

基于局域压缩量子剪切制备非高斯量子态及非经典性

余敏^{1,2}, 叶炜^{1,3}, 常守康^{1,2}, 夏莹^{1,4}, 张欢^{1,2}, 胡利云^{1,2}

(1.江西师范大学量子科学与技术中心,江西南昌330022;2.江西师范大学物理与通信电子学院,江西南昌330022;
3.中南大学计算机学院,湖南长沙410083;4.中山大学物理学院,广东广州510275)

摘要 光场量子态的制备和操控对于量子信息处理的发展具有非常重要的实际意义。将局域的压缩操作引入到量子剪切装置中,实现将输入相干态截断为真空光,单光子和双光子的叠加形式。利用平均光子数和Wigner函数,着重研究了输出态的非经典特性。在相同参数下,局域压缩参数的增加有利于平均光子数的提高以及Wigner函数负部体积的增大。此外,相干态的振幅增加可以提高平均光子数,但会导致Wigner函数负部体积的减小。这些研究结果表明,相比于没有局域压缩的情况,局域压缩的量子剪切装置在制备强非经典性的非高斯态上具有显著的优势。

关键词 局域压缩;量子剪切;相干态;非高斯操作

中图分类号 O413.1

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Preparation of Non-Gaussian Quantum States by a Squeezing-based Quantum Scissors and Its Nonclassical Properties

YU Min^{1,2}, YE Wei^{1,3}, CHANG Shoukang^{1,2}, XIA Ying^{1,4},
ZHANG Huan^{1,2}, HU Liyun^{1,2}

(1.Center for Quantum Science and Technology,Jiangxi Normal University,Nanchang 330022,China;2.School of Physics,Communication and Electronics,Jiangxi Normal University,Nanchang 330022,China;3.School of Computer Science and Technology,Central South University,Changsha 410083,China;4.School of physics,Sun Yat-sen University,Guangzhou 510275,China)

Abstract The generation and manipulation of quantum states have very important practical significance for the development of quantum information processing. In this paper, we consider that cutting the coherent state into the superposition of the vacuum light, single photon and two photons by embedding the local squeezed operation into the quantum scissors device. Further, we focus on the statistical properties of the output state in term of the average photon number and Wigner function. The research results show that under the same parameters, the increase of the local squeezed parameter is beneficial to the increase of the average photon number and the negative region of the Wigner function. In addition, the increase in the amplitude of the coherent state can also increase the average number of photons, but it will lead to a decrease in

收稿日期:2020-09-08

基金项目:国家自然科学基金项目(11964013,11664017);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划资助

通讯作者:胡利云,男,汉族,博士,教授,研究方向:量子光学与量子信息,E-mail:hlyun2008@126.com.

the negative region of the Wigner function. These research results show that, compared with the case of no local squeezed, the squeezing-based quantum scissors device has a significant advantage in preparing the non-Gaussian states with strong nonclassicality.

Key words local squeezed; quantum scissors device; coherent state; non-Gaussian operation

0 引言

量子信息技术的蓬勃发展使得人们对信息传递的效率和测量精度的要求越来越高,而以经典光场为信息载体已经远远满足不了科学发展的需求^[1-6]。例如,在量子度量领域,当非经典量子态作为干涉仪的输入态时,标准量子极限可以被突破,这是输入经典态所不能及的^[5-7]。因此,如何制备和调控强非经典性的量子态成为了顺利完成量子信息任务的前提。

在连续变量范畴里,量子态可被分为高斯态和非高斯态,这两种态最为明显的区别在于其相应 Wigner 函数的表现形式^[8-10]。此外,不同于后者,前者亦可通过当前的实验技术比较容易地被实现^[11,12]。不幸的是,高斯态在完成某些特定的量子信息任务存在一定的局限性。例如,双模压缩真空态虽然在高精密相位灵敏度接近海森堡极限,但是压缩参数实际上被限制在 1.15 内^[13,14]。为此,人们把研究目光聚焦在非高斯量子态上。一般而言,非高斯量子态的制备通常都要利用到非高斯操作,比如,光子扣除^[3,4,15],光子增加^[16,17]和这两者的相干叠加操作^[18,19]。尤其是,光子增加和光子扣除操作已经被实验上用来证明量子力学算符的不对易性^[20]。此外,这两种操作不仅可以被用来实现量子态非经典性的增强,还能进一步改善高斯态(如双模压缩真空态)的纠缠度。具体而言,在 1991 年,AGARWAL G S 等提出了一种利用光子增加操作将经典的相干态转变为高非经典的量子态,并利用准概率分布函数讨论了非经典性的强弱^[21]。在 2014 年,KUROCHKIN Y 等在实验上证明了光子扣除操作可以使得双模压缩真空态的纠缠度和压缩度提高 50% 左右^[22]。另一方面,NHA H 等提出了利用光子增加和扣除的相干叠加操作将经典光场转变为非经典光场^[23]。基于这种叠加操作的特性,Zhang 等人还利用了粒子守恒叠加操作提高了双模压缩真空态的纠缠度以及量子隐形传输的保真度^[24]。除了上述常见的非高斯操作之外,量子催化操作首次被 LVOVSKY A L 等人提出^[25],在量子态工程上具有潜在的应用前景。在量子催化过程,虽说这种操作看似没有在光路上增加或者扣除光子,但是将输入的相干态转变为具有高非经典的量子态^[25]。自此,量子催化操作在提升量子纠缠^[26],量子相干^[27]和量子密钥分发性能方面^[28,29]扮演着重要的角色。

