量子光学学报 18(3)：230～235，2012
Acta Sinica Quantum Optica

文章编号：1007-6654(2012)03-0230-06 ⑳

确定性量子分束器的实验研究

张海龙[1,2]， 白云飞[1]， 张俊香[1]， 郜江瑞[1,†]

（1. 量子光学与光量子器件国家重点实验室，山西大学光电研究所，山西 太原 030006； 2. 解放军信息工程大学电子技术学院，河南 郑州 450004）

摘要： 基于“时间反演”的 HOM 干涉原理，利用一个普通的分束器将Ⅰ类自发参量下转换过程产生的一对飞秒脉冲量级、简并单光子对完全分离，分束效率最高可以达到 92%。

关键词： 量子分束器； 确定性； 简并光子对

中图分类号： O431 **文献标识码：** A

0 引言

在量子物理和量子信息通信研究中，纠缠态是最重要的资源之一[1-4]。产生纠缠态的方法主要有光学参量振荡器[5]、四波混频[6]和参量下转换[7]，目前较成熟的、研究人员普遍使用的则是利用脉冲光与中心非对称晶体相互作用的自发参量下转换过程[1,3]。该过程中，在满足相位匹配、动量守恒和能量守恒的条件下，一个高频率的光子（泵浦光）湮灭后产生一对低频的、高度关联的光子对（分别称为信号光和闲置光）[8]。根据下转换光子对不同的偏振组合情况，可以分为Ⅰ类和Ⅱ类参量下转换。Ⅰ类过程产生的光子对偏振相同，而Ⅱ类过程产生的光子对偏振相互垂直[9,10]。

在相空间中波包形状相同、物理特性完全简并的光子对在线性量子计算[11]、量子网络[12]和量子保密通讯[13]中发挥着重要作用，如何操控这样一对粒子也成为研究人员关注的课题之一。对于Ⅱ类下转换过程产生的偏振相互垂直的光子对，我们可以用一个偏振分束器来彻底将它们分离[14]；而对于Ⅰ类下转换过程，除非光子对为频率非简并或以非共线方式传输，否则很难将它们完全分开[15,16]。在这样的技术背景下，人们通常用一块普通的、分束比为 50∶50 的分束器来概率性地分开简并光子对[17-19]。直到 2007 年，Jun Chen 小组才提出了一个基于 Sagnec 光纤环的确定性分束方案[20]，即一束皮秒量级的泵浦光入射到光纤环中，通过一个分束器将其分为顺时针（CW）和逆时针（CCW）传输的、功率相等的两部分。每一束泵浦光都和光纤环发生非线性相互作用，经由四波混频过程各产生一个双光子源。由于入射的泵浦光功率不高而且光纤环的非线性效率有限，所以两个双光子源产生光子对的时刻在绝大多数情况下是不相同的；但是，从量子态的角度而言，这两个双光子态的相位完全相同。满足以上条件的两个双光子态在光纤环内以相反方向传输一周后同时到达分束器输出端并耦合，经过干涉作用后，可以从两个输出端口各出射一个光子，并且效率应接近 100%。

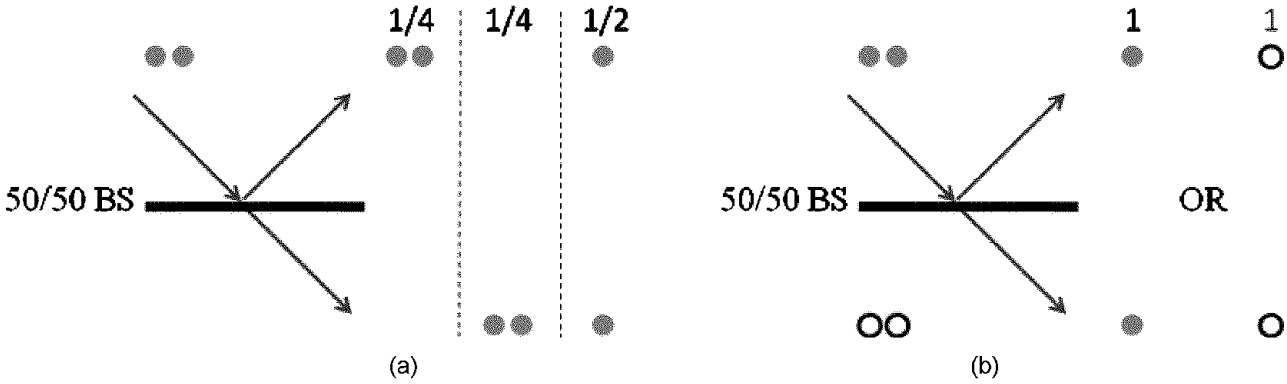
本文中，我们利用一个普通的分束器，以较高的分束效率将飞秒量级的双光子源完全分离，并通过 HBT 实验装置证实了该方案的有效性。

