

# 热光的高阶双缝干涉<sup>\*</sup>

汪凯戈<sup>†</sup> 熊俊

(北京师范大学物理系 北京市应用光学重点实验室 北京 100875)

**摘要** 干涉效应反映了光场的相干性,非相干光源中无序性会破坏干涉.然而对于高阶干涉来说这一看法并不成立.文章作者最近的理论和实验研究表明,横向传播方向无序的热光源可以实现高阶双缝干涉.尽管单个探测器的强度分布是均匀的,处于不同位置的两个探测器的联合强度关联却出现了干涉条纹.当两个探测器同步反向移动时,条纹间距减小为一阶干涉条纹的一半.实验结果同不久前报道的在自发参量下转换过程中产生的纠缠双光子对的双缝实验中所观察到的亚波长干涉效应十分类似.实验结果可以用多模热光场的二阶空间关联性质来解释.热光的高阶双缝干涉是著名的 Hanbury-Brown 和 Twiss 实验的空间干涉版本,因此也可称其为 Hanbury-Brown 和 Twiss 型双缝干涉.

**关键词** 量子光学,热光的双缝干涉,光场的高阶空间关联, Hanbury-Brown 和 Twiss 实验

## High-order double-slit interference of thermal light

WANG Kai-Ge<sup>†</sup> XIONG Jun

(Department of Physics, Applied Optics Beijing Area Major Laboratory, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract** From a common viewpoint, interference is related to the coherence of the optical field, and the disorder of a light source may destroy the interference fringe. But this is not true for high-order interference. Our recent theoretical and experimental studies show that a thermal-like light source that is random in transverse propagating directions can perform high-order double-slit interference. Though the intensity distribution measured by each detector is homogeneous, an interference fringe emerges in the joint-intensity measurement of two detectors placed at different positions. When the two detectors are scanned synchronously in opposite directions, the fringes show a half period for the first-order interference, exhibiting so-called subwavelength interference, similar to the results for entangled photon pairs generated in spontaneous parametric down-conversion. The experimental results can be explained with the second-order spatial correlation of a multimode thermal optical field. The present work can be regarded as a new version of the landmark Hanbury Brown and Twiss (HBT) experiment, and in this sense we may call it an HBT-type double-slit interference.

**Keywords** quantum optics, double-slit interference of thermal light, high-order spatial correlation of optical field, Hanbury-Brown and Twiss experiment

众所周知,当单色光以确定的方向照射双缝时,可以观察到干涉条纹.但如果单色光照射双缝的方向完全随机时,干涉条纹将消失,因为混乱无序的光线传播方向破坏了光的相干性,或者说不同传播方向所产生的干涉条纹的非相干叠加使得条纹消失.这是直观的物理常识,并且很容易用实验来证明.但“直观性”往往有可能妨碍人们进一步的思考,是否这样的非相干光源不可能产生任何干涉效应?

在回答这一问题之前,我们先简要回顾有关的研究和发展.由量子力学可知,当两个相同质量的粒子结合为一体时,联合体的德布罗意波长减为单粒子的一半.根据这一思想,1995年 Yamamoto 小

<sup>\*</sup> 国家重点基础研究发展计划(批准号 2001CB309310)和国家自然科学基金(批准号:10574015,10074008)资助项目  
2005-08-11 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: Wangkg@bnu.edu.cn

组提出多光子波包的光子德布罗意波( photonic de Broglie wave )的概念<sup>[1]</sup>, 当光束的波长为  $\lambda$  时, 光束中  $N$  个光子组成的波包作为整体所表现的德布罗意波长在多光子测量中为  $\lambda/N$ . 不久, 有两个实验组报道了他们采用 II 型晶体自发参量下转换产生的纠缠光子对为光源, 并照射到双缝上, 采用双光子符合测量可以观察到干涉条纹, 并且条纹间隔如同具有下转换光波长的  $\lambda/2$  的光源形成的普通干涉条纹一样<sup>[2,3]</sup>. 同时, 理论分析表明, 用双光子纠缠态通过分束器分为两束投射到观察屏上, 并采用双光子探测器测量, 也可以观察到条纹间隔减小一半的干涉图<sup>[4]</sup>. 由于波长  $\lambda$  的光产生出对应于  $\lambda/2$  的干涉图, 这一现象被称为亚波长干涉( sub-wavelength interference ). 精细的条纹可用于光刻技术, 而这一方法又是采用量子纠缠光源获得的, 因此又称为量子光刻( quantum lithography ).

