论文

高纯四光子 GHZ 态的实验制备及非定域性研究

曹连振^{①②}, 赵加强^{①②}, 王晓芹^{①②}, 逯怀新^{①②*}

① 山东省多光子纠缠与操纵重点实验室, 潍坊 261061;

② 潍坊学院物理与光电工程学院, 潍坊 261061

*联系人, E-mail: luhuaixin@wfu.edu.cn

收稿日期: 2012-12-31; 接受日期: 2013-04-26

国家自然科学基金资助项目(批准号: 11174224)

摘要 采用 II 型参量下转换(SPDC)和后选择技术, 实验上制备了保真度达 0.831 的高纯四光子 Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) 态. 通过理论分析和实验优化, 提出一种有效提高四光子对比度的实验方法. 同时利用制备的纠缠态, 研究了四光子 GHZ 态的非定域性, 得到了对四光子 Bell 不等式 28 标准差的偏离, 证明制备的态为真正四体纠缠态. 本文的研究对实验上获得高对比度的多光子纠缠态及非定域性研究具有非常好的借鉴意义.

关键词 四光子 GHZ 态, 高对比度, Bell 不等式, 非定域性

PACS: 03.65.Ud, 03.67.-a, 42.50.Dv

doi: 10.1360/132012-1028

量子信息处理技术在运算速度、信息安全和信息容量等方面能够突破传统信息系统的极限, 具有重要的科学意义和潜在的应用价值^[1,2], 引起了人们越来越多的关注, 成为当前各国科学家研究的热点之一. 而多比特纠缠态被认为是量子信息处理技术的核心资源. 目前多种物理系统都可以实现多比特纠缠态的制备, 如线性光学系统^[3]、离子阱^[4]、原子^[5]、量子点^[6]和腔-QED^[7]等. 其中光子由于其固有的优势: 性质稳定、抗退相干能力强、单比特操纵简单等, 尤其被广泛关注, 被认为是实现量子通讯的最佳候选系统之一. 同时为了在理论和实验上表征制备的纠缠态, 许多相互关联的不等式如 Bell 不等式等被科学家们创造出来, 对不等式的破坏即意味着制备

的态存在纠缠^[8,9]. 特别是 Bell 不等式对定域实在论的破坏不仅可以用来验证量子力学和 EPR 佯谬等基本问题^[10], 还是所有多体量子信息方案处理过程的基础, 如多方密码^[11]和分布式量子计算^[12]等, 并且对纠缠和非定域性的理论研究和实验验证也是量子信息学领域的热点问题之一^[13,14].

然而, 由于通常采用参量下转换过程制备纠缠光子的转化效率较低, 所以制备的纠缠源亮度和保真度较低, 而在远程量子密钥分发和量子隐形传态等量子信息处理中, 纠缠源的亮度和保真度对信息发送的速度和安全性至关重要^[15–17]. 所以, 制备并实验探索提高多光子纠缠体系亮度和保真度等品质的优化方法并研究所制备纠缠体系的性质是量子信息

引用格式: 曹连振, 赵加强, 王晓芹, 等. 高纯四光子 GHZ 态的实验制备及非定域性研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 1079–1083
Cao L Z, Zhao J Q, Wang X Q, et al. Experimental preparation and nonlocality of the high-pure four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger states (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1079–1083, doi: 10.1360/132012-1028

应用领域一个亟待解决的问题. 同时, 理论研究表明, 在多光子纠缠源的亮度和对比度之间存在一定的关系, 只要通过合理的实验优化, 获得较好的对比度就可以获得较高的亮度^[18].

本文在原有工作的基础上, 采用参量下转化和后选择技术, 实验上制备了保真度可达 0.831 的高纯四光子 GHZ 态. 同时详细研究了实验上提高四光子纠缠态对比度的方法, 并给出了合理的物理解释机制. 研究了四光子 GHZ 态的非定域性, 得到了对 Bell 不等式 28 标准差的偏离. 本文研究对实验上获得高对比度的多光子纠缠态及非定域性研究具有非常好的借鉴意义.

