

# 读出效率对光与原子纠缠产生的影响\*

王圣智<sup>1)2)</sup> 温亚飞<sup>1)2)</sup> 张常睿<sup>1)2)</sup> 王登新<sup>1)2)</sup>  
徐忠孝<sup>1)2)†</sup> 李淑静<sup>1)2)</sup> 王海<sup>1)2)</sup>

1) (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, 太原 030006)

2) (极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2018年7月6日收到; 2018年11月7日收到修改稿)

在光与原子纠缠态产生中, 自旋波读出效率是影响纠缠质量的一个重要因素. 本文在实验和理论上研究了读出效率与纠缠质量 (Bell 参量) 的关系. 实验上利用<sup>87</sup>Rb 冷原子系综中的自发 Raman 散射过程产生了光与原子量子纠缠. 通过改变读光功率或 OD (光学厚度), 实现了读出效率的变化. 在此基础上, 研究了光与原子纠缠质量 (Bell 参量) 随读出效率变化的关系. 该实验将为高保真度的光与原子纠缠产生提供帮助.

**关键词:** 冷原子系综, 自发拉曼散射, 读出效率, 光与原子纠缠

**PACS:** 03.67.-a, 03.67.Bg, 03.65.Ud

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181314

## 1 引言

实现远距离的纠缠分发 (在远距离的两端建立纠缠) 是构建基于光纤量子通信网络的一个重要任务. 光子传输速度快, 不易受外界环境影响, 是理想的信息传输载体. 但是其在光纤传输中的损耗使长距离的纠缠分发难以实现. 为解决这个问题, Briegel 等<sup>[1]</sup>在 1998 年提出了量子中继的方案. 该方案将需要实现纠缠分发的长距离分成多个小区间. 先在小区间两端建立纠缠, 再通过相邻区间的纠缠交换扩大纠缠距离, 直至实现长距离的纠缠分发. 为了实现量子中继, 人们提出了很多方案<sup>[2-7]</sup>, 其中 Duan-Lukin-Cirac-Zoller (DLCZ) 方案是最具潜力的方案之一. 该方案利用原子系综作为存储单元, 通过单光子测量实现纠缠产生与交换. 该方案由于实验装置简单、操作容易实现, 受到了人们的关注. 然而, 该方案的一个缺点是对长距离纠缠分发过程中相位的稳定性要求非常高, 导致该方

案实现长距离的纠缠分发十分困难. 为了降低该方案对相位稳定性的要求, 提出了一种改进的 DLCZ 协议. 在新方案中, 利用光与原子纠缠源作为量子界面, 通过运用双光子探测代替单光子探测来进行纠缠交换. 实现该方案的一个基本元件是光与原子纠缠界面, 即能产生光与原子量子记忆纠缠的源. 近年来围绕着该量子界面的产生, 人们完成了一系列实验演示. 2003 年 Kuzmich 等<sup>[8]</sup>和 van der Wal 等<sup>[9]</sup>分别通过 SRS(spontaneous Raman scattering) 过程在冷原子系综中制备出斯托克斯和反斯托克斯量子关联光子对. 2005 年, Matsukevich 等<sup>[10]</sup>在冷原子系综中通过 SRS 过程产生了偏振纠缠光子对. 2011 年, Yan 等<sup>[11]</sup>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. 2015 年, Yang 等<sup>[12]</sup>在普通的冷原子 MOT (magneto-optical trap) 系综中, 利用腔增强效应得到高恢复效率的自旋波纠缠源, 其恢复效率为 76%. 2015 年, Ding 等<sup>[13]</sup>实现了纠缠光子对在冷

\* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2016YFA0301402)、国家自然科学基金 (批准号: 11475109, 11274211)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11604191)、山西省应用基础研究计划 (批准号: 201601D202007) 和山西省“1331 工程”重点学科建设项目 (批准号: 133KSC) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuzhongxiao@sxu.edu.cn

原子系综中的存储. 在这些工作中, 一个关键的因素就是介质中量子存储读出效率, 它对量子中继纠缠产生速率具有重要影响. 读出效率主要与读光功率和光学厚度 (OD) 有关<sup>[14-17]</sup>, 选择合适的功率或光学厚度都能极大地提高读出效率. Bell 参量是判断光与原子量子纠缠质量的重要指标. 为了获得长寿命量子存储, Felinto 等<sup>[18]</sup>研究了光与原子纠缠态在原子记忆中的退相干机制, 测量了量子存储寿命. 但是光与原子纠缠态中自旋波读出效率对纠缠质量具有的重要影响还没有相关的研究报道. 本文研究自旋波读出效率对光与原子纠缠质量 (Bell 参量) 的影响.

