量子光学学报 20(1)：1-7，2014
Acta Sinica Quantum Optica

文章编号：1007-6654(2014)01-0001-07[2]

不同光场二阶相干度的实验研究

习文婷， 何军， 刘贝， 王杰英， 王军民†

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

摘要：基于 Hanbury Brown-Twiss（HBT）实验，我们借助于两个单光子计数模块，一个 50/50 分束器和一个快速计数卡（FastCom-P7888）研究了不同光场的二阶相干度。我们首先制备了脉冲相干光，连续相干光以及单原子发出的单光子源，并测量这几种不同光场的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$。我们通过测量俘获在磁光阱（MOT）和远失谐偶极阱（FORT）中的单原子在近共振连续激光激发下所辐射的荧光的二阶相干度，分别得到了 $g^{(2)}(\tau=0)=0.08$ 和 $g^{(2)}(\tau=0)=0.09$，借助于实验中产生的脉冲光与单原子，接下来我们将进行触发式单光子源的实验研究。

关键词：二阶相干度； 脉冲相干光； 单原子； 光学偶极力阱

中图分类号：O431.2；O562 **文献标识码**：A **DOI**：10.3788/ASQO20142001.0001

0 引言

在关于光场的经典理论中，光场的相干性主要表现为时间相干性和空间相干性，比如 Mach-Zehnder (M-Z)干涉实验和杨氏双缝干涉实验。但是，上述的实验所表现出的相干性是不同时空点光场的相位关联程度，描述的是光场的一阶相干性[1]，它不能描述不同时空点光场的强度关联特性，因此需要进一步研究光场的高阶相干性，如光场的量子高阶相干性[2]，光子的反群聚效应[3]。基于数字化的单光子探测技术能探测不同光场的高阶量子特性[4]，这在量子光学和量子信息过程中起到了重要的作用[5]。对光场高阶相干性的研究起源于 20 世纪 50 年代的 Hanbury Brown 和 Twiss 强度关联(HBT)实验[6]和 Glauber 的光场相干性理论[7]。随后 Mandel 等发展的光电探测理论[8]，使人们对光场的本质有了进一步的认识。随着光子计数技术的发展，人们能够在单光子水平上对光场的光子统计性质进行实验测量。多个小组分别测得了单原子、单分子等所发出荧光的反群聚效应[9-12]。

由两个单光子探测模块(SPCMs)组成的 HBT 实验系统已经成为测量光场的非经典效应和评估单光子源质量的一个重要的手段[4,13]。利用 HBT 实验，可以分析反映光场光子统计特性的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$。$g^{(2)}(\tau)$测量的是光场延时 τ 之后的强度关联特性，当一个光场的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)>1$ 时，光子呈现群聚特性，因为在被延时的很短时间之内，两个或者多个光子可能会同时出现。然而，如果光子是反群聚的，即$g^{(2)}(\tau)<1$，则光子随时间的分布是趋向于分离的，即在延时的时间之内不会有两个光子同时出现的概率。

本文中，我们首先介绍 HBT 的实验装置，脉冲相干光产生及单原子产生的实验装置，同时分析不

[2] **收稿日期**：2013-10-17

基金项目：国家自然科学基金项目(11274213；61205215；61227902)；国家重大科学研究计划课题(2012CB921601)；国家自然科学基金创新群体项目(61121064)；山西省回国留学人员科研经费(2012-015)；山西省太原市科技明星专项(12024707)

作者简介：习文婷(1983—)，山东潍坊人，光学专业博士研究生。

† **通讯作者**：王军民，E-mail：wwjjmm@sxu.edu.cn

同光场的二阶相干度，然后通过 HBT 实验测量并验证了几种不同光场的二阶相干度。通过实验上对几种光场的 HBT 实验研究，我们验证了光场的性质，并且为下一步脉冲光激发单原子得到触发式单光子源奠定了理论和实验基础。

