

基于增强型 CCD 光场高阶相干度的测量

曹晋凯, 杨鹏飞, 田亚莉, 毋伟, 张鹏飞, 李刚*, 张天才**

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极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

摘要 光场的高阶关联特性是揭示光的统计行为的重要特征。采用传统的 HBT(Hanbury-Brown and Twiss)实验模型测量多光子高阶关联时,会受到单光子探测器和分束器数量的限制,测量起来比较复杂。提出了一种利用增强型电荷耦合器件(ICCD)快速测量光场高阶关联的方法。通过改变曝光时间和光照强度(计数率)对赝热光场和相干光场的高阶相干度进行测量和分析。结果表明:在适当的条件下,可以确定光场的高阶相干度。当曝光时间为 600 ns、计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时,实测赝热光场的 2 阶和 3 阶相干度分别为 $g_1^{(2)}(0) = 1.79 \pm 0.20$, $g_1^{(3)}(0) = 4.94 \pm 0.59$ 。对多达 4 阶的光场相干度进行了测量,该结果能在理论上得到较好的解释。该实验方法有望应用于某些光源的高阶相干性测量和研究方面,对揭示光场的高阶关联行为具有一定意义。

关键词 测量; 量子光学; 高阶相干度; 增强型电荷耦合器件; 赝热光场; 相干光场

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0712008

Measurement of High-Order Coherence of Light Field Based on Intensified Charge-Coupled Device

Cao Jinkai, Yang Pengfei, Tian Yali, Wu Wei, Zhang Pengfei, Li Gang*, Zhang Tiancai**

Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

Abstract The high-order correlation characteristics of a light field are important features for revealing the statistical behavior of light. When the traditional HBT(Hanbury-Brown and Twiss) experimental model is used to measure the multi-photon high-order correlation, the measurement is complicated because of the limited number of single-photon detectors and splitters. In this study, we propose a fast method to measure the high-order correlation of a light field using an intensified charge-coupled device. The high-order coherence of the pseudothermal and coherent light fields can be measured and analyzed by varying the exposure time and light intensity (counting rate). The results demonstrate that the high-order coherence of a light field can be determined under appropriate conditions. When the exposure time is approximately 600 ns and the counting rate is $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, the measured second-order and third-order coherences of the pseudothermal light fields are $g_1^{(2)}(0) = 1.79 \pm 0.20$ and $g_1^{(3)}(0) = 4.94 \pm 0.59$, respectively. Note that the coherence of up to four orders has been measured and that the results can be theoretically explained. We expect that this method can be applied for measuring and studying the high-order coherence of some light sources. Furthermore, we believe that the proposed method will significantly contribute to revealing the high-order correlations of the light fields.

Key words measurement; quantum optics; high-order coherence; intensified charge-coupled device; pseudothermal light field; coherent light field

OCIS codes 270.1670; 030.5290; 030.5260

1 引 言

研究光场的高阶关联性质一直是量子光学的重要内容。通过光子关联对光场的各种经典和非经典

性质进行探索,有助于深刻理解不同光场量子态的高阶相干性^[1]。对光子高阶关联的研究可以追溯到 20 世纪 50 年代 Hanbury-Brown 和 Twiss(HBT)关于不同时空点的强度关联测量^[2]。Glauber

收稿日期: 2019-01-17; 修回日期: 2019-03-01; 录用日期: 2019-04-01

基金项目: 国家重点研发计划(2017FYA0304502)、国家自然科学基金(11634008, 11674203, 11574187, 61227092)、“1331”重点学科建设计划

* E-mail: gangli@sxu.edu.cn; ** E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

