

# 计数率和分辨时间对光场统计性质测量的影响<sup>\*</sup> ——单探测器直接测量的实验分析

李 园 李 刚 张玉驰 王晓勇 王军民 张天才<sup>†</sup>

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 太原 030006)

(2006 年 3 月 7 日收到, 2006 年 4 月 5 日收到修改稿)

利用工作在盖革( Geiger )模式下的单光子探测器( single-photon-counting module, SPCM )采取单个探测器直接对光子计数的方法, 对相干光场及热光场的光子数统计性质进行了测量和分析. 通过改变计数率, 调整分辨时间, 系统地研究了光场二阶相干度测量值受实验条件的影响. 结果表明, 在综合考虑系统中的各种因素对测量影响的情况下, 通过选择合适的测试条件, 可以利用单个单光子探测器直接探测的方法快速确定一个待测光场的二阶相干度. 实验表明在实测计数率为 109 kc/s, 分辨时间范围为  $2^8$  ns— $2^{12}$  ns 的条件下, 该系统能很好地揭示相干光场和热光场的光子统计性质.

关键词: 光子统计, 单光子探测器, 二阶相干度

PACC: 2970, 4250, 2940S

## 1. 引 言

对光场统计性质的深刻认识始于上个世纪 50 年代 Hanbury-Brown 和 Twiss 的光子相关实验( HBT 实验 )<sup>[1]</sup>以及 1963 年 Glauber 有关光的相干性理论<sup>[2]</sup>. 随后由 Mandel 等发展起来的光电探测理论( Mandel 公式 ), 使人们对光的本性有了进一步认识<sup>[3]</sup>. 随着光电倍增管的出现, 人们能够在光子水平上对光场的统计性质进行实验研究. 1965 年, Arecchi 通过光子计数的方法在实验上测得了高斯分布的光源与激光光源的光子统计性质<sup>[4]</sup>, 1976 年, Mandel 等人通过光子计数和关联实验方法测量了染料激光的光场统计性质<sup>[5]</sup>. 另外, 采用这种光子计数的方法能够对不同量子态的 Wigner 函数进行直接测量<sup>[6]</sup>, 与此同时这种方法在化学、生物荧光测量<sup>[7]</sup>等方面也有着广泛的应用.

现代技术的发展使单光子探测手段得到了快速发展. 目前, 效率很高的“数字化”单光子计数模块( single-photon-counting module, SPCM ), 包括信号提取

和电子放大部分)已经被广泛应用到科学研究和灵敏测量<sup>[8,9]</sup>, 它与传统的光电倍增管( PMT )相比, 具有许多优点, 如近红外波段量子效率较高, 暗计数低, 工作稳定性好等, 很多性能参数指标均优于 PMT, 因此 SPCM 成为现代量子光学和量子信息科学中的重要探测手段, 在单光子源的检测<sup>[10,11]</sup>, 激光雷达探测<sup>[12]</sup>等方面得到了广泛使用. 然而这种探测器不能在其死时间( dead time )内响应多个光子. 为了实现两(多)个光子的同时测量, 必须使用两(多)个单光子探测器, 并采用两(多)重符合计数的方法. 昂贵的单光子探测器和高速脉冲计数系统既增加了投入, 也使实验系统越来越庞大. 能否在一定的条件下, 使用单个探测器直接测量, 确定未知入射光场的二阶相干度? 这就是本文讨论的问题.

本文利用工作在盖革( Geiger )模式下的单光子探测器( SPCM ), 采用单个探测器直接测量的方法, 对相干光及热光场的统计性质进行了测量. 研究表明, 在实验能够控制的情况下, 影响测量结果的因素来自两个方面: 入射光强的变化( 直接影响计数率 ) 和测量的时间分辨率. 我们通过在不同条件下测量

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金( 批准号: 10434080, 10374062, 60578018 ), 山西省归国留学基金, 中俄协议项目、教育部科技创新工程重大项目培育资金( 批准号: 705010 ), 长江学者和创新团队发展计划基金( 批准号: JRT0516 )资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: tczhang@sxu.edu.cn

相干光和热光场的结果比较,说明能够通过单个单光子探测器简单准确地得到入射光场的二阶相干度.与 HBT 实验方案相比,这种方法简单快捷,甚至可以用在对一些非经典光场的测量上,比如压缩真空态和 EPR 纠缠态的测量.

