

弱抽运下光学参量过程中压缩真空场 的光子统计性质^{*}

赵冬梅 李志刚 郭龔强 李 刚 王军民 张天才[†]

(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, 太原 030006)

(2009 年 11 月 17 日收到; 2009 年 12 月 26 日收到修改稿)

在理论和实验上研究了光学参量振荡中产生的弱压缩真空场的光子统计行为. 弱压缩真空具有强烈的光子聚束效应, 这种比热光场更强的聚束效应在量子光学和量子测量中具有重要的应用. 利用远离阈值的光学参量振荡 (optical parametric oscillator, OPO) 过程, 在实验上产生了该弱压缩真空输出, 运转波长在铯原子线附近. 通过 Hanbury-Brown-Twiss (HBT) 测量了 OPO 输出光场的二阶关联函数, 实验结果与理论分析基本一致.

关键词: 压缩真空态, 二阶相干度, 光学参量振荡

PACC: 4265K, 4250, 2970

1. 引 言

压缩真空光场是指电磁场正交位相分量的起伏低于真空态的起伏. 因其在量子光学基础研究、灵敏测量以及连续变量量子通讯和量子信息中的重要作用, 已经获得了广泛的研究. 相对于那些明亮的压缩, 如光子数压缩、强度差压缩等, 压缩真空因其光子数很弱, 在研究光场的量子行为时具有特殊的意义. 早在 1985 年, Kimble 小组采用光学参量振荡 (optical parametric oscillator, OPO) 方法获得了 63% 的正交压缩真空^[1], 这一结果 2007 年被日本科学家提高到 87% (9dB), 他们利用内置周期极化磷酸氧钛钾 (PPKTP) 晶体, 通过提高平衡零拍探测相位锁定技术获得^[2]. 最近德国研究组进一步通过 I 类简并 OPO 获得 11.5 dB 的压缩真空^[3]. 这是目前报道的最大压缩真空场. 与获得高度压缩的真空相反, 当光学参量振荡器运转在远低于阈值时, 会获得弱的压缩真空输出. 这种弱抽运下的光学参量过程引起了人们的注意. 2000 年 Ou 就远低于阈值的 OPO 输出窄带宽双光子对作了阐述^[4]. 远低于阈值的弱压缩真空场具有极低的光子数同时有很强烈的聚束效应, 其二阶相干度 $g^{(2)}$ 远大于热光场的二阶相关度^[5]. 该类光场因其平均光子数远小于 1, 可以采用单

光子探测装置对其进行测量. 通过 OPO 腔以及其他滤波措施, 可以产生窄带双光子源, 这类光场可以广泛应用于量子密钥^[6]、量子隐形传态^[7,8]、量子计算^[9]、量子相干^[10]等量子信息过程, 并可望与原子结合实现量子比特存储和交换等^[11], 是实现光子-原子量子接口的重要资源^[12,13].

本文对远低于阈值的弱压缩光的性质作了分析, 特别是从一般的压缩相干态出发, 对相空间原点附近的相图进行了深入分析, 获得了清晰的二阶相干度以及 Mandel 因子随压缩参数和相干分量的变化. 同时, 我们讨论了弱抽运 OPO 输出光场的多模场的二阶相干度随延迟时间的变化. 实验方面, 我们利用弱抽运情况下的 OPO 系统, 产生了铯原子 D_2 线附近的弱压缩真空, 通过 Hanbury-Brown-Twiss (HBT) 测量了光场的二阶关联函数. 实验结果与理论分析一致.

2. 压缩光场的光子统计性质

一般意义上的压缩态是泛指光场的某一可测力学量的起伏小于相应的理想相干态对应的起伏. 压缩相干态的平均光子数

$$\langle N \rangle = |\alpha|^2 + \sinh^2 r \quad (1)$$

对应的光子数起伏为

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10974125, 60808006, 60821004, 60978017), 国家重点基础研究发展计划 (973) (批准号: 2006CB921102) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

$$\begin{aligned} \langle \Delta^2 N \rangle = & | \alpha \cosh r - \alpha^* e^{i\theta} \sinh r |^2 \\ & + 2 \cosh^2 r \sinh^2 r, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 α 表示相干分量, r 为压缩参数, θ 为压缩角度. 因此可以得到二阶相干度

$$g^{(2)}(0) = \frac{| \alpha \cosh r - \alpha^* e^{i\theta} \sinh r |^2 + 2 \cosh^2 r \sinh^2 r + (| \alpha |^2 + \sinh^2 r)^2 - | \alpha |^2 - \sinh^2 r}{(| \alpha |^2 + \sinh^2 r)^2}, \quad (3)$$