## 2 实验能级和实验装置

在<sup>87</sup>Rb 冷原子系综中进行光量子界面的实验研究. 实验采用的能级结构如图 1 所示. 初始时刻, 原子制备在 $|5S_{1/2}, F=1\rangle$ 态上. 首先与原子作用的写光为右旋圆偏振光, 作用在 $|5S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=2\rangle$ 跃迁正失谐 20 MHz 处. 以其中一个子能级为例, 在写光作用下小概率跃迁到 $|5P_{1/2}, F'=2, m=1\rangle$ 能级, 之后发生自发拉曼散射过程, 产生 $|5P_{1/2}, F'=2, m=1\rangle \rightarrow |5S_{1/2}, F=2, m=0\rangle$  ( $|5S_{1/2}, F=2, m=2\rangle$ ) 跃迁相对应的 $|R\rangle$  ( $|L\rangle$ ) 斯托克斯光子. 它们分别联系着相干性 $|5S_{1/2}, F=1, m=0\rangle \leftrightarrow |5S_{1/2}, F=2, m=0\rangle$ ;  $|5S_{1/2}, F=1, m=0\rangle \leftrightarrow |5S_{1/2}, F=2, m=2\rangle$ . 在斯托克斯光子产生的同时, 产生相应的原子自旋波 $|+\rangle$  ( $|-\rangle$ ) 并存储于原子系综中. 经过存储时

间  $\tau$ , 左旋偏振的读光作用于原子, 通过电磁感应透明效应将原子自旋波转化为 $|L\rangle$  ( $|R\rangle$ ) 反斯托克斯光子. 光与原子系统可以写为  $\rho_{\text{ap}} = |0\rangle\langle 0| + \chi |\Phi\rangle\langle \Phi|$ , 其中光与原子自旋波纠缠态表示为:  $|\Phi\rangle = \sqrt{\chi}(\cos\vartheta|+\rangle|R\rangle + \sin\vartheta|-\rangle|L\rangle)$ ;  $|+\rangle$  ( $|-\rangle$ ) 表示自旋波, 联系着相干性  $|a, m_a\rangle \leftrightarrow |b, m_b = m_a\rangle$  ( $|a, m_a\rangle \leftrightarrow |b, m_b = m_a + 2\rangle$ );  $|R\rangle$  ( $|L\rangle$ ) 表示偏振态为 $\sigma^+$  ( $\sigma^-$ ) 的斯托克斯光子;  $\cos\vartheta$  是关联的 Clebsch-Gordan 系数.

实验装置如图 2 所示, 读光和写光沿相反方向作用于原子系综, 与雪茄型原子长轴的夹角为  $2.75^\circ$ . 读光和写光在原子处光斑直径分别为 1.32 和 1.17 mm, 为避免多光子激发对纠缠的影响, 调整写光功率使得写激发探测率保持在 1%. 抽运光的作用是将初始的原子制备到 $|5S_{1/2}, F=1\rangle$ 态. 抽运光共两束, 它们相互重合, 与原子长轴的夹角为  $2^\circ$ , 其中一束为左旋圆偏振, 锁定在 $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=1\rangle$ 共振处, 另外一束为右旋圆偏振, 锁定在 $|5S_{1/2}, F=2\rangle \rightarrow |5P_{1/2}, F'=2\rangle$ 共振处, 原子处光斑直径为 3.6 和 3.0 mm, 功率均为 15 mW. 在实验过程中, 沿着原子长轴的两个相反方向上对产生的斯托克斯光子和反斯托克斯光子进行收集. 采集到的光子要经过单模保偏光纤和滤波器去除日光灯、杂散光等环境光噪声的影响, 最后在偏振分束棱镜 (PBS) 前放置四分之一波片, 使 $\sigma^-$  和 $\sigma^+$  态分别转换为 H 和 V 态. 收集光纤的效率为 76%, 滤波器总的透射效率为 65%, 多模光纤的效率为 90%, 单光子探测器的量子效率为 50%. 因而斯托克斯光子和反斯托克斯光