## 2. 实 验

利用单个单光子探测器直接测量的实验装置图如图 1 所示.在实验中,相干光场由一台中心波长为 905 nm 的外腔反馈半导体激光器(ECDL)产生.实验中的热光场是将半导体激光器出射的光经过透镜聚焦在旋转的毛玻璃上得到的,是一种准热光场<sup>[13,14]</sup>(pseudo-thermal source)(如图 1 中的虚线框所示).透过旋转毛玻璃的光经过一小孔后再经过干涉滤光片和衰减后进入探测器.图中的衰减片用来改变入射光的强度,即改变探测器的计数率,同时为了防止光强太强损伤探测器,输入光经过充分衰减后进入探测器.在实验中加入了中心波长为 905 nm,带宽为 25 nm 的干涉滤波片以减少背景辐射对探测的影响.由于探测器的有效感光面积很小,直径约为 170  $\mu\text{m}$ ,在光路中加入一口径为 20 mm,焦距为 65 mm 的凸透镜以使光会聚到探测器上.

光子计数部分由单光子探测器和快速数据采集卡(P7888 FastCom 公司)组成.入射光子经过探测器

之后,以电脉冲的形式输出,输出信号最后由数据采集卡记录.计数时信号发生器产生的方波信号作为触发信号,记录在给定的时间内探测器的输出光子的计数个数.其中,数据采集卡的分辨时间可以作为光子计数的取样时间  $T$ ,在实验能够控制的范围内,其分辨时间能够从  $2^0 \text{ ns}$ — $2^{23} \text{ ns}$  变化.

测量过程中采集卡采集时间一定,取样时间越大取样次数越少.所以不同的取样时间(采集卡的分辨时间)有不同的取样次数.设取样时间  $T$  对应的取样次数为  $N$ ,则每一次取样测得  $m$  个光子计数的统计概率为

$$P(m) = \frac{N_m}{N}, \quad (1)$$

其中  $N_m$  为在一次数据采集过程中每一个取样时间内记录到  $m$  个脉冲的次数.在  $T$  内得到的统计平均脉冲数即平均光电脉冲计数为

$$m = \sum_{m=0}^{\infty} m P(m), \quad (2)$$

以及

$$m^2 = \sum_{m=0}^{\infty} m^2 P(m). \quad (3)$$

光场的二阶相干度为<sup>[15]</sup>

$$g^{(2)}(0) = \frac{m^2 - m}{m^2}. \quad (4)$$

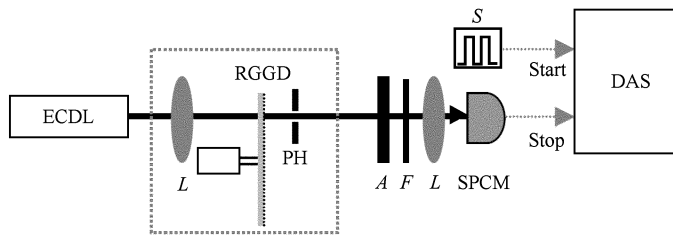


图 1 单探测器直接测量的实验装置图(ECDL 为外腔反馈半导体激光器; $L$  为凸透镜;RGGD 为旋转的毛玻璃片;PH 为小孔; $A$  为衰减片; $F$  为干涉滤波片; $S$  为信号发生器;SPCM 为单光子探测模块;DAS 为数据采集系统)

## 3. 实验结果与分析

我们分别在不同的计数率及时间分辨率条件下,测量了相干光场及热光场的二阶相干度.图 2 显示的是在计数率为 109 kc/s 时,按照上述方法得到的光场的二阶相干度随取样时间的变化.图中▲

和●分别为热光场与相干光场实验结果,实线和虚线分别对应热光场与相干光场的理论分析(见后)结果.从图中可以看出,随着分辨时间从  $2^0 \text{ ns}$  增加到  $2^{23} \text{ ns}$ ,二阶相干度经历了三个阶段的变化:在分辨时间较小时,相干光和热光场的二阶相干度均为 0,以后迅速增加到 1.0(2.0)左右,这对应它们的理论预期,随着时间的进一步增加,逐渐都趋于 1.