1 实验装置

1.1 HBT 实验装置

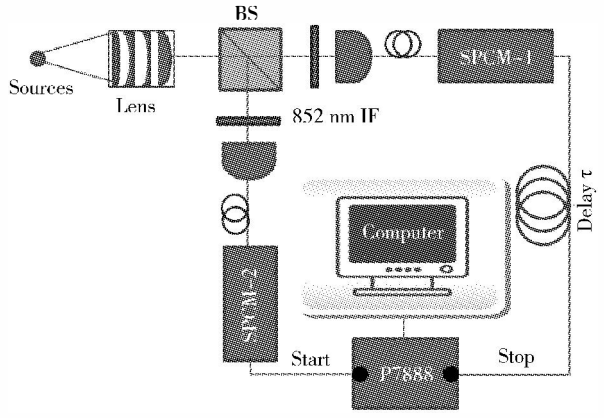

Fig. 1 The setup for the HBT experiment. BS: beam splitter; 852 nm IF: 852 nm narrow-band interference filter. SPCM: single-photon-counting module; P7888: two-input multiple-event time digitizers.

图 1 HBT 实验装置。BS：分束片；852 nm IF：852 纳米窄带干涉滤光片。SPCM：单光子计数模块；P7888：两通道输入多事件时间数字转换器。

HBT 实验装置如图 1 所示，单原子(Sources)发出的光子经真空气室的窗片及聚焦透镜(Lens)、光纤等，最终只有 6‰的光子到达单光子探测器(SPCM)。透镜组的等效焦距为 36 mm，数值孔径(NA)为 0.29，所占 4π 立体角的比例：

$$\frac{\Omega}{4\pi}=\frac{1}{2}(1-\sqrt{1-(NA)^2})=2.1\%. \quad (1)$$

在 HBT 实验中，50/50 分束器把入射光子分为两部分，分别经 852 nm 窄带滤波片和多模光纤进入到两个单光子探测器(SPCM)中，一路做 start，另外一路经过延时做 stop。两路信号中 stop 一路加延时器(Delay box)，把零点延时到 188 ns 的位置。若是理想的单光子源，则单光子只能到达其中的一个单光子探测器，因此 start 与 stop 两路信号在延时 188 ns 处符合计数为零。与只用一个单光子探测器相比，在 HBT 实验中用两个或者更多单光子探测器的最主要优点是可以避免探测器死时间的限制，并且可以增大强度范围。$g^{(2)}(\tau)$受限于光子计数率[14]，因此我们用快速计数卡 P7888(FastCom 公司)来进行光子计数。两个信号分别被送到 P7888 卡的 start 与 stop 端口，计数的结果被一台工控机处理，通过归一化，即可得到不同光场的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$。

1.2 脉冲相干光产生的实验装置

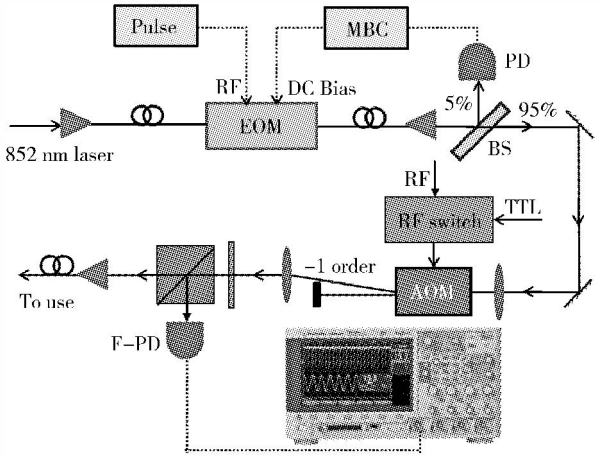

Fig. 2 The experiment setup for the generation of the optical pulse. EOM: Electro-Optic Amplitude Modulator; Pulse: the electrical pulses generator; MBC: modulator bias controller; PD: photo-diode; F-PD: fast photo-diode; RF: radio frequency signal. OSC: oscilloscope.

