

Sagnac 光纤环制备并分离简并关联光子对的 实验研究

杨磊 刘楠楠 李小英

Experimental research on generating and splitting degenerate correlated photon pairs in Sagnac fiber loop

Yang Lei Liu Nan-Nan Li Xiao-Ying

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 194202 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.194202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

相干态和压缩真空态的自适应最优估计方法

[Adaptive optimal measurement for the squeezed vacuum and coherent state](#)

物理学报.2016, 65(19): 194203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.194203>

激光线宽对单次通过 PPMgO:LN 晶体倍频效率的影响

[Influence of laser linewidth on the conversion efficiency of single-pass frequency doubling with a PPMgO:LN crystal](#)

物理学报.2016, 65(7): 074207 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.074207>

双光子失谐对慢光和光存储影响的实验研究

[Experimental study of the effects of two-photon detuning on slow light and light memory](#)

物理学报.2016, 65(1): 014205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.014205>

基于压缩光的量子精密测量

[Quantum precision measurement based on squeezed light](#)

物理学报.2015, 64(23): 234210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.234210>

基于量子相干控制吸收的准 Λ 型四能级原子局域化研究

[Study on atomic localization of \$\Lambda\$ -type quasi-four level atoms based on absorption with quantum coherent control](#)

物理学报.2015, 64(13): 134204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134204>

Sagnac 光纤环制备并分离简并关联光子对的实验研究*

杨磊 刘楠楠 李小英†

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

(2016年4月22日收到; 2016年7月12日收到修改稿)

光纤中自发四波混频过程产生的频率简并关联光子对是实现量子信息处理和高精密测量的重要资源. Sagnac 光纤环是制备简并关联光子对的典型装置, 利用环中的对向传播光子对在 50/50 分束器的量子干涉, 实现两个孪生简并关联光子的空间分离. 本文利用两束不同波长的脉冲光抽运由 300 m 色散位移光纤和 50/50 分束器组成的 Sagnac 光纤环, 通过环中单模光纤色散引入的相位差控制光子对的对向传播相位差, 获取了空间模式分离的窄带简并关联光子对.

关键词: 窄带简并关联光子对, Sagnac 光纤环, 自发四波混频, 色散

PACS: 42.50.-p, 03.67.-a, 42.65.-k, 42.81.-i

DOI: 10.7498/aps.65.194202

1 引言

简并关联光子对是指非局域关联且频率简并的两个孪生光子, 它们不但是研究量子力学基本问题的重要资源^[1], 也能够广泛地应用于量子离物态^[2]、线性光学量子计算^[3]、量子层析成像^[4]以及高精密测量^[5]中. 其中, 基于简并关联光子对的高可见度 Hong-Ou-Mandel 双光子干涉^[6]应用于量子层析成像, 可将分辨率提高至经典相干层析成像的 2 倍^[4]. 光纤中的自发四波混频参量过程是制备简并关联光子对的一种常用方法^[7-10], 两个抽运光子(频率为 ω_{p1} 和 ω_{p2}) 与光纤 $\chi^{(3)}$ 非线性电极化系数相作用散射为两个频率简并的关联光子(频率为 ω_c), 且满足能量守恒关系 $\omega_{p1} + \omega_{p2} = 2\omega_c$. 这样的光子对模式纯净, 适于获取高可见度的双光子干涉^[10].

光纤中简并关联光子对的产生方式通常可以

分为两种, 一种是两个偏振平行的抽运光产生两个偏振平行的简并光子(来源于 $\chi_{xxxx}^{(3)}$ 分量); 另一种是两个偏振垂直的抽运光产生两个偏振垂直的简并光子(来源于 $\chi_{xyxy}^{(3)}$ 分量)^[8,11]. 为了获取最大的光子对产生效率, 光纤产生的简并光子对通常来源于 $\chi_{xxxx}^{(3)}$ 分量 ($\chi_{xxxx}^{(3)} = 3\chi_{xyxy}^{(3)}$)^[8,11], 而作为资源应用于 Hong-Ou-Mandel 双光子干涉时^[6], 两个偏振相同且频率简并孪生光子的空间分离便成为实验中的难题^[7,10]. Sagnac 光纤环因具有两个端口的输出, 可作为产生和分离简并光子对的实验装置, 它通常由一段非线性光纤、50/50 分束器和偏振控制器 (fiber polarization controller, FPC) 组成^[10,12]. 当抽运光注入 Sagnac 光纤环的一端口后, 经 50/50 分束器顺时针和逆时针在光纤环中传播并分别产生简并光子对. 新产生的对向传播光子对在 50/50 分束器处重新相遇并发生量子干涉, 对向传播光子对的偏振平行(或称偏振模式匹配)和特定传播相位差是两个简并孪生光子空间完全分离的

* 国家自然科学基金青年科学基金(批准号: 11504262)、国家重大科研仪器研制项目(批准号: 11527808)、国家重点基础研究发展计划(批准号: 2014CB340103)、高等学校博士学科点专项科研基金(批准号: 20120032110055)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(青年项目)(批准号: 14JCQNJC02300)和光电信息技术教育部重点实验室(天津大学)开放基金(批准号: 2015KFKT014)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

必要条件^[13].