1 四光子 GHZ 态的制备及表征

1.1 实验实现四光子 GHZ 态

采用线性光学系统制备四光子纠缠态的实验装置如图 1 所示. 通过优化 II 型参量下转化方法和后选择技术, 两对高保真度的双光子 EPR 对首先被制备. 其中 1 和 2 路光子极化偏振态为 $(|H_1H_2\rangle + |V_1V_2\rangle)/\sqrt{2}$, 3 和 4 路光子极化偏振态为 $(|H_3H_4\rangle + |V_3V_4\rangle)/\sqrt{2}$, 这里 $|H\rangle$ 和 $|V\rangle$ 分别代表水平极化和垂直极化的光子态. 通过精细调节 2 和 3 路光子到达极化分束器 (Polarization Beam Splitter, PBS) 的光程, 使它们同时到达 PBS₂₃, 满足相干叠加条件, 则四光子被制备在 GHZ 态上

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|H_1H_2H_3H_4\rangle + |V_1V_2V_3V_4\rangle). \quad (1)$$

图 1 四光子 GHZ 纠缠态实验制备装置

Figure 1 Schematic diagram of the experimental set-up for the generation of four-photon GHZ entanglement states.

实验中采用波长为 532 nm 的半导体激光器 (Millennia Pro 10 s, Newport Co) 泵浦钛宝石锁模飞秒激光器 (Tsunami, Newport Co) 产生中心波长为 780 nm, 重复频率为 80 MHz, 脉宽约 100 fs 的脉冲激光. 脉冲激光入射到非线性硼酸锂晶体 (LBO-LiB₃O₅) 上可使 780 nm 的红外光倍频产生波长为 390 nm 的紫外脉冲光, 再通过 5 个双色镜 (DM-dichroic Beamsplitters, 反射 390 nm 光, 透射 780 nm 光) 将未发生参量上转换的红外光滤除. 然后, 将紫外光打在第一个硼酸钡 (BBO-barium Borate) 晶体上, 由于 II 型参量下转换效应, 一个 390 nm 的光子劈裂为两个极化方向相互垂直的 780 nm 光子, 由此产生 Bell 纠缠态. 第一个 BBO 晶体上未发生参量转换的 390 nm 紫外光通过第二个 BBO 晶体, 产生第二对 EPR 对. 通过精细调节, 使 2 路和 3 路光子同时到达 PBS 上, 最后制备出式(1)所示的四光子 GHZ 纠缠态.

1.2 表征制备的四光子 GHZ 态

经过精心优化实验方案, 发现 HHHH 和 VVVV 成分的四体符合计数率为 2 Hz, 比文献报道的亮度高两倍左右^[19], H/V 基对比度为 7.9 (实验中, 四体符合计数时间为 600 s, 飞秒脉冲激光每秒激发功率为 200 mW). 为了验证制备的态(1)确实为相干叠加态, 我们在 $+/-$ 基矢下对四光子做了极化投影测量, 其中 $+= (|H\rangle + |V\rangle)/\sqrt{2}$, $- = (|H\rangle - |V\rangle)/\sqrt{2}$. 通过程序控制步进电机, 我们可以精确控制 2 路和 3 路光子到达 PBS₂₃ 的延时时间 (光程差). 延迟可用来调节光子时间上的可分辨性, 相干位置处, $+/-$ 基的对比度为 10.4, 说明得到的是相干叠加态. 当相对于相干位置有正向或负向延迟时, 穿过极化分束器 PBS 的两个光子变得空间可分, 于是对比度便消失, 实验测量结果如图 2 所示.

同时还测量了 H/V, $+/-$ 基下所有可能组合, 实验测量数据如图 3 所示, 结果显示这两组基下制备的态为纯度较好的四光子 GHZ 态, 可以计算态的保真度为 $F=0.831$, 因此可以证明制备的态(1)确实为四体纠缠态.

