

文章编号: 1007-6654(2014)03-0177-06^①

利用自发参量下转换产生 795 nm 关联光子对的实验研究

郝红玉, 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)

摘要: 本文进行了自发参量下转换(SPDC)产生 795 nm 关联光子对的实验研究。选择 II 类 PPKTP 晶体作为非线性介质, 用倍频获得的 397.5 nm 紫光作为泵浦光。在实验上首先通过符合计数测量了紫光单次穿过 PPKTP 晶体时 SPDC 过程产生的光子对亮度, 当泵浦光功率为 5 mW 时, 测得符合计数为 53 150/s。然后将下转换过程放入光学谐振腔中, 对下转换光子的线宽进行压窄。实验上测得下转换光子对的关联时间为 14.6 ns, 对应线宽约为 15 MHz。本文为纠缠光子对在 Rb 原子系综中的存储提供了实验基础。

关键词: 自发参量下转换; 关联光子对; 符合计数

中图分类号: O431

文献标识码: A

DOI: 10.3788/ASQO20142003.0177

0 引言

近年来, 非经典光场的产生及其在量子信息领域中的应用已成为一个焦点。量子信息科学是信息科学与量子光学交叉融合而迅速发展起来的一门新兴学科, 目前被人们广泛研究。量子纠缠态是量子信息科学的核心资源, 是传输量子信息的有效载体^[1-2]。将纠缠光子源与原子相互作用, 实现纠缠光子源在原子系综中的存储^[3], 可产生大的 Cluster 态^[4] 以及实现量子中继器^[5] 中不同片断之间的纠缠连接, 这在量子信息计算^[6-7] 和远距离量子通讯^[8] 中发挥着重要作用。实验上产生纠缠源的方法有多种, 到目前为止, 制备纠缠源最成熟、最广泛的技术便是自发参量下转换过程^[9-11]。自发参量下转换产生的双光子^[12-13] 在时间、空间、能量及偏振等方面具有高度的关联性, 与利用原子系综产生关联光子

对^[14-15] 相比, 自发参量下转换技术还具有操作简便, 探测方便的特点, 自发参量下转换产生双光子技术可广泛应用于许多需要产生纠缠光子对的研究中, 如量子密钥分配^[16-17]、量子隐形传输^[18] 等领域。

为了进行 Rb 原子系综中纠缠光子对的存储, 本文开展了自发参量下转换产生 795 nm 关联光子对的实验研究。在实验上测量了泵浦光单次穿过 II 类 PPKTP 晶体时下转换光子对的符合计数; 并将下转换过程放入光学谐振腔中对其线宽进行压窄, 测量了 SPDC 过程产生的光子对的时间关联特性。

1 自发参量下转换过程

自发参量下转换的本质是三波混频过程, 图 1 为共线情况下自发参量下转换示意图。当一个

① 收稿日期: 2014-05-17

基金项目: 国家重点实验室研究发展计划(973)项目(批准号: 2010CB923103); 国家自然科学基金(基金号 10874106; 11274211 和 61121064)

作者简介: 郝红玉(1990—), 女, 山西运城人, 硕士研究生, 研究领域: 光与原子相互作用。

[†]通信作者: 李淑静; E-mail: lishujing@sxu.edu.cn

高频光子(泵浦光,频率为 ω_p)入射到非线性晶体上时,由于二阶非线性效应,以一定的概率自发转换为两个低频光子(信号光和空闲光,频率分别为 ω_s 和 ω_i)。三光束在晶体内相互作用,使自发参量下转换过程得以持续进行,产生的两个光子即称为下转换关联光子对,且满足能量守恒与动量守恒关系:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_p = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i \quad (2)$$

其中,波矢为 $k = \frac{n\omega}{c}$,角标 p、s、i 分别代表泵浦光、信号光、空闲光。

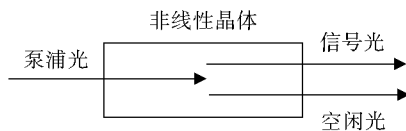


Fig. 1 Collinear case of the SPDC process diagram

图 1 共线情况下的自发参量下转换过程示意图

对于准相位匹配晶体,相位匹配条件为 $\Delta k = k_p - k_s - k_i - k_m = 0$, k_m 是周期极化引起的光栅波矢。通常情况下,由于非线性晶体的双折射效应使得泵浦光、信号光和空闲光在晶体内的折射率不同,因而相位匹配条件不易满足,实验中可通过调节晶体温度改变三束光的折射率,使相位匹配条件成立。