⑳ **收稿日期：** 2012-03-26
基金项目： 国家自然科学基金（60978008，61008006）
作者简介： 张海龙（1979—），男，甘肃武威人，博士生，研究领域：量子光学与量子信息。
†通讯作者： E-mail：jrgao@sxu.edu.cn

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

1　基本原理

当一对完全简并的光子对入射到一个50∶50的分束器上时，其输出状态的概率分布可由图1(a)表示：



(a) 双光子模型，(b) 双光子与真空形成的纠缠态模型

图1　双光子与分束器作用模型

(a) the pure two-photon state. (b) the entangled state of two-photon and vacuum

Fig. 1　The which-way probability distribution when two photons escape from a 50∶50 BS under different conditions

两光子态在光子数表象中可以表示为$|2\rangle$，当入射到分束器时，系统的输入态等于分束器两个输入端口状态的直积：$|\psi\rangle_{in1}=|2\rangle_a|0\rangle_b$。根据分束器的输入输出关系[21]，输出态可以表示为[20,22]：

$$|\psi\rangle_{out1}=\frac{1}{\sqrt{2}}\frac{|2\rangle_d|0\rangle_c-|0\rangle_d|2\rangle_c}{\sqrt{2}}+\frac{i}{\sqrt{2}}|1\rangle_d|1\rangle_c=\frac{1}{\sqrt{2}}\psi_{2002}+\frac{i}{\sqrt{2}}\psi_{11}\tag{1}$$

ψ_{2002} 和 ψ_{11} 分别表示两光子从相同的输出端口出射和从不同的输出端口出射。上式表明：一对相同的光子在入射到分束器上时，各自独立地选择输出端口，它们不能被确定地分束。

当输入态是两光子和真空的光子数纠缠态 $|\psi\rangle_{in}=m|2\rangle_a|0\rangle_b+e^{i\delta}\cdot n|0\rangle_a|2\rangle_b$ 时，如图1(b)所示，其输出将变为：

$$|\psi\rangle_{out2}=\frac{m-e^{i\delta}\cdot n}{\sqrt{2}}\psi_{2002}+\frac{i(m+e^{i\delta}\cdot n)}{\sqrt{2}}\psi_{11}\tag{2}$$

根据上式计算可得：当 $m=n=1/\sqrt{2}$ 且 $\delta=0$ 时，$|\psi\rangle_{out2}=\psi_{11}$，此时系统处于确定性分束的状态；当 $m=n=1/\sqrt{2}$ 且 $\delta=\pi$ 时，$|\psi\rangle_{out2}=\psi_{2002}$，此时系统处于完全不被分束的状态。除此之外，系统将处于 ψ_{2002} 和 ψ_{11} 的叠加态。

以上现象和四光子干涉有本质的区别。当分束器的两个输入端口分别有两个光子入射时，输入态可表示为$|2,2\rangle$，根据多光子干涉理论，输出端口的量子态为 $|\Psi\rangle=\sqrt{3/8}(|4,0\rangle+|0,4\rangle)+1/2|2,2\rangle$[23]。不难看出，输出端并没有出现$|1,3\rangle$和$|3,1\rangle$项，而按照经典理论，$|1,3\rangle$和$|3,1\rangle$出现的概率各为1/8。因此无论是四光子干涉模型还是确定性分束模型，正是由于量子效应的存在使得光场干涉的概率分布与经典理论大相径庭。

2　实验装置

实验装置如图2所示。从锁模(Mode Locked)激光器输出的850 nm的基频光(粗实线箭头)绝大部分能量输入倍频腔(SHG)用于产生425 nm的泵浦光(粗实线)，一小部分能量用于光路的准直(虚线)。准直光束通过双色镜DM1(850 nm高反，425 nm高透)注入泵浦光路中，在数据采集时将会被挡掉。泵浦光被透镜L1和L2匹配到一个特定的空间模式上。为了获得较高的下转换效率，BBO晶体放置在泵浦光的焦点处。当泵浦光由左向右穿过BBO晶体时，产生了中心波长为850 nm的、共线简并的Ⅰ类下转换光源，透射的泵浦光被双色镜DM3反射，下转