等^[3-4]在 20 世纪 60 年代提出了光场的相干理论,由 Mandel 等^[5]发展起来的光电探测理论,使人们对光场测量有了新的认识。随着光电倍增技术的发展,Areccchi 等^[6]对相干光及热光场光子统计分布进行了测量,获得了它们的相干特性^[7]。近几年,随着单光子探测技术和可分辨光子数探测技术的快速发展,人们能够在单光子水平上对不同光场的量子统计性质进行分析和测量,这些技术在量子光学、量子信息和量子计量方面具有重要作用^[8]。利用单光子探测技术,基于 HBT 关联测量,可以确定光场的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$,从而可以区分不同的光场,如:相干光 $g^{(2)}(0)=1$,光子数分布为泊松分布;热光场 $g^{(2)}(0)>1$,光场呈现群聚效应;类单光子源, $g^{(2)}(0)<1$,光场呈现反群聚效应^[9]。

光场的高阶关联测量,可用来研究光源的基本特性,在量子成像中具有重要应用。2010 年,中国科学院物理研究所的 Chen 等^[10]研究了高对比度 n 阶热光鬼成像,发现随着阶数增加,像的对比度逐渐增强,测量过程中需要较短的积分时间才能得到好的鬼成像。2011 年,文献^[11]提出了一种任意阶的热光关联成像理论方案,并得到了成像的可见度随关联阶数增加而提高的结论。2015 年,张闻文等^[12]在对高阶鬼成像质量进行分析时,从数值模拟中发现了最佳阶数和有效像素之间的关系,并通过实验验证了这一点。2017 年, Bai 等^[13]发现赝热光通过多个毛玻璃后可以获得超聚束光。这些研究表明,在鬼成像研究中,光场的高阶关联对提高成像对比度以及揭示光场的多光子关联行为,具有深远意义。

真热光场的相干时间非常短,一般探测器的响应时间大于它的相干时间^[14]。人们通常使用赝热光代替真热光,其相干时间可以控制。但对高阶关联,原则上需要多个探测器以及多个分束器,随着阶数增加,系统会变得越来越复杂。截至目前,有关 n ($n>2$) 阶关联度的测量实验很少见到报道。2009 年, Aβmann 等^[15]利用 CCD 在半导体微腔中,分别在强、弱耦合状态下,测到多达 4 阶的相干度。近年来,随着 CCD 技术的发展,高效、高灵敏(单光子响应)和快速响应的 CCD 被应用到量子光学领域,测量光场的量子统计性质^[16]。CCD 本身含有数量众多的探测器,对于一个在 CCD 探测区域呈近似均匀分布的光场,一次 CCD 曝光可以看成是数量众多的探测器对入射光场的一部分同时进行了一次等分测量,而每一次曝光的时间远小于被测光的相干时间。基于这个基本思想,本文提出了一种利用增强型电

荷耦合器件 (ICCD) 测量光场高阶相干度的方法。这种方法虽然存在一定的不足,如参数选择存在特定的区域,但只要经过校正,确定了合适的参数,其优点就会显示出来:不需要大量的单光子探测器 (SPCM) 和分束器,高效、快速地确定光场的高阶量子统计性质。研究表明,当选择曝光时间约为 600 ns、单个像素 (pixel) 计数率约为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时,利用测量结果可以非常好地确定赝热光和相干光的高阶相干度。此外,实验结果可以用本课题组之前建立的热光-相干光混合模型^[17]予以解释,虽然这种方法受限于 ICCD 的限制,如不能连续快速采样,但还是具有一定参考意义的。利用 ICCD 确定光场高阶相干度的方法,为量子光学和量子信息方面的测量提供了一种手段。

2 基本原理

光场的高阶相关函数定义为^[18]

$$G^{(n)}(x_1, \dots, x_n; x_n, \dots, x_1) = \text{Tr}[\rho E^{(-)}(x_1) \dots E^{(-)}(x_n) E^{(+)}(x_n) \dots E^{(+)}(x_1)], \quad (1)$$

式中: $G^{(n)}(x_1, \dots, x_n; x_n, \dots, x_1)$ 为高阶相关函数; x_1, \dots, x_n 为 n 个不同的时空点; ρ 为场的密度算符; $E^{(-)}$ 为场的负频部分算符; $E^{(+)}$ 为场的正频部分算符; Tr 为对矩阵求迹,即矩阵主对角线上各个元素的总和。