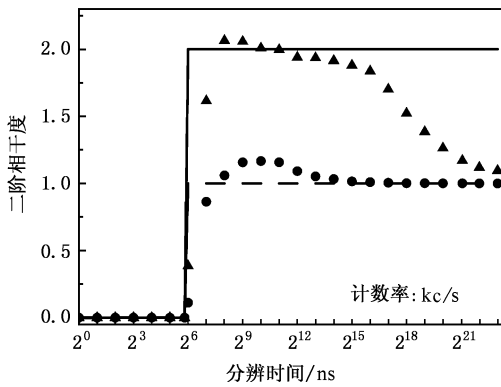


图2 计数率为 109 kc/s 时,热光场与相干光场的二阶相干度随取样时间  $T$  的变化(图中▲和●分别为热光场与相干光场实验测量结果,实线和虚线分别对应热光场与相干光场的理论分析结果)

这一结果可以得到解释:在分辨时间很短时,探测器在探测到一个光子后,由于死时间的存在(抑制电路要用一定时间使探测器恢复到原来状态),在这一期间,探测器对入射光子没有响应,因此如果数据采集卡的分辨时间,即取样时间  $T$ ,小于死时间,那么在  $T$  内就只能有 0 或 1 的计数,这样由(4)式不难得到二阶相干度为 0. 实验所用的探测器的死时间约为 56 ns,所以在分辨时间为 1 ns—32 ns 范围内,测量值均为 0. 反过来,这一结果提供了一种确定探测器死时间的方法.

随着分辨时间的增加,在  $2^8$  ns— $2^{12}$  ns (256 ns—4096 ns) 范围时,我们看到热光场和相干光场的二

阶相干度被区分开来,并且与理论值符合较好. 相干光的结果在 1 附近,其稍大于 1 的结果可能是由于 ECDL 的出射光并不是一个理想的相干光场;而热光场的结果为 2 左右. 但是,随着分辨时间的进一步增加,当取样时间远大于热光场的相干时间时,热光场可以被看成一种平稳光场,其光子数分布从热光场的玻色分布逐步过渡到相干光的泊松分布,因此其二阶相干度从 2 逐步下降到 1,同时,单光子探测器的修正<sup>[16]</sup>也会造成误差. 而相干光场的统计性质不受影响,受背景和相干光不纯导致的影响也被泊松分布的统计特性取代,二阶相干度从而很快达到 1.

上述分析结果也能从光子计数的概率分布随着分辨时间  $T$  的增大看出. 图 3 显示的是探测器计数率一定时热光场(a)—(d)和相干光场(e)—(h)的光子计数的概率分布随着  $T$  的增大而变化的情况. 其中直方图是实测光子计数的分布,而曲线是按照得到的平均光子数对应的热光场和相干光的理论分布结果. 我们看到,在  $T = 2^{12}$  ns 时,相干光和热光的理论与实验都符合较好,但随着  $T$  的进一步增加,热光场的实测分布逐渐远离理论分布,而相干光场却一直保持与理论的一致性.