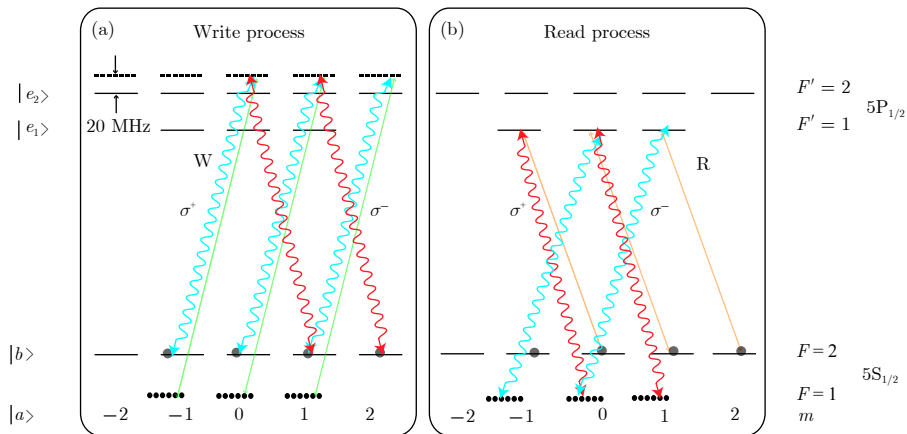


图 1 实验能级图 (a) 和 (b) 分别为自发拉曼散射的写过程和读过程,  $\sigma^+$  ( $\sigma^-$ ) 代表右旋圆偏振 (左旋圆偏振) 的斯托克斯光场和反斯托克斯光场; W 表示写光, R 表示读光

Fig. 1. Relevant <sup>87</sup>Rb atomic levels: (a) and (b) are writing process and reading process of the SRS process.  $\sigma^+$  ( $\sigma^-$ ) represents right (left) polarization of emitted photon. W (R) represents writing(reading) field.

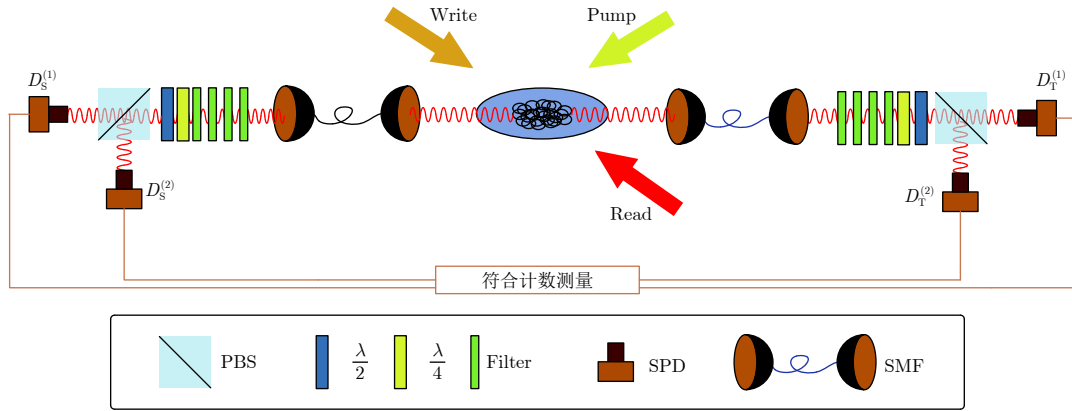


图 2 实验装置, 其中 PBS 为偏振分束棱镜, SMF 为单模光纤, SPD 为单光子探测器,  $\frac{\lambda}{2}$  为二分之一波片,  $\frac{\lambda}{4}$  为四分之一波片, Filter 为滤波器

Fig. 2. Experimental setup. PBS, polarization beam splitter; SMF, single mode fiber; SPD, single photon detector;  $\frac{\lambda}{2}$ , half wave plate;  $\frac{\lambda}{4}$ , quarter wave plate; Filter, F-P etalon.