图 2 脉冲相干光产生的实验装置。EOM：电光振幅调制器；Pulse：电脉冲信号发生器；MBC：偏置控制器；PD：光电探测器；F-PD：快速光电探测器；RF：射频信号. OSC：示波器。

如图 2 所示，我们用振幅型电光调制器 EOM(Eospace 公司，型号 AZ-OK5-10-PFA-PFA-850-UL)来产生脉冲相干光[15]。EOM 的主要构造是 M-Z 干涉仪。我们把 EOM 的偏置通过反馈锁定系统(feedback system)调到零点。调节的方法是用一个 5/95 的分束器(BS)分出～5%的光经探测器(PD)探测后转变为电信号反馈控制偏置控制器(MBC)的直流偏置电压(DC Bias)端口，使得 EOM 调到消光点。然后在 EOM 的 RF 端口上加上电脉冲信号。通过 TTL 信号的高低电平来控制射频开关(RF Switch)的通断从而控制经过 AOM 的脉冲光的开启与关断。我们通过一个快速探测器(New Focus 1554-B，DC-12GHz)和示

波器(Agilent DS090254A，2.5GHz)来测量脉冲信号。

1.3　单原子实验装置

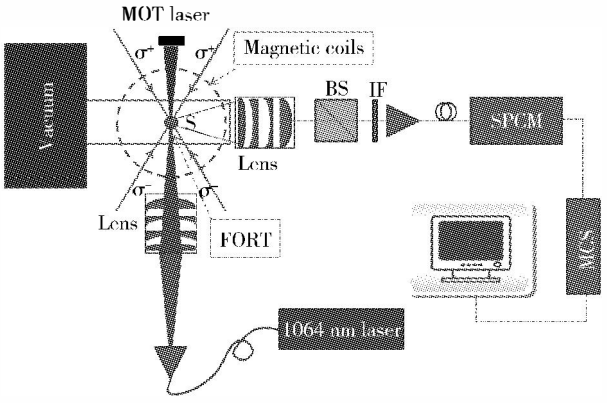

Fig. 3　The setup for the generation and detection of single atoms. MOT laser: cooling and repumping lasers; lens: lens assembly; BS: beam splitter; SPCM: single-photon-counting module; MCS: Multi-Channel Scaler card; FORT: far-off-resonance optical dipole trap generated by 1064nm Nd:YVO_4 laser.

图 3　单原子产生与探测装置。MOT laser：冷却光与反抽运光；lens：透镜组；BS：分束器；SPCM：单光子探测模块；MCS：多通道脉冲计数卡；FORT：1 064 nm Nd：YVO_4 激光束强聚焦后形成的远失谐光学偶极阱。

我们通过磁光阱(MOT)和远失谐光学偶极阱(FORT)长时间俘获单原子。MOT 的光场(MOT laser)是由 $\sigma^+-\sigma^-$ 偏振两两对射的三对冷却光与反抽运光构成，水平面内的两对冷却光的夹角为 60 度，竖直方向的冷却光垂直于水平面内的两束光。因为冷却光会把铯原子抽运到 $F_g=3$ 态，所以需要反抽运光(～10% 的冷却光强)把原子反抽运回 $F_g=4$态，MOT 磁场(Magnetic coils)是由一对水冷的可产生大磁场梯度的反向亥姆霍兹线圈构成，通过提高磁场梯度来降低磁光阱的原子装载率，实验中典型的磁场梯度约为270 Gauss/cm[16-17]。真空气室的真空度约为 2×10^{-10} Torr。单原子俘获在 MOT 的六束冷却光与反抽运光和磁场零点的交汇区。通过精确地调节 FORT 的三维平移台的位置，我们可以实现 FORT 中单原子的高效装载与单原子在 MOT 与 FORT 之间接近 100% 的转移。

单原子发出的荧光信号由收集系统收集(具体描述在图 1 中)，并由单光子探测器探测。激光诱导原子发出的荧光信号经多通道脉冲计数卡(MCS)计数并积累，由计算机进行计数统计。图 4 中，我们通过改变竖直方向与水平方向冷却光的比例(竖直方向光强是水平方向光强的 2－3 倍)，反抽运光的光强，以及通过认真清洁真空玻璃气室的各光学表面，我们把背景计数降到 15 counts/50 ms，光子计数的台阶 C_0，C_1 和 C_2 分别表示 MOT 中没有原子，有一个原子和两个原子的情况。从图中可以看出，我们在 MOT 中得到的单原子荧光光子计数信号有很高的信噪比。