利用单次参量下转换方法产生的纠缠光子对频率分布很宽,为 THz 量级,两光子的关联时间为 ps 量级。原子系综中量子存储的线宽为 MHz 量级,单次参量下转换产生的纠缠光子对无法和原子存储相匹配,所以我们需压窄参量下转换光子对的线宽才能与原子系综有效结合。光学参量振荡是产生窄带纠缠光子对的有效手段。所谓光学参量振荡就是将参量下转换过程放在一个光学谐振腔内进行,这样不仅腔对模式共振的光子有增强效应,而且通过设计合适的腔可以有效压窄下转换光子对的线宽,从而与原子存储有效结合。

2 实验装置及结果

实验装置如图 2 (I) 所示,采用钛宝石激光器作为光源,其输出光的波长为 795 nm。光束首先通

过电光晶体 EOM 进行相位调制,用于对倍频腔和下转换腔进行边带锁定^[19-20],然后经 PBS1 分为两部分,一部分作为 SPDC 的锁腔光,另一部分输入到倍频腔中进行倍频(SHG)^[21]。倍频腔采用驻波腔结构,其中输入镜 M1、输出镜 M2 均为曲率半径为 30 mm 的平凹镜,M2 置于压电陶瓷 PZT 上,M1 对 795 nm 光的透射率为 10%,397.5 nm 光的反射率大于 98%;M2 对 795 nm 光的反射率大于 99%,397.5 nm 光增透。倍频采用 I 类 PPKTP 晶体,尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm。晶体置于紫铜炉中,使用温控仪对其进行精密控温。在倍频腔后通过分束镜 DM(397.5 nm HR/795 nm HT)将基频光(795 nm)和产生的倍频光(397.5 nm)分开。795nm 红光进入 D1 探测器,用于对倍频腔进行锁定,397.5 nm 紫光作为下转换过程的泵浦光。在输入泵浦光功率 400 mW,腔长 62 mm,晶体温度为 53.7 °C 时,输出倍频光功率达到 83 mW,倍频效率为 20.75 %。

我们首先测量了泵浦光单次通过 II 类 PPKTP 晶体时的双光子亮度。实验装置如图 2 (II) 所示,通过半波片 HWP2 和偏振分光棱镜 PBS2 调节输入泵浦光的功率,且使其偏振方向为水平偏振(H)。397.5 nm 紫光经透镜聚焦后注入 PPKTP 晶体,晶体尺寸为 1 mm×2 mm×10 mm,置于紫铜炉中,用温控仪对其进行精密控温。泵浦光连续入射到非线性介质,产生下转换光子对(795 nm),这两个光子偏振方向垂直,分别为 H 偏振和 V 偏振。泵浦光通过晶体后,用分束镜 DM 将其反射开,795 nm 下转换光子对通过 DM 后,经过偏振分束棱镜 PBS 将 H 偏振和 V 偏振光子分开,V 偏振光子从 PBS 反射,进入单光子探测器 SPCM1,H 偏振光子从 PBS 透射,进入单光子探测器 SPCM2。通过对 SPCM1 及 SPCM2 探测到的信号进行符合计数,我们对单次穿过 PPKTP 晶体产生的下转换双光子亮度进行了测量。为减小杂散光及外界噪声的干扰,测量系统放置了光阑及测量波长点的 795 nm 干涉滤光片。整个探测系统封装于黑箱子里,用于屏蔽外界杂散光干扰。