子总的探测效率为 22%.

实验所用的时序图如图 3 所示, 采用 NI 公司的 6713 时序板卡实现对 MOT 的开关控制. 冷原子 MOT 的重复频率为 20 Hz, 在 42 ms 内, 开启 MOT 用于俘获原子. 随后 8 ms 的时间内进行多次循环实验, 循环过程通过 FPGA (field-programmable gate array) 模块来控制, 每个循环包括写过程、读过程和态清洗过程三个阶段, 其中写过程的脉冲宽度为 100 ns, 读脉冲的宽度为 100 ns, 态清洗光脉冲宽度为 500 ns.

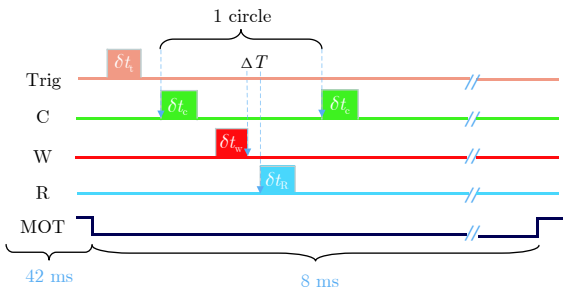


图 3 实验时序图 (图中 Trig 表示触发信号, C 表示态清洗过程, W 和 R 分别代表写过程与读过程, MOT 代表冷原子制备过程)

Fig. 3. Time sequence of experiment (Trig represents the trigger signal, C represents the state cleaning process, W and R represent the writing and reading process, and MOT represents the cold atom preparation process).

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 光学厚度与读出效率的关系

实验上研究了光量子纠缠界面系统中光学厚度与读出效率的关系, 通过改变冷原子中再抽运光

的功率大小, 改变原子系综的光学厚度. 实验中测得再抽运光功率为 12.2, 5.0, 2.0, 0.5 和 0.3 mW 时冷原子介质对应的光学厚度为 20, 17, 10, 2 和 1.

测量了读出效率随 OD 的变化, 实验结果如图 4 所示. 可以看出, 随着 OD 的增大, 光与原子纠缠界面的读出效率逐渐增大, 由 2.1% 增加至 18%. 当 OD 由 10 继续增加时, 光与原子纠缠源的读出效率继续增加但相对之前变化缓慢.

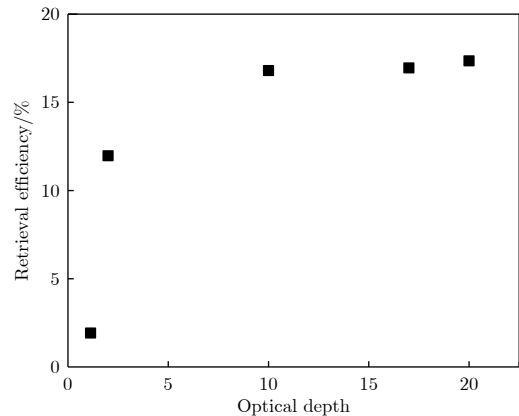


图 4 读出效率随光学厚度的变化

Fig. 4. The retrieval efficiency as the function of optical depth.

#### 3.2 反斯托克斯光子读出效率随读光功率的变化关系

测量了反斯托克斯光子读出效率随读光功率的变化, 实验结果如图 5 所示, 其中黄色点表示读出效率  $\gamma$  随读光功率的变化, 黑色点表示反斯托克斯光子计数  $N_{AS}$  随读光功率的变化, 红色点表示反斯托克斯光子收集通道上的噪声计数  $N_b$  随读光功

率的变化, 其中  $N_{AS}$  和  $N_b$  均是在 300 万次实验条件下得到的测量计数. 随着读光功率的增加, 读出效率和  $N_{AS}$  逐渐增大, 两者的变化趋势基本一致, 而背景噪声基本不变, 当读光功率大于 1.5 mW 之后, 读出效率没有明显增加, 趋于饱和.