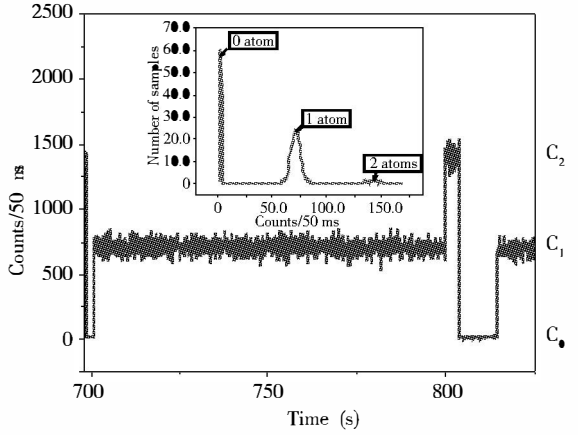

Fig. 4　Typical LIF photon-counting signals of individual Cs atoms trapped in the large-magnetic-gradient MOT under optimized condition. The LIF photon-counting levels, C_0, C_1 and C_2, indicate no atom, one atom and two atoms are trapped in MOT, respectively. The inset is the frequency count signal.

图 4　俘获在大磁场梯度磁光阱中的铯原子典型的激光诱导荧光信号。光子计数的台阶 C_0，C_1 和 C_2 分别表示 MOT 中没有原子，有一个原子和两个原子的情况。插图是对光子计数率统计的结果。

2　$g^{(2)}(\tau)$测量原理及 HBT 实验结果

在这一部分中，我们从理论角度介绍不同光场的光子统计特性，并通过实验分析不同光场的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$。

二阶相干度定义为：

$$g^{(2)}(\tau)=\frac{\langle n_1(t)n_2(t+\tau)\rangle}{\langle n(t)\rangle^2}, \qquad (2)$$

如果 $\tau=0$ 处的二阶相干度 $g^{(2)}(0)$在如下的范围内：$1\geqslant g^{(2)}(0)\geqslant 0$，且 $g^{(2)}(0)<g^{(2)}(\tau)$，则光子是

反群聚的(anti-bunching),这是一种典型的量子效应,这时光子随时间的分布趋于分离。如果 $g^{(2)}(0)>1$,且 $g^{(2)}(0)>g^{(2)}(\tau)$,那么光子则是群聚(bunching)的,光子在时间上的分布趋于成堆出现。

对于热光场[1,14]:

$$g^{(2)}(\tau)=1+|g^{(1)}(\tau)|^2, \tag{3}$$

因此 $1\leqslant g^{(2)}(\tau)\leqslant 2$,并且当 $g^{(2)}(0)>1$ 且 $g^{(2)}(0)>g^{(2)}(\tau)$ 时,光子是群聚的。

2.1 脉冲相干光和连续相干光的 HBT 实验结果

利用 1.2 节所述的实验装置,我们可产生重复频率与脉宽均可调节的脉冲激光,典型的实验结果如图 5(a)及其插图所示,我们把重复频率固定在 10 MHz,脉宽从 1 ns 变化到 6 ns。在 HBT 实验中,我们利用产生的重复频率为 $\nu_f=10$ MHz,$T_0=100$ ns,脉宽为 $\tau_0=5$ ns 的方波脉冲相干光(图 5(a)),测量了脉冲光的符合计数,实验结果如图 5(b) 所示。脉冲相干光符合计数结果为一系列三角形尖峰。内插图中符合计数结果为一条直线,$g^{(2)}(\tau)=1$,是连续相干光的二阶相干度。