作为另一种可实现非高斯态制备的方案,在 1998 年,PEGG 等人提出了一种可以将相干态截断为真空态和单光子态叠加的量子剪切^[30]。此后,量子剪切被用来实现无噪声放大^[8,30],这种放大器在提升量子密钥分发的通信距离上也被广泛地研究^[31-33]。在 2019 年,这种剪切装置被 Hu 等人作用到双模压缩真空态中,并考虑了开放系统下的剪切效果^[34]。研究表明,即使是在有耗散的情况下,这种剪切装置仍然可以提高双模压缩真空态的纠缠度,而且这种提升效果比量子催化的情况更为显著。最引人注目的是,局域压缩操作嵌入到量子剪切里可以进一步地放大增益因子^[35],但并未讨论此方案下量子态的非经典特性。因此,基于上述背景,本文将局域压缩操作引入到量子剪切装置中,并以相干态作为输入态时,着重研究输出态的量子统计特性,主要涉及平均光子数和 Wigner 函数。特别要指出的是,本方案基于两个单光子输入和单光子探测,实现了真空态,单光子态与双光子态的叠加,与实现真空态、单光子态叠加的方案不同^[35]。研究表明,在相同参数下,局域压缩度的增加有助于平均光子数的提高以及 Wigner 函数负部体积的增大,这意味着这种局域压缩操作在量子度量等领域具有潜在的应用。

本文结构安排如下:第 2 节首先简要介绍了局域压缩的量子剪切装置结构。然后,从输入输出关系出发,获取局域压缩的量子剪切装置的等效算符。当考虑了相干态作为输入态时,第 3 节利用了平均光子数和 Wigner 函数来讨论输出态的非经典性。最后,第 4 节对本文进行总结。

1 基于局域压缩的量子剪切装置和非高斯态的制备

本节首先简要介绍局域压缩的催化式量子剪切装置,重点推导出这种装置的等效算符,从而建立起量子

态输入-输出关系。然后,假定输入态为相干态时,本节可进一步获取非高斯态的具体表达形式,继而考察所制备出非高斯态的成功概率。

1.1 局域压缩的量子剪切装置及其等效算符

如图 1 所示,局域压缩的催化式量子剪切装置有三个输入端口(分别标记为 a, b, c 模),其中, a, c 模的输入端口有单光子输入, b, c 模的输出端口分别做单光子探测。这类似于单光子催化操作,因为在量子催化过程中,辅助模的输入-输出 Fock 态似乎保持不变,但对主模之间的量子态转换起到一定作用。在该装置中,两个光分束器(分别标记为 BS_1 和 BS_2)对 a, c 模和 b, c 模光具有合束与分束的作用效果。在算符形式上,这两个分束器可以分别表示为 $BS_2 = e^{\theta_2(ac + -a + c)}$ 和 $BS_1 = e^{\theta_1(bc + -b + c)}$,其中 BS_j 的透射率为 $T_j = \cos^2 \theta_j$, ($j=1,2$)。为了在 c 模上引入局域压缩操作 $S_c(\xi) = \exp[\xi(c^2 - c^{+2})/2]$ (ξ 为压缩参数),这里假设将局域压缩放置在两个光分束器之间。于是,整个局域压缩的催化式量子剪切装置则可被看作一种等效算符,即

$$O = {}_c \langle 1 | {}_b \langle 1 | BS_1 S_c(r) BS_2 | 1 \rangle_a | 1 \rangle_c, \quad (1)$$

为了获得上述等效算符的解析表达式,这里须采用算符的变换关系:

$$\begin{aligned} BS_2 a BS_2 &= a \sqrt{T_2} + c \sqrt{R_2}, BS_2 a BS_2 = c \sqrt{T_2} - a \sqrt{R_2}, \\ BS_1 a BS_1 &= b \sqrt{T_1} + c \sqrt{R_1}, BS_1 c BS_1 = c \sqrt{T_1} - b \sqrt{R_1}, \\ S_c(\xi) c S_c(\xi) &= c \cosh \xi + c \sinh \xi, \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $R_j = 1 - T_j$, ($j=1,2$)为反射率。因此,结合式(1)和式(2),局域压缩的催化式量子剪切装置的等效算符可进一步表示为