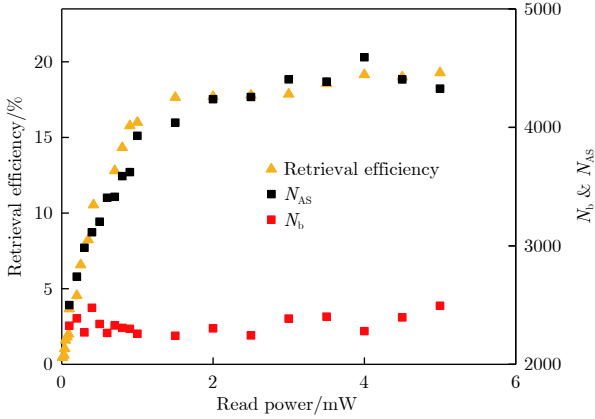


图 5 读出效率及  $N_{AS}$  随读光功率变化

Fig. 5. The retrieval efficiency and  $N_{AS}$  as the function of power of read light field.

对实验结果进行分析如下, 反斯托克斯光子读出计数等于读恢复计数和噪声的和, 公式表示为<sup>[19]</sup>:

$$N_{AS} = N\chi\eta_{AS}r + N_b, \quad (1)$$

其中  $\chi$  为写激发率,  $\eta_{AS}$  为反斯托克斯光子的探测效率,  $N$  为实验循环次数,  $N_{AS}$  为实验探测得到的反斯托克斯光子数,  $N_b$  为收集反斯托克斯光子通

道上的噪声数.

$$\gamma = \frac{N_{AS} - N_b}{\chi\eta_{AS}N}.$$

因为  $N_b$  基本不变, 上式可化简为

$$\gamma = \frac{N_{AS}}{\chi\eta_{AS}N} - \frac{N_b}{\chi\eta_{AS}N} = \frac{N_{AS}}{a} - b, \quad (2)$$

其中  $a = \chi\eta_{AS}N$ ,  $b = \frac{N_b}{\chi\eta_{AS}N}$ ,  $a$ ,  $b$  近似于常数. 由 (2) 式可以看出, 读出效率与  $N_{AS}$  计数呈线性关系. 如图 5 所示读出效率和  $N_{AS}$  随着读光功率的增加逐渐增大, 两者的变化趋势基本一致, 从此推断出读出效率与  $N_{AS}$  呈线性关系, 理论与实验结果相符.

### 3.3 Bell 参量与读出效率的关系

Bell 参量  $S$  以及 Clauser-Horne-Shimony-Holt (CHSH) 不等式是检验是否产生纠缠光子对的常用判据. 依据 Bell-CHSH 不等式,  $S$  参量为

$$S = |E(\theta_S, \theta_T) - E(\theta_S, \theta'_T) - E(\theta'_S, \theta_T) - E(\theta'_S, \theta'_T)| < 2. \quad (3)$$

其中  $\theta_S$  和  $\theta_T$  分别为斯托克斯光子 S 和反斯托克斯光子 T 的投影极化角, 测量 Bell 参量装置如图 2 所示, 通过旋转在偏振分束棱镜  $PBS_S$  以及  $PBS_T$  前放置的  $\lambda/2$  波片角度来实现不同极化角的变化. 在测量过程中  $\theta_S, \theta_T, \theta'_S, \theta'_T$  分别取  $0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ$ . (3) 式中,  $E(\theta_S, \theta_T)$  表示为

$$E(\theta_S, \theta_T) = \frac{C(\theta_S, \theta_T) + C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_{T+90^\circ}) - C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_T) - C(\theta_S, \theta_{T+90^\circ})}{C(\theta_S, \theta_T) + C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_{T+90^\circ}) + C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_T) + C(\theta_S, \theta_{T+90^\circ})}, \quad (4)$$

其中  $C(\theta_S, \theta_T)$  为探测器  $D_S^{(1)}$  和  $D_T^{(1)}$  之间的符合计数;  $C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_{T+90^\circ})$  为探测器  $D_S^{(2)}$  和  $D_T^{(2)}$  之间的符合计数;  $C(\theta_{S+90^\circ}, \theta_T)$  为探测器  $D_S^{(2)}$  和  $D_T^{(1)}$  之间的符合计数;  $C(\theta_S, \theta_{T+90^\circ})$  为探测器  $D_S^{(1)}$  和  $D_T^{(2)}$  之间的符合计数.