以及相应的 Mandel- Q 参数

$$\begin{aligned} Q &= \frac{\langle \Delta^2 N \rangle - \langle N \rangle}{\langle N \rangle} \\ &= \frac{| \alpha \cosh r - \alpha^* e^{i\theta} \sinh r |^2 + 2 \cosh^2 r \sinh^2 r - | \alpha |^2 - \sinh^2 r}{| \alpha |^2 + \sinh^2 r}. \end{aligned} \quad (4)$$

所谓弱压缩光场指压缩参数 $r \ll 1$ 的状态, 对应的平均光子数 $\langle N \rangle \ll 1$. 图 1 中我们给出了 $r < 1$ 对应的压缩真空 ($\alpha = 0$) 在相空间中的正交位相分量的噪声图, 其中压缩角为 0. 需要特别指出的是, 压缩真空对应的噪声椭圆的中心不在原点, 而是偏离原点. 因为压缩真空本身的光子数不等于 0. 这一点与一些文献[14—17]中描写的不同. 图 1 中从左至右压缩参数 r 依次等于 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 椭圆中心到原点的距离用压缩态的平均光子数来度量. 从图 1 可以看出, 压缩度越大, 椭圆偏离原点越远. 与此同时, 离开原点越远, 椭圆越扁. 这些椭圆清楚地显示了弱压缩真空的噪声特点.

图 2 是压缩相干态二阶相干度 (a) 以及 Mandel- Q 参数 (b) 随相干分量 α 和压缩参数 r 的变化情况.

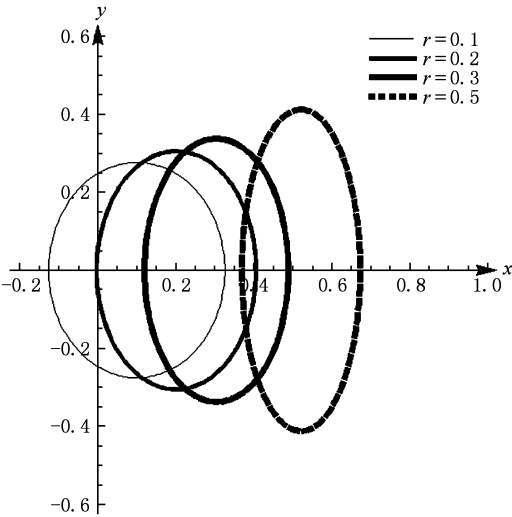


图 1 压缩真空态在正交位相空间的相图

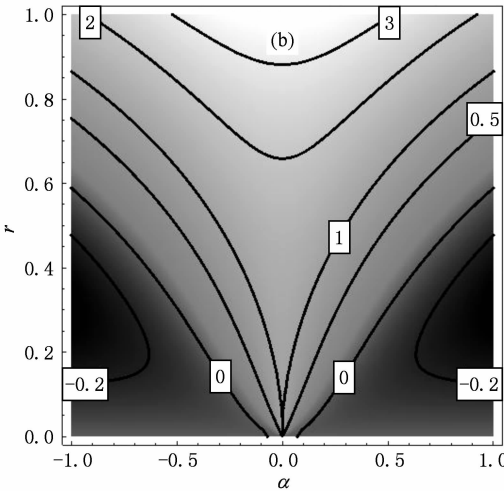
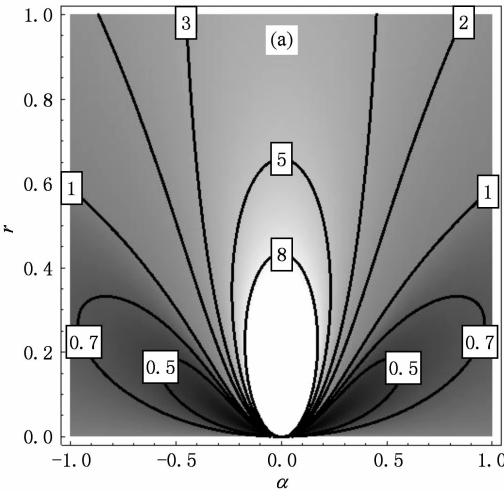