$$O = \sum_{k=0}^2 \omega_k |k\rangle_{ab} \langle k| + \omega_3 |0\rangle_{ab} \langle 2| + \omega_3 |2\rangle_{ab} \langle 0|, \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} \omega_0 &= \frac{5 \sinh^2 \xi + 3 \sinh^2 \xi \tanh^2 \xi - 2 \sqrt{T_1 T_2 R_1 R_2}}{\sqrt{\cosh \xi}}, \omega_1 = (T_1 - R_1)(T_2 - R_2) \cosh^{-3/2} \xi, \\ \omega_2 &= -\frac{2}{\sqrt{\cosh \xi}} \sqrt{T_1 T_2 R_1 R_2}, \omega_3 = -\frac{\sqrt{2} \tanh \xi}{\sqrt{\cosh \xi}} \sqrt{T_1 T_2 R_1 R_2}. \end{aligned} \quad (4)$$

由式(3)可知,整个装置的作用效果就是真空态,单光子态,双光子态投影算符的叠加。这意味着,对于任意的输入态(见图 1),经过此装置后,输出态可被截断为真空态,单光子态和双光子态的叠加形式。此外,不同于文献[32]的工作,局域压缩操作的引入导致了等效算符中增加了 $\omega_3 |0\rangle_{ab} \langle 2|$ 和 $\omega_3 |2\rangle_{ab} \langle 0|$ 两项,这或许在量子态非经典性的改善方面起到显著的效果。特别地,当压缩参数 $\xi=0$ 时,式(4)可简化成

$$\omega_0 = \omega_2 = -2 \sqrt{T_1 T_2 R_1 R_2}, \omega_1 = (T_1 - R_1)(T_2 - R_2), \omega_3 = 0. \quad (5)$$

这与文献[32]的结果一致。

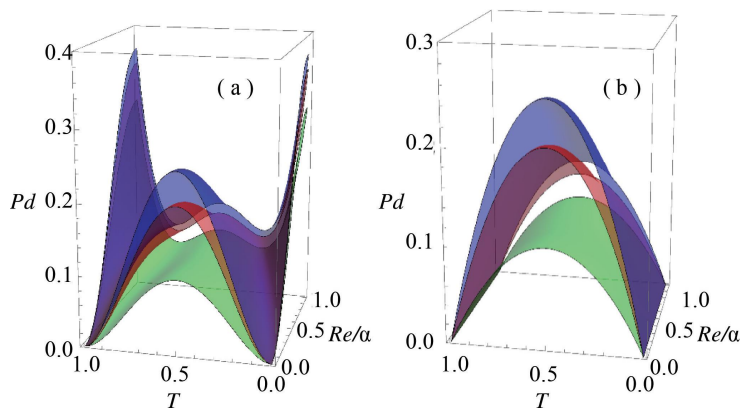


图 2 (a) 对于透射率 $T_1 = T_2 = T$, (b) 透射率 $T_1 = T, T_2 = 0.5$, 成功概率 P_d 在 $(T, Re[\alpha])$ 空间的分布,其中 $\xi=0$ (上面), $\xi=0.2$ (下面), $\xi=0.4$ (下面)

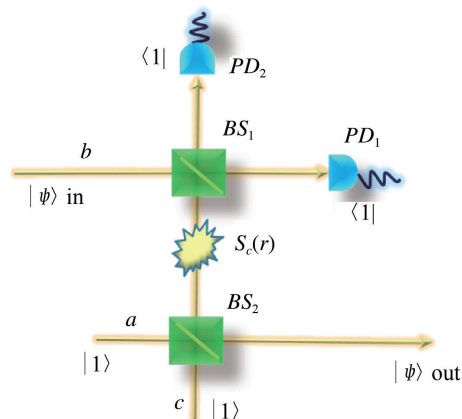


图 1 基于局域压缩的催化式量子剪切装置

1.2 非高斯态的制备及其成功概率

为了进一步展示出在传统量子剪切装置中嵌入局域压缩操作的优势,下面将以相干态 $|\alpha\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} e^{-|\alpha|^2/2} \frac{\alpha^n}{\sqrt{n!}} |n\rangle$ 作为输入态来获取所制备的非高斯态,从而能够分析输出非高斯态的成功概率。

由图 1 可知,对于任意输入态 $|\psi\rangle_{in}$,则经过局域压缩的催化式量子剪切装置后的输出态可以表示为

$$|\psi\rangle_{out} = \frac{1}{\sqrt{P_d}} O |\alpha\rangle_b = \frac{e^{-|\alpha|^2/2}}{\sqrt{P_d}} (c_0 |0\rangle_a + c_1 |1\rangle_a + c_2 |2\rangle_a), \quad (6)$$

这里 P_d 表示所制备非高斯态的归一化系数(或者成功概率)

$$c_0 = \omega_0 + \frac{\alpha^2}{\sqrt{2}} \omega_3, c_1 = \alpha \omega_1, c_2 = \frac{\alpha^2}{\sqrt{2}} \omega_2 - \omega_3. \quad (7)$$