实验结果如图 6 所示, 黑点和红点是写激发率为 1% 和 1.5% 时  $S$  测量值. 由图 6 可以看出  $S$  值随读出效率的增加而增加,  $S$  最大值可以达到 2.6 左右. 在读出效率等于 0.6% 时, Bell 参量  $S$  值约等于 2.

对该 Bell 参量与读出效率的关系进行分析,  $S$  与二阶关联函数  $g_{S,AS}^{(2)}$  的关系<sup>[20, 21]</sup>为

$$S \approx S_{MAX} \frac{g_{S,AS}^{(2)} - 1}{g_{S,AS}^{(2)} + 1}, \quad (5)$$

$g_{S,AS}^{(2)}$  的表达式为

$$g_{S,AS}^{(2)} = \frac{P_{S,AS}}{P_S P_{AS}}, \quad (6)$$

$P_S$  为斯托克斯光子的激发率,  $P_{AS}$  为反斯托克斯光子的计数率,  $P_{S,AS}$  为斯托克斯光子与反斯托克斯光子的符合概率, 分别表示为:

$$P_S = \chi\eta_S + C\eta_S, \quad (7)$$

$$P_{AS} = \chi r\eta_{AS} + B\eta_{AS}, \quad (8)$$

$$P_{S,AS} = \chi r\eta_S\eta_{AS} + P_S P_{AS}, \quad (9)$$

式中  $C$  表示斯托克斯光子的接受通道上的噪声水平,  $B$  表示反斯托克斯光子的接收通道上的噪声水平.

联立 (6) 式—(9) 式得到

$$g_{S,AS}^{(2)} = \frac{\chi^r}{(\chi + C)(\chi r + B)} + 1, \quad (10)$$

其中写过程中由于写光是弱的失谐光, 实验测量得到写过程的噪声  $C$  很小可以忽略, (10) 式可简化为

$$g_{S,AS}^{(2)} = \frac{r}{\chi r + B} + 1. \quad (11)$$

与 (5) 式联立得到

$$S = \frac{S_{MAX}r}{(1 + 2\chi)r + 2B}. \quad (12)$$

将信噪比  $SNR = \frac{r}{B}$  代入 (12) 式得

$$S = \frac{S_{MAX}}{(1 + 2\chi) + 2/SNR}. \quad (13)$$

(5) 式中比例系数  $S_{MAX} = 2\sqrt{2}$ , 这是理想状态下的最大值. 由于实验中存在能级选择不对称等不理想因素, 因此选取  $S_{MAX} = 2.69$ , 蓝色和绿色实线分别代表根据 (13) 式所得的拟合曲线, 理论模拟与实验结果较好地匹配.

对拟合公式 (13) 式进行进一步分析, 写激发率  $\chi=1\%$ , 忽略掉  $\chi$  项得到  $S = 2$  时  $\frac{1}{1 + 2/SNR} \approx 0.75$ , 由此得到  $SNR = 6$ . 实验测量结果显示当读出效率为 0.6% 时 (图 6 五角星所示位置), 信噪比  $SNR = 8.2$ , Bell 参量  $S \approx 2$ , 该  $SNR$  基本与上述理论结果符合. 进一步分析发现, 在我们的实验系统, 读光功率的增加并不会增加背景噪声, 而读出信号在逐渐增加, 相应的信噪比逐渐增加, 在读光功率小时, 信噪比小于 6 : 1, 导致 Bell 参量  $S$  小于 2, 当读光功率大于 1.5 mW 之后信号远大于噪声, 此时 Bell 参量  $S$  值增加变缓. 影响纠缠的本质原因在信噪比, 信噪比越高纠缠越好.

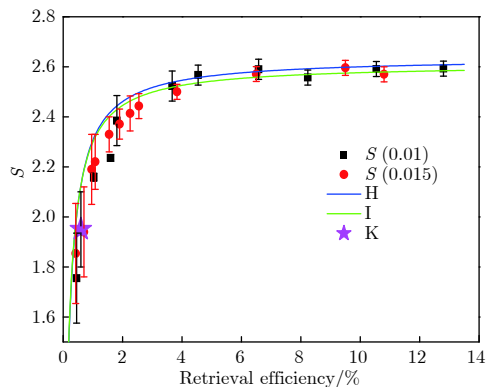


图 6 Bell 参量  $S$  随读出效率的变化

Fig. 6. The Bell parameter  $S$  as the function of quantum retrieval efficiency.