既然要用于光刻, 双光子纠缠态的强度显然太弱, 进一步要考虑的问题是能否用含有大量光子数的强纠缠光束来产生亚波长干涉<sup>[5]</sup>. 我们小组首先研究了高增益自发参量下转换光的双缝干涉, 发现在含有大量光子的强纠缠光作用下, 亚波长干涉效应仍然存在. 虽然干涉条纹的可见度随光强递减, 但最低可维持在 20%( 或 33% )的水平<sup>[6,7]</sup>. 这表明了亚波长干涉的宏观量子特征. 与此同时, 我们还有一个意外的发现, 在 I 型晶体高增益的参量下转换光照射双缝后, 若将两个探测器放置在关于双缝中心的对称位置上进行强度关联测量, 也可以观察到亚波长干涉条纹, 但这一效应在低增益时消失. 后一种干涉是否也像前一种一样, 出自于光子纠缠呢? 如果是的话, 为什么在低增益时( 对应于双光子纠缠态 )反而消失呢? 也就是说, 后一效应只出现在宏观领域, 而没有微观对应. 经过进一步的理论分析, 我们提出后一干涉效应同量子纠缠无关, 而源于经典热关联<sup>[8]</sup>. 在 I 型晶体自发参量下转换过程中, 下转换光既包含了量子纠缠又包含了经典热关联, 因此两种亚波长干涉效应共存.

为了证明上述理论预言, 我们对热光的亚波长干涉现象进行了实验研究<sup>[9]</sup>. 实验装置如图 1 所示, 波长为 632.8nm 的激光照射在旋转的毛玻璃上, 形成空间波矢方向随机分布的类热光源. 经过双缝的光用 50/50 分束器分成两束, 分别用普通的光电探测器  $D_1$  和  $D_2$  探测. 这是为了实验操作的方便和模拟双光子吸收探测. 移动两个探测器, 将采集的数据经过数字示波器进行联合强度关联处理.

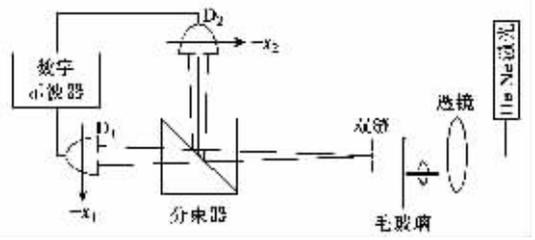


图 1 热光的高阶双缝干涉实验装置示意图

实验结果如图 2 至图 5 所示. 图 2 表示在每个探测器上测到的光强分布, 分别用  $\blacktriangledown$  和  $\bullet$  表示, 实线是理论模拟的结果. 为了比较, 图 2(a) 和 (b) 分别表示有毛玻璃形成的类热光和取走毛玻璃的激光照射双缝后所形成的斑图. 很明显, 这就是我们在本文开头提过的大家熟知的结果. 由理论曲线对热光实验结果的拟合, 可以决定本实验中类热光源波矢统计分布的带宽.