利用量子态的正交归一性,它的解析表达式具有如下形式

$$P_d = e^{-|\alpha|^2} (|c_0|^2 + |c_1|^2 + |c_2|^2). \quad (8)$$

根据式(8),不同压缩参数 $\xi=0,0.2,0.4$ 下,图 2 绘制出了,成功概率 P_d 随透射率 T 和相干态振幅 $Re[\alpha]$ 的变化曲面。显然,在相同参数条件下,随着局域压缩参数的增加,成功概率 P_d 也在逐渐降低,这一定程度上反映出实际调控局域压缩的困难。尽管如此,局域压缩操作的引入却可以有效地放大增益因子,这在量子信息处理上有着潜在的应用。此外,当取相同的压缩参数和振幅时,相比于 $T_1=T, T_2=0.5$ 的情况,见图 2(b),对于 $T_1=T_2=T$ 的成功概率除了 $T=0.5$ 外还在 $T \rightarrow 0$ 或者 1 达到了最高值,见图 2(a)。这说明 $T_1=T_2=T$ 的情形下的成功概率要优于 $T_1=T, T_2=0.5$ 的情况。从图 2(a) 还可知,当取相同的压缩参数时, $T \rightarrow 0$ 或者 1 的成功概率可以随着振幅的增加而增加,这是完全不同于 $T_1=T, T_2=0.5$ 的情况。由此可见,输入相干态的振幅在某种特殊情况下有利于增加非高斯态的实现几率。

2 非高斯量子态的非经典特性

在讨论完非高斯态的成功概率后,本节从平均光子数和 Wigner 函数的负部特征方面来考察输出态的统计特性,重点分析域压缩操作对输出态统计特性的影响。

2.1 平均光子数

平均光子数作为光场量子态统计的特征之一,尤其在量子度量领域扮演着重要角色。例如,在光学干涉仪系统中,平均光子数越高则会使得量子费舍信息越大,从而达到更高的相位灵敏度^[33]。那么,在本文所提方案中,局域压缩的引入能否进一步的提高输出态的平均光子数呢? 本节对输出态的平均光子数进行研究。

如图 1 所示,对于 a 模输出的任意量子态 ρ_{out} ,它的平均光子数都可以被定义为

$$\langle \hat{n} \rangle = Tr[\rho_{out} a^+ a]. \quad (9)$$

结合式(6)和式(9),输出态的平均光子数的解析表达式为

$$\langle \hat{n} \rangle = \frac{|c_1|^2 + 2|c_2|^2}{|c_0|^2 + |c_1|^2 + |c_2|^2}. \quad (10)$$

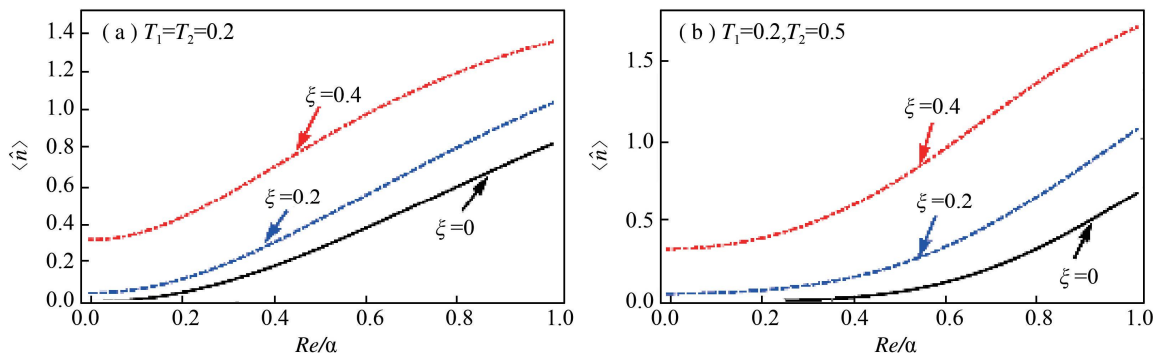


图 3 (a) 对于透射率 $T_1=T_2=0.2$, (b) 透射率 $T_1=0.2, T_2=0.5$, 平均光子数随 $Re[\alpha]$ 的变化, 其中 $\xi=0$ (实线), $\xi=0.2$ (虚线), $\xi=0.4$ (点划线)

