

文章编号: 0253-2239(2010)11-3332-04

# 热光场无分束器非局域成像研究

贺拾贝 沈 夏 王 慧 龚文林 韩申生

(中国科学院上海光学精密机械研究所 量子光学重点实验室和冷原子物理中心, 上海 201800)

**摘要** 非局域成像(又称为鬼成像)是近年来兴起的一种新的、利用光场二阶关联进行成像的方法。在这个领域里,已经取得了很多有重大意义的成果。在传统的非局域成像系统中,分束器是一个不可缺少的光学元件。但是,分束器的使用却限制了非局域成像在很多领域的进一步运用,特别是利用自然光源进行非局域成像。介绍了一种新的实验装置,利用对光源面上的强度调制,在赝热光作为光源的条件下,实现无分束器的非局域成像。并从理论上研究了 this 装置,给出了实验结果。最后,将该实验装置进行改进,使之能够应用于更广泛的场合。无分束器非局域成像实验的成功,对于非局域成像的实际应用有重大价值。

**关键词** 量子光学;非局域成像;无分束器;热光场

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3332

## Ghost Imaging without Beamsplitter in Thermal Optical Field

He Shibei Shen Xia Wang Hui Gong Wenlin Han Shengsheng

(Key Laboratory for Quantum Optics and Center for Cold Atom Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Ghost imaging has attracted much attention since it was realized. Many significant results have been achieved in the field of ghost imaging, in which the beamsplitter is an indispensable optical component. However, the existence of the beamsplitter hinders the wider application of ghost imaging, especially with the natural light. A method to realize ghost imaging without beamsplitter by modulating the light intensity on the plane of light source is introduced. Then it is studied theoretically and experimentally. Finally, for further applications, the basic model is improved to a more advanced one. The success of the ghost imaging without beamsplitter is very significant to the applications of ghost imaging.

**Key words** quantum optics; ghost imaging; without beamsplitter; thermal optical field

## 1 引 言

非局域成像又被称为鬼成像,是近年来兴起的,基于光场的二阶关联效应的一种新的成像方式。非局域成像最初是利用纠缠光子对作为光源实现的<sup>[1]</sup>。随后,由于赝热光源具有和经典热光源相同的统计性质,被引入实验架构,实现了热光场的非局域成像<sup>[2~5]</sup>。

在传统的非局域成像中,分束器是一个不可或缺的光学器件。它将赝热光复制成两个相同的光场,这两个光场在近场和远场都具有关联。一个光

场(称为探测光)经过一个包含物体的光学系统,最终被一个点探测器接收(这个光路称为物臂),另一个光场(参考光)经过一个不包含物体的光学系统,最终被一个面阵列探测器接收(这个光路称为参考臂),这两个探测器接收的光强经过关联运算,可以得到物体的实像或者傅里叶像<sup>[6,7]</sup>。

利用自然光源进行非局域成像是一个引人注目的课题。但是,传统的非局域成像的实验架构不能满足这种要求。在利用自然光源进行非局域成像的光路中摆放一个分束器进行分光在实际中是不可行

收稿日期: 2009-12-25; 收到修改稿日期: 2010-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60877009)、国家 863 计划(2006AA12Z115)和上海自然科学基金(09JC1415000)资助课题。

作者简介: 贺拾贝(1984—),男,硕士研究生,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: heshibei@163.com

导师简介: 韩申生(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: sshan@mail.shcnc.ac.cn

的。于是,如何实现无分束器的非局域成像成为实现其实际应用的关键。本文介绍了一种新的实验装置,并从理论和实验两个方面对其进行了研究。

## 2 实验装置和理论分析

利用对赝热光源的强度调制实现了无分束器的非局域成像,得到了物体的傅里叶谱。实验装置如图 1 所示。

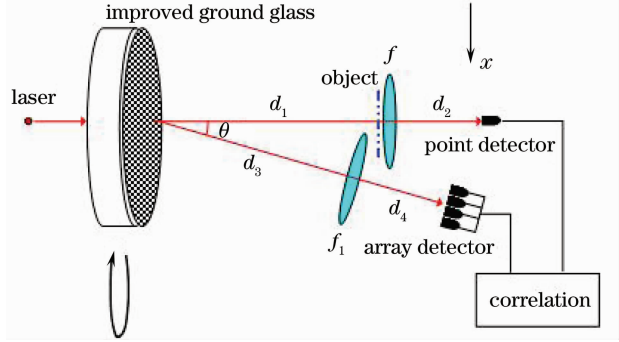


图 1 热光场无分束器非局域成像装置

Fig. 1 Experimental setup of the ghost imaging without beamsplitter in pseudo-thermal light field