图 2 压缩相干态的 $g^{(2)}(0)$ (a) 和 Q 参数 (b) 随相干分量 α 及压缩参数 r 的变化

图中线条为 $g^{(2)}(0)$ 和 Q 的等高线, 方框中的数字为相应的值. 可以看出, 随着压缩参数和相干

分量的变化, 光子的统计行为可以在很大的范围内从反聚束 ($g^{(2)}(0) < 1$) 到聚束 ($g^{(2)}(0) > 1$) 或者从

亚泊松统计到超泊松统计变化. 当相干分量很小, 直至真空时, 会出现强聚束效应, 如图中的浅色部分所示, 此时对应为超泊松统计分布. 在适当的条件下, 也能得到反聚束或亚泊松统计, 此时光场的光子数起伏小于平均光子数, 说明此时的压缩相干态伴随光子数压缩同时产生 (见颜色最深的区域).

3. 远低于阈值的 OPO 输出光场的关联谱

对于简并的 OPO 腔, 当内腔损耗很小时, 其阈值功率 $P_{th} = (L + T)^2 / 4E_{NL}$, 其中 L 为 OPO 内腔损耗, T 为 OPO 输出耦合透射率^[18]. 在远低于 OPO 阈值抽运光作用下, 输出场下转换光子对之间的时间

关联函数可表示为^[4,19]

$$\Gamma^{(2)}(\tau) = |\varepsilon|^2 \rho^2 \left\{ \left[\frac{2|\varepsilon|(2m+1)}{\Delta\nu} \right]^2 + \exp(-\Delta\nu|\tau|) \frac{\sin^2[(2m+1)\Omega\tau/2]}{\sin^2[\Delta\nu\tau/2]} \right\}, \tag{5}$$

其中 τ 为延迟时间, ε 表示单次通过参量增益, ρ 是 OPO 腔的逸出效率, $\rho = T/(T + L)$, $\Delta\nu$ 表示 OPO 腔线宽, Ω 是 OPO 腔自由光谱区, $2m + 1$ 表示 OPO 输出模式数 (m 取非负整数). (5) 式中第一项表示两个不同光子对之间光子的关联, 由于与延迟时间无关, 故两个不同光子对之间没有关联. 第二项表示一个光子对中的两个光子之间的关联, 这是一个振荡函数. 图 3 显示不同 m 对应的 $\Gamma^{(2)}(\tau)$ 随延迟时间 τ 的变化.