由相关函数确定的相干度为

$$g^{(n)}(x_1, \dots, x_n; x_n, \dots, x_1) = \frac{G^{(n)}(x_1, \dots, x_n; x_n, \dots, x_1)}{G^{(1)}(x_1, x_1) \dots G^{(1)}(x_n, x_n)}, \quad (2)$$

式中: $g^{(n)}(x_1, \dots, x_n; x_n, \dots, x_1)$ 为任意时空点 x_1, \dots, x_n 的高阶相干度。

假定光场在 CCD 所有像素探测区内是均匀分布的, CCD 有 M (行) \times K (列) 个像素,每个像素可以看作是一个微小的探测器,且输出的每个像素的光子计数大小与光强成线性关系。若仅考虑延迟时间 $\tau=0$ 、空间位置 $X=0$ (对应成像平面) 时的情况,则任意单一像素在该时空点的光子数可以认为不发生变化,基于这 $N=M \times K$ 个探测器的 n 阶相干度为^[13,19]

$$g^{(n)}(0) = \frac{\frac{I_1^n + I_2^n + I_3^n + \dots + I_{N-1}^n + I_N^n}{N}}{I^n} = \frac{\frac{a_1^n + a_2^n + a_3^n + \dots + a_{N-1}^n + a_N^n}{N}}{\left[\sum_a a P(a) \right]^n}, \quad (3)$$

式中: $I_1, I_2, I_3, \dots, I_N$ 为各个像素的光强; $a_1, a_2, a_3, \dots, a_N$ 为各个像素的光子计数; N 为像素个数; I 为各个像素的平均光强; a 为单个像素的光子计数; $P(a)$ 为此光子计数出现的概率; $\sum_a aP(a)$ 为各个像素的平均光子计数。

实际产生的赝热光场不是理想的热光场。本课题组曾在双探测器、三探测器、四探测器方案中讨论过热光场和相干光场组成的混合模型,并考虑了探测效率的影响^[20-21]。假设被测光场 $|\psi\rangle$ 的光子数分布为 $P_{in}(n)$, 其中光的收集效率、传输效率以及探测效率构成整个系统的总效率,用 η 表示。背景噪声由于关联时间很短,且远短于探测器的响应时间,对测量来说相当于一个泊松统计光场 $|\beta\rangle$, 它的光子

数分布为泊松分布:

$$P_{in,c}(n) = \frac{\gamma^n \exp(-\gamma)}{n!}, \quad (4)$$

式中: $\gamma = |\beta|^2$ 为背景和暗计数构成的平均光子数。热光场的光子数分布为

$$P_{in,T}(n) = \frac{(\alpha)^n}{(1+\alpha)^{n+1}}, \quad (5)$$

式中: α 为热光场的平均光子数。考虑到混合光场以及测量效率,赝热光场的 2~4 阶相干度可以表示为^[20-21]

$$g^{(2)}(0) = \frac{1 - \frac{4\exp(-\gamma/2)}{2+\alpha\eta} + \frac{\exp(-\gamma)}{1+\alpha\eta}}{\left[1 - \frac{2\exp(-\gamma/2)}{2+\alpha\eta}\right]^2}, \quad (6)$$

$$g^{(3)}(0) = \frac{1 + \frac{9\exp(-2\gamma/3)}{3+2\alpha\eta} - \frac{\exp(-\gamma)}{1+\alpha\eta} - \frac{9\exp(-\gamma/3)}{3+\alpha\eta}}{\left[1 - \frac{3\exp(-\gamma/3)}{3+\alpha\eta}\right]^3}, \quad (7)$$

$$g^{(4)}(0) = \frac{1 - \frac{16\exp(-3\gamma/4)}{4+3\alpha\eta} - \frac{16\exp(-\gamma/4)}{4+\alpha\eta} + \frac{12\exp(-\gamma/2)}{2+\alpha\eta} + \frac{\exp(-\gamma)}{1+\alpha\eta}}{\left[1 - \frac{4\exp(-\gamma/4)}{4+\alpha\eta}\right]^4}. \quad (8)$$