传统的赝热光源是用激光光束打到旋转的毛玻璃上。毛玻璃的作用是给光束横截面的各个部分一个随机的相位调制,在毛玻璃后面就形成了赝热光场,这种光场具有和经典热光场相同的统计特性<sup>[8,9]</sup>。但是,真实热光源在其发光表面上具有不同的强度分布,而赝热光源在光源的发光面(即毛玻璃的平面)上光强是均匀的。

实验中对赝热光源进行了改进,在毛玻璃面上

引入了强度调制,使得激光光源在毛玻璃上具有了随机的光强分布。

实验装置中,激光的传播方向在毛玻璃后面的延长线构成物臂的主光轴。激光射在毛玻璃的那一点作为整个系统的原点。距离毛玻璃  $d_1$  的位置垂直于主光轴摆放一个凸透镜(焦距为  $f$ ),在透镜后距离为  $d_2$  的位置摆放一个点探测器。被探测物体紧贴在透镜前,所以物体与透镜之间的距离可以忽略。

参考臂的主光轴与物臂主光轴相交于系统原点,并与之成一个小角度  $\theta$ 。距离原点  $d_3$  的位置垂直与参考臂主光轴摆放另一个透镜(焦距为  $f_1$ ),在此透镜之后距离为  $d_4$  的位置摆放面阵探测器。各光学参数必须满足条件:  $\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} = \frac{1}{f}$ ,  $\frac{1}{d_3} + \frac{1}{d_4} = \frac{1}{f_1}$ 。

不失一般性,只考虑一维情况。物臂和参考臂的光强涨落关联可以写为

$$\langle I_t(x_t) I_r(x_r) \rangle = \langle E_t(x_t) E_r(x_r) E_t^*(x_t) E_r^*(x_r) \rangle, \quad (1)$$

式中  $x_t$  和  $x_r$  分别是物臂探测器和参考臂探测器上的坐标。两个探测器上的光场是被光源面上的光场所决定的:

$$\begin{cases} E_t(x_t) = \int dx_1 h_t(x_1, x_t) E(x_1) \\ E_r(x_r) = \int dx_1 h_r(x_1, x_r) E(x_1) \end{cases}, \quad (2)$$

$x_1$  是光源面上的坐标,  $h_t(x_1, x_t)$  是物臂的脉冲响应函数,  $h_r(x_1, x_r)$  是参考臂的脉冲响应函数。

赝热光场是高斯随机过程,光源面上的强度调制并不影响光场的统计性质,根据高斯函数的矩定理<sup>[9]</sup>,有  $\langle E(x) E(x') E^*(x'') E^*(x''') \rangle = \langle E^-(x) E^+(x''') \rangle \langle E(x') E^*(x'') \rangle + \langle E^-(x) E^+(x'') \rangle \langle E(x') E^*(x''') \rangle$ ,

将(2),(3)式代入(1)式,得到

$$\langle I_t(x_t) I_r(x_r) \rangle = \langle I_t(x_t) \rangle \langle I_r(x_r) \rangle + \left| \int dx_1 \int dx_1' h_t(x_1, x_t) h_r^*(x_1', x_r) \langle E(x_1) E^*(x_1') \rangle \right|^2. \quad (4)$$

