

基于冷原子系综自发 Raman 散射 产生关联光子的实验研究

葛伟,田龙,原浩翔,李淑静*,王海

(山西大学 光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西 太原 030006;
山西大学 极端光学协同创新中心,山西 太原 030006)

摘要:利用自发拉曼散射过程,在 ^{87}Rb 冷原子系综中进行了关联光子对的制备。实验结果表明:存储时间为 $1\ \mu\text{s}$ 时,关联光子的二阶关联函数 $g^{(2)}$ 可达到84,表明光子对之间存在着很强的非经典关联。另外,在激发率为1.5%时,对 anti-Stokes 光子的宣布式单光子统计特性 α 进行了测量,当存储时间小于 $24\ \mu\text{s}$ 时, α 保持在0.23附近。该工作为冷原子系综中纠缠光子对的产生提供了实验基础。

关键词:自发拉曼散射;冷原子系综;关联光子;光子统计特性

中图分类号:O431 文献标志码:A 文章编号:0253-2395(2016)04-0601-05

Experimental Research for Generation of Correlation Photons based on Spontaneous Raman Scattering Process in Cold Atomic Ensemble

GE Wei, TIAN Long, YUAN Haoxiang, LI Shujing*, WANG Hai

(The state key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,
Institute of Opto Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: The generation of correlation photon pairs was implemented in cold ^{87}Rb ensemble based on Spontaneous Raman scattering process, which demonstrates that the second order intensity cross-correlation functions $g^{(2)}$ can be up to 84 on condition that the storage time τ is equal to $1\ \mu\text{s}$, indicating the strong non-classic correlation features among photon pairs. Besides, based on the excitation rate of 1.5%, the measurement of α , heralded single photon statistical property of anti-Stokes photons, was carried out, which shows that the value of α is always near to 0.23 while the storage time increased from 0 to $24\ \mu\text{s}$. It is believed that this work will pave the way for the generation of entanglement photons in atomic ensemble.

Key words: spontaneous raman scattering; cold atom ensemble; correlation photon; photon statistical property

0 引言

非经典光源是量子信息的核心资源,在量子通讯、量子计算中发挥着重要作用^[1-6]。过去实验上广泛采用自发参量下转换产生关联光子,但是产生的光子线宽一般在 THz 量级,不能与原子记忆线宽相匹配

收稿日期:2016-07-25;修回日期:2016-09-05

基金项目:973 计划(2010CB923103);国家自然科学基金(11475109;11274211;60821004)

作者简介:葛伟(1989-),男,山西阳泉人,硕士研究生,主要从事量子光学和光与原子相互作用方面的研究。E-mail: 958755428@qq.com

* 通信作者:李淑静(LI Shujing),E-mail:lishujing@sxu.edu.cn

(MHz 量级)^[7-8]。近年来利用原子系综中的自发拉曼散射过程(Spontaneous Raman scattering, SRS)产生关联光子对成为了量子信息领域的一个的研究热点。利用 SRS 过程可以产生光子与原子系综的关联以及光子之间的关联^[9-11]。L. M. Duan 等人提出利用原子系综中的自发拉曼散射过程可以产生光子与原子系综的纠缠,进而通过纠缠交换实现两个远距离原子系综的纠缠^[12]。多个研究小组在原子系综中利用 SRS 过程开展了关联光子对产生的实验研究。2003 年, Kimble 小组首先利用 SRS 在原子系综中制备出了关联光子对^[13]。2011 年, 杜胜望小组利用四波混频在原子系综中实现了时频和偏振纠缠的窄带非简并的光子对的探测^[14]。2015 年, 丁冬生小组实现了纠缠光子对在冷原子系综中的存储^[15]。