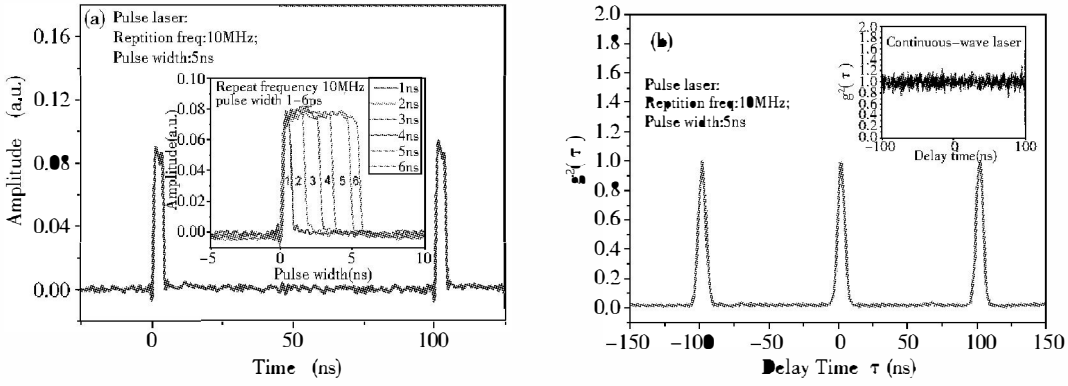

Fig. 5 (a) The generated pulse laser with the pulse width of 5ns. The inset is the generated pulse laser with the puls width from 1ns to 6ns. (b) The coincidence counting result of pulse laser measured in the HBT experiment after normalizing, the inset is the coincidence counting result of the continuous-wave laser.

图 5 (a)产生的 5 ns 的脉冲光,插图是从 1 到 6 ns 的脉冲光。(b)脉冲光 HBT 实验中,符合计数归一化为二阶相干度后的实验结果,插图是连续相干光符合计数结果。

脉冲相干光可以被看作矩形脉冲(图 5(a)),当 $\tau_0=fT_0$,脉冲光的光强为 I_0 时,脉冲光的平均光强 $I=fI_0$,因此二阶相干度可以定义为以下形式:

$$g^{(2)}(\tau)=\frac{\langle \bar{I}(t)\bar{I}(t+\tau)\rangle}{\bar{I}^2}, \tag{4}$$

当 $\tau=0$ 时,

$$g^{(2)}(0)=\frac{1}{f}, \tag{5}$$

当 $\tau\neq 0$ 时,并且脉冲长度 $\tau_0\leqslant T_0/2$ 时,二阶相干度可以定义为以下形式(其中 f 为所产生脉冲激光的宽度 τ_0 与周期 T_0 的比值,m 为整数):

$$g^{(2)}(\tau)=\begin{cases}\dfrac{\tau}{T_0}+f-m \\ \dfrac{}{f^2}\cdots mT_0-(T_0-\tau_0)\leqslant\tau\leqslant mT_0\\ \dfrac{f-\dfrac{\tau}{T_0}+m}{f^2}\cdots mT_0\leqslant\tau\leqslant mT_0+(T_0-\tau_0)\\ \dfrac{2f-1}{f^2}\cdots mT_0+(T_0-\tau_0)\leqslant\tau\leqslant mT_0+\tau_0\end{cases}, \tag{6}$$

由上式可知,脉冲相干光的二阶相干度为三角波形式,正如图 5(b)中的脉冲光 HBT 测量结果所示。根据公式(6),当 $f=1$ 时,为连续相干光,可以得出 $g^{(2)}(\tau)=1$,如图 5(b)中的内插图 HBT 测量

结果所示，连续相干光的二阶相干度是恒为 1 的一条直线。

2.2　单原子所发出单光子的 HBT 实验结果

利用 1.3 节中俘获在 MOT 与 FORT 中的单原子和一个计数器来反馈控制磁场梯度的大小使其长时间保持单原子，并且控制 SPCM 门控开关使得只有单原子时 SPCM 开启。图 7(a)和(b)为用连续冷却光照射 MOT 与 FORT 的单原子然后经 HBT 实验得到的单原子发出单光子的二阶相干度测量结果。从图中可以看出，在冷却光相对于铯原子 $6S_{1/2}$ ($F_g=4$) − $6P_{3/2}$ ($F_e=5$) 失谐量为 −5 MHz，光强 105 μW，反抽运光 56 μW 的条件下，MOT 中单原子被连续冷却光激发下发出单光子的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau=0)=0.09$；激发 FORT 中单原子的连续冷却光、反抽运光与 MOT 中的相同，由于偶极阱中单原子 $6S_{1/2}$ ($F_g=4$) − $6P_{3/2}$ ($F_e=5$) 之间发生 AC Stark 频移，在阱深 1.5 mK 时，AC Stark 频移约 −20 MHz。结果中还没有减去背景和暗计数对二阶相干度的影响，说明我们这套系统可作为很好的单光子源。

