

热光二阶关联的影响因素实验研究

田 甲, 林海龙, 高 禄

(中国地质大学(北京)数理学院, 北京 100083)

摘 要:热光 HBT 测量值可定量表示热光场的二阶关联程度. 实验研究了物光和参考光的光程差及热光源横向尺寸对热光二阶关联值的影响. 结果表明:随着物光和参考光光程差增加, HBT 值会降低并且其半高全宽增大;随着光源横向尺寸增加, HBT 值降低, 其半高全宽减小.

关键词:热光场; 二阶关联; 分辨率

中图分类号: O431 文献标识码: A 文章编号: 1005-4642(2014)09-0009-04

1 引 言

1956 年, 汉勃雷-布朗(R. H. Brown)和特威斯(R. Q. Twiss)为测量恒星角直径而设计著名的实验^[1], 后来人们就以他们的名字命名该实验为“HBT”实验. HBT 实验第一次证实了光的强度关联效应, 实验本身也成为测量强度关联的典型方法, 在量子光学发展史上具有里程碑的意义. 1995 年, 美国马里兰大学的 Yanhua Shih 等人利用自发参量下转换的纠缠光子对完成了奇特的成像实验——鬼成像(ghost imaging)^[2], 此实验使得在没有物体的闲散光路中获得物体的空间信息成为了可能. 当时人们认为这是一种量子现象, 只有采用纠缠双光源才能实现鬼成像. 2002 年, Rochester 大学的 Boyd 等人巧妙地利用随机旋转的反射镜反射激光获得了空间频率随机分布的热光源, 通过光场的强度测量获得了透射物体的鬼成像^[3]. 该实验结果表明鬼成像实验也可以利用经典光源实现, 而并非是量子光源所特有的现象. 这一实验报道更是引起了科学界的一场争辩:鬼成像实验是否是一种量子现象? 随后, 国内外很多研究组在热光二阶关联测量方面开展了理论和实验研究工作^[4-7]. 研究结果表明热光源可以模仿纠缠双光子源实现鬼干涉、鬼成像等双光子关联测量实验.

在研究热光二阶关联特性的实验中, HBT 测量是一个必要的实验基础, 因此对于 HBT 影

响因素的研究极为关键. 本实验中, 采用激光照射旋转毛玻璃形成空间频率随机分布的热光源, 通过改变热光源的横向尺寸及物光和参考光光程差, 研究光源特性及光路设计对热光二阶关联的影响.

2 实验原理

HBT 的实验原理如图 1 所示. 非相干热光源发出的光被非偏振分束器分成 2 束, 分别自由传递到达探测器 D_1 和 D_2 . 将其中一个探测器探测面上某一固定点的光强值与另一个探测器探测面上各个点的光强值进行强度关联测量, 即可获得 HBT 值.

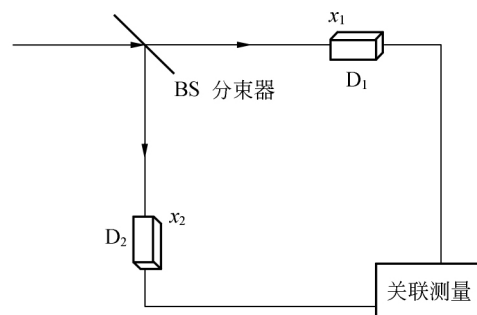


图 1 HBT 实验原理图

根据高斯矩定理, 满足高斯统计分布光场的高阶关联可以用一阶关联函数表示, 则热光场的二阶关联函数可以表示为

收稿日期: 2014-05-27

基金项目: 北京市自然科学基金资助(No. 4133086); 中央高校基本业务费资助(No. 2-9-2014-022)

作者简介: 高 禄(1982—), 女, 辽宁沈阳人, 中国地质大学(北京)数理学院讲师, 博士, 主要从事大学物理及大学物理实验的教学和研究工作.