本文在冷原子介质中利用自发拉曼散射过程开展了关联光子对产生的实验研究, 详细介绍了关联光子对的制备以及光子统计特性的测量方案。

1 实验原理和实验装置

如图 1 所示为 Λ 型原子能级结构。初始时刻, 原子概率性地被制备在基态 $|a\rangle$ 的三个 Zeeman 子能级 $|m_a = -1\rangle, |m_a = 0\rangle$ 和 $|m_a = 1\rangle$ 上。一束频率锁定在 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=2$ 跃迁线上且正失谐 20 MHz 的左旋圆偏振的写光(W)作用于原子, 通过自发拉曼散射过程, 以一定的概率产生了与 $|e_1\rangle \rightarrow |b\rangle$ 跃迁共振的 Stokes 光子。在 Stokes 光子产生的同时, 产生相应的原子自旋波并存储于原子系综中。经过存储时间 τ , 频率锁定在 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{1/2}, F'=1$ 的一束右旋圆偏振读光(R)作用到原子, 原子自旋波被读出, 转化为 anti-Stokes 光子。Stokes 光子和 anti-Stokes 光子之间存在强的非经典关联。从能级图中可以当 Stokes 光子为左旋圆偏振(σ^+)时, 对应的 anti-Stokes 光子为右旋圆偏振(σ^-)。当 Stokes 光子为左旋圆偏振(σ^+)时, 对应的 anti-Stokes 光子为右旋圆偏振(σ^-)。

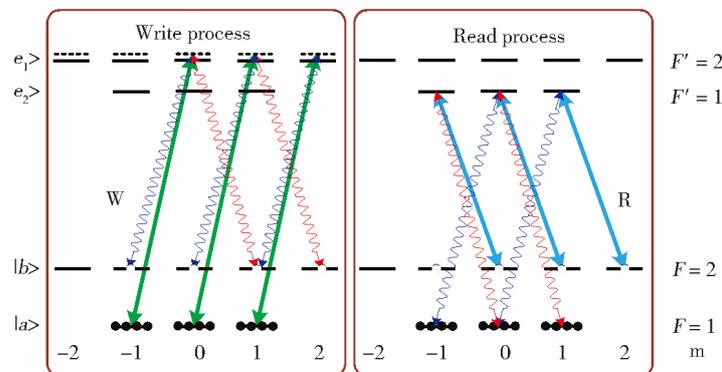


Fig. 1 Atomic level structure

图 1 原子能级结构

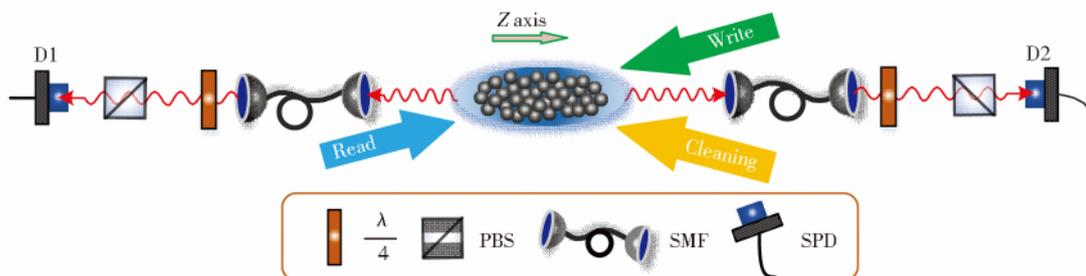


Fig. 2 Experimental setup for preparing correlated photon pairs

图 2 制备关联光子对的实验装置图

我们利用磁光阱(MOT)进行了⁸⁷Rb冷原子的俘获和冷却。磁阱由两个 $12.5 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 的矩形同轴反向亥姆赫兹线圈构成, 六束相互正交且功率相同的冷却光和再泵浦光共同交汇于线圈中心处构成光阱, 其中再泵浦光和其中一束冷却光重合。冷却光频率锁定于 $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=3$ 负失谐 20 MHz 处, 每束光的功率均为 13 mW, 再泵浦光锁定于 $5S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5P_{3/2}, F'=1$, 功率为 12 mW。冷原子空间尺寸为 $5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 经过西西弗斯冷却过程, 冷原子温度下降至 $130 \mu\text{K}$, 长轴方向光学厚度为 7。实验装置如