为了更加清晰地反应所制备量子态的统计特性,根据(10)式,对于不同的局域压缩参数 $\xi=0,0.2,0.4$,

图 3 给出了输出态的平均光子数 $\langle \hat{n} \rangle$ 随着输入相干态振幅 $\text{Re}[\alpha]$ 的变化曲线。值得注意的是,黑色实线表征着没有局域压缩的情况。由图 3 可知,无论是 $T_1=T_2=0.2$, 还是 $T_1=0.2, T_2=0.5$, 随着局域压缩的增强 ($\xi=0, 0.2, 0.4$), 输出态的平均光子数在增加, 从而揭示了局域压缩的引入会导致平均光子数的提升, 这种现象与成功概率完全不同。此外, 对于相同参数 ξ 和 $\{T_1, T_2\}$ 下, 平均光子数会随着振幅的增加而增加。这些研究结果表明, 嵌入局域压缩和输入相干态振幅都是有益于平均光子数的进一步提升。

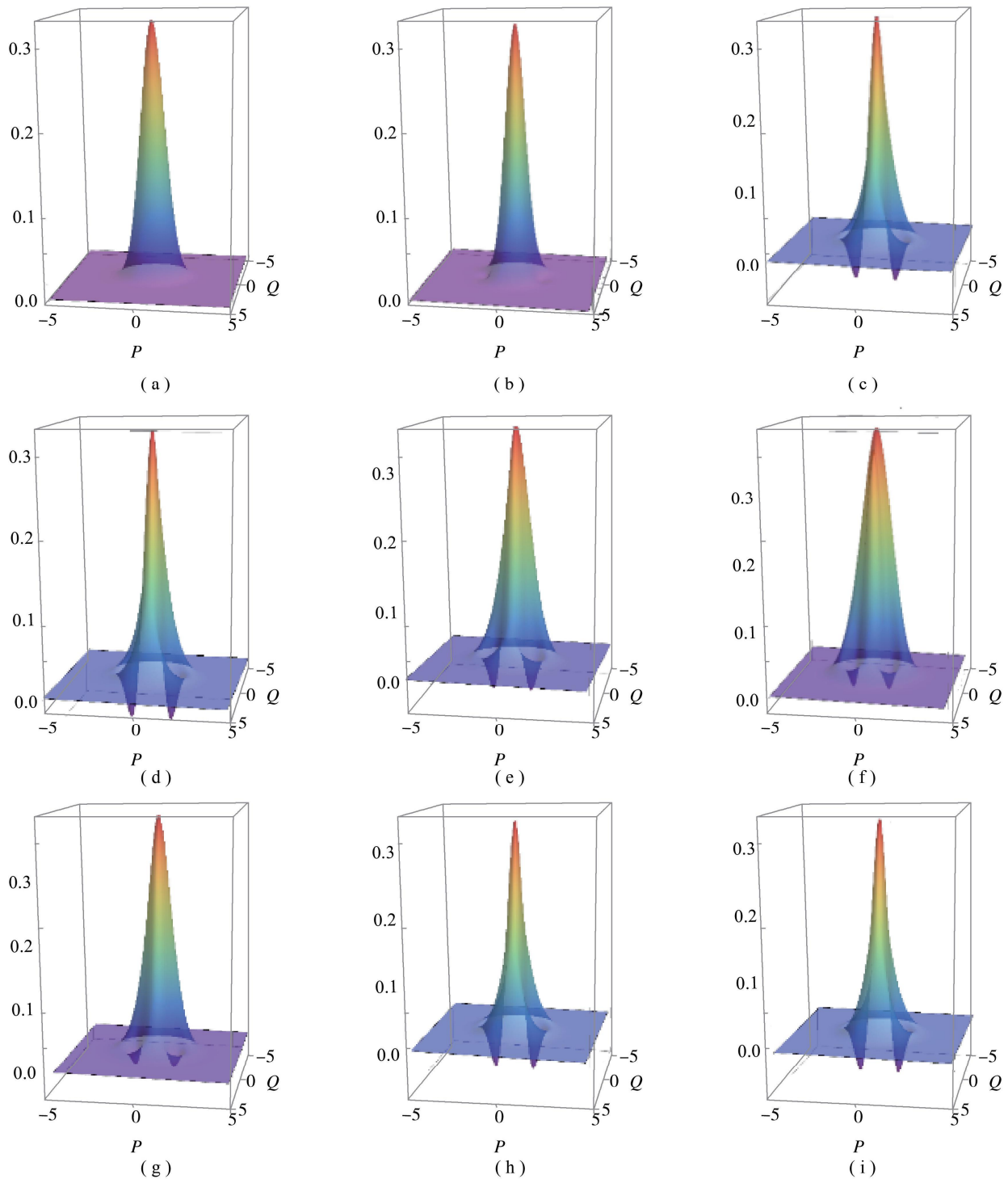


图 4 对于不同的相干态振幅, 局域压缩参数和光分束器的透射率(这里我们设 $T_1=T_2=T$), 输出态的 Wigner 函数 $W(\beta)$ 在 相空间 (Q, P) 中的分布; (a)-(c): 给定输入相干振幅 $\text{Re}[\alpha]=0.1$ 和透射率 $T=0.2$, 分别对应 $\xi=0, 0.2, 0.4$; (d)-(f): 给定 $\xi=0.4$ 和 $T=0.2$, 分别对应 $\text{Re}[\alpha]=0.1, 0.3, 0.5$; (g)-(i): 给定 $\text{Re}[\alpha]=0.1$ 和 $\xi=0.4$, 分别对应 $T=0.1, 0.3, 0.5$