在实验中,我们还进一步研究了二阶相干度测量值随计数率的关系. 图 4 显示的是在分辨时间为  $2^8$  ns 时,热光场和相干光场的二阶相干度随计数率的变化. 显然,在计数率较小时,理论与实验的偏差较大. 随着计数率的逐渐增大,光场二阶相干度

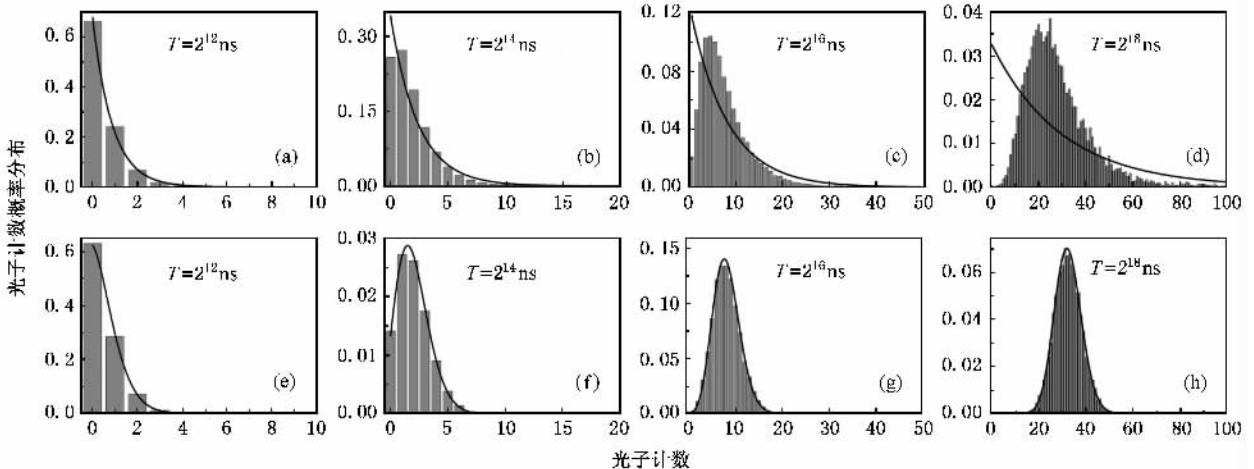


图3 热光场(a)—(d)与相干光(e)—(h)的光子计数概率分布随着  $T$  的增大的变化(图中直方图为实验测量结果,实线对应理论结果. 计数率为 109 kc/s)

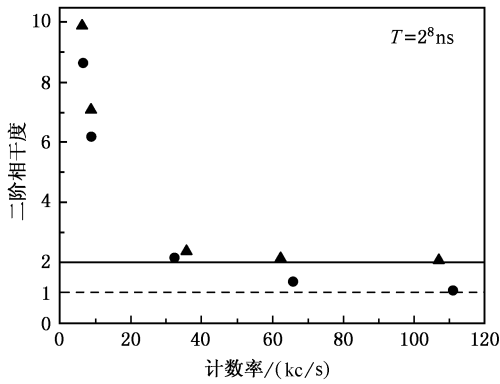


图4 当取样时间  $T = 2^8 \text{ ns}$  时,热光场与相干光场的二阶相干度随计数率的变化(图中▲和●分别为热光场与相干光场实验测量结果,实线为热光场理论值,虚线为相干光理论值)

趋于理论值.造成这一结果的原因为:在计数较低时,出现多光子的概率很低,取样次数  $N$  有限,从而不能正确地反映实际情况,所以探测器需要记录足够多的次数才能客观上反映入射光场的统计性质.但在计数率足够高的情况下,比如,本实验中,在  $T = 2^8 \text{ ns}$  时,计数率只要大于  $50 \text{ kc/s}$ ,就可以得到满

意的结果.

## 4. 结 论

我们用单个单光子探测器及数据采集卡组成的光子计数系统,在不同条件下测量了相干光场和热光场的光子计数分布.实验结果表明,在计数率不变的情况下,随着分辨时间  $T$  的增大,光场的二阶相干度变化有三个不同的阶段.当  $T$  固定时,随着入射光场的强度(即计数率)的增大,光场的二阶相干度逐渐趋于其实际值,并对此作了解释.该实验表明,通过综合考虑系统中的各种因素对测量的影响,选择合适的测试条件,利用单个单光子探测器和相应的数据采集系统,可以快速确定一个待测光场的二阶相干度.通过系统的测量和分析,在分辨时间为  $2^8 \text{ ns} - 2^{12} \text{ ns}$ ,计数率大于  $50 \text{ kc/s}$  的情况下,可以得到良好的结果.该方法可以应用到其他非经典光源的检测方面,比如对压缩真空态和单光子源的测量.