式中第 1 项提供了一个恒定的背景,不包含任何有价值的信息,物体所有的信息都包含在第 2 项中。首先考虑  $\langle E^-(x_1) E^+(x_1') \rangle$  这一项(为了方便起见,所有的  $x''$  都换成  $x'$ ),由于在不同的采样中,光源面上不同点的光强分布是随机的,彼此不相关的,得到

$$\langle E(x_1) E^*(x_1') \rangle = I_0 \delta(x_1 - x_1'). \quad (5)$$

接下来考虑物臂,赝热光从毛玻璃面上出射之后相继穿过了自由空间  $d_1$ ,物体  $t(x_2)$ ,在相同平面上的凸透镜,自由空间  $d_2$ ,最后被一个点探测器接收到。根据傅里叶光学,物臂的脉冲响应函数为<sup>[10]</sup>

$$h_t(x_1, x_t) = \int dx_2 \sqrt{\frac{\exp(ikd_1)}{i\lambda d_1}} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_1} (x_1 - x_2)^2\right] t(x_2) \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda f} x_2^2\right] \sqrt{\frac{\exp(ikd_2)}{i\lambda d_2}} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda d_2} (x_2 - x_t)^2\right]. \quad (6)$$

式中  $x_2$  是物体和凸透镜平面上的坐标。 $\exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda f}x_2^2\right]$  是焦距为  $f$  的凸透镜引入的二次相位因子。

根据高斯薄透镜成像定理,参考臂上的面阵列探测器对毛玻璃面上的强度调制成像。但由于参考臂的主光轴并不垂直与毛玻璃平面,所以所成之像并不是准确的强度调制像,而是强度调制像在垂直与参考臂主光轴的平面上的投影。如果考虑旁轴条件对光路的影响,所成之像的大小应该是其准确实像大小的  $\cos\theta$  倍。据此,参考臂的脉冲响应函数为<sup>[10]</sup>

$$h_r(x'_1, x_r) = \delta(d_4 x'_1 \cos\theta + d_3 x_r) \exp[ig(x_r)], \quad (7)$$

$\exp[ig(x_r)]$  是一个相位因子,它代表了像面上每一点的相位,在以后的推导中发现它并不重要,可以被省略掉。

将(5)~(7)式代入(4)式的第2项[用  $\langle \Delta I_1(x_1) \Delta I_r(x_r) \rangle$  表示],不考虑透镜的有限大小,并且设光源无限大,可以得到

$$\langle \Delta I_1(x_1) \Delta I_r(x_r) \rangle = \frac{I_0^2}{\lambda^2 d_1 d_2} \left| T\left(\frac{x_r d_3}{\lambda d_1 d_4 \cos\theta} - \frac{x_1}{\lambda d_2}\right) \right|^2, \quad (8)$$

式中  $T$  是物函数  $t$  的傅里叶变换。由于物臂的信息被一个点探测器接收,所以  $x_i$  是一个定值,可以取  $x_i = 0$ ,这样,当扫描参考臂的面阵列探测器时,可以得到物体的傅里叶谱:  $\frac{I_0^2}{\lambda^2 d_1 d_2} \left| T\left(\frac{x_r d_3}{\lambda d_1 d_4 \cos\theta}\right) \right|^2$ 。这个像也可以用焦距为  $\frac{2d_1 d_4 \cos\theta}{d_3}$  (称为有效焦距)的凸透镜在传统成像系统中的  $f-f$  系统中做出来,它可以为非局域成像提供验证标准。

在实验中,选用双缝作为成像物体。每条狭缝宽为  $60\ \mu\text{m}$ ,狭缝中心间距为  $120\ \mu\text{m}$ 。其他的参数为  $f-f, d_1 = d_2 = 15.0\ \text{cm}, f_1 = 10.0\ \text{cm}, d_3 = d_4 = 20.0\ \text{cm}, \theta$  经过测量为  $20.7^\circ$ 。所以作为标准比对的有效焦距为  $15 \cdot \cos\theta = 14\ \text{cm}$ 。实验结果如图2所示。得到了傅里叶谱的零级和一级衍射峰。其中(a)是单个点关联的结果,(b)是多个点关联的平均结果,(c)是利用标准的  $f-f$  系统( $f = 15.0\ \text{cm}$ )的经典成像的结果。(a)和(b)中的虚线是经过多峰拟合后的结果。由于强度调制的特征长度限于实验条件并不能做得足够小,所以,谱的分辨率比较低,零级峰与次级峰没有完全分开。零级峰与次级峰的距离为  $110\ \text{pixel}$ ,所以,实验中峰距的