$$\langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle = \langle E_1^*(x_1)E_2^*(x_2)E_2(x_2)E_1(x_1) \rangle = \langle E_1^*(x_1)E_1(x_1) \rangle \langle E_2^*(x_2)E_2(x_2) \rangle + |\langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle|^2 = \langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle + |\langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle|^2. \quad (1)$$

式(1)由 2 部分组成, 第一项 $\langle I_1(x_1) \rangle \langle I_2(x_2) \rangle$ 表示探测器 D_1 和 D_2 处的强度分布的乘积, 是直流背景项; 第二项 $|\langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle|^2$ 表示光场的二阶关联信息.

光场从光源横截面到探测器的探测面自由传播的脉冲响应函数可以表示为

$$h(x_j, x_0) = \frac{k}{2\pi z} \exp \left[-\frac{i\pi}{4} + ik \sqrt{(x_j - x_0)^2 + z^2} \right], \quad (2)$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为光场的波数, z 是从光源横截面到探测器的探测面的距离, x_j 和 x_0 分别表示探测面和光源横截面的空间横向坐标. 在近轴近似

条件下, 式(2)可以写为

$$h(x_j, x_0) = \sqrt{\frac{k}{2\pi z}} \exp \left[-\frac{i\pi}{4} + ikz + \frac{ik}{2z}(x_j - x_0)^2 \right], \quad (3)$$

假设理想情况下, 热光源发出的光具有无穷小的相干长度, 热光源横截面的一阶关联函数可以表示为

$$\langle E_0(x)E_0(x') \rangle = S_0 \delta(x_0 - x_0'), \quad (4)$$

这里假设光场强度分布为常量 S_0 . 将式(3)和(4)代入到式(1)中的关联项, 可以得到光场的一阶互关联函数为

$$\langle E_1^*(x_1)E_2(x_2) \rangle = \iint h_1^*(x_1, x_0)h_2(x_2, x_0')S_0\delta(x_0 - x_0')dx_0dx_0' = \frac{kS_0}{2\pi z} \exp \left[\frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2z} \right] \int_{-r}^r \exp \left[\frac{ik(x_1 - x_2)x_0}{z} \right] dx_0 \frac{S_0kr}{\pi z} \exp \left[\frac{ik(x_2^2 - x_1^2)}{2z} \right] \text{sinc} \left[\frac{2\pi r(x_1 - x_2)}{\lambda z} \right], \quad (5)$$

其中 r 为光源发光面的尺寸半径. 于是, 可以得到 HBT 实验的二阶关联函数为

$$\langle I_1(x_1)I_2(x_2) \rangle = \left(\frac{krS_0}{\pi z} \right)^2 \left\{ 1 + \text{sinc}^2 \left[\frac{2\pi r(x_1 - x_2)}{\lambda z} \right] \right\}, \quad (6)$$

固定一个探测器, 扫描另一个探测器就可以得到

$$\langle I_1(0)I_2(x) \rangle = \frac{hrS_0}{\pi z} \left[1 + \text{sinc}^2 \left(\frac{2\pi rx}{\lambda z} \right) \right], \quad (7)$$

式(7)表示非相干热光源 HBT 实验测得的二阶关联函数形式, 其归一化形式可以表示为

$$g^2(0, x) = 1 + \text{sinc}^2 \left(\frac{2\pi rx}{\lambda z} \right). \quad (8)$$

从式(8)中可以看到, 归一化 HBT 曲线的半高宽与光源距探测面的距离 z 、光源的尺寸 r 及波长 λ 有关. HBT 曲线的半高宽随着 z 的增加而增大, 随 r 的增加而减小. HBT 理论曲线如图 2 所示.