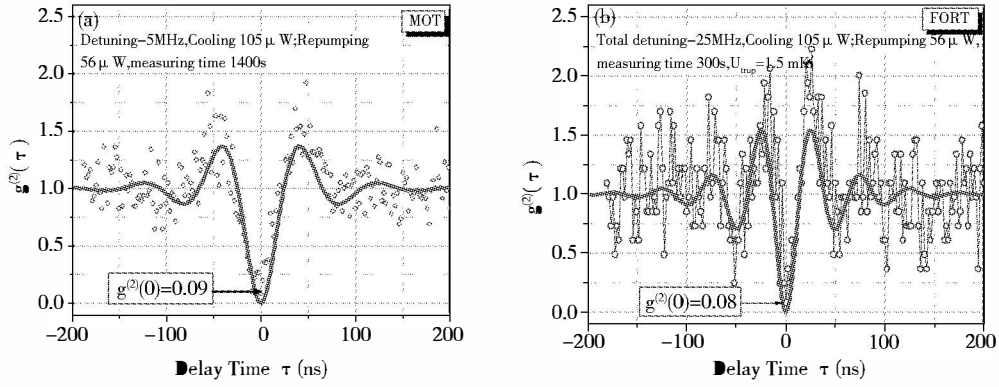

Fig. 7　(a) The HBT experimental result of single atom trapped in the MOT. (b) The HBT experimental result of single atom trapped in the FORT.

图 7　(a)MOT 中单原子的 HBT 实验结果。(b) FORT 中单原子的 HBT 实验结果。

图中实线是我们对实验数据采用文献[18−19]的二能级模型进行理论拟合的结果，拟合表达式为：

$$g^{(2)}(\tau)=1-e^{-3\Gamma\tau/4}\left[\cos(\Omega_R\tau)+\frac{3\Gamma}{4\Omega_R}\sin(\Omega_R\tau)\right], \tag{7}$$

其中，$\Omega_R^2=\Omega_0^2+\Delta^2-(\Gamma/4)^2$，$\Omega_0$ 为共振 Rabi 频率，$\Gamma=2\pi\times5.2$ MHz 为铯原子 $F_e=5-F_g=4$ 跃迁的自然线宽，Δ 为激发光角频率相对于原子跃迁的失谐量。对于强的驱动场，$\Omega_R/\Gamma>1$，$g^{(2)}(\tau)$ 所表现出的是阻尼振荡(如图 7 所示)，阻尼振荡振幅的衰减快慢是由激发光场的强弱所决定。

2.3　讨论

利用 1.2 节中产生的重复频率可调的脉冲光与 1.3 节中产生的单原子，我们可以进行触发式单光子源的研究[9]。首先脉冲光的脉宽要远远小于铯原子 $6P_{3/2}|F_e=5,m_F=+5\rangle$ 态自发辐射的寿命 30.6 ns，这样可以避免原子在单个脉冲周期内被多次激发。另外光脉冲信号的傅里叶谱宽不能大于铯原子 $6P_{3/2}$ ($F_e=4$) 和 ($F_e=5$) 能级之间的间隔(251 MHz)，否则铯原子将有可能被激发至 $6P_{3/2}$ ($F_e=4$) 态，导致单个光子的中心频率不同，这将严重影响单光子的不可区分度。根据上面的要求，实验中选定脉冲光的脉宽为4～6 ns的方波脉冲。同时脉冲的周期要大于铯原子 $6P_{3/2}|F_e=5,m_F=+5\rangle$ 态的自发辐射寿命(30.6 ns)，使原子在被下一个脉冲激发之前，自发辐射跃迁回基态。所以实验上选择脉冲的重复频率<10MHz, 相邻方波脉冲间的间隔>100ns。

3　总结

综上所述，我们在实验中制备了脉冲相干光和基于单原子激发的单光子源，并通过 HBT 实验分别测量了上述不同光场的二阶相干度。尤其是我们通过控制单光子探测器的门控开关，只有当 MOT

与FORT中是单原子时，开启单光子探测器进行HBT实验测量，结合实验上已可制备FORT中的单原子与纳秒级的脉冲相干光，我们拟开展触发式单光子源的实验研究。

参考文献：

[1] CHRISTOPHER G, PETER K. Introductory Quantum Optics (Cambridge) [M]. 2005: 127.