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

换光则透过 DM3 进入探测系统。被反射的泵浦光由右向左再次穿过晶体，并产生另一束下转换光源。为了使这两束下转换光完全不可区分，可以轻微调节 DM3 使得两个下转换过程有着相同的相位匹配角。漏过 DM2 和 DM3 的泵浦光子被各自光路中的双色镜组 DM4 和 DM5 可靠地反射。下转换光被透镜 L3、L4 耦合进单模光纤 SMF 之前，先通过红玻璃 RG 和干涉滤波片 F，可以把泵浦光子和噪声光子与下转换光子隔离。可变光衰减器 VOA 用于平衡两个下转换过程中的双光子产生率。

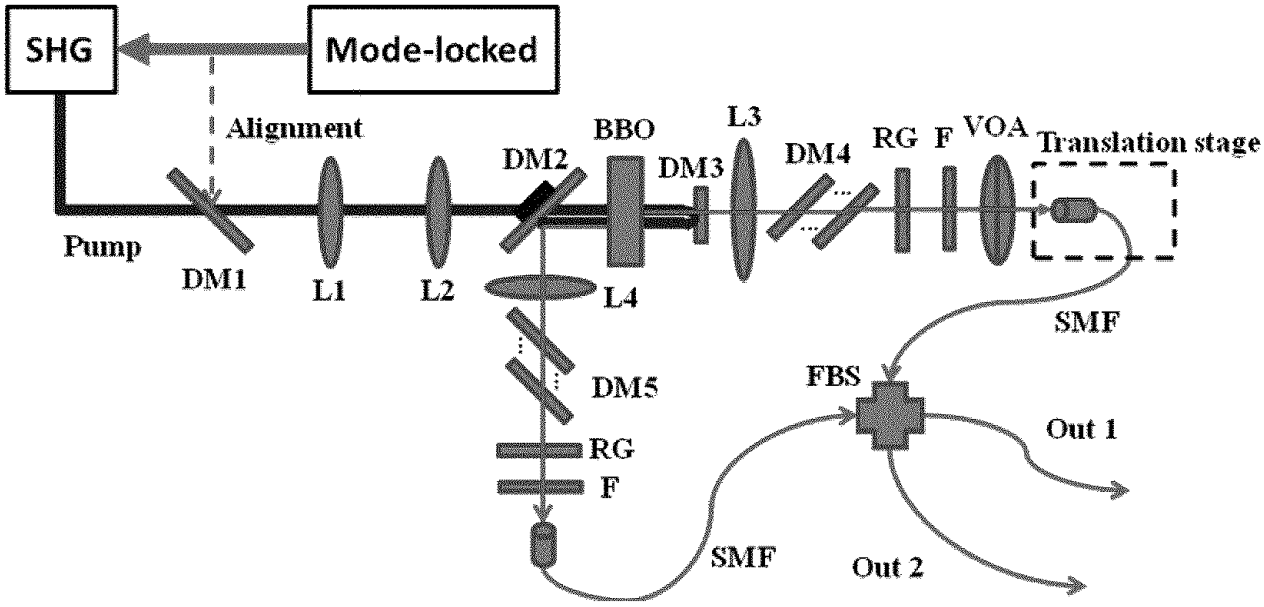


图 2　确定性量子分束器的实验装置图

Fig. 2　Experimental setup of Deterministic Quantum Splitter

从分束器的两个输出端口出射的光子分别被单光子探测器 D1 和 D2 探测，然后进行单臂计数以及符合计数的测量，如图 3 a)所示。如果双光子被彻底分开的话符合计数将达到一个比较高的数值。为了进一步验证确定性分束器的性能，我们将分束器其中一个输出端口 Out2 挡住，另外一个输出端口 Out1 出射的光经过 50∶50 的分束器分束后分别被单光子探测器 D3 和 D4 探测，进行类似于 HBT 实验的符合计数测量，如图 3 b)所示。如果双光子被分开，那么从 Out1 输出的将始终为单光子，那么探测器 D3 和 D4 间的符合计数理论上应该为零。