图 2 所示,写光和读光反向传播,与 z 轴呈 0.4° 夹角作用于原子,其中,写光光斑直径为 3.0 mm ,功率为 $100\ \mu\text{W}$;读光光斑直径为 3.4 mm ,功率为 50 mW 。两束泵浦光 (cleaning) 重合并与 z 轴呈 2° 夹角作用于原子,它们的作用是将原子制备在基态 $|a\rangle$,光斑直径分别为 3.8 mm 和 3.9 mm ,功率均为 45 mW ,其频率分别锁定于 $|b\rangle\rightarrow|e_1\rangle$ 和 $|b\rangle\rightarrow|e_2\rangle$ 的跃迁上。我们沿 z 轴的两个相反方向上对实验产生的 Stokes 和 anti-Stokes 光子进行收集。Stokes 和 anti-Stokes 光子首先通过单模保偏光纤去除日光灯、杂散光等环境噪声影响。由于光纤引入的相差,我们在光纤出口处引入了一套玻片补偿系统,进行信号的偏振补偿。然后光子对穿过一组标准具构成的滤波系统(由 3 个 7.5 mm 厚双面镀膜高度反射的标准具组成),最后在偏振分束棱镜 (PBS) 前放置四分之一玻片使 σ^+ 和 σ^- 的偏振成分转换为 H/V 偏振。Stokes 光子数的 H 分量进入 D1 探测器, anti-Stokes 光子数的 H 分量则进入 D2 探测器。单模光纤采集效率为 81% , 3 个标准具的总透射效率为 81% , 多模光纤的采集效率为 95% , 单光子探测器的平均量子效率为 50% 。总的探测效率为 31.2% 。

2 实验时序和 FPGA 高速采集模块介绍

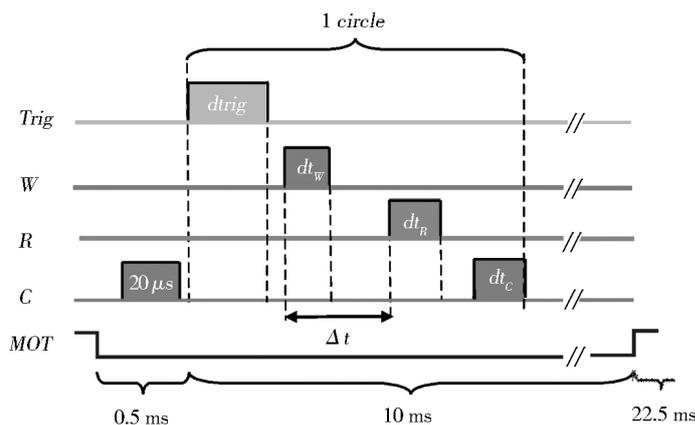


Fig. 3 Time sequence of an experimental cycle

图 3 实验循环时序图

时序图如图 3 所示,我们采用 NI 公司的 6713 时序板卡实现对 MOT 的开关控制。MOT 开关的重复频率为 30 Hz ,其中 MOT 开启 22.5 ms 用于俘获原子。在泵浦光,读光和写光作用之前需要关闭 MOT。MOT 关断后有 0.5 ms 用于执行希绪弗斯冷却操作,原子温度由 $200\ \mu\text{K}$ 下降为 $130\ \mu\text{K}$ 。期间,泵浦光开启 $20\ \mu\text{s}$ 将原子制备到基态。接着,在剩余 10 ms 内,不间断进行实验循环,每个循环包括写过程、读过程和态清洗三个阶段。

我们采用 NI 公司生产的基于 PXIe-7966R 的 FPGA 模块,实现对单光子探测器探测到的数据的高速采集和处理^[11]。如图 4 所示,该模块包括三个部分:线程 1、线程 2 和 Host。线程 1 和 2 是 FPGA 内部的核心采集部件,并行工作,具有高速判断的特性。线程 1 主要负责数据的采集,线程 2 负责 FIFO 队列数据的处理,二者独立运行,保证了采集速度。Host 实际是电脑控制部件,负责对 FPGA 发送指令并提取、呈现实时数据。通过调试 DMA FIFO 的运行机制,实现了双通道的高速符合测量工作。

3 实验测量与结果分析

首先对 Stokes 和 anti-Stokes 的关联特性进行了测量。时序上,我们设定一个测量周期内发射 $1\ 000$ 万个写脉冲。单位时间内,探测器 D1 和 D2 同时探测到的光子数作为关联光子对符合计数的产生率。在写光激发率为 1.4% 时,我们测量了关联光子对的产生率随存储时间变化的关系曲线。实验结果如图 5 所示, $t = 1\ \mu\text{s}$ 时刻,每秒产生的关联光子对为 305 对。随着存储时间的增加,符合计数产率逐渐降低。我们利用公式 $\eta(t) = \eta_0 \exp(-t^2/\tau_c^2)$ 对实验数据拟合,得到自旋波的存储寿命 $\tau_c = 23.2\ \mu\text{s}$ 。