2.2 Wigner 函数

Wigner 函数是一种典型的准概率分布函数, 原因在于它的值不仅仅局限于 $(0, 1/\pi)$, 其在相空间分布中常常会出现负值区域。一般而言, 这种负值区域越大表明量子态的非经典性越强, 因此 Wigner 函数也通常被用来判断光场态的非经典性强弱^[34]。基于此背景下, 本小节利用关于 Wigner 函数的积分公式量化负部体积的大小, 以便于直观地看出 Wigner 函数负部体积随局域压缩参数、输入相干态振幅的变化。这里, 首

先给出 Wigner 函数在相干态表象下的表达形式,即

$$W(\beta) = \frac{e^{2|\beta|^2}}{\pi} \int \frac{d^2 z}{\pi} \langle -z | \rho | z \rangle e^{-2(z\beta^* - z^*\beta)}, \quad (11)$$

这里 $\beta = (Q + iP)/\sqrt{2}$, $\rho = |\psi\rangle_{out}\langle\psi|$, 为任意输出态的密度算符。于是,根据式(6)和式(11),输出态的 Wigner 函数的具体表达式为

$$W(\beta) = \frac{e^{-|\alpha|^2 - 2|\beta|^2}}{\phi P_d} \{ |c_0|^2 + (1 + 4|\beta|^2) |c_1|^2 + \sqrt{2}(1 - 8|\beta|^2 + 8|\beta|^4) |c_2|^2 + 2[\beta c_0 c_1^* + \beta^* c_0^* c_1] \\ + 2\sqrt{2}[\beta^2 c_0 c_2^* + \beta^{*2} c_0^* c_2] + 2\sqrt{2}(2|\beta|^2 - 1) \times [\beta c_1 c_2^* + \beta^* c_1^* c_2] \}. \quad (12)$$

为了更加清晰地展示出输出态的非经典特性,根据式(12),对于不同参数(包含了局域压缩 ξ , 振幅 $Re[\alpha]$ 和光分束器的透射率 T),图 4 给出了 Wigner 函数在相空间 (Q, P) 中的分布曲面。为了便于分析和讨论,这里仅考虑两个分束器的透射率相同的情况,即 $T_1 = T_2 = T$ 。由图 4 可知,对于给定的透射率 $T = 0.2$ 和相干态振幅 $Re[\alpha] = 0.1$ 时, Wigner 函数的负部体积随着局域压缩参数的增大而增大(见图 4(a)-(c))。但是,对于给定的透射率 $T = 0.2$ 和局域压缩参数 $\xi = 0.4$ 时,随着振幅的增加, Wigner 的负部体积却是减小的(见图 4(d)-(f))。这些研究结果表明,局域压缩的增大有利于增强输出态的非经典特性,而输入相干态的振幅越小对非经典性的增强越有益。值得一提的是,从图 4(g)-(i)中,对于给定的相干态振幅 $Re[\alpha] = 0.1$ 和局域压缩参数 $\xi = 0.4$,透射率 T 的增加 $t = 0.1, 0.3$,相应的 Wigner 函数的负部体积在增大;而透射率 T 从 0.3 到 0.5 的变化对负部体积影响甚微。于是,为了进一步看清非经典性的强弱变化,这里将利用 Wigner 函数的负部体积表达式来进行量化,它可以被定义为

同样地,在与图 4 相同的参数取值下,根据式(13),表 1 给出了相应的输出态 Wigner 函数的负部体积值。除了上述研究结果外,由表 1 的第 1-3 行可知,对于 $\xi = 0$ 的情况, Wigner 函数的负部体积还是存在的,这表明利用量子剪切装置确实可以把经典态转换为非经典态^[26]。此外,由表 1 的第 7-9 行可知,随着透射率 T 的增加(T 局限在 $(0, 0.5]$ 内), $V(\beta)$ 是逐渐地增加。在相同参数下,由于 Wigner 函数的负部体积关于 $T = 0.5$ 对称,因此这里不再考虑 $T \in [0.5, 1)$ 的情形。

$$V(\beta) = \frac{1}{2} \int dQ dP [W(Q, P) | -W(Q, P) |]. \quad (13)$$

表 1 Wigner 函数的负部体积,其中第 1-3 行为给定 $Re[\alpha] = 0.1$ 和 $T = 0.2$,负部体积值随 ξ 的变化;第 4-6 行为给定 $\xi = 0.4$ 和 $T = 0.2$,负部体积值随 $Re[\alpha]$ 的变化;第 7-9 行为给定 $Re[\alpha] = 0$ 和 $\xi = 0.4$,负部体积值随 T 的变化