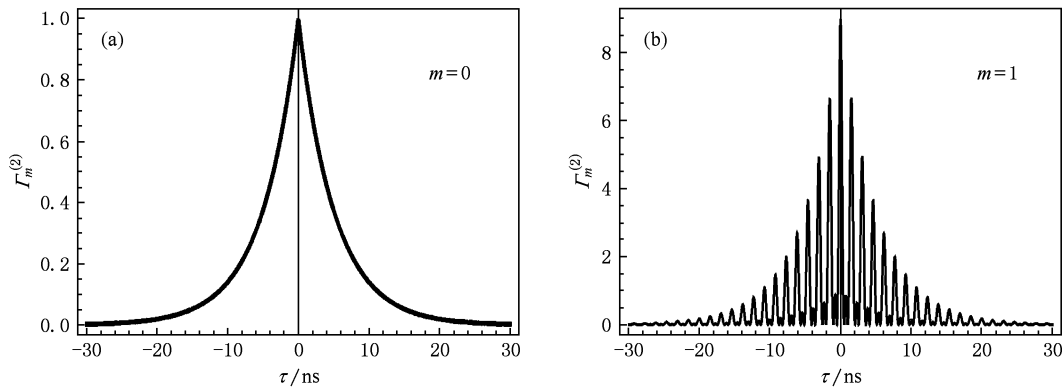


图3 弱抽运下 OPO 输出的二阶关联函数随延迟时间的变化

(5) 式中当 $m = 0$ 时, 对应单模 OPO 输出场的二阶关联函数只有一个主峰, 主峰随腔寿命指数衰减. 如图 3(a) 所示. 当 m 取其他值时, 关联函数会出现多峰梳状结构, 两峰间的间隔为光子在腔中环行一周的时间, 如图 3(b) 所示, 此时 m 等于 1, OPO 腔输出模式个数为 $2m + 1 = 3$, 图中主峰个数与腔的模式数无关. 只有当探测系统的分辨时间小于相邻两峰间隔时, 才能得到明显的梳状结构.

4. 实验装置及结果分析

实验中通过远低于阈值的光学参量振荡方法获得弱压缩真空输出. 装置如图 4 所示. 用锁定铯原子 D_2 线的单频连续钛宝石激光器 (MBR110, Coherent Inc.) 作抽运源, 单次穿过 PPKTP (Raicol

Crystal Ltd) 晶体, 倍频产生的 426 nm 蓝光作为 OPO 腔的抽运光进行参量下转换^[20]. OPO 腔采用四镜环形腔结构, 其中 M_1, M_2 为两片曲率半径为 50 mm 的平凹镜, 对 852 nm 光的反射率大于 99.996%^[21], 对 426 nm 光的透射率为 77.2%, 平镜 M_3 在 852 nm 处的反射率为 99.95%, M_4 作为 OPO 腔的输出耦合镜, 在 852 nm 处的透射率为 7.6%, OPO 腔长 476 mm, 自由光谱区 655 MHz, 线宽 9.8 MHz, 内腔损耗 $L = 2\%$. 实验利用两个单光子模块组成的 Hanbury-Brown-Twiss 方法^[22]测量了 OPO 腔输出光场的关联函数, 两个单光子计数模块 Single-Photon-Counting Module, SPCM (PerkinElmer Optoelectronics) 的计数率分别为 10 kc/s 和 11 kc/s. P7888 数据采集系统 DAS 分辨时间为 1 ns. 为了减小背景噪声的影响, 测量系统中放置了小孔和 852 nm 干涉滤波片^[23].

线是考虑损耗后的二阶相干度随压缩参数的变化. 压缩参数越大, 二阶相干度测量值越接近理想值. 黑色圆点对应图 5 中的最高峰值. 从图中可以得出 $g^{(2)}(0) = 25$ 时, 压缩参数 $r = 0.048$.

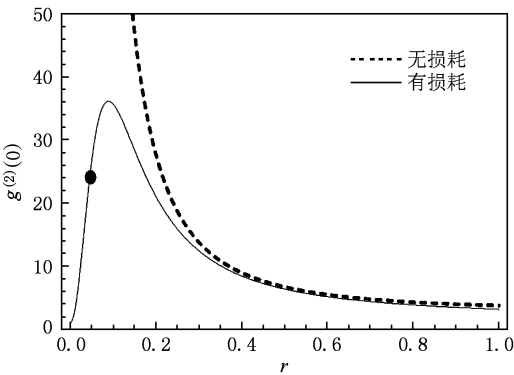


图 6 二阶相干度随压缩参数的变化

5. 结 论

我们在理论上研究了弱压缩真空和压缩相干态的光子统计性质. 指出在弱抽运下, 如果相干分量很弱, 光场的统计行为可以在大幅度的范围内变化, 包括从反聚束到强烈聚束效应. 通过运转在远低于阈值的 OPO 系统, 我们在实验上获得了弱压缩真空输出, 测量了该强聚束效应. 如果进一步增加抽运强度并引入相干注入分量, 可以基于该系统在更宽的范围获得具有多种不同统计性质的非经典光场, 为探索弱非经典光场的量子性质、构建光子原子量子接口提供重要的光源.