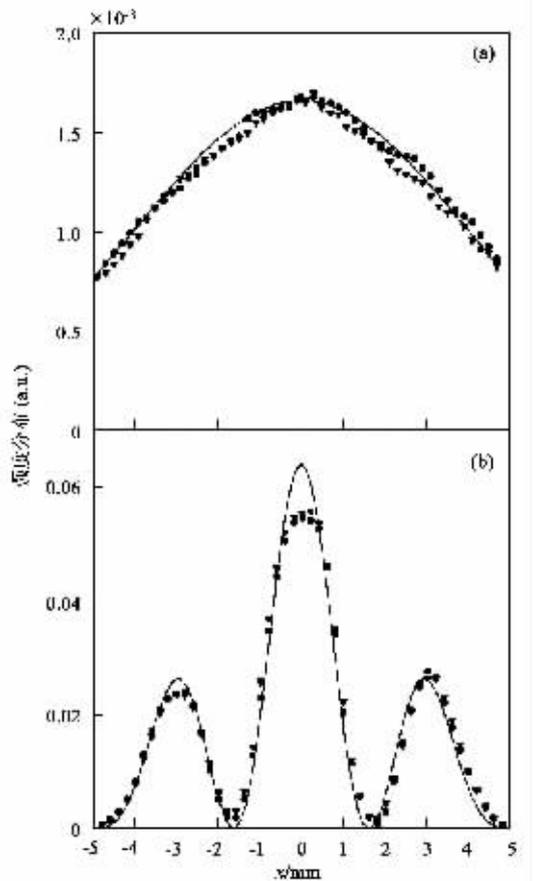


图 2 单个探测器观察的强度分布 (a) 类热光 (b) 激光. 黑点表示实验数据, 实线表示理论曲线

光场的一阶和二阶空间关联函数分别定义为

$$G^{(1)}(x_1, x_2) \propto E^*(x_1) E(x_2),$$

$$G^{(2)}(x_1, x_2) \propto E^*(x_1) E^*(x_2) E(x_1) E(x_2) \propto I(x_1) I(x_2).$$