## 4 结 论

本文在冷原子系综中利用自发拉曼散射过程产生了光与原子的纠缠. 测量了读出效率对 Bell 参量  $S$  的影响. 实验结果表明: 当读出效率小于 0.6% 时, 没有纠缠特性; Bell 参量随读出效率的增加而增加; 当恢复效率增长至 5% 时, 纠缠质量增加不明显. 更进一步的分析显示, 读出效率的关系与噪声水平相关, 信噪比越高纠缠质量越高. 该系统的存储时间为  $9 \mu\text{s}$ <sup>[22]</sup>, 通过 BEC<sup>[23, 24]</sup> 或光晶格可以使存储时间达到毫秒量级. 本文进行的工作对冷原子系综中制备高质量的纠缠源提供了参考.

## 参考文献

- [1] Briegel H J, Dür W, Cirac J I, Zoller P 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932
- [2] Hensen B, Bernien H, Dreau A E, Reiserer A, Kalb N, Blok M S, Ruitenberg J, Vermeulen R F, Schouten R N, Abellan C, Amaya W, Pruneri V, Mitchell M W, Markham M, Twitchen D J, Elkouss D, Wehner S, Taminiau T H, Hanson R 2015 *Nature* **526** 682
- [3] Volz J, Weber M, Schlenk D, Rosenfeld W, Vrana J, Saucke K, Kurtsiefer C, Weinfurter H 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 030404
- [4] Hofmann J, Krug M, Ortegel N, Gérard L, Weber M, Rosenfeld W, Weinfurter H 2012 *Science* **337** 72
- [5] Rosenfeld W, Burchardt D, Garthoff R, Redeker K, Ortegel N, Rau M, Weinfurter H 2017 *Phys. Rev. Lett.* **119** 010402
- [6] Blinov B B, Moehring D L, Duan L M, Monroe C 2004 *Nature* **428** 153
- [7] Moehring D L, Maunz P, Olmschenk S, Younge K C, Matsukevich D N, Duan L M, Monroe C 2007 *Nature* **449** 68
- [8] Kuzmich A, Bowen W P, Boozer A D, Boca A, Chou C W, Duan L M, Kimble H J 2003 *Nature* **423** 731
- [9] van der Wal C H, Eisaman M D, André A, Walsworth R L, Phillips D F, Zibrov A S, Lukin M D 2003 *Science* **301** 196
- [10] Matsukevich D N, Chaneliere T, Bhattacharya M, Lan S Y, Jenkins S D, Kennedy T A B, Kuzmich A 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 040405
- [11] Yan H, Zhang S, Chen J F, Loy M M, Wong G K, Du S 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 033601
- [12] Yang S J, Wang X J, Li J, Rui J, Bao X H, Pan J W 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 210501
- [13] Ding D S, Zhang W, Zhou Z Y, Shi S, Shi B S, Guo G C 2015 *Nat. Photon.* **9** 332
- [14] Xu Z X, Wu Y L, Liu H L, Li S J, Wang H 2013 *Phys. Rev. A* **88** 013423
- [15] Jenkins S D, Matsukevich D N, Chanelière T, Kuzmich A, Kennedy T A B 2006 *Phys. Rev. A* **73** 021803
- [16] Matsukevich D N, Chaneliere T, Jenkins S D, Lan S Y, Kennedy T A, Kuzmich A 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 033601
- [17] Gorshkov A V, André A, Lukin M D, Sørensen A S 2007 *Phys. Rev. A* **76** 033804
- [18] Felinto D, Chou C W, de Riedmatten H, Polyakov S V, Kimble H J 2015 *Phys. Rev. A* **72** 053809
- [19] Chen S, Chen Y A, Strassel T, Yuan Z S, Zhao B,