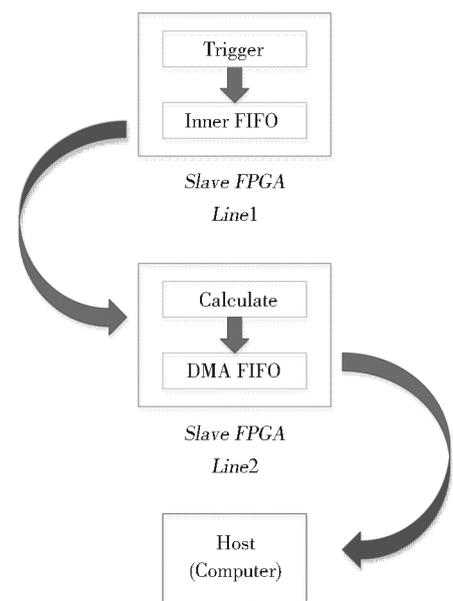


Fig. 4 Flow chart of data acquisition and processing based on FPGA

图 4 基于 FPGA 的数据采集处理流程图

接着,我们测量了二阶关联函数 $g^{(2)}$ 随存储时间的变化曲线。二阶关联函数定义为 $g^{(2)} = P_{s,as} / (P_s \cdot P_{as})$, 其中, P_s 为 D1 探测到的 Stokes 光子数 H 分量的概率, P_{as} 为 D2 探测到 anti-Stokes 光子数 H 分量的概率。 $P_{s,as}$ 为 D1 和 D2 同时探测到光子数的概率。测量结果如图 6 所示, $t=1 \mu\text{s}$ 时, $g^{(2)}=84, g^{(2)} \gg 2$ 意味着 Stokes 和 anti-Stokes 光子对之间存在着强的非经典关联。随着存储时间增加, $g^{(2)}$ 逐渐下降, 当 $t=25 \mu\text{s}$ 时, $g^{(2)}=38$, 仍然远远超过经典极限 2。我们利用公式 $g^{(2)}(t) = 1 + g_0 \exp(-t^2/\tau_c^2)$ 对实验数据进行拟合, 当 $\tau_c = 27.3 \mu\text{s}$ 时, 吻合较好。

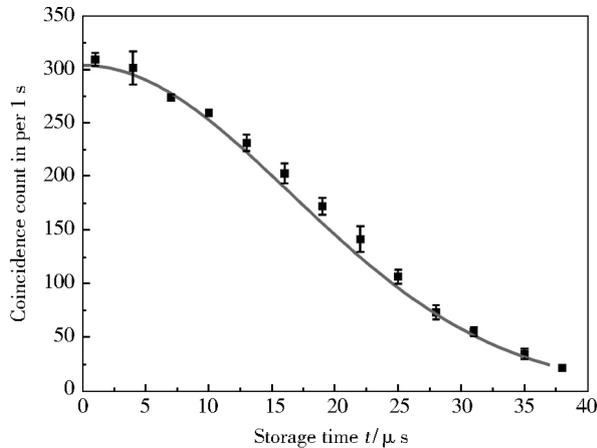


Fig. 5 Total coincidence count in per 1 s as a function of storage time t

图 5 每秒的符合计数随存储时间的变化

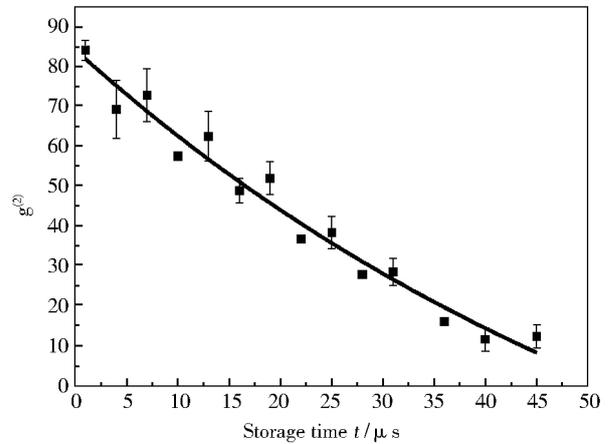


Fig. 6 Cross-correlation function $g^{(2)}$ between Stokes photon and anti-Stokes photon against storage time t

图 6 Stokes 光子和 anti-Stokes 光子的交叉关联函数 $g^{(2)}$ 随存储时间 t 的变化

最后,我们对 anti-Stokes 光子的宣布式单光子统计特性 α 进行了测量。实验测量装置如图 7 所示,在图 2 装置的基础上,我们将 anti-Stokes 的 H 分量收集到 50/50 的多模光纤耦合器,并通过单光子探测器 D4, D5 进行探测。

