

文章编号: 0253-2239(2001)01-0001-03

# 飞秒超短脉冲的双光子干涉\*

江云坤 史保森 郭光灿 韩正甫 李 剑 范晓峰

(中国科学技术大学物理系量子通信与量子计算开放实验室, 合肥 230026)

**摘要:** 利用钛宝石飞秒激光超短脉冲抽运 BBO 晶体, 产生 I 型自发光参量下转换的双光子对, 在实验上得到双光子对的四阶干涉现象, 证明了双光子纠缠态的关联特性。

**关键词:** 飞秒超短脉冲; 参量下转换; 双光子纠缠态

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

## 1 引 言

纠缠态的概念是 1935 年爱因斯坦等在著名的 EPR 佯谬的理想实验中提出的<sup>[1]</sup>。在实验上, 一种比较方便而且行之有效的产生纠缠态的方法就是利用晶体的非线性自发参量下转换技术<sup>[2~5]</sup>。大量实验证明参量下转换产生的光子对(信号光和休闲光)在空间和时间上具有高度关联性。自 80 年代末以来, 光参量下转换技术已成为产生纠缠态的重要手段, 并得到广泛应用。以双光子纠缠态作为一种信号源, 在量子密码<sup>[6,7]</sup>、密集编码<sup>[8]</sup>、量子隐形传态以及量子计算等研究中的应用已成为热门的研究领域<sup>[9,10]</sup>。对紫外连续光抽运下的光参量下转换产生的纠缠光子对的研究也日趋成熟, 但以超短脉冲作为抽运光产生参量下转换双光子纠缠态的研究仍处在探索阶段<sup>[11]</sup>。对于非线性晶体, 超短脉冲比连续光具有更高的下转换效率, 能有效地提高纠缠光子对的产生效率, 且其脉冲特性也更利于通信上的应用。我们在实验上已观察到双光子对的四阶干涉现象, 并证实了双光子纠缠态的关联特性。

## 2 实验装置与原理

在自发光参量下转换中, 双光子被同时产生, 成为双光子纠缠态, 满足能量和动量守恒

$$w_s + w_i = w_p, \quad \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i = \mathbf{k}_p, \quad (1)$$

其中  $w_s$ 、 $w_i$ 、 $w_p$  分别为信号光、休闲光、抽运光的中心频率,  $\mathbf{k}_s$ 、 $\mathbf{k}_i$ 、 $\mathbf{k}_p$  分别为信号光、休闲光、抽运光的波矢量。根据晶体的相位匹配条件, 通常存在 I 型(双光子皆为 o 光)和 II 型(双光子分别为 o 光和 e

光)两种下转换类型。限于 I 型参量下转换产生空间波矢方向的纠缠态, 中心频率  $w_s = w_i = w_p/2$ 。

实验装置如图 1 所示。Millennia™ X 激光器输出 532 nm 的连续激光抽运美国光谱物理公司的可调谐钛宝石飞秒激光器, 钛宝石激光器的输出在 690 nm~850 nm 范围内连续可调。选择钛宝石激光器输出中心波长为 770 nm, 脉冲重复率 82 MHz, 即脉冲间隔时间  $\tau$  为 12.2 ns, 经倍频器产生中心波长为 385 nm 的二次谐波作为参量下转换的抽运光, 输出功率为 150 mW, 脉冲宽度  $\delta t$  为 180 fs。抽运光经全反射镜和色散棱镜去除杂散光后抽运非线性晶体。本实验用 I 型切割的 BBO 作为下转换晶体, 切割角度为 30°, 晶体尺寸为 5 mm × 5 mm × 0.5 mm, 适当旋转角度使下转换光以非共线相位匹配。信号光和休闲光与抽运光的夹角皆为 5.0°, 下转换光一路经全反射镜 M<sub>2</sub> 和微米平移棱镜到达分光镜 BS, 另一路经全反射镜 M<sub>3</sub> 到达分光镜 BS, 光路传输距离约为 1.5 m, 最后由单光子探测器 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 探测, 并由符合计数设备进行符合计数。图中 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 是直径为 1 mm 的小孔。探测器 D<sub>1</sub> 和 D<sub>2</sub> 为 EG&G 公司的 SPCM-AQ-15 系列硅雪崩二极管(APD), 由时间-振幅转换器和计数器完成符合计数。调节微米平移台平移棱镜(Prism2)从而改变双光子输出两臂的光程差来实测双光子干涉现象。