- Schmiedmayer J, Pan J W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 173004
- [20] de Riedmatten H, Laurat J, Chou C W, Schomburg E W, Felinto D, Kimble H J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 113603
- [21] Zhao B, Chen Y A, Bao X H, Strassel T, Chuu C S, Jin X M, Schmiedmayer J, Yuan Z S, Chen S, Pan J W 2008 *Nat. Phys.* **5** 95
- [22] Zhang C R, Wang S Z, Xu Z X, Li S J, Wang H 2018 *Acta Sinica Quantum Optica* **24** 333 (in Chinese) [张常睿, 王圣智, 徐忠孝, 李淑静, 王海 2018 量子光学学报 **24** 333]
- [23] Lettner M, Mucke M, Riedl S, Vo C, Hahn C, Baur S, Bochmann J, Ritter S, Durr S, Rempe G 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 210503
- [24] Fu Z, Wang P, Chai S, Huang L, Zhang J 2011 *Phys. Rev. A* **84** 043609

# Dependence of performance character of photon-atom entanglement source on retrieval efficiency\*

Wang Sheng-Zhi<sup>1)2)</sup> Wen Ya-Fei<sup>1)2)</sup> Zhang Chang-Rui<sup>1)2)</sup> Wang Deng-Xin<sup>1)2)</sup>  
 Xu Zhong-Xiao<sup>1)2)†</sup> Li Shu-Jing<sup>1)2)</sup> Wang Hai<sup>1)2)</sup>

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

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

(Received 6 July 2018; revised manuscript received 7 November 2018)

## Abstract

The photon-atom interface is a basic component of quantum repeater, quantum network, and linear optical quantum computing. Different approaches have been tested in the last decade to develop quantum interface, such as quantum dots, single atoms and ions, color centers and cold atomic ensemble. In the cold atomic ensemble, a normal way to produce photon-atom interface is the Duan-Lukin-Cirac-Zoller (DLCZ) protocol. Used in the DLCZ protocol is an atomic ensemble that can emit single photons while creating a single atomic excitation, which is stored in the ensemble. The atomic excitation can be converted into a photon due to the collective interference.

The influences of the retrieval efficiency on the atom-photon entanglement source have been studied in various experiments. But no one has studied the retrieval efficiency threshold of entanglement generation. In our experiment we study the retrieval efficiency dependence on read power and OD. Setting the power of the repump light beam to be 12.2 mW, 5.0 mW, 2.0 mW, 0.5 mW and 0.3 mW, OD of the cold atom ensemble is measured to be 20, 17, 10, 2, and 1, respectively. As we expected, the retrieval efficiency increases with increasing OD value and read power, the curve shows that the retrieval efficiency increases sharply with increasing the OD value and read power, then after a while slowly increases with increasing the OD values and read power. Then we measure the Bell parameter with increasing the retrieval efficiency by increasing the read power. It shows that the Bell parameter sharply increases for retrieval efficiency values ranging from 0 to 3%, but changes very small for retrieval efficiency values ranging from 3% to 18.3%. The maximum Bell parameter is 2.6.

We further analysis the result, finding that the Bell parameter can be expressed as  $S = \frac{S_{MAX}r}{(1+2\chi)r+2B}$ . Fitting parameters to the curve are  $\chi = 1\%$ ,  $B = 0.073\%$ . To avoid of multi-excitation the write power kept low that  $\chi$  at 1% level. Then we can find out from the function that the signal-to-noise ratio is bigger than 6 : 1 the Bell parameter will reach 2. The theoretical analysis and experimental results fit very well.

So the further reason that alter the Bell parameter is the signal-to-noise ratio. We should decrease the noise while increasing the retrieval efficiency. This paper will help with rise the quality of entanglement generation through photon-atom interface.

**Keywords:** cold atomic ensemble, spontaneous Raman scattering, retrieval efficiency, photon-atom entanglement

**PACS:** 03.67.-a, 03.67.Bg, 03.65.Ud

**DOI:** 10.7498/aps.68.20181314

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2016YFA0301402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475109, 11274211), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11604191), the Applied Basic Research Program of Shanxi Province, China (Grant No. 201601D202007), and the Shanxi Provincial Fund for "1331 Project" Key Subjects Construction, China (Grant No. 1331KSC).

† Corresponding author. E-mail: xuzhongxiao@sxu.edu.cn