[1] Wu L A, Kimble H J, Hall J L, Wu H F 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2520

[2] Takeno Y, Yukawa M, Yonezawa H, Furusawa A 2007 *Opt. Express* **15** 4321

[3] Mehmet M, Vahlbruch H, Lastzka N, Danzmann K, Schnabel R 2010 *Phys. Rev. A* **81** 013814

[4] Lu Y J, Ou Z Y 2000 *Phys. Rev. A* **62** 033804

[5] Grosse N B, Symul T, Stobinska M, Ralph T C, Lam P K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 153603

[6] Ekert A K 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 661

[7] Bennett C H, Brassard G, Cr'epeau C, Jozsa R, Peres A, Wootters W K 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 1895

[8] Zhai Z H, Li Y M, Wang S K, Guo J, Zhang T C, Gao J R 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2710 (in Chinese) [翟泽辉、李永明、王少凯、郭娟、张天才、郜江瑞 2005 物理学报 **54** 2710]

[9] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter A, Zeilinger H 1997 *Nature (London)* **390** 575

[10] Ghosh R, Mandel L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 1903

[11] Zhang J, Wang J M, Zhang T C 2007 *Opt. Commun.* **227** 353

[12] Honda K, Akamatsu D, Arikawa M, Yokoi Y, Akiba K, Nagatsuka S, Tanimura T, Furusawa A, Kozuma M 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093601

[13] Appel J, Figueroa E, Korystov D, Lobino M, Lvovsky A I 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 093602

[14] Loudon R, Knight P L 1987 *Journal of modern Optics* **34** 709

[15] Guo G C 1990 *Quantum Optics* (Beijing : Heigher Education Press) p539 (in Chinese) [郭光灿 1990 量子光学 (北京:高等教育出版社) 第 539 页]

[16] Tan W H 2009 *Introduction to Quantum Optics* (Beijing : Science Press) Fig5—22 (in Chinese) [谭维翰 2009 量子光学导论 (北京:科学出版社) 图 5—22]

[17] Ficek Z, Wahiddin M R 2004 *Quantum Optics - Fundamentals and Applications* (Kuala Lumpur: International Islamic University Press) p72

[18] Wu L A, Xiao M, Kimble H J 1987 *Opt. Soc. Am. B* **4** 1465

[19] Goto H, Yanagihara Y, Wang H, Horikiri T, Kobayashi T 2003 *Phys. Rev. A* **68** 015803

[20] Song X L, Li Z G, Zhang P F, Li G, Zhang Y C, Wang J M, Zhang T C 2007 *Chin. Opt. Lett.* **5** 596

[21] Li G, Zhang Y C, Li Y, Wang X Y, Zhang J, Wang J M, Zhang T C 2006 *Appl. Opt.* **45** 7628

[22] Li Y, Li G, Zhang Y C, Wang X Y, Zhang J, Wang J M, and Zhang T C 2007 *Phys. Rev. A* **76** 013829

[23] Li Y, Li G, Zhang Y C, Wang X Y, Wang J M, Zhang T C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5779 (in Chinese) [李园、李刚、张玉驰、王晓勇、王军民、张天才 2006 物理学报 **55** 5779]

[24] Li G, Zhang T C, Li Y, Wang J M 2005 *Phys. Rev. A* **71** 02307

Photon statistics of squeezed vacuum field from optical parametric oscillator far below the threshold^{*}

Zhao Dong-Mei Li Zhi-Gang Guo Yan-Qiang Li Gang Wang Jun-Min Zhang Tian-Cai[†]

(*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,*

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

(Received 17 November 2009; revised manuscript received 26 December 2009)

Abstract

Photon statistics of the weak squeezed vacuum field from an optical parametric oscillator (OPO) is investigated both in theory and by experiment. The strong photon bunching effect of weak squeezed vacuum field, which can be used as an important source in quantum optics and quantum measurement, was demonstrated. We have experimentally produced the weak squeezed vacuum at the center wavelength of D_2 line of the cesium atom by the OPO operating far below the threshold. The second-order correlation function was measured based on the Hanbury-Brown-Twiss scheme, and the result is consistent with theoretical analysis.

Keywords: squeezed vacuum state, second-order coherence degree, optical parametric oscillator

PACC: 4265K, 4250, 2970

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10974125, 60808006, 60821004, and 60978017) and the State Basic Key Research Program of China (Grant No. 2006CB921102).

[†] Corresponding author. E-mail: tczhang@sxu.edu.cn