3 实验和结果

3.1 实验系统

利用 ICCD (PI-MAX4 1024i, Princeton, America) 进行测量的实验装置如图 1 所示。实验中,一台中心波长为 532 nm 的全固态激光器 (VD-IIA DPSS LASER DRIVER, Optotronics, America) 产生一束激光,经过衰减片和焦距为 25 mm 的透镜后聚焦在旋转的毛玻璃片上。加入衰减片是用来改变入射光强度的,同时也可以防止光强太强而损伤

ICCD,使入射光经过充分衰减进入 ICCD。毛玻璃片以一定的速度旋转,其出射为一种赝热光场^[22]。透过毛玻璃的光经过一直径为 200 μm 的针孔后穿过透镜组、滤波片,最后进入 ICCD。将图 1 中虚线框部分放入封闭的暗室内,防止环境中的杂散光影响探测系统。图 1 中的针孔直径远小于赝热光在针孔平面上的相干长度,可以保证穿过针孔的光子有较高的不可区分度^[13]。由(6)~(8)式可知赝热光场的相干度与探测效率及赝热光场光子数的乘积有关,实验中通过改变衰减片的衰减率来调节赝

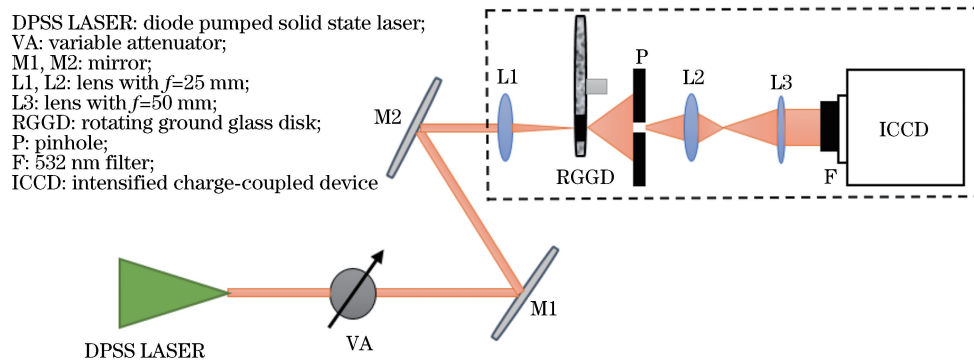


图 1 ICCD 测量的实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup based on ICCD

热光场的光子数。通过透镜组调节光斑的大小,得到一个均匀的光斑入射进 ICCD。

3.2 实验结果及分析

从图 2(a)、(b)可以看出,随着曝光时间的变化,测量结果对应三个过程:1)曝光时间较短时,2(3)阶相干度值偏差较大,且远大于理论值,其中 $g_{\tau}^{(2)}(0)$ 远大于 2。这是由于曝光时间太短,光子计数太少,不足以反映大量光子的统计行为。也就是说, $g_{\tau}^{(2)}(0)$ 大于 2 是测量过程光子计数偏低造成的,并不意味着存在某种非经典关联或者量子纠缠^[23]。最近也有报道指出,即使 $g_{\tau}^{(2)}(0)$ 大于 2,即所谓超聚束,也并不意味着一定存在量子关联^[13]。2)中等长度的曝光时间,这个时间大约是 300~600 ns。在 600 ns 时, $g_{\tau}^{(2)}(0) = 1.79 \pm 0.20$, $g_{\tau}^{(3)}(0) = 4.94 \pm 0.59$, 而根据文献^[17],可得到此时赝热光场的理论值(见下文分析), $g_{\text{th},\tau}^{(2)}(0) = 1.91$, $g_{\text{th},\tau}^{(3)}(0) = 5.50$ [图 2(a)、(b)中用五角星标出]。因此,在该