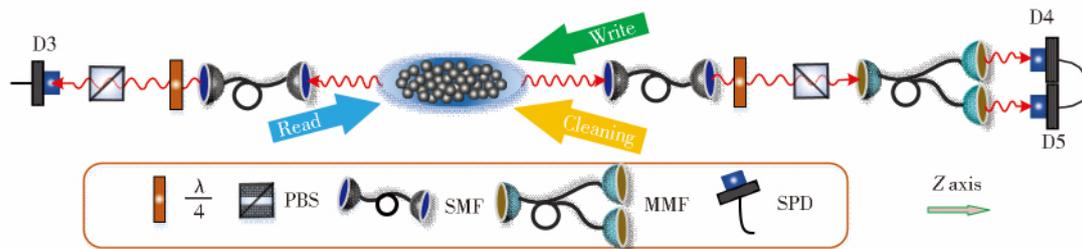


Fig. 7 Illustration of the experimental setup measuring heralded single photon statistical property α

图 7 测量宣布式单光子统计特性 α 的实验装置图

宣布式单光子统计特性 α 定义如下: $\alpha = P_{3,4,5} / (P_{3,4} \cdot P_{3,5})$ 。其中, $P_{3,4}$ 表示 D3, D4 探测器同时探测到光子的概率, $P_{3,5}$ 表示 D3, D5 探测器同时探测到光子的概率。 $P_{3,4,5}$ 表示 D3, D4, D5 探测器同时探测到光子的概率。

我们在存储时间为 $1 \mu\text{s}$ 时测量了 α 随写激发率的变化曲线,如图 8 所示。当激发率为 0.365% 时, α 为 0.1, 这表明 anti-Stokes 光子的单光子性能良好。随着写激发率的增大, α 将线性增大, 激发率为 1.55% 时, α 为 0.245, α 值的增大是因为双光子或多光子过程的出现而引起的。激发率 χ 为 1.5% 时, 我们还测量了 α 随存储时间的变化关系, 如图 9 所示, 当 t 小于 $24 \mu\text{s}$ 时, α 的值都约为 0.23, 无明显变化。当 t 大于 $24 \mu\text{s}$ 后, α 开始增大。

4 结论

本文在冷原子系中基于自发拉曼散射过程进行了关联光子对产生的实验研究。我们测量了关联光子的二阶关联函数 $g^{(2)}$ 随存储时间的变化关系, 存储时间为 $1 \mu\text{s}$ 时, $g^{(2)}$ 可达到 84; $g^{(2)}$ 随着存储时间的增加而下降, 当存

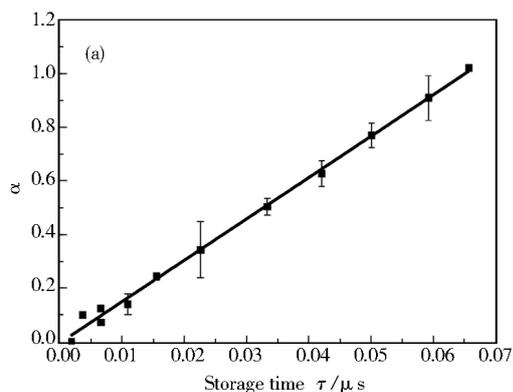


Fig. 8 Heralded single photon statistical property α as a function of excitation rate χ

图 8 宣布式单光子统计特性 α 随写激发率 χ 的变化

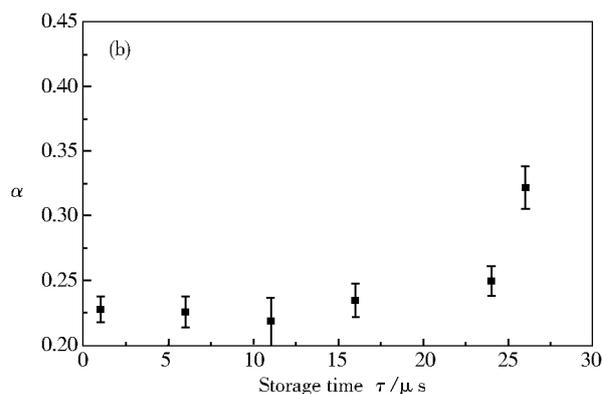


Fig. 9 Heralded single photon statistical property α as a function of time τ (b)