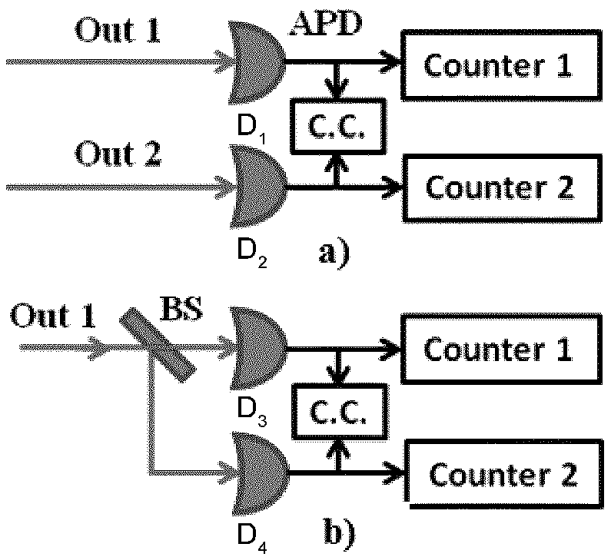


图 3　确定性分束器的测量 a)和验证 b)装置

Fig. 3　The measurement and verification scheme of Deterministic Quantum Splitter

本实验关键在于 $|2\rangle_a|0\rangle_b$ 和 $|0\rangle_a|2\rangle_b$ 模式之间的匹配。时间和空间上的模式匹配度是决定实验能否成功的关键。在时间上，分辨率为 0.3 μm 的电控平移台和压电陶瓷(置于 DM2 基底上)用于精确调节相位延迟；在空间上，基于单模光纤的分束器用来实现空间模式的良好匹配，当光束注入单模光纤时，光束的空间模式就转变为单模光纤的模式，因此空间模式匹配的问题可

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

以自动得到解决；在频域上，通过精确调节下转换过程的相位匹配角使得它们的频谱分布趋于一致。还有一个重要的因素是两个下转换光源产生双光子的几率是否相同，也即公式(1)当中几率幅 m 是否等于 n，这可由可变光衰减器 VOA 来完成。

3　实验结果

当两束下转换光的相对相位差 δ 被 PZT 扫描时，两个单光子探测器的单臂计数和符合计数的结果由图 4 表示。符合计数的时间窗口为 5 ns，计数时间为 10 ms。在 10 ms 的时间范围内，每一束下转换光双光子的产生个数为 32 对。通常情况下，这将会导致 32 个符合计数。然而，在满足确定性分束的条件下，符合计数值应接近 64。从图中可以看出：当 $\delta = 0$(或 $2k\pi$ ($k \in$ integer))时，符合计数会出现一个峰值，这相对于一个 ψ_{11} 态：不管入射到分束器上的光子对来源于哪一个自发参量下转换过程，它们都将被确定性分束并从分束器不同的输出端口输出。此时，我们所获得的符合计数率为 59，因此该确定性分束器的分束效率为 92%。当 $\delta = \pi$(或$(2k+1)\pi$ ($k \in$ integer))时，符合计数值将达到最低——6 个。此时，入射到分束器上的两个光子将从分束器的同一个输出口输出。不是所有的光子对都会被确定性分束的原因是两个下转换过程不完美的模式匹配以及计数系统的限制。窄带滤波片的使用可能会促进该问题的解决。

为了排除振荡的符合计数是由经典干涉引起的，我们同时记录了两个单光子探测器的单臂计数，如图 4 中所示。理论上讲，来源于不同的下转换过程的两个光子没有固定的相位差，因此一阶经典干涉是不可能的[24]。图中单臂计数的结果是几乎没有振荡的直线，显示了确定性分束不是一个经典的物理过程。单臂计数率的微小差异是由于单模光纤耦合效率的不同和单光子探测器量子效率的不同引起的。

下面从实验上来验证一下确定性分束器。分束器的其中一个输出端口被挡住，另一个输出

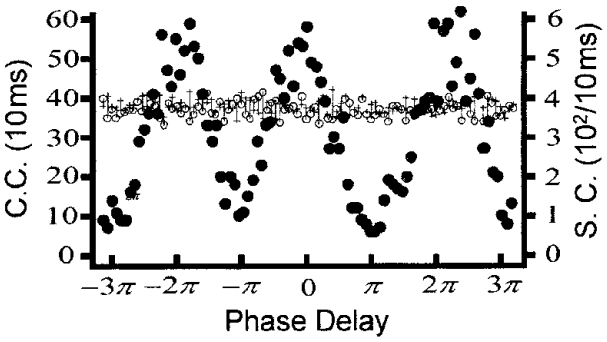


图 4　符合计数 C. C.(实心点)和单臂计数 S. C.(空心圈和十字)

Fig. 4　The coincidence counts (C. C.) and single counts (S. C.), which represented by solid circle, open circle and cross respectively, are shown as the relative phase delay is scanned.