范围内实验结果与理论预计相差不到 10.18%。3)随着曝光时间增加,相干度值逐渐趋于 1,这是由于曝光时间远大于赝热光的相干时间,此时赝热光场可以近似看作是一种平稳光场,相干度值趋于 1,这种现象与之前用单光子探测器探测赝热光场的趋势大致相同^[24]。

如图 2(c)所示,当曝光时间为 300 ns、计数率为 $9.07 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时, $g_{\tau}^{(3)}(0) = 5.60 \pm 0.28$ 。在图 2(b)中,当曝光时间为 600 ns、计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时, $g_{\tau}^{(3)}(0) = 4.94 \pm 0.59$ 。可以发现在偏差范围内 $g_{\tau}^{(3)}(0)$ 是相近的,因此可以得出:如果增加光强(计数率),就可以避免因光子计数少而导致的无法真实反映入射光场的统计行为。

在实际过程中,由于激光穿过旋转的毛玻璃后,获得的光存在部分相干光,再加上背景干扰和暗计数,因此可以用热光场和相干光场组成的混合模型来刻画实际的光源。由图 2(a)、(b)可知,当曝光

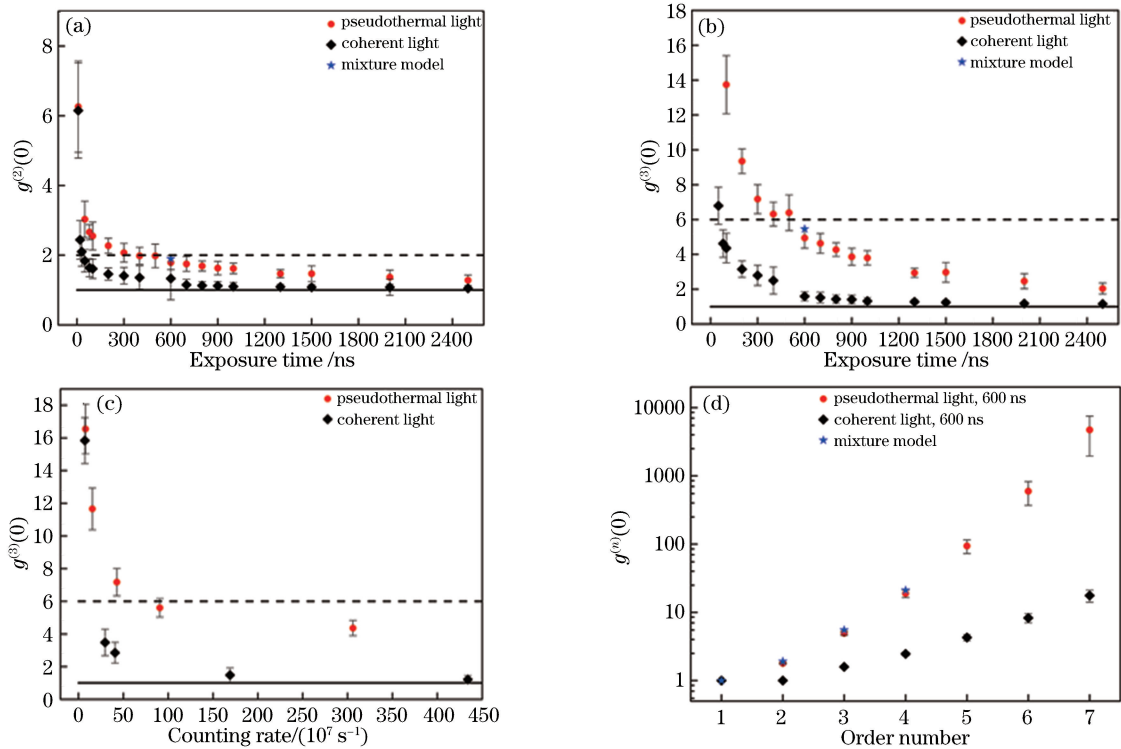


图 2 赝热光场和相干光场的高阶相干度(虚线为赝热光场的理论值,实线为相干光场的理论值)。(a)计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时, $g^{(2)}(0)$ 随曝光时间的变化; (b)计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时, $g^{(3)}(0)$ 随曝光时间的变化; (c)曝光时间为 300 ns 时, $g^{(3)}(0)$ 随计数率的变化; (d)计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 曝光时间为 600 ns 时, $g^{(n)}(0)$ 随对应阶数的变化