图 9 宣布式单光子统计特性 α 随时间 t 的变化

储时间增大至 $25 \mu\text{s}$ 时, $g^{(2)}$ 为 38, 仍然远远超过经典极限 2, 说明 Stokes 和 anti-Stokes 光子存在强的非经典关联。另外, 我们还对 anti-Stokes 光子的宣布式单光子统计特性 α 进行了测量, 当写激发率为 1.55% 时, 在小于 $24 \mu\text{s}$ 的存储时间内, 保持在 0.23 附近。该工作对下一步在冷原子系综中进行偏振纠缠光子对奠定了基础。

参考文献:

- [1] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y, *et al.* Multi-photon Entanglement and Interferometry[J]. *Rev Mod Phys*, 2012, **84**:777-838. DOI:10.1103/RevModPhys.84.777.
- [2] Zhao B, Chen Z B, Chen Y A, *et al.* Robust Creation of Entanglement between Remote Memory Qubits[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**:240502-204505. DOI:10.1103/PhysRevLett.98.240502.
- [3] Sangouard N, Simon C, de Riedmatten H, *et al.* Quantum Repeater based on Atomic Ensembles and Linear Optics[J]. *Rev Mod Phys*, 2011, **83**:33-80. DOI:10.1103/RevModPhys.83.33.
- [4] Chou C W, Laurat J, Deng H, *et al.* Functional Quantum Nodes for Entanglement Distribution over Scalable Quantum Networks[J]. *Science*, 2007, **316**:1316-1320. DOI:10.1126/Science.1140300.
- [5] Zhao R, Dudin R O, Jenkins S D, *et al.* Long-lived Quantum Memory[J]. *Nature Phys*, 2009, **5**:100-104. DOI:10.1038/nphys1152.
- [6] Zhao B, Chen R A, Bao X H, *et al.* A Millisecond Quantum Memory for Scalable Quantum Networks [J]. *Nature Phys*, 2009, **5**:95-99. DOI:10.1038/nphys1153.
- [7] Yuan Z S, Chen Y A, Zhao B, *et al.* Experimental Demonstration of a BDCZ Quantum Repeater Node[J]. *Nature*, 2008, **454**:1098-1101. DOI:10.1038/nature07241.
- [8] Bashkansky M, Vurgafman, Pipino A C R, *et al.* Significance of Heralding in Spontaneous Parametric Down-conversion [J]. *Phys Rev A*, 2014, **90**:053825. DOI:10.1103/PhysRevA.90.053825.
- [9] Van der Wal C H, Eisaman M D, Andre A, *et al.* Atomic Memory for Correlated Photon States[J]. *Science*, 2003, **301**:196. DOI:10.1126/Science.1085946.
- [10] Lu X S, Chen Q F, Shi B S, *et al.* Generation of a Non-Classical Correlated Photon Via Spontaneous Four-Wave Mixing in a Cold Atomic Ensemble[J]. *Chin Phys Lett*, 2009, **26**:124-126. DOI:10.1088/0256-307x/26/6/064204.
- [11] 武跃龙, 葛伟, 李淑静, 等. 冷原子系综中偏振关联光子对产生的测量[J]. *量子光学学报*, 2016, **22**(1):68-73. DOI:10.3788/JQO20162201.0010.
- [12] Duan L M, Lukin M, Cirac J I, *et al.* Long-distance Quantum Communication with Atomic Ensembles and Linear Optics [J]. *Nature*, 2001, **414**:413-418. DOI:10.1038/35106500.
- [13] Kuzmich A W P, Bowen A D, Boozer A, *et al.* Generation of Nonclassical Photon Pairs for Scalable Quantum Communication with Atomic Ensembles[J]. *Nature*, 2003, **423**:731. DOI:10.1038/nature01714.
- [14] Yan H, Zhang S, Chen J F, *et al.* Generation of Narrow-band Hyper Entangled Nondegenerate Paired Photons[J]. *Phys Rev Lett*, 2011, **106**:033601-033604. DOI:10.1103/PhysRevLett.106.033601.
- [15] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, *et al.* Raman Quantum Memory of Photonic Polarized Entanglement[J]. *Nature Photonics*, 2015, **9**:332-338. DOI:10.1038/nphoton.2015.43.