理论值应该是  $110 \cdot \cos\theta = 103\ \text{pixel}$ ,实际的实验结果是  $101\ \text{pixel}$ ,误差为  $2\%$ 。

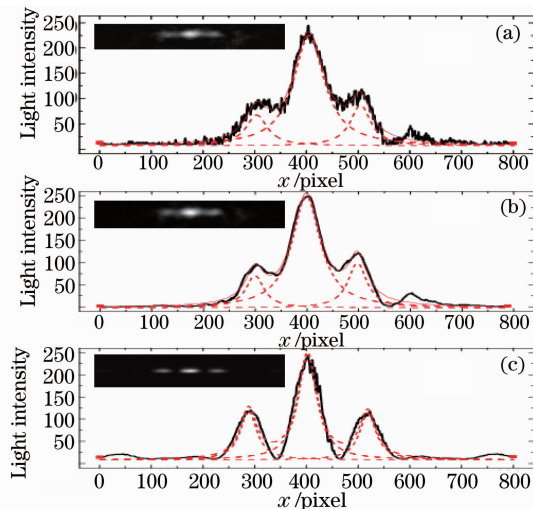


图2 热光场无分束器非局域成像实验结果。(a)单个点关联的衍射谱;(b)多点关联衍射谱的平均值;(c)经典成像的衍射谱结果

Fig. 2 Experimental results of ghost imaging without beamsplitter in pseudo-thermal light field. (a) single point correlated result of diffraction; (b) multi-point average correlated result of diffraction; (c) classic imaging's result of diffraction

非局域成像的机理是双光子干涉,从宏观角度来说,是远场和近场关联<sup>[11]</sup>。如果这两种关联都不存在,将不能得到任何物体的信息。纠缠光子对,具有这两种关联,即同时满足动量空间  $\Delta(p_1 + p_2) = 0$  和位置空间  $\Delta(x_1 - x_2) = 0$ <sup>[12~17]</sup>。但是赝热光却没有任一关联,使用分束器的作用就是复制光场,使之具有近场和远场关联<sup>[18,19]</sup>。而在本实验中,去掉了分束器,而对光源面上进行强度调制,所以,整个光场具有近场关联,而没有远场关联。

### 3 实验装置的改进

在成像装置中,要求物体紧贴物臂透镜,在很多实际场合中,这样做是不方便的。可以使用一个简单的光场变换来克服这一局限。改进的实验装置如图3所示。在物臂中,增加了两个相同焦距的凸透镜(假设其焦距为  $F$ ,称之为变换透镜)。第1个透镜在距离物体  $2F$  的位置摆放,第2个透镜距离第1个透镜距离也是  $2F$  的地方摆放,原来物臂的成像透镜紧贴在第2个透镜后面,其他的装置不变。两个变换透镜的作用是将物体平面上的光场复制在成像透镜的平面上(成倒立实像),并消去一个二次项因子。

根据傅里叶光学,如果假设在物体平面上的光

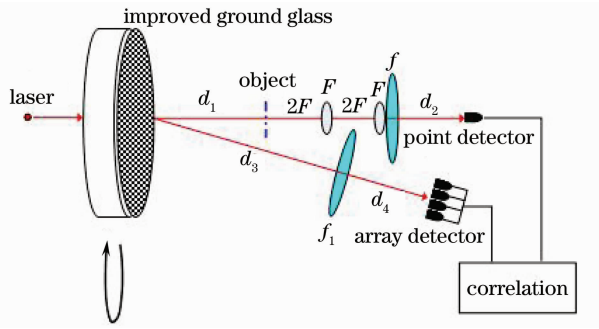


图 3 改进型热光场无分束器鬼成像装置

Fig. 3 Improved experimental setup of the ghost imaging without beamsplitter in pseudo-thermal light field