- [ 1 ] Brown H R, Twiss R Q 1956 *Nature* **177** 27
- [ 2 ] Glauber R J 1963 *Phys. Rev.* **130** 2529
- [ 3 ] Mandel L 1979 *Optics Lett.* **4** 205
- [ 4 ] Arecchi F T 1965 *Phys. Rev. Lett.* **15** 912
- [ 5 ] Abate J A, Kimble H J, Mandel L 1976 *Phys. Rev. A* **14** 788
- [ 6 ] Banaszek K, Radzewicz C, Wódkiewicz K 1996 *Phys. Rev. A* **60** 674
- [ 7 ] Braun D, Libchaber A 2002 *Opt. Lett.* **27** 1418
- [ 8 ] Chang J T, Wu L A 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1133 (in Chinese)  
[ 常君、吴令安 2003 物理学报 **52** 1133 ]
- [ 9 ] Kwiat P G, Steinberg A M, Chiao R Y, Eberhard P H, Petroff M D 1993 *Phys. Rev. A* **48** R 867
- [ 10 ] McKeever J, Baca A, Boozer A D, Buck J R, Kimble H J 2003 *Nature* **425** 268
- [ 11 ] Wang X B, Huang T, Shao J H, Jiang Y Q, Xiao L T, Jia S T 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 617 (in Chinese)[ 王晓波、黄涛、邵军虎、降雨强、肖连团、贾锁堂 2005 物理学报 **54** 617 ]
- [ 12 ] Fouche D G 2003 *Appl. Opt.* **42** 5388
- [ 13 ] Goodman J W 1992 *Statistical Optics* (Beijing: Science Press) p139 (in Chinese)[ J. W. 顾得门 1992 统计光学(北京:科学出版社) p139 ]
- [ 14 ] Basano L, Ottonello P 1982 *Am. J. Phys.* **50** 996
- [ 15 ] Loudon R 1992 *The Quantum Theory of Light* (Beijing: Higher Education Press) p256 (in Chinese)[ R. Loudon 1992 光的量子理论(北京:高等教育出版社)第256页 ]
- [ 16 ] Li G, Zhang T C, Li Y, Wang J M 2005 *Phys. Rev. A* **71** 023807



# The effect of counting rate and time resolution on the measured photon statistical properties<sup>\*</sup> —— Experimental study of direct measurement via SPCM

Li Yuan Li Gang Zhang Yu-Chi Wang Xiao-Yong Wang Jun-Min Zhang Tian-Cai<sup>†</sup>

( State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices , Institute of Opto-Electronics , Shanxi University , Taiyuan 030006 , China )

( Received 7 March 2006 ; revised manuscript received 5 April 2006 )

## Abstract

Photon statistical properties of coherent field and thermal field are experimentally studied by means of direct photon counting using only one single-photon-counting module ( SPCM ) operating in Geiger mode. The second-order degree of coherence as affected by photon counting rate and selected resolution time is investigated systematically. By taking into account all the experimental factors which can influence the  $g^{(2)}$ , the second-order degree of coherence of an unknown optical field can be determined quickly and simply via single SPCM when choosing proper detecting conditions. In our experiment , when the counting rate is about 109 kc/s and the resolution time varies from  $2^8$  ns to  $2^{12}$  ns , the measured results can reliably reflect the different second-order degree of coherence of coherent and thermal fields.

**Keywords :** photon statistics , single-photon-counting module , second-order degree of coherence

**PACC :** 2970 , 4250 , 2940S

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos : 10434080 , 10374062 , 60578018 ) , NSFC/RFBR joint project , Research Funds for Returned Scholar Abroad from Shanxi Province and also supported by the CFKSTII ( Grant No. 705010 ) and PCSIRT from Ministry of Education of China ( Grant No. IRT0516 ).

<sup>†</sup> E-mail : tczhang@sxu.edu.cn