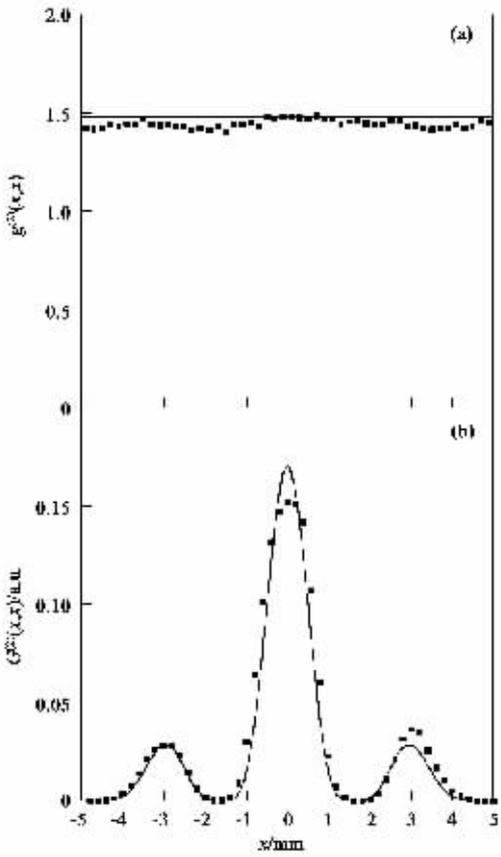


图3 两个探测器放在同一位置上的强度关联(反映双光子强度分布)(a)类热光(b)激光。■表示实验数据,实线为理论曲线

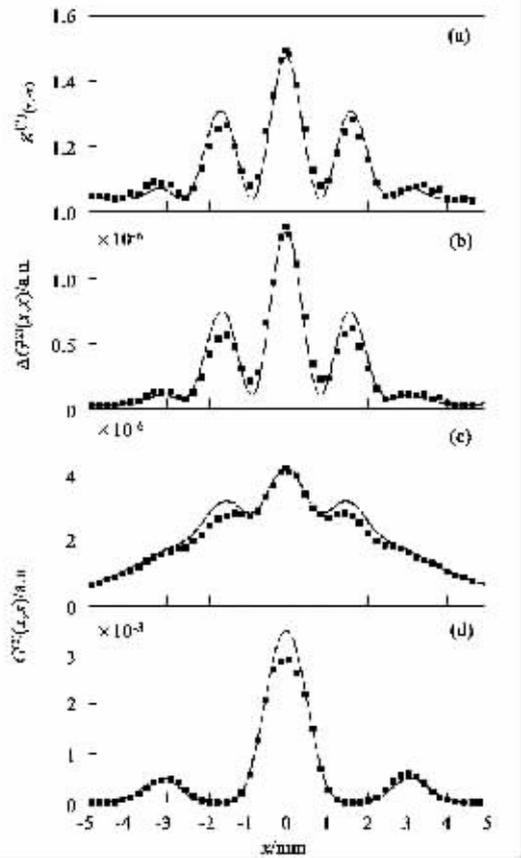


图4 两个探测器放在对称位置上同步扫描的联合强度关联分布(a)(b)(c)为类热光(d)为激光。■表示实验数据,实线为理论曲线

归一化的二阶空间关联函数为

$$g^{(2)}(x_1, x_2) = G^{(2)}(x_1, x_2) [G^{(1)}(x_1, x_1) G^{(1)}(x_2, x_2)]$$

当  $x_1 \neq x_2$  时  $G^{(2)}(x_1, x_2)$  和  $g^{(2)}(x_1, x_2)$  表示光场在  $x_1$  和  $x_2$  的强度关联, 当  $x_1 = x_2 = x$  时, 它表示采用双光子吸收探测器测量的双光子强度分布. 由于现在并没有双光子吸收探测器产品, 实验中都是采用分束器加两个单光子吸收探测器的方法来实现.

图3(a)和(b)分别表示热光和激光经过双缝后的双光子强度分布, 即  $x_1 = x_2 = x$  时的二阶空间关联函数, 其结果与图2没有实质性区别. 图3(a)是热光源的  $g^{(2)}(x, x)$ , 由于在归一化中消除了有限带宽的影响, 它的分布十分平坦. 对于理想的热光源  $g^{(2)}(x, x) \equiv 2$ , 而实验中的类热光源约为 1.5. 比较图3(b)和图2(b)可以看出, 激光的高阶干涉条纹比低阶更精细. 图3所示的结果依然没有违反我们的直觉观念: 混乱无序的非相干光源不能发生干涉. 而对于纠缠的双光子态光源, 用这种测量方式实验观察到的是亚波长干涉条纹<sup>[2,3]</sup>.

现在将两个探测器放在相对于双缝的一对对称

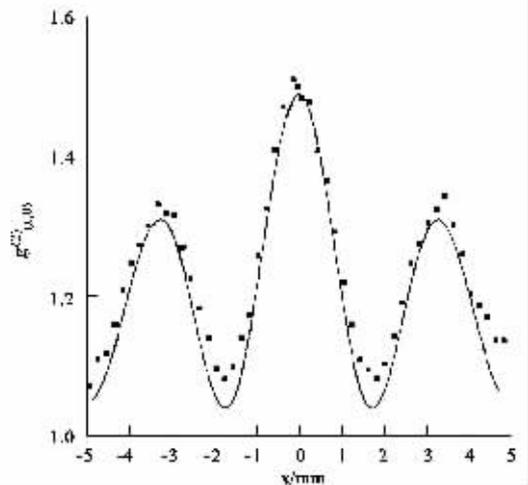


图5 对于热光源, 固定一个探测器同时扫描另一个探测器的联合强度关联分布(■表示实验数据, 实线为理论曲线)

位置  $x$  和  $-x$  (实际上对称中心可以取任意位置, 并不影响实验结果) 并作联合强度关联测量, 我们得到违反上述直觉的结果, 观察到了非相干光源的干涉条纹, 如图4(a),(b)和(c). 图中黑点表示实

验数据,实线为理论模拟的结果.与激光源的结果图4(d)相比较,热光干涉图的条纹间距减小了一半,如同纠缠双光子态的亚波长干涉图<sup>[2,3]</sup>.图4(b)显示的是减去了背景的二阶关联项,  $\Delta G^{(2)}(x, -x) = I(x)I(-x) - \langle I(x) \rangle \langle I(-x) \rangle$ ,称为强度关联涨落.由于实验中的类热光源的统计分布具有有限的带宽,  $g^{(2)}(x, -x)$ 和  $\Delta G^{(2)}(x, -x)$ 在扣除背景的影响后,干涉条纹显得更为清晰.

在图5中,我们固定一个探测器在对称中心(固定探测器也可以放在任意位置),扫描另一个探测器,作联合强度关联测量,同样可以观察到热光的双缝干涉图,但条纹间距与激光的干涉图相同.图2—图5表明理论和实验符合得很好.

在实验中,每个探测器测到的光强是完全无规则的涨落,而它们的乘积却呈现出干涉条纹.如果从干涉问题常识性的理解,实验结果令人困惑.首先,干涉的发生与光场的相位有关,而光强度本身不包含任何相位信息.其次,光源在传播方向上的混乱无序将会破坏干涉.实际上,这两个困惑正是问题的因果关系所在:光源的无序性赋予了光在强度关联中包含了场的相位信息.这一禀性可以用经典统计理论的基本定理来解释<sup>[8]</sup>.