场为  $U(x_0)t(x_0)$ , 那么在成像透镜面上的光场可以经过计算得到

$$E(x_2) = \int dx_0 U(x_0)t(x_0) \sqrt{\frac{\exp(ik2F)}{i\lambda 2F}} \times \int dx_1 \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda 2F}(x_0 - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda 2F}x_1^2\right] \times \sqrt{\frac{\exp(ik2F)}{i\lambda 2F}} \exp\left[\frac{i\pi}{\lambda 2F}(x_2 - x_1)^2\right] \exp\left[\frac{-i\pi}{\lambda 2F}x_2^2\right] = \int dx_0 \exp(ik2F)U(x_0)t(x_0)\delta(x_0 + x_2) = U(-x_0)t(-x_0), \quad (9)$$

据此,最后关联得到的结果为

$$\frac{I_0^2}{\lambda^2 d_1 d_2} \left| T\left(-\frac{x_r d_3}{\lambda d_1 d_4 \cos \theta}\right) \right|^2,$$

与(8)式仅差一个负号。

在实际情况下,物臂上物体后所有的装置可以作为一个光学系统,整个参考臂作为一个光学系统,这样,就可以在更广泛的场合中实现热光场非局域成像。

## 4 结 论

本文介绍了一种实现无分束器非局域成像的新的实验装置。利用对赝热光源面上的光强进行调制,达到了这一目的。随后,从理论上证明了这个实验装置的正确性,并给出了实验结果。最后,运用光学变换的方法,将该装置进行改进,使之能够运用到更广泛的领域。

## 参 考 文 献

1 T. B. Pittman, Y. H. Shih, D. V. Strekalov *et al.*. Optical imaging by means of 2-photon quantum entanglement[J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(5): R3429~R3432

2 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd *et al.*. Quantum and classical coincidence imaging [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(3): 033601

3 R. S. Bennink, S. J. Bentley, R. W. Boyd. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, **89**(11): 113601

4 Jing Cheng, Shengsheng Han. Incoherent coincidence imaging and its applicability in X-ray diffraction[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **92**(9): 093903

5 Minghui Zhang, Qing Wei, Xia Shen *et al.*. Lensless Fourier-transform ghost imaging with classical incoherent light[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 021803(R)

6 M. D. Angelo, Y. H. Shih. Quantum imaging[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2005, **2**(12): 567~596

7 Honglin Liu, Xia Shen, Daming Zhu *et al.*. Fourier-transform ghost imaging with pure far-field correlated thermal light [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **76**(5): 053808

8 W. Martienssen, E. Spiller. Coherence + fluctuations in light beams[J]. *Am. J. Phys.*, 1964, **32**(12): 919~926

9 J. W. Goodman. Statistical Optics[M]. New York: Wiley, 1985

10 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Qin Kebin, Liu Peisen, Chen Jiabi *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006

古德曼. 傅里叶光学导论[M]. 秦克斌, 刘培森, 陈家璧 等译. 北京: 电子工业出版社, 2006

11 A. Gatti, E. Brambilla, M. Bache *et al.*. Ghost imaging with thermal light: Comparing entanglement and classical correlation [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, **93**(9): 093602

12 A. Gatti, E. Brambilla, L. A. Lugiato. Entangled imaging and wave-particle duality: from the microscopic to the macroscopic realm[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **93**(10): 133603

13 E. Brambilla, A. Gatti, M. Bache *et al.*. Simultaneous near-field and far-field spatial quantum correlations in the high-gain regime of parametric down-conversion[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(2): 023802

14 R. Qi, X. L. Yu, Z. B. Li *et al.*. Non-abelian Josephson effect between two  $F=2$  spinor Bose-Einstein condensates in double optical traps[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(18): 185301

15 A. C. Ji, Q. Sun, X. C. Xie *et al.*. Josephson effect for photons in two weakly linked microcavities[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **102**(2): 023602

16 A. C. Ji, W. M. Liu, J. L. Song *et al.*. Dynamical creation of fractionalized vortices and vortex lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2008, **101**(1): 010402

17 W. M. Liu, B. Wu, Q. Niu. Nonlinear effects in interference of Bose-Einstein condensates[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2000, **84**(11): 2294~2297

18 Shen Xia, Zhang Minghui, Liu Honglin *et al.*. Research on the pulsed pseudo-thermal light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2893~2898

沈 夏, 张明辉, 刘红林 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2893~2898

19 Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia *et al.*. Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1858~1866

张明辉, 魏 青, 沈 夏 等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟和实验验证[J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1858~1866