行数	$Re[\alpha]$	ξ	T	$V(\beta)$
1	0.1	0	0.2	0.000552279
2	0.1	0.2	0.2	0.00238157
3	0.1	0.4	0.2	0.0591862
4	0.1	0.4	0.2	0.0591862
5	0.3	0.4	0.2	0.0430197
6	0.5	0.4	0.2	0.0177116
7	0.1	0.4	0.1	0.0242789
8	0.1	0.4	0.3	0.0639408
9	0.1	0.4	0.5	0.0644936

3 结论

当考虑输入相干态时,本文主要利用局域压缩的量子剪切来制备非经典态,并考察了输出态的量子非经典特性。从输入输出关系出发,本文首先获得基于局域压缩量子剪切的等效算符,它可以将经典的相干态截断为真空态,单光子态和双光子态的叠加形式。此外,以输入相干态为例,本文导出输出态的解析表达式及其实现的成功概率。研究发现,对于给定的相干态振幅和光分束器的透射率,随着嵌入的局域压缩参数的增加,成功概率有所降低。尽管如此,在相同参数下,局域压缩对输出态的量子非经典特性却是有益的。具体

而言,平均光子数随着嵌入的局域压缩参数或输入相干态的振幅的增大而增加,这为在量子度量学中研究量子费舍信息提供了一个重要的途径。类似地,Wigner 函数的负部体积随着局域压缩参数增加而增大,从而表明了基于局域压缩的量子剪切装置可以进一步增强输出态的非经典性,这些研究结果有望为量子度量中相位精度的提升做了有效的贡献。

参 考 文 献

- [1] BRAUNSTEIN S L, PATI A K. Quantum information with continuous variables[J]. *Rev Mod Phys*, 2005, 77: 513-577.
- [2] KOK P, LOVETT B W. *Introduction to Optical Quantum Information Processing*[M]. New York: Research Gate, 2010.
- [3] Opatrny T, Kurizki G, Welsch D G. Improvement on teleportation of continuous variables by photon subtraction via conditional measurement[J]. *Phys Rev A*, 2000, 61: 032302.
- [4] Stefano O, Paris M G A, Rodolfo B. Teleportation improvement by inconclusive photon subtraction[J]. *Phys Rev A*, 2003, 67: 032314.
- [5] Hofmann H F. All path-symmetric pure states achieve their maximal phase sensitivity in conventional two-path interferometry[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79: 033822.
- [6] JAEWOO J, WILLIAM J M, TIMOTHY P S. Quantum metrology with entangled coherent states [J]. *Phys Rev Lett*, 2011, 107: 083601.
- [7] LUCA P, AUGUSTO S. Ultrasensitive two-mode interferometry with single-mode number squeezing[J]. *Phys Rev Lett*, 2013, 110: 163604.
- [8] ZHAO H X, XU X X, YUAN H C. Thermal state truncation by using quantum-scissors device [J]. *Opt Commun*, 2017, 382: 127-131.
- [9] Eisert J, Scheel S, Plenio M B. Distilling Gaussian states with Gaussian operations is impossible[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 89(13): 137903.
- [10] MENG X G, GOAN H S, WANG J S, et al. Nonclassical thermal-state superpositions; analytical evolution law and decoherence behavior [J]. *Opt Commun*, 2018, 411(7): 15-20.
- [11] ANISIMOV P M, RATERMAN G M, CHIRUVELLI A, et al. Quantum metrology with two-mode squeezed vacuum; parity detection beats the heisenberg limit[J]. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 103602.
- [12] EBERLE T, HADCHEN V, SCHNABEL R. Stable control of 10 dB two-mode squeezed vacuum states of light[J]. *Opt Express*, 2013, 21: 11546.
- [13] YANG Y, LI F L. Entanglement properties of non-Gaussian resources generated via photon subtraction and addition and continuous-variable quantum-teleportation improvement[J]. *Phys Rev A*, 2009, 80: 022315.
- [14] WU J N, LIU S Y, HU L Y, et al. Improving entanglement of even entangled coherent states by a coherent superposition of photon subtraction and addition[J]. *J Opt Soc Am B*, 2015, 32: 2299.
- [15] LEE S Y, JI S W, KIM H J, et al. Enhancing quantum entanglement for continuous variables by a coherent superposition of photon subtraction and addition[J]. *Phys Rev A*, 2011, 84: 012302.
- [16] ZAVATTA A, PARIGI V, KIM M S, et al. Experimental demonstration of the bosonic commutation relation via superpositions of quantum operations on thermal Light Fields[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103: 140406.
- [17] AGARWAL G S, TARA K. Nonclassical properties of states generated by the excitations on a coherent state[J]. *Phys Rev A*, 1991, 43(1): 492-497.
- [18] KUROCHKIN Y, PRASAD A S, LVOVSKY A I. Distillation of the two-mode squeezed state[J]. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 070402.
- [19] LEE S Y, NHA H. Quantum state engineering by a coherent superposition of photon subtraction and addition[J]. *Phys Rev A*, 2010, 82: 053812.
- [20] ZHANG H, YE W, XIA Y, et al. Improvement of the entanglement properties for entangled states using a superposition of number-conserving operations[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16: 085204.
- [21] LVOVSKY A I, MLYNEK J. Quantum-optical catalysis; generating nonclassical states of light by means of linear optics[J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88: 250401.
- [22] HU L Y, LIAO Z Y, ZUBAIRY M S. Continuous-variable entanglement via multiphoton catalysis[J]. *Phys Rev A*, 2017, 95: 012310.
- [23] YE W, ZHAO W D, ZHANG H L, et al. Laguerre polynomial excited coherent state; generation and nonclassical properties[J]. *Laser Phys Lett*, 2017, 14: 115201.
- [24] GUO Y, YE W, ZHONG H, et al. Continuous-variable quantum key distribution with non-Gaussian quantum catalysis[J]. *Phys Rev A*, 2019, 99: 032327.
- [25] YE W, ZHONG H, LIAO Q, et al. Improvement of self-referenced continuous-variable quantum key distribution with quantum photon catalysis[J]. *Opt Express*, 2019, 27: 17186.