[2] ARECCHI F T, BERNÉ A, BULAMACCHI P. High-Order Fluctuations in a Single-Mode Laser Field [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **16**: 32.

[3] KIMBLE H J, DAGENAIS M, MANDEL L. Photon Antibunching in Resonance Fluorescence [J]. *Phys Rev Lett*, 1977, **39**: 691.

[4] MCKEEVER J, BOCA A, BOOZER A D, *et al*. Experimental realization of a one-atom laser in the regime of strong coupling [J]. *Nature*, 2003, **425**: 268.

[5] NEERGAARD-NIELSEN J S, NIELSEN B M, HETTICH C, *et al*. Generation of a Superposition of Odd Photon Number States for Quantum Information Networks [J]. *Phys Rev Lett*, 2006, **97**: 083604.

[6] BROWN H R, TWISS R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light [J]. *Nature*, 1956, **177**: 27.

[7] GLAUBER R J. The quantum theory of optical coherence [J]. *Phys Rev*, 1963, **130**: 2529.

[8] MANDEL L. Sub-Poissonian photon statistics in resonance fluorescence [J]. *Opt Lett*, 1979, **4**: 205.

[9] DARQUIE B, JONES M P A, DINGIAN J, *et al*. Controlled Single-Photon Emission from a Single Trapped Two-Level Atom [J]. *Science*, 2005, **309**: 454.

[10] KELLER M, LANGE B, HAYASAKA K, *et al*. Continuous generation of single photons with controlled waveform in an ion-trap cavity system [J]. *Nature*, 2004, **431**: 1075.

[11] KUHN A, HENNRICH M, REMPE G. Deterministic single-photon source for distributed quantum networking [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, **89**: 067901.

[12] MICHLER P, KIRAZ A, BECHER C, *et al*. A Quantum Dot Single-Photon Turnstile Device [J]. *Science*, 2000, **290**: 2282.

[13] LI G, ZHANG T C, LI Y, *et al*. Photon statistics of light fields based on single-photon-counting modules [J]. *Phys Rev A*, 2005, **71**: 023807.

[14] LI Y, LI G, ZHANG Y C, *et al*. Effects of counting rate and resolution time on a measurement of the intensity correlation function [J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**: 013829.

[15] DINGIAN J, DARQIÉ B, BEUGNON J, *et al*. A frequency-doubled laser system producing ns pulses for rubidium manipulation [J]. *Appl Phys B*, 2006, **82**: 47.

[16] HAUBRICH D, HOPE A, MESCHEDE D. A simple model for optical capture of atoms in strong magnetic quadruple fields [J]. *Opt Commun*, 1993, **102**: 225.

[17] HE J, WANG J, YANG B D, *et al*. Single atoms transferring between a magneto-optical trap and a far-off-resonance optical dipole trap [J]. *Chinese Phys B*, 2009, **18**: 3404.

[18] WEBER M, VOLZ J, SAUCKE K. Analysis of a single-atom dipole trap [J]. *Phys Rev A*, 2006, **73**: 043406.

[19] CARMICHAEL H J, WALLS D F. A quantum-mechanical master equation treatment of the dynamical stark effect [J]. *J Phys B*, 1976, **9**: 1199.

Experimental Investigation of the Second-order Degree of Coherence for the Various Light Fields

DIAO Wen-ting, HE Jun, LIU Bei, WANG Jie-ying, WANG Jun-min

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

Abstract: We investigated the properties of various light fields based on the Hanbury-Brown-Twiss (HBT) experiment consisted by two single-photon-counting modules (SPCMs), one 50/50 beam splitter and the Fast-Com P7888 card. Having experimentally investigated the second-order degree of coherence $g^2(\tau)$ for the continuous-wave and the pulse lasers and the single-photon source generated by single atom, we confirmed the experiment results by theoretical analysis. Specially, we have achieved a high quality of single-photon source based on single atom trapped in the magnetic-optical trap and the far-off-resonance trap with $g^{(2)}(\tau=0)=0.09$ and $g^{(2)}(\tau=0)=0.08$, respectively. Using the pulse laser and the single atom, we can perform the triggered single photon experiment.

Key words: the second order degree of coherence; coherent pulse laser; single atoms; optical diople trap