根据参量下转换的一阶微扰近似<sup>[11~13]</sup>, 不考虑真空态的影响, 下转换的双光子态为

$$|\Psi\rangle = \int H_1 dt = \int dw_p \iint d\mathbf{k}_s d\mathbf{k}_i \chi_{\text{eff}}(w_s, w_i, w_p) \times \\ l \text{sinc}(\Delta k_z l/2) A(w_p) \delta(w_s + w_i - w_p) \times \\ \delta(\mathbf{k}_{s,\perp} + \mathbf{k}_{i,\perp}) a_s^\dagger a_i^\dagger |0\rangle, \quad (2)$$

其中  $H_1$  为相互作用哈密顿算符,  $\chi_{\text{eff}}(w_s, w_i, w_p)$

\* 国家自然科学基金(19874056 和 69907005)资助项目。

收稿日期: 1999-05-28; 收到修改稿日期: 1999-08-29

为 BBO 晶体非线性系数,  $l$  为晶体的厚度, 抽运光沿  $z$  轴方向,  $k_{s,\perp}$ 、 $k_{i,\perp}$  分别为信号光、休闲光波矢

量的横向分量,  $A(w_p)$  为抽运光的谱分布函数。(2) 式中,  $\Delta k_z = k_{s,z} + k_{i,z} - k_p$ 。

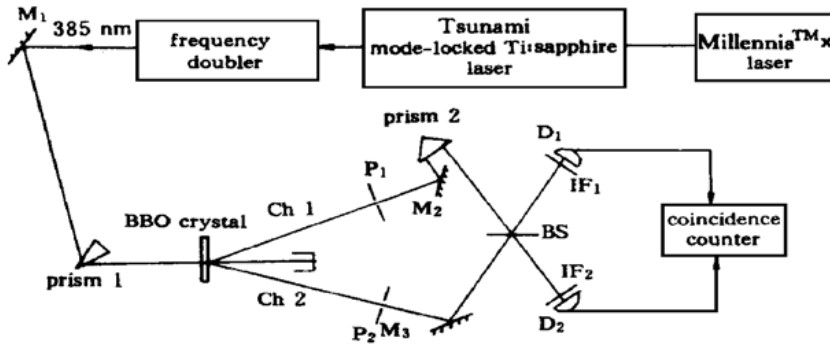


Fig. 1 Schematic of experimental setup

双光子经分束器 BS 后有四种可能的路径: 1) 信号光和休闲光同时被探测器  $D_1$  探测; 2) 信号光和休闲光同时被探测器  $D_2$  探测; 3) 信号光由探测器  $D_1$  探测, 休闲光由探测器  $D_2$  探测; 4) 信号光由探测器  $D_2$  探测, 休闲光由探测器  $D_1$  探测。显然, 前两者均不可能产生符合计数, 只有后两种情况将产生符合计数, 形成双光子干涉。这样, 经分束器 BS 后, 态函数变为

$$|\Psi\rangle = \int H_1 dt = \int dw_p \iint dk_s dk_i \chi_{\text{eff}}(w_s, w_i, w_p) \times \\ l \text{sinc}(\Delta k_z l / 2) A(w_p) \times \\ \delta(w_s + w_i - w_p) \delta(k_{s,\perp} + k_{i,\perp}) \times \\ [e^{-iw_s L_1/c} e^{-iw_i L_2/c} a_s^+ a_i^+ - \\ e^{-iw_i L_1/c} e^{-iw_s L_2/c} a_i^+ a_s^+] |0\rangle, \quad (3)$$