测量结果如图 3 所示,实验测量了 1 s 时间内

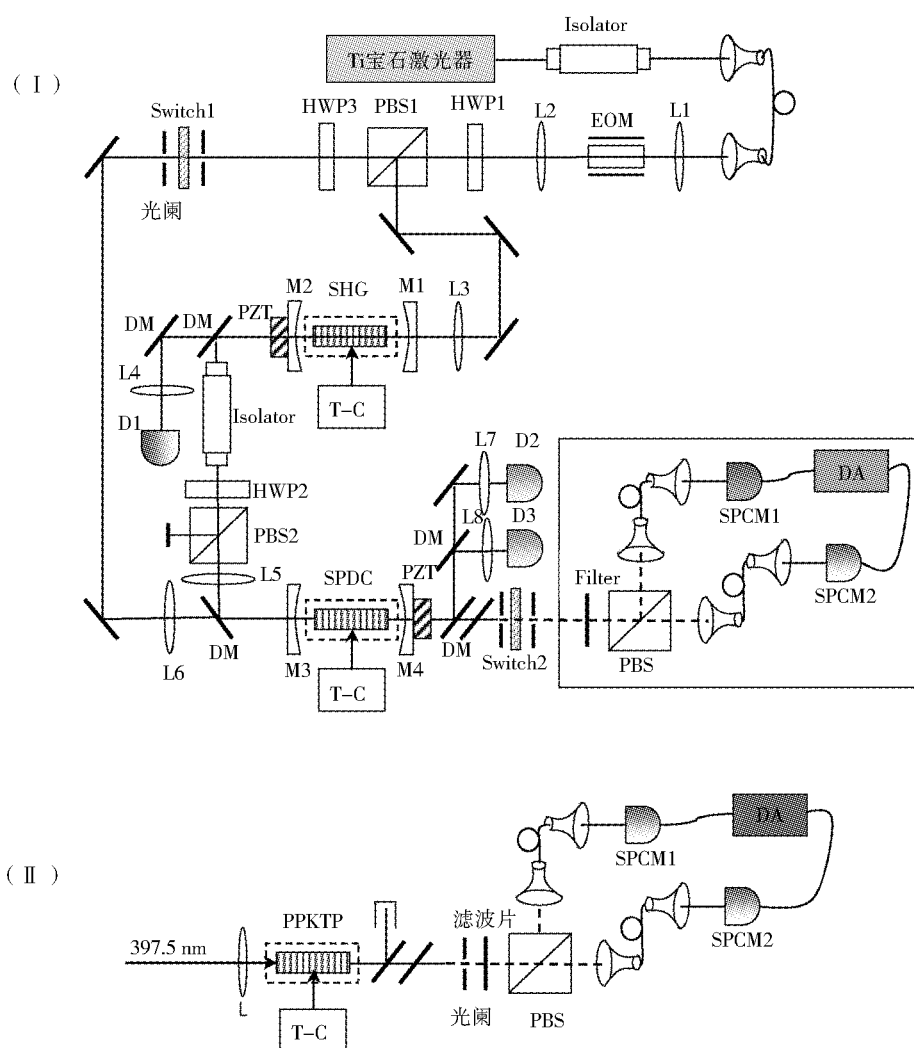


Fig. 2 (I) The experimental setup of SHG and SPDC. (II) The experimental setup of the SPDC process when the 397.5 nm laser through the PPKTP crystal in single.

EOM; electro-optic modulator; PBS; polarizing beam splitter; HWP; half-wave plate; PZT; piezoelectric ceramic; DM; beam splitter; DA; data acquisition card; SPCM; single photon detector; D1-D3; detector; L1-L8; lens

图 2 (I) 倍频及参量下转换实验装置图。(II) 397.5 nm 激光单次穿过 PPKTP 晶体进行参量下转换的实验装置图。EOM:电光调制器;PBS:偏振分光棱镜;HWP:半波片;PZT:压电陶瓷;DM:分束镜;DA:

数据采集卡;SPCM:单光子探测器;D1-D3:探测器;L1-L8:透镜

不同泵浦光功率条件下的光子符合计数,黑点表示测量得到的符合计数,红线表示拟合的实验结果。当 II 类 PPKTP 晶体温度为 40.08℃,注入 397.5 nm 泵浦光功率为 0.3 mW 时,测量到 1 s 时间内的符合计数为 1200/s,随着泵浦光功率的增加,符合计数也随之增大,当注入功率增加为 5 mW 时,符合计数变为 53 150/s。拟合的实验结果表明,符合计数与入射的泵浦光功率成正比,随着泵浦

光功率的增加,符合计数值随之线性增大。

在上述实验基础上,将参量下转换过程置于一个谐振腔中,其中输入镜 M3、输出镜 M4 均为曲率半径为 50 mm 的平凹镜,M4 置于压电陶瓷 PZT 上,M3 对 397.5 nm 光的透射率大于 98%,795 nm 光的反射率大于 99.5%;M4 对 795 nm 光的透射率为 5%,397.5 nm 光的反射率大于 95%。锁腔光与泵浦光在分束镜上合束后进入谐振腔,泵浦光通过