我们在文献[8]中从理论上对经典热光源和量子纠缠源的双缝干涉效应进行了详细的比较和分析.在晶体自发参量下转换过程中产生的纠缠双光子态中,单个光子波矢的横向分量存在随机性,因此用单光子探测器观察经双缝的衍射光,不存在干涉条纹,即一阶干涉效应不存在.由于两个横向波矢反向的光子存在着纠缠,反映在场的空间二阶关联函数中,反向波矢之间存在关联,这是二阶干涉效应(亚波长干涉)的基本成因.对于多模热光场,无序的传播方向使得一阶干涉效应不会发生,但热光场的空间二阶关联函数中同方向横向波矢之间存在类似的关联.这些共性使得这两种截然不同的光源之间存在着相似性.反向波矢与同向波矢关联之间的区别反映在二阶干涉效应不同的观察方式上.此外,热光强度关联中包含相位信息的项和不含相位信息的项具有相同的大小,前者产生干涉条纹,后者产生背景.因此热光干涉条纹的最大可见度为33%,而纠缠光源则可以达到100%.

在同一时期,国际学术界就热光是否可以同纠缠光一样产生“鬼成像”和“鬼干涉”效应进行着热烈的讨论<sup>[10-17]</sup>.实际上,“鬼成像”和“鬼干涉”问题同“亚波长干涉”属于同一起因,都是光场高阶空

间关联特征的反映.晶体自发参量下转换过程中产生的具有显著量子特征的纠缠光场和普通光源产生的多模热光场,它们的高阶空间关联性质具有相似性,导致这两种光场都可以实现高阶成像和高阶干涉效应.当人们初次观察和认识这类高阶效应并对量子纠缠现象还具有神秘感时,赋予它们如“鬼成像”和“鬼干涉”这种非科学性的称谓.或许正是由于这种神秘感的推动,使得对于量子纠缠光源的高阶效应的认识先于经典热光源.这样的例子在物理学中并不多见.

“亚波长干涉”的名称源于对同一波长的光所观察到的高阶干涉条纹间距是低阶干涉的二分之一.比较实验结果图4和图5可以看出,同样在高阶干涉中,只有当两个探测器同时移动时,条纹间距才会减小.在描述条纹函数  $I(x_1 - x_2)$  的理论公式中可以看出,当两个探测器共同移动的距离之和等于一个探测器移动的距离时,函数有相同的值.如果我们仍以一个探测器的位置作为空间标度,就会观察到不同的干涉条纹间隔.同样的理解也适用于纠缠光源的高阶干涉效应.因此,“亚波长”的概念并不反映它的高阶干涉中的物理内涵.

当纠缠光的高阶干涉效应首次被发现时,人们寄希望于它能克服瑞利衍射极限,提高光刻的精度,给微电子技术的发展带来新的革命,即所谓“量子光刻”.实际上,条纹间距的减小可以用许多光学方式来实现,如某些非线性光学的方法<sup>[18,19]</sup>.不过最简单有效的方法是我们最近提出的用两个独立激光源产生高阶干涉的方法<sup>[20]</sup>,它既可以有任意强的功率,又可以达到100%的可见度.因此,提高光刻精度的关键问题并不在光源方面,而应解决多光子吸收探测材料的研制.

纠缠光源和热光源的高阶成像和干涉效应的真正意义还是在物理方面,使我们对各种光源的干涉本性有更进一步的认识.这两种光源与激光(相干态)源不同,它们是非相干光源,存在强烈的单光子强度涨落,不能发生普通的(一阶)干涉效应.关于纠缠光源的双缝实验和我们的实验表明,这两种光源都存在二阶干涉效应.对于纠缠光源,二阶干涉效应可以用两个光子的空间纠缠来解释.而对于热光源,它源于热统计规律高阶空间关联的本性<sup>[8]</sup>.尽管量子理论和经典统计理论完全可以解释这两类高阶双缝干涉效应,但我们却又面临一些问题需要深入思考.例如,既然非相干光源也可以发生高阶干涉,如何理解光的相干性?在光场的高阶