$L_1$ 、 $L_2$  分别为参量光经通道 1 和通道 2 到达分束器 BS 的光程。 $D_1$ 、 $D_2$  符合计数率可表示为

$$R_c \propto \frac{1}{T} \iint dt_1 dt_2 \langle \Psi | E_1^{(-)} E_2^{(-)} E_2^{(+)} E_1^{(+)} | \Psi \rangle = \\ \frac{1}{T} \iint dt_1 dt_2 |\langle 0 | E_2^{(+)} E_1^{(+)} | \Psi \rangle|^2, \quad (4)$$

其中  $T$  为探测器的探测时间,  $E_1^{(+)}$ 、 $E_2^{(+)}$  为  $D_1$ 、 $D_2$  的场算符, 表示如下:

$$E_1^{(+)} = \int dw f_1(w - \Omega_1) \exp(-iwt) a_1(w), \quad (5)$$

$$E_2^{(+)} = \int dw f_2(w - \Omega_2) \exp(-iwt) a_2(w), \quad (6)$$

其中  $f_1(w)$ 、 $f_2(w)$  为干涉滤光片谱分布函数, 其中心波长为  $\Omega_1$ 、 $\Omega_2$ ,

$$f_i(w) = C_i \exp[-(w - \Omega_i)^2 / 2\sigma_i^2] \\ i = 1, 2, \quad (7)$$

$C_i$  为常数,  $\sigma_i$  为半宽度常数。(4) 式的计算结果可表示为

$$R_c = R_{c0} [1 - \rho(\delta L)], \quad (8)$$

其中  $R_{c0}$  为常数,  $\delta L = L_2 - L_1$ ,  $\rho(\delta L)$  为  $\delta L$  的函数,  $\rho(\delta L)$  还与抽运光脉冲宽度、晶体厚度、干涉滤光片的半宽度有关。 $\rho(\delta L)$  通常可近似为高斯分布函数,  $\delta L = 0$  时反映量子干涉的最高可见度。强度关联实验的经典理论分析可得到类似结果<sup>[14]</sup>, 但在经典强度关联实验中,  $\rho(0) \leq 0.5$ , 而量子干涉可使  $\rho(0) > 0.5$ 。

### 3 实验结果与分析

实验结果示于图 2。图中纵坐标表示符合计数

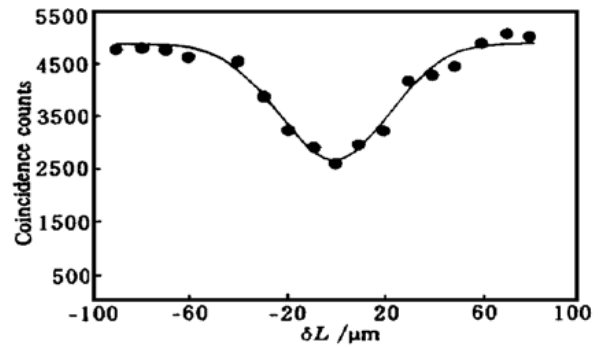


Fig. 2 The measured number of coincidences as a function of position between signal and idler photons

的大小, 每个数据计数时间为 100 s, 横坐标为微米平移台的刻度, 符合计数器的计数时间窗口为 1 ns, 实验在 100 s 内背景光的符合计数为 0。单个探测器的计数基本保持不变, 平均每秒计数为 5.4 k, 与棱镜的平移无关, 说明实验不存在二阶干涉现象。图 2 曲线是双光子的干涉图样, 显然, 是一种双光子的四阶干涉现象。图 2 实线为实验数据拟合曲线, 符合倒高斯分布, 拟合曲线表达式为