2 优化四光子对比度的实验方法及物理机制

如实验装置图 1 所示, 为产生四光子纠缠态, 紫外脉冲激光要依次通过 BBO₁ 和 BBO₂ 晶体来产生两对极

图 2 四光子纠缠的 Hong-Ou-Mandel 型相干曲线

Figure 2 The Hong-Ou-Mandel coherent curve of the four-photon states.

化纠缠的光子. 而 BBO 晶体为非线性晶体, 当泵浦光打在 BBO 晶体上时, 将会以一定的概率发生 II 型参量下转换过程, 一个光子被劈成两半, 产生两个极化方向相互垂直的光子, 分别称为 H 光和 V 光. 由于动量、能量守恒关系, 参量下转换出来的两个光子在空间和时间自由度上也是高度关联的. 同时 BBO 是双折射晶体, 产生的 H 光和 V 光在晶体内部的传输速度不同, 离开 BBO 时时间(纵向)就有了偏差. 此外, 纠缠光子的传播方向并不垂直于光轴, H 光和 V 光在 BBO 内部传输后, 在空间(横向)上也有差异. 这种时间和空间上的偏移, 会导致纠缠态的品质的下降. 因此为获得高对比度的双光子对, 需要在相应光路上适当地补偿这个偏移, 如用一块放在 45° 的半波片, 将 H 和 V 互换, 然后再让它们穿过一块厚度为主 BBO 晶体 $1/2$ 的副 BBO 晶体, 可实现时间和空间上的补偿. 但是, 在制备更多光子数目的纠缠态时, 比如说本实验要实现的四光子, 虽然每一对光子具有非常好的对比度, 但是整体测量四光子时, 由于这两对光子也存在时间和空间上的差异, 导致四体对比度非常低. 为解决此问题, 借鉴优化双光子对比度的方法, 我们在第 3 路上又加了一个副 BBO_3 晶体, 并研究了调节此副 BBO_3 晶体的角度对四光子对比度的影响. 实现发现, 当每一对 (12 和 34) 都已实现最好的对比度时, 通过顺时针旋转调节副 BBO_3 晶体 540° , 可使 $+++-$ 符合计数最小, 也就是四光子 $+/-$ 对比度达到最大值, 说明此时达到四体符合的最好位置, 实验结果如图 4 所示. 这种方法不仅可以有效地提高四光子的

图 3 四光子 GHZ 态的实验数据

(a) H/V 基矢下的四体符合计数; (b) $+/-$ 基矢下的四体符合计数
Figure 3 Typical experimental result for polarization measurement. (a) The coincidence rates of all four photons in the H/V basis. (b) The coincidence rates of all four photons in the $+/-$ basis.

对比度, 也是我们获得高亮度四光子纠缠源的重要原因之一.

3 四光子 GHZ 态的非定域性

1935 年, Einstein, Podolsky 和 Rosen^[20]为了说明量子力学的不完备性, 开创性地提出 EPR 佯谬. 为了反驳 Einstein 的定域实在论和隐变数理论, Bell 提出了著名的 Bell 不等式. 后经科学家们推广和发展, 成为验证量子理论跟定域实在论矛盾的有力工具, 特别是针对多粒子 GHZ 态, Ardehali^[21]提出量子力学

图 4 四光子纠缠的+++相干曲线随 BBO₃ 旋转角度的变化关系

Figure 4 The +++- coherent curve of the four-photon states depending on the rotation angle of the BBO₃.