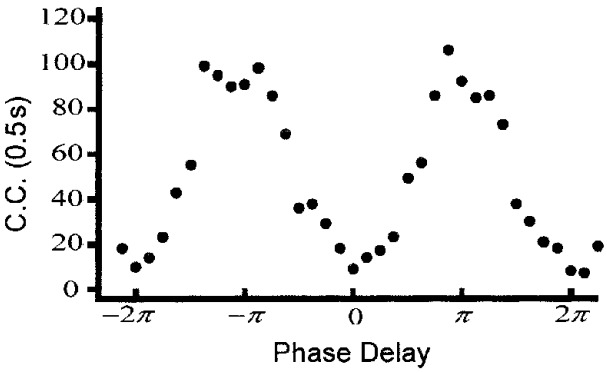


图 5　HBT 的测量结果(0.5 s)

Fig. 5　The HBT result of output (0.5 s)

端接在一个 HBT 测量装置上。符合计数随相位延迟 δ 的变化关系如图 5 所示，我们得到了一个与图 4 完全相反的光子计数统计分布的结果。显而易见：当系统处于 ψ_{11} 态时，最多只有一个光子注入 HBT 测量装置中，此时符合计数值为 0；当系统处于 ψ_{2002} 态时，要么有 2 个光子要么没有光子注入 HBT 装置中，此时符合计数值达到最大值。

4　小结

在本文中，我们从实验上演示了一个仅由一块 I 类 BBO 晶体和分束器构成的确定性量子分束器。结果显示：该装置的分束效率为 92%，表明了其较高的分束性能。最后，通过 HBT 实验

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

装置对该分束器作了进一步的验证。可以预见的是,该过程在量子信息领域中必将发挥越来越重要的作用。

参考文献:

[1] YOSHIHIRO NAMBU, KOJI USAMI, YOSHIYUKI TSUDA, *et al*. Generation of Polarization-entangled Photon Pairs in a Cascade of two Type-I Crystals Pumped by Femtosecond Pulses [J]. *Phys Rev A*, 2002, **66**: 033816.

[2] SHI Bao-sen, AKIHISA TOMITA. Generation of a Pulsed Polarization Entangled Photon Pair Using a Sagnac Interferometer [J]. *Phys Rev A*, 2004, **69**: 013803.

[3] LUO Yu-hui, KAM TAI CHAN. Quantum Cryptography with Entangled Multiphotons of the Same Polarization [J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**: 042302.

[4] MANFRED EIBL, SASCHA GAERTNER, MOHAMED BOURENNANE, *et al*. Experimental Observation of Four-photon Entanglement from Parametric Down-conversion [J]. *Phys Rev Lett*, 2003, **90**: 200403.

[5] ENRICO POMARICO, BRUNO SANGUINETTI, NICOLAS GISIN, *et al*. Waveguide-based OPO Source of Entangled Photon Pairs [J]. *New J Phys*, 2009, **11**: 113042.

[6] HIROKI TAKESUE, KYO INOUE. Generation of Polarization-entangled Photon Pairs and Violation of Bell's Inequality Using Spontaneous Four-wave Mixing in a Fiber Loop [J]. *Phys Rev A*, 2004, **70**: 031802.

[7] CENTINIL M, J PEŘINA JR, SCISCIONE L, *et al*. Entangled Photon Pair Generation by Spontaneous Parametric Down-conversion in Finite-length One-dimensional Photonic Crystals [J]. *Phys Rev A*, 2005, **72**: 033806.

[8] HOU SHUN POH, CHUNE YANG LUM, IVAN MARCIKIC, *et al*. Single-mode Coupling Efficiencies of Type-II Spontaneous Parametric Down-conversion: Collinear, Noncollinear, and Beamlike Phase Matching [J]. *Phys Rev A*, 2007, **75**: 043816.

[9] YOON-HO KIM, MARIA CHEKHOVA V, SERGEI KULIK P, *et al*. Interferometric Bell-state Preparation Using Femtosecond-pulse-pumped Spontaneous Parametric Down-conversion [J]. *Phys Rev A*, 2001, **63**: 062301.