3 实验研究

3.1 实验装置

实验光路如图 3 所示. 波长为 632.8 nm 的激光器发出的激光经过平面镜 M 反射, 依次通过

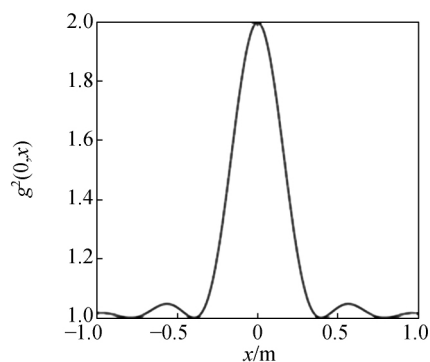


图 2 HBT 理论曲线图

偏振片 P_1 和 P_2 , 它们的作用是保证光源为线偏振光, 同时可以组合调节光强. 扩束透镜 N 可以调整激光光斑的大小. 经扩束后的激光照射在转动的毛玻璃 G 上形成空间频率随机分布的赝热光源. P_3 为放置在热光源附近的光阑, 用来调节热光源的横向尺寸. BS 为 50/50 非偏振分束器, 可以把光源发出的光束分为 2 束, 2 束光分别自由传递到达探测器 D_1 和 D_2 的探测面. 两探测器的探测面距离热光源 G 的距离分别为 d_1 和 d_2 .

2 个探测器分别连接计算机中采集卡的端口,由相应的采集程序进行数据采集和测量,并将数据存储在计算机中。

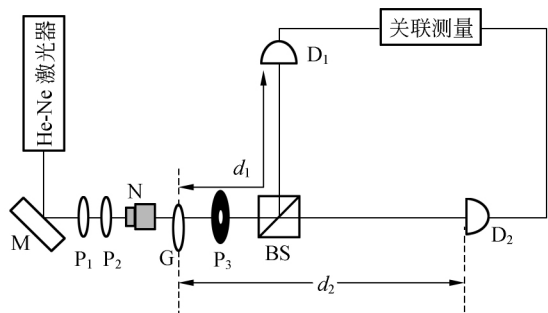


图 3 HBT 实验装置图

依据 HBT 原理,本实验所采用的采集方式为:取探测器 D_1 探测面上某一固定点值与另一个探测器 D_2 探测面上的各个点的光强值进行关联测量,对采集到的数据进行归一化关联计算,从而得到光场的二阶关联 HBT 值。

3.2 实验过程及结果

首先,固定光阑 P_3 的直径为 3 mm,通过改变探测器 D_2 距离光源的光程,改变物光和参考光两光路的光程差,测量相应的 HBT 值。探测器 D_1 保持位置不变,距离分束器 BS 的距离为 $d_1 = 31.80$ cm,探测器 D_2 的位置依次变化使光程差分别为 $\Delta d = d_2 - d_1 = 0, 5, 10, 20$ cm。实验结果如图 4 所示。当 $\Delta d = 0$ cm 时,归一化的 HBT 值达到了 1.935,接近理想值 2;随着探测器到光源光程差的增加,HBT 值逐渐减小。当光程差 Δd 达到 20 cm 时,二阶关联的 HBT 值减到 1.221,二阶关联值变得较低。实验结果表明:热光二阶

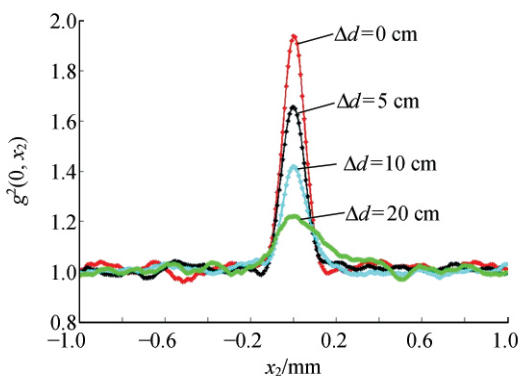


图 4 HBT 值随光程差变化曲线

关联随着 2 个光路光程差的增大而下降,同时曲线的半高宽也随之增大,导致二阶关联测量的分辨率降低。所以在上述热光二阶关联实验测量系统中,在光源尺寸是直径为 1 mm 的圆形区域情况下,物光和参考光两光路的光程差不能大于 20 cm,否则二阶关联特性将消失。