Fig. 2 High-order degree of coherences of pseudothermal and coherent light fields (dashed line is theoretical value of pseudothermal light field and solid line is theoretical value of coherent light field). (a) $g^{(2)}(0)$ as function of exposure time with counting rate of $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$; (b) $g^{(3)}(0)$ as function of exposure time with counting rate of $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$; (c) $g^{(3)}(0)$ as function of counting rate with exposure time of 300 ns; (d) $g^{(n)}(0)$ as function of order number with counting rate of $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ and exposure time of 600 ns

时间为 600 ns 时, 赝热光场 $g_{\text{T}}^{(2)}(0) = 1.79 \pm 0.20$, $g_{\text{T}}^{(3)}(0) = 4.94 \pm 0.59$, 由于实测的 2 阶相干度值自身偏差最小, 因此利用 2 阶相干度值确定了两种光对应的比例^[17]

$$g_{\text{T}}^{(2)}(0) = 1 + \left(\frac{p}{1+p}\right)^2 + \frac{2p}{(1+p)^2} = 1.79, \quad (9)$$

式中: p 为热光平均光子数与相干光平均光子数对应的比例, $p = 1.18$ 。可以得到此时光场中热光场平均光子数及相干光场平均光子数分别为^[17-18] 0.0836 和 0.0708, 背景噪声平均光子数为 0.0003。利用 (6)~(8) 式可得: $g_{\text{th,T}}^{(2)}(0) = 1.91$, $g_{\text{th,T}}^{(3)}(0) = 5.50$, $g_{\text{th,T}}^{(4)}(0) = 21.04$ [图 2(d) 中用五角星标出]。从图 2(d) 中可以看到, 随着阶数增加, 高阶相干度值自身的偏差逐渐增大, 且与其对应的理论值偏差也在增大, 因此用此方法来测高阶相干度值时, 测量阶数会受到一定限制, 但在 4 阶以下还是可行的, 其赝热光场的自身偏差小于 12.6%, 测量值与理论值之间的偏差小于 10.5%。这是由于随着阶数增加, 相干度的理论值快速增大, 而且对光子数测量变得越来越敏感, 故自身偏差相应增大^[15]。

4 结 论

利用 ICCD 测量了赝热光场和相干光场的高阶相干度, 通过改变曝光时间和计数率, 研究了光场的 1~4 阶相干度值随实验条件的变化。研究发现, 当计数率为 $5.12 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 时, 选择 600 ns 的曝光时间, 就可以较好地反映入射赝热光场和相干光场的 1~4 阶相干度。这种方法可以用来测量、判别其他不同光场的统计性质, 为下一步探究弱光光场及其他量子光源的高阶相干度提供了一种新方法。同时, 该测量方法在应用领域也有广阔的前景, 有望在量子成像和量子传感中得到应用。