[10] OSUNG KWON, YOUNG-WOOK CHO, YOON-HO KIM. Single-mode Coupling Efficiencies of Type-II Spontaneous Parametric Down-conversion: Collinear, Noncollinear, and Beamlike Phase Matching [J]. *Phys Rev A*, 2008, **78**: 053825.

[11] KNILL E, LAFLAMME R, MILBURN G J. Stopping Light in its Tracks [J]. *Nature*, 2001, **409**: 461-462.

[12] ALMENDROS M, HUWER J, PIRO N, *et al*. Bandwidth-tunable Single-photon Source in an Ion-trap Quantum Network [J]. *Phys Rev Lett*, 2009, **103**: 213601.

[13] CHARLES SANTORI, DAVID FATTAL, JELENA VUC KOVIC, *et al*. Indistinguishable Photons from a Single-photon Device [J]. *Nature*, 2002, **419**: 594-597.

[14] 马海强,王素梅,吴令安. 基于偏振纠缠光子对的单光子源 [J]. 物理学报, 2009, **58**: 717-721.

[15] BURLAKOV A V, CHEKHOVA M V, KARABUTOVA O A, *et al*. Collinear Two-photon State with Spectral Properties of Type-I and Polarization Properties of Type-II Spontaneous Parametric Down-conversion: Preparation and Testing [J]. *Phys Rev A*, 2001, **64**: 041803.

[16] HUGUES GUILLET DE CHATELLUS, ALEXANDER SERGIENKO V, BAHAA SALEH E A, *et al*. Non-collinear and Non-degenerate Polarization-entangled Photon Generation Via Concurrent Type-I Parametric Downconversion in PPLN [J]. *Optics Express*, 2006, **14**: 10060-10072.

[17] JUN CHEN, KIM FOOK LEE, CHUANG LIANG, *et al*. Fiber-based Telecom-band Degenerate-frequency Source of Entangled Photon Pairs [J]. *Opt Lett*, 2006, **31**: 2798-2800.

[18] HALDER M, TANZILLI S, DE RIEDMATTEN H, *et al*. Photon-bunching Measurement After two 25-km-long Optical Fibers [J]. *Phys Rev A*, 2005, **71**: 042335.

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn

[19] FAN J, DOGARIU A, WANG L J. Generation of Correlated Photon Pairs in a Microstructure Fiber [J]. *Opt Lett*, 2005, **30**: 1530-1532.

[20] JUN CHEN, KIM FOOK LEE, PREM KUMAR. Deterministic Quantum Splitter Based on Time-reversed Hong-Ou-Mandel Interference [J]. *Phys Rev A*, 2007, **76**: 031804.

[21] CAMPOS R A, SALEH B E A, TEICH M C. Quantum-mechanical Lossless Beam Splitter: SU(2) Symmetry and Photon Statistics [J]. *Phys Rev A*, 1989, **40**: 1371-1384.

[22] LI Xiao-ying, YANG Lei, MA Xiao-xin, *et al*. All-fiber Source of Frequency-entangled Photon Pairs [J]. *Phys Rev A*, 2009, **79**: 033817.

[23] CARMAN R L. Observation of Degenerate Stimulated Four-photon Interaction and Four-wave Parametric Amplification [J]. *Phys Rev Lett*, 1966, **17**: 1281-1283.

[24] HONG C K, OU Z Y, MANDEL L. Measurement of Subpicosecond Time Intervals Between two Photons by Interference [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, **59**: 2044-2046.

Experimental Investigation of Deterministic Quantum Beam Splitter of Femtosecond Pulse

ZHANG Hai-long[1,2], BAI Yun-fei[1], ZHANG Jun-xiang[1], GAO Jiang-rui[1]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*; 2. *Institute of Electronic Technology, PLA Information Engineering University, Zhengzhou* 450004, *China*)

Abstract: Based on the principle of "time-reserved" HOM interference, we demonstrate that the completely degenerate femtosecond photon pairs, which come from the type-I spontaneous parametric down conversion process, can be deterministically separated by an ordinary 50 : 50 beam splitter. The maximum splitting efficiency is 92%.

Key words: quantum beam splitter; determinacy; degenerate photon pairs

PDF 文件使用 "pdfFactory Pro" 试用版本创建 www.fineprint.cn