXiv:1201, 1159.
- [12] REYNAUD S, FABRE C, GLACOBINO E. Quantum Fluctuations in a two-mode Parametric Oscillator [J]. *J Opt Soc Am B*, 1987, **4**: 1520-1524.

Influence of the Cavity Bandwidth of a NOPA on Entanglement Enhancement

MA Wen-yu, JIA Xiao-jun

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

Abstract: It has been demonstrated that non-degenerate optical parametric amplifier (NOPA) made a remarkable enhancement of quantum entanglement. However, it is impossible to realize the entanglement enhancement in the whole frequency region due to the limitation of cavity bandwidth of a NOPA. In this paper, we investigate how the cavity bandwidth makes the influence on the entanglement enhancement, which should provide some references for the research on the broadband entanglement enhancement.

Key words: entanglement enhancement; non-degenerate optical parametric amplifier; cavity bandwidth