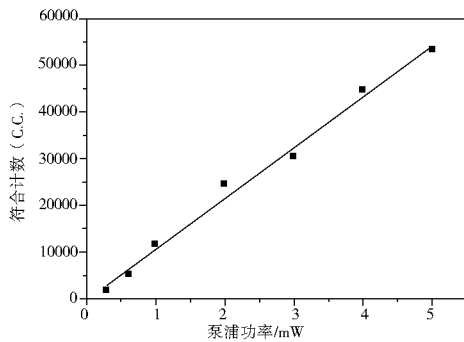


Fig. 3 Variation of the coincidence counts with the different pump power

图 3 符合计数随泵浦光功率变化关系

晶体发生下转换过程,用锁腔光对下转换参量振荡腔进行 Pound-Drever-Hall 锁定。调节晶体温度 (40.08 °C),使 H 和 V 偏振的腔模重合,谐振腔为双共振。下转换产生的 H 和 V 偏振光子分别进入单光子探测器 SPCM1 和 SPCM2。由于锁腔光和下转换光子对波长均为 795 nm,为避免锁腔光进入单光子探测器对其造成损害,我们在锁定光及下转换光子探测光路上,采用两个机械开关 Switch1 和 Switch2 对下转换腔进行了间断锁定。Switch1 打开时 Switch2 关闭,此时对下转换腔进行锁定;下一时刻 Switch1 关闭而 Switch2 打开,锁定光被挡住,但腔仍处于锁定状态,此时单光子探测器对下转换光子进行探测。我们测量了下转换光子对的时间关联特性,单光子探测器 SPCM1 的信号作为开始信号,在 130 ns 的时间内对单光子探测器 SPCM2 的信号进行记录,这个测量过程重复 1×10^7 次,将每次的信号进行累加,即可得到两个垂直偏振光子的时间关联特性。当输入泵浦光功率为 $200 \mu\text{W}$ 时,实验测量得到符合计数随两光子延迟时间的变化关系,如图 4 所示。从图中可以看出延迟时间为 7.3 ns 时,计数值降为延迟时间为 0 时的一半,说明 H 偏振和 V 偏振的下转换光子的关联时间为 14.6 ns,用公式 $e^{-2\pi\Delta\nu|t|}$ 对测量结果进行拟合^[22],可得下转换光子对的线宽 $\Delta\nu$ 约为 15 MHz,说明光学谐振

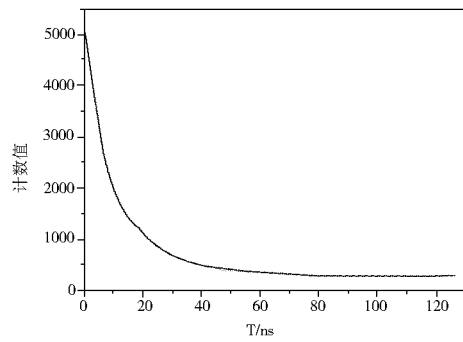


Fig. 4 Time correlation count results when the pump power is $200 \mu\text{W}$

图 4 时间关联测量曲线,其中泵浦光功率为 $200 \mu\text{W}$

腔对下转换光子的线宽进行了有效的压窄。在泵浦光单次穿过 II 类 PPKTP 晶体时,实验上测不到下转换光子对符合计数随延迟时间的变化曲线,因为单次通过时下转换光子对的关联时间在 ps 量级,而我们所用单光子探测器的最小分辨时间为 1 ns。目前谐振腔仍然是多纵模输出,为了实现单纵模输出,下一步我们将设计滤波器对杂散模式进行滤波。

3 结论

我们在实验上进行了自发参量下转换过程产生关联光子对的实验研究。采用 795 nm 激光倍频获得的 397.5 nm 紫光作为下转换过程的泵浦源。观察了泵浦光单次穿过 II 类 PPKTP 晶体时下转换光子对亮度随泵浦光强度的变化关系,当泵浦光为 5 mW 时符合计数值为 53 150/s。在此基础上,将下转换过程放入一个光学谐振腔中,对下转换光子的线宽进行压窄。实验上测得下转换光子对的关联时间为 14.6 ns,对应线宽约为 15 MHz,说明光学谐振腔对下转换光子的线宽进行了有效的压窄。所做工作为纠缠光子在原子系综中的存储提供一定的实验基础。

参考文献:

- [1] SAMUEL L B, MANN A, and REVZEN M. Maximal Violation of Bell Inequalities for Mixed States[J]. *Phys Rev Lett*, 1992, **68**:3259.
- [2] VITTORIO G, LORENZO M, JEFFREY H S. Extended Phase-matching Conditions for Improved Entanglement Generation[J]. *Phys Rev A*, 2002, **66**:043813.
- [3] XTAO H B, YONG Q, JIAN Y, *et al.* Generation of Narrow-Band Polarization-Entangled Photon Pairs for Atomic Quantum Memories[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **101**:190501.
- [4] DANIEL E B and TERRY R. Resource-Efficient Linear Optical Quantum Computation[J]. *Phys Rev Lett*, 2005, **95**:010501.
- [5] BRIEGEL H-J, DÜR W, CIRAC J I, *et al.* Quantum Repeaters; The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication[J]. *Phys Rev Lett*, 1998, **81**:5932.
- [6] YUUKI T, SHIN K, TAKASHI Y, *et al.* Generation of High-fidelity Four-photon Cluster State and Quantum-domain Demonstration of One-way Quantum Computing[J]. *Phys Rev Lett*, 2008, **100**:210501.
- [7] PREVEDEL R, WALTHER P, TIEFENBACHER F, *et al.* High-speed Linear Optics Quantum Computing Using Active Feed-forward[J]. *Nature*, 2007, **445**:65-69.
- [8] EKERT A, BOUWMEESTER D, ZEILINGER A. The Physics of Quantum Information[M]. New York: Springer, 2000: 33-39.
- [9] PAUL G K, KLAUS M, HARALD W, *et al.* New High-Intensity Source of Polarization-Entangled Photon Pairs[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **75**:4337.
- [10] BURNHAN D C and WEINBERG D L. Observation of Simultaneity in Parametric Production of Optical Photon Pairs [J]. *Phys Rev Lett*, 1970, **25**:84.
- [11] DOUGLAS M, HERBERT M. Study in Ammonium Dihydrogen Phosphate of Spontaneous Parametric Interaction Tunable from 4400 to 16 000 Å [J]. *Phys Rev Lett*, 1967, **18**:905.
- [12] 孙立群, 张久馨, 刘亚芳, 等. 自发参量下转换双光子场的产生及其在光学计量中的应用[J]. *应用光学*, 1999, **20**(5): 31-36.
- [13] HONG C K, OU Z Y, MANDEL L. Measurement of Subpicosecond Time Intervals between two Photons by Interference [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**:2044.
- [14] LU X S, CHEN Q F, SHI B S, GUO G C. Generation of a Non-classical Correlated Photon Pair Via a Spontaneous Four-wave Mixing in a Cold Atomic Ensemble[J]. *China Phys Letts*, 2009, **26**:064204.
- [15] 颜辉, 薛正远, 朱诗亮. 冷原子系综中窄线宽纠缠光子对的产生和调制[J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2011, **35**(2): 1-7.
- [16] KURTSIEFER C, ZARDA P, HALDER M, *et al.* Quantum Cryptography: A Step Towards Global Key Distribution[J]. *Nature*, 2002, **419**:450-455.
- [17] SCHMITT M T, WEIER H, FURST M, *et al.* Experimental Demonstration of Free-space Decoy-state Quantum Key Distribution Over 144 km[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, **98**:010504.
- [18] BOUWMEESTER D, PAN J W, MATTLE K, *et al.* Experimental Quantum Teleportation[J]. *Nature*, 1997, **390**:575-579.
- [19] BLACK E D. An Introduction to Pound-Drever-Hall Laser Frequency Stabilization[J]. *Am J Phys*, 2001, **69**(1), 79.
- [20] DREVER R W P, HALL J L, KOWALSKI F V, *et al.* Laser Phase and Frequency Stabilization Using an Optical Resonator[J]. *Apply Phys B*, 1983, **31**, 97-105.
- [21] 李嘉华, 郑海燕, 张玲, 等. 利用 PPKTP 晶体倍频产生 397.5 nm 激光的实验研究[J]. *量子光学学报*, 2011, **17**(1): 30-33.
- [22] OU Y Z and LU Y J. Cavity Enhanced Spontaneous Parametric Down-Conversion for the Prolongation of Correlation

Time between Conjugate Photons[J]. *Phys Rev Lett*, 1999, **83**, 2556.

The Experimental Investigation of 795 nm Correlation Photons Caused by Spontaneous Parametric Down-Conversion

HAO Hong-yu, TIAN long, YUAN Hao-xiang, LI Shu-jing, WANG Hai

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

Abstract: In this paper, we presented an experimental research of 795 nm correlation photons caused by spontaneous parametric down-conversion(SPDC). Selecting the II class PPKTP crystal as the nonlinear medium and the 397.5 nm violet light produced by frequency-doubling as the pump source. When the violet light through the PPKTP crystal in single, we measured the brightness of photons produced by the SPDC process through coincidence counting in experiment. When the pump power is 5 mW, the coincidence count we measured is 5 3150/s. We put the SPDC process in a optical cavity in order to narrow the line width of the conversion photons. The Correlation time of the conversion photons for H and V polarizations experimentally measured is 14.6 ns, the width the time corresponds to is about 15 MHz. This paper provides an experimental foundation for the entangled photons being stored in the Rb atomic ensemble.

Key words: Spontaneous Parametric Down-conversion (SPDC); correlation photons; coincidence count