- [26] PEGG D T, PHILLIPS L S, BARNETT S M. Optical state truncation by projection synthesis[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, 98: 1604.
- [27] BLANDINO R, LEVERRIER A, BARBIERI M, et al. Improving the maximum transmission distance of continuous-variable quantum key distribution using a noiseless amplifier[J]. *Phys Rev A*, 2012, 86: 012327.
- [28] GHALAI M, OTTAVIANI C, KUMAR R, et al. Long-distance continuous-variable quantum key distribution with quantum scissors[J]. 2018, arXiv:1808.01617 [quant-ph].
- [29] GHALAI M, OTTAVIANI C, KUMAR R, et al. Discrete-modulation continuous-variable quantum key distribution enhanced by quantum scissors[J]. 2019, arXiv:1907.13405 [quant-ph].
- [30] HU L Y, AL A M, LIAO Z Y, et al. Entanglement improvement via a quantum scissor in a realistic environment[J]. *Phys Rev A*, 2019, 100: 052322.
- [31] YANG S, ZHANG S L, ZOU X B, et al. Improving noiseless linear amplification for optical quantum communication with quadrature squeezing[J]. *Phys Rev A*, 2013, 87: 024302.
- [32] ZHANG K Z, HU L Y, YE W, et al. Preparation and non-classicality of non-Gaussian quantum states based on catalytic quantum scissors[J]. *Laser Phys Lett*, 2019, 16: 015204.
- [33] YU X, ZHAO X, SHEN L Y, et al. Maximal quantum Fisher information for phase estimation without initial parity[J]. *Opt. Express*, 2018, 26: 16292.
- [34] 张欢,周维东,叶炜,等.基于催化式 KLM 型干涉仪实现非高斯量子态的制备及非经典性的研究[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2019, 32(6): 21-27.
-

(上接第 32 页)

- [15] DONG J, UEDA K, SHIRAKAWA A, et al. Composite Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG ceramics picosecond microchip lasers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(22): 14516-14523.
- [16] ZAYHOWSKI J J, DILL I C. Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(18): 1427-1429.
- [17] SUN Z, LI Q, CHEN X, et al. Stable polarized diode-pumped passively Q-switched [100]-cut Nd:YAG laser with Cr⁴⁺:YAG crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 60(8): 56-60.
- [18] 韩伙辉,夏克贵,李桂运,等.3.2 ns 高峰值功率 YAG/Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG 键合晶体被动调 Q 径向偏振微片激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(07): 69-73.
- [19] JIANG C, CHEN Y Y, MEI S H, et al. Investigation of a passively Q-switched Raman laser at 1176 nm with Nd³⁺:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG composite crystal and a coupled cavity[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, 51: 380.
- [20] TSUMEKANE M, TAIRA T. High Peak Power Passively Q-Switched Yb:YAG/Cr:YAG Micro-Lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2013, 49(5): 454-461.
- [21] TSUNEKANE M, INOHARA T, KANEHARA K, et al. Micro-Solid-State Laser for Ignition of Automobile Engines[M]. *Advances in Solid State Lasers Development and Applications*. Tokyo: Intech, 2010.
- [22] LEE K, LEE H C, CHO J Y, et al. Passively Q-switched high peak power Nd:YAG laser pumped by QCW diode laser[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(7): 2053-2057.
- [23] 高旭恒,吴立志.基于 Nd:YAG/Cr:YAG 复合晶体结构的被动调 Q 固体微片激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(6): 061401.
- [24] 李景照,陈振强,朱思祁.基于 Yb:YAG/Cr⁴⁺:YAG/YAG 键合晶体的高峰值功率短脉冲激光器[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0606007.