其次,固定探测器 D_1 和 D_2 的位置,即 $d_1 = d_2 = 31.80$ cm。通过改变光阑 P_3 的直径即热光源的横向尺寸,测量相应的 HBT 值。实验测量结果如图 5 所示。实验结果表明:当光阑直径为 1 mm 时,关联值达到 1.797;随着光阑直径的增大,HBT 值逐渐减小,当直径增加到 10 mm 时,二阶关联值下降到 1.361。由此可见,强度关联值随着热光源横截面尺寸的增大而降低。同时,HBT 曲线的半高全宽随着光阑直径的增加而减小,这说明热光二阶关联测量系统的分辨率随着光阑直径的增加而提高。

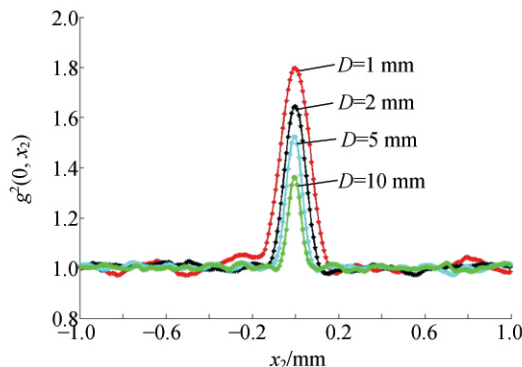


图 5 HBT 值随光阑直径变化曲线

4 结 论

热光的归一化二阶关联 HBT 值与物光和参考光光程差及光源的横截面尺寸有紧密联系。研究表明:随着热光二阶关联测量系统中物光和参考光光程差增加,HBT 值会随之降低,而且曲线的半高全宽也随之增加,导致系统的测量分辨率降低。随着光源横截面尺寸增加,即实验装置中光阑 P_3 直径增大,HBT 值也会随之降低,但是曲线的半高全宽却随之减小,系统的测量分辨率提高。这说明尽管光源横截面尺寸的增加可以提高热光关联系统的测量分辨率,但是要以降低图像可见度为代价。

参考文献:

- [1] Brown R H, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light [J]. Nature, 1956,177:27-29.
- [2] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. Phys. Rev. A, 1995, 52: R3429-R3432.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. Phys. Rev. Lett., 2002,89(11):113601-1-4.
- [4] Cao De-zhong, Wang Kai-ge. Sub-wavelength Interference in macroscopic observation [J]. Phys. Lett. A, 2004,333:23-29.
- [5] GAO Lu, XIONG Jun, ZHANG Shu-heng, et al. Improving visibility of diffraction pattern with pseudo-thermal light [J]. Chin. Phys. Lett., 2008,25(4):1277.
- [6] 李璐,关东石,刘宏超,等. 光的偏振性对 Hanbury Brown-Twiss 实验的影响[J]. 量子光学学报,2009(3):201-206.
- [7] 高禄,张颖涛,汪凯戈. 相位物体的热光关联成像[A]. 第十二届全国量子光学学术会议论文集[C]. 南昌:2006.

Experimental research on the influence factors of thermal light HBT

TIAN Jia, LIN Hai-long, GAO Lu

(School of Science, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The measured HBT value of thermal light can numerically represent the second order correlation of thermal light field. The effects of the transverse size of thermal light source and the optical path difference of the two light beams on the thermal light second order correlation had been experimentally studied. The results showed that both the value and the half-height width of HBT decreased with the increase of the transverse size of the thermal light source. The value of HBT decreased with the increase of the optical path difference between the two beams, but the half-height width increased.

Key words: thermal light field; second order correlation; resolution

[责任编辑:任德香]