$$R_c = 4879.8 \times$$

$$\{1 - 0.455 \exp[-(\delta L)^2 / 2 \times (45.6)^2]\}. \quad (9)$$

由上式拟合数据得  $\rho(0) = 0.45$ , 条纹半宽度为

91.2  $\mu\text{m}$ 。该实验结果未能超出经典极限。这是由于本实验用飞秒激光作为抽运光源, 其相干时间约为 180 fs, 远小于连续激光的相干时间。在连续光抽运下, 满足抽运光的相干时间远大于下转换光的相干时间, 这样, 连续光泵浦可以得到  $\rho(0)$  大于 0.5 的干涉条纹的可见度, 而在超短脉冲抽运下, 上述条件不再满足, 使得干涉条纹可见度下降。要得到较高的条纹可见度, 有两种方法, 一是增长抽运光的相干时间, 也就是加大激光器的脉冲宽度, 但是大范围改变激光器的输出脉宽在实验上不易实现。另一方法就是在单光子探测器前加窄带干涉滤光片以增加探测光子对的相干时间, 从而提高干涉条纹的可见度。本实验在现有条件下所使用的干涉滤光片的半高全宽为 14 nm, 对应的相干时间约为 140 fs, 在实验上影响很小; 另外,  $\rho(0)$  的大小还与实验误差有关, 包括光路的校准等因素。要得到更高的条纹可见度, 需要更窄的干涉滤光片, 从而得到的干涉条纹可见度可超过经典极限。

**结论** 利用可调谐钛宝石飞秒激光抽运 I 型切割的 BBO 晶体, 由晶体的非线性过程产生自发光参量下转换双光子对(信号光和休闲光), 从而获得空间纠缠的双光子态, 并在实验上得到双光子的四阶干涉现象, 从而证明了双光子纠缠的关联特性, 并且分析了飞秒脉冲抽运下的双光子纠缠态关联特性。

### 参 考 文 献

- [1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can the quantum mechanical description of physical reality be considered complete?. *Phys. Rev.*, 1935, **47**: 777~ 780
- [2] Shih Y H, Alley C O. New type of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm experiment using pairs of light quanta produced by optical parametric down conversion. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(28): 2921~ 2924
- [3] Ou Z Y, Mandel L. Observation of spatial quantum beating with separated photodetectors. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, **61**(1): 54~ 57
- [4] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L. Measurement of subpicosecond time intervals between two photons by interference. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(18): 2044~ 2046
- [5] Kwiat P G, Stenbergh A M, Chiao R Y. High-visibility interference in a Bell inequality experiment for energy and time. *Phys. Rev. (A)*, 1993, **47**(4): R2472
- [6] Franson J D. Two-photon interferometry over large distances. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(7): 4552~ 4555
- [7] Ekert A K, Rarity J G, Tapster P R *et al.*. Practical quantum cryptography based on two-photon interferometry. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **69**(69): 1293~ 1295
- [8] Mattle K, Weinfurter H, Kwiat P G *et al.*. Dense coding in experimental quantum communication. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(25): 4656~ 4659
- [9] Bennet C H, Brassard G, Crepeau C *et al.*. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(70): 1895~ 1899
- [10] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K *et al.*. Experimental quantum teleportation. *Nature*, 1997, **390**(11): 575~ 579
- [11] Giuseppe G D, Haiberger L, Martini F D. Quantum interference and indistinguishability with femtosecond pulses. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **56**(1): R21~ R24
- [12] Shih Y H, Sergienko A V. Two-photon anti-correlation in a Hanbury Brown-Twiss type experiment. *Phys. Lett. (A)*, 1994, **186**(1): 29~ 34
- [13] Joobeur A, Saleh B E A. Spatio-temporal coherence properties of entangled light beams generated by parametric down conversion. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(4): 3349~ 3361
- [14] Ou Z Y. Investigation of nonclassical and nonlocal effects in four-order optical interference, *Ph. D Thesis*, University of Rochester, U. S. A., 1990

## Two-Photon Interference with Femtosecond Pulses

Jiang Yunkun Shi Baosen Guo Guangcan Han Zhengpu Li Jian Fan Xiaofeng  
 (The Center of Nonlinear Science, University of Science & Technology of China, Hefei 230026)  
 (Received 28 May 1999; revised 29 August 1999)

**Abstract:** A BBO nonlinear crystal was used in the experiment. A pair of light quanta called signal and idler light quanta is produced through the nonlinear process of type I spontaneous parametric down-conversion with Ti:sapphire femtosecond pulses. The fourth-order interference phenomena was observed and the correlation behavior of the two-photon entangled state was demonstrated.

**key words:** femtosecond pulses; parametric down conversion; two-photon entangled state