对定域实在论的破坏值会随着纠缠态粒子数的增加而指数增长. 根据定域实在论, 四光子 GHZ 态满足

$$|\langle A \rangle_{LR}| \leq 4. \quad (2)$$

其中

$$A = (\sigma_x \sigma_x \sigma_x - \sigma_x \sigma_y \sigma_y + \sigma_y \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_y \sigma_x)(\sigma_a + \sigma_b) + (\sigma_y \sigma_y \sigma_y - \sigma_x \sigma_y \sigma_x + \sigma_x \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_x \sigma_x) \times (\sigma_a - \sigma_b), \quad (3)$$

并且 $\sigma_a = (\sigma_x + \sigma_y)/\sqrt{2}$, $\sigma_b = (\sigma_x - \sigma_y)/\sqrt{2}$. 式中 $\langle \sigma_x \sigma_x \sigma_x \sigma_a \rangle$ 代表对四光子作 $\sigma_x \sigma_x \sigma_x \sigma_a$ 测量的期望值. $\sigma_x \sigma_x \sigma_x \sigma_a$ 代表对光子 1, 2 和 3 作线性偏振 $\pm$, 同时对光子 4 作椭圆偏振极化测量. $\sigma_x \sigma_x \sigma_x \sigma_b$ 代表对光子 1 做线性偏振测量, 对光子 2 和 3 作圆偏振 R/L 测量, 对光子 4 做椭圆偏振极化测量, 其他的类似. 其中 $|R\rangle = (|H\rangle + i|V\rangle)/\sqrt{2}$, $|L\rangle = (|H\rangle - i|V\rangle)/\sqrt{2}$. 量子

力学理论给出的期望值为

$$|\langle A \rangle_{QM}| \leq 8\sqrt{2}. \quad (4)$$

也就是说对不等式(2)的最大违背为 $2\sqrt{2}$. 为了实验上得到力学量 A 的期望值, 需要对式(3)中 16 力学量逐一测量. 为此需要在 4 路中加入一个四分之一波片, 如作 σ_a 的测量, 需要把四分之一波片设置为与垂直方向的夹角为 -22.5° 和 22.5° . 同理对 σ_b 的测量, 只需把四分之一波片与垂直方向的夹角设置到 -67.5° 和 22.5° 即可. 实验得到的结果为 $|\langle A \rangle_{\text{exp}}| = 9.6 \pm 0.2$ 因此可以算出其相对于方程(2)有 28 标准差的破坏, 因此证明所制备的四光子量子体系具有非常好的非定域性.

4 结论

通过参量下转化和后选择技术, 制备了四光子 GHZ 四体纠缠态, 论述了提高四光子对比度的实验方法, 并给出了合理的物理解释, 最后研究了其非定域性, 本文主要工作可总结如下.

(1) 实验上制备了对比度达 10.4 的高纯四光子 GHZ 态, 并测量了制备态的密度矩阵, 通过密度矩阵, 算出了态的保真度为 0.831, 证明制备的四光子 GHZ 态为非常纯的四体纠缠态.

(2) 研究了提高四光子对比度的实验方法, 通过理论分析和实验优化, 证明通过在光路中额外加入一个副 BBO 晶体, 可以有效提高四光子对比度, 这一工作将为类似甚至更多光子纠缠态对比度的提高, 提供一种有效的方法.

(3) 利用制备的四光子 GHZ 纠缠态, 实验测量了 Ardehali 提出的四粒子 Bell 不等式, 得到破坏值达 28 标准偏差的实验结果, 证明四光子 GHZ 纠缠态具有非常好的非定域性.

参考文献

- 1 Acin A, Brunner N, Gisin N, et al. Device-independent security of quantum cryptography against collective attacks. Phys Rev Lett, 2007, 98: 230501
- 2 Yuan Z S, Bao X H, Lu C Y, et al. Entangled photons and quantum communication. Phys Rep, 2010, 497: 1–40
- 3 Zeilinger A. Experiment and the foundations of quantum physics. Rev Mod Phys, 1999, 71: S288–S297
- 4 Molmer K, Sorensen A. Multiparticle entanglement of hot trapped ions. Phys Rev Lett, 1999, 82: 1835–1838
- 5 Duan L M, Lukin M D, Cirac J I, et al. Long-distance quantum communication with atomic ensembles and linear optics. Nature, 2001, 414: 413–418
- 6 Chen G, Bonadeo N H, Steel D G, et al. Optically induced entanglement of excitons in a single quantum dot. Science, 2000, 289: 1906–1909
- 7 Raimond J M, Brune M, Haroche S. Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity. Rev Mod Phys, 2001, 73:

565–582

- 8 Mermin N D. Extreme quantum entanglement in a superposition of macroscopically distinct states. *Phys Rev Lett*, 1990, 65: 1838–1840
- 9 Lu H X, Zhao J Q, Cao L Z, et al. Experimental investigation of the robustness against noise for different Bell-type inequalities in three-qubit Greenberger-Horne-Zeilinger states. *Phys Rev A*, 2011, 84: 044101
Lu H X, Zhao J Q, Wang X Q, et al. Experimental demonstration of tripartite entanglement versus tripartite nonlocality in three-qubit Greenberger-Horne-Zeilinger-class states. *Phys Rev A*, 2011, 84: 012111
- 10 Barreiro J T, Wei T C, Kwiat P G, et al. Beating the channel capacity limit for linear photonic superdense coding. *Nat Phys*, 2008, 4: 282–286
- 11 Lanyon B P, Barbieri M, Almeida M P, et al. Simplifying quantum logic using higher-dimensional Hilbert spaces. *Nat Phys*, 2009, 5: 134–140
- 12 Zhao J Q, Cao L Z, Wang X Q, et al. Experimental investigation of tripartite entanglement and nonlocality in three-qubit generalized Greenberger-Horne-Zeilinger states. *Phys Lett A*, 2012, 376: 2377–2380
- 13 Zhao J Q, Lu H X, Wang X Q. Preparation of generalized Greenberger-Horne-Zeilinger and measurement of nonlocality (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2011, 41: 1198–1202 [赵加强, 逯怀新, 王晓芹. 广义 GHZ 态的制备和非定域性的测量. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41: 1198–1202]
- 14 Kwiat P G, Waks E, White A G, et al. Ultrabright source of polarization-entangled photons, *Phys Rev A*, 1999, 60: 773–776
- 15 Sanaka K, Kawahara K, Kuga T. New high-efficiency source of photon pairs for engineering quantum entanglement. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 5620–5623
- 16 Kurtsiefer C, Oberparleiter M, Weinfuter H. High-efficiency entangled photon pair collection in type-II parametric fluorescence. *Phys Rev A*, 2001, 64: 023802
- 17 Lu H X, Zhang J, Wang X Q, et al. Experimental high-intensity three-photon entangled source. *Phys Rev A*, 2008, 78: 033819
- 18 Zhao Z, Yang T, Chen Y A, et al. Experimental violation of local realism by four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger Entanglement. *Phys Rev Lett*, 2003, 91: 180401
- 19 Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys Rev*, 1935, 47: 777–780
- 20 Ardehali M. Bell inequalities with a magnitude of violation that grows exponentially with the number of particles. *Phys Rev A*, 1992, 46: 5375–5378

Experimental preparation and nonlocality of the high-pure four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger states

CAO LianZhen^{1,2}, ZHAO JiaQiang^{1,2}, WANG XiaoQin^{1,2} & LU HuaiXin^{1,2*}

¹ Shandong Provincial Key Laboratory of Multi-photon Entanglement and Manipulation, Weifang 261061, China;

² Department of Physics and Electronic Science, Weifang University, Weifang 261061, China

Using the spontaneous parametric down conversion and post-selection method, we experimentally prepare the four-photon Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ) states with a high fidelity about 83.1%. Then, an efficiently method to improve the contrast ratio of the four-photon state is reported by theoretical analysis and experiment optimization. Based on the state, we study the local realism of this state and achieve 28 standard deviations, confirm the existence of genuine four-particle entanglement. Our work has important significance for experimental preparation and studying nonlocality of the high-fidelity multiple-photon entanglement states.

four-photon GHZ state, high contrast ratio, Bell-type inequalities, nonlocality

PACS: 03.65.Ud, 03.67.-a, 42.50.Dv

doi: 10.1360/132012-1028