致谢 感谢太原师范学院田剑锋老师、太原理工大学郭龔强老师等的指导, 以及普林斯顿公司工程师的帮助。

参 考 文 献

- [1] Loudon R. The quantum theory of light [M]. USA: Oxford Science Publications, 2000: 92.
- [2] Hanbury Brown R, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light [J]. Nature, 1956, 177(4497): 27-29.
- [3] Glauber R J. The quantum theory of optical coherence [J]. Physical Review, 1963, 130(6): 2529-2539.
- [4] Glauber R J. Photon correlations [J]. Physical Review Letters, 1963, 10(3): 84-86.
- [5] Mandel L, Sudarshan E C G, Wolf E. Theory of photoelectric detection of light fluctuations [J]. Proceedings of the Physical Society, 1964, 84(3): 435-444.
- [6] Arecchi F T. Measurement of the statistical distribution of Gaussian and laser sources [J]. Physical Review Letters, 1965, 15(24): 912-916.
- [7] Arecchi F T, Gatti E, Sona A. Time distribution of photons from coherent and Gaussian sources [J]. Physics Letters, 1966, 20(1): 27-29.
- [8] Li W F, Du J J, Wen R J, *et al.* Quantum-enhanced metrology based on Fabry-Perot interferometer by squeezed vacuum and non-Gaussian detection [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(12): 123106.
- [9] Paul H. Photon antibunching [J]. Reviews of Modern Physics, 1982, 54(4): 1061-1102.
- [10] Chen X H, Agafonov I N, Luo K H, *et al.* High-visibility, high-order lensless ghost imaging with thermal light [J]. Optics Letters, 2010, 35(8): 1166-1168.
- [11] Liu Y C, Kuang L M. Theoretical scheme of thermal-light many-ghost imaging by Nth-order intensity correlation [J]. Physical Review A, 2011, 83(5): 053808.
- [12] Zhang W W, Si X F, He R Q, *et al.* The optimum order fitting method based on high order ghost image quality model: CN104486617A [P]. 2015-04-01. 张闻文, 斯雪峰, 何睿清, 等. 基于高阶鬼成像像质模型的最佳阶数拟合方法: CN104486617A [P]. 2015-04-01.
- [13] Bai B, Liu J B, Zhou Y, *et al.* Photon superbunching of classical light in the Hanbury Brown-Twiss interferometer [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(10): 2081-2088.
- [14] Boitier F, Godard A, Rosencher E, *et al.* Measuring photon bunching at ultrashort timescale by two-photon absorption in semiconductors [J]. Nature Physics, 2009, 5(4): 267-270.
- [15] Aßmann M, Veit F, Bayer M, *et al.* Higher-order photon bunching in a semiconductor microcavity [J]. Science, 2009, 325(5938): 297-300.
- [16] Peřina J, Hamar M, Michálek V, *et al.* Photon-number distributions of twin beams generated in spontaneous parametric down-conversion and measured by an intensified CCD camera [J]. Physical Review A, 2012, 85(2): 023816.
- [17] Li Y, Zhang Y C, Zhang P F, *et al.* Experimental

- study on coherence time of a light field with single photon counting[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(7): 074205.
- [18] Zhang Z M. Quantum optics[M]. Beijing: Science Press, 2015: 128.
张智明. 量子光学[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 128.
- [19] Zhang Y C, Li Y, Guo Y Q, *et al.* Degree of fourth-order coherence by double Hanbury Brown-Twiss detections[J]. Chinese Physics B, 2010, 19(8): 084205.
- [20] Li G, Zhang T C, Li Y, *et al.* Photon statistics of light fields based on single-photon-counting modules[J]. Physical Review A, 2005, 71(2): 023807.
- [21] Guo Y Q. Strongly coupled dual-optical microcavities system and manipulation and measurement of individual particles[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2013: 78-83.
郭龔强. 强耦合双光学微腔系统的构建及单粒子的操控与测量[D]. 太原: 山西大学, 2013: 78-83.
- [22] Goodman J W. Statistical optics [M]. Beijing: Science Press, 1992: 139.
J. W. 顾德门. 统计光学[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 139.
- [23] Fang S D, Cao Z L. Dynamical of entangled atoms in GHZ states interacting with the Fock state field[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2006, 23(2): 197-202.
方曙东, 曹卓良. GHZ 类态原子体系与 Fock 态光场相互作用的动力学[J]. 量子电子学报, 2006, 23(2): 197-202.
- [24] Li Y, Li G, Zhang Y C, *et al.* The effect of counting rate and time resolution on the measured photon statistical properties: experimental study of direct measurement via SPCM [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(11): 5779-5783.
李园, 李刚, 张玉驰, 等. 计数率和分辨时间对光场统计性质测量的影响: 单探测器直接测量的实验分析[J]. 物理学报, 2006, 55(11): 5779-5783.