通常, 连接 50/50 分束器和非线性光纤的两段单模光纤 (single mode fiber, SMF) 的长度是相等的, 将 Sagnac 光纤环调节成为抽运光半反射半透射状态时, 可满足两个孪生光子不同端口输出的相位差条件^[13,14]. 但由于光纤双折射的存在, 直接判断 50/50 分束器处光子对的偏振模式匹配存在着一定的困难, 目前通过注入参考光^[13] 或检测输出孪生光子偏振态的方法可间接判定偏振模式匹配, 但操作较繁琐, 给工程实际应用带来了不便. 根据 Sagnac 光纤环中光场传输的琼斯矩阵变换可得, 当 Sagnac 光纤环任一端口的输出光强为 0 时 (全反射或全透射状态), 顺时针与逆时针传输至 50/50 分束器的对向传播光场的琼斯矩阵 X 分量与 Y 分量的比值相同, 即两对向传输光场干涉时偏振平行, 偏振模式可自动匹配^[12,13]. 本文利用全反射 Sagnac 光纤环偏振模式匹配自动完成的特性, 通过光纤环中两段单模光纤的长度差控制光子对的传播相位差, 获取了空间模式分离的高质量窄带简并关联光子对.

2 实验装置

图 1 是利用 Sagnac 光纤环产生和分离简并关联光子对的实验装置. Sagnac 光纤环由 50/50 分束器和 300 m 色散位移光纤 (dispersion shifted fiber, DSF) 焊接组成, DSF 的零色散波长约为 1545 nm、非线性系数 $\gamma \approx 2 /(\text{W}\cdot\text{km})$. 41 MHz 的光纤锁模脉冲激光器 (Precision photonics, 1110) 的输出光经过双光栅滤波器 1 (double grating filter, DGF1) 分光色散, 获取中心波长 $\lambda_{p1} = 1535.83 \text{ nm}$ 和 $\lambda_{p2} = 1553.33 \text{ nm}$ 的两束脉冲光 E_{p1} 和 E_{p2} . 为了获得足够的抽运功率, 两束脉冲光 E_{p1} 和 E_{p2}

同时注入掺铒光纤放大器 (EDFA) 进行功率放大, 而后经过 DGF2 滤除频率位于关联光子对频段的噪声光子. 经过放大后的脉冲光 E_{p1} 和 E_{p2} 通过环形器 (Cir) 后注入 Sagnac 光纤环, 产生中心波长 $\lambda_c = 1544.53 \text{ nm}$ 的简并关联光子对并同时伴随着自发拉曼光子的产生. 自发拉曼光子是简并光子对的主要噪声之一^[14,15], 冷却光纤是抑制拉曼噪声光子产生的主要手段^[16,17], 本文将 DSF 浸泡于液氮 (77 K) 的杜瓦瓶中以抑制自发拉曼噪声光子的产生. 除 DSF 外, 实验装置的其他部分工作于室温下 (300 K) 且温度恒定.

脉冲光经 Sagnac 光纤环中的 50/50 分束器后, 等功率分为顺时针传输和逆时针传输的两组光场. 顺时针传输的脉冲光经过 SMF1 后, 抽运 DSF 产生简并光子对 $|2\rangle_c$, 经过 SMF2 后输入 50/50 分束器; 逆时针传输的脉冲光经过 SMF2 后, 抽运 DSF 产生简并光子对 $|2\rangle_d$, 经过 SMF1 后输入 50/50 分束器. 此时, 50/50 分束器的输入量子态为

$$|\Psi\rangle_{\text{in}} = \frac{|2\rangle_c|0\rangle_d + e^{i\delta}|0\rangle_c|2\rangle_d}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

δ 代表顺时针传输与逆时针传输光子对的相位差.

两对光子对经干涉后输出量子态的表达式为

$$|\Psi\rangle_{\text{out}} = \frac{1 - e^{i\delta}}{2}|\Psi\rangle_1 + \frac{i(1 + e^{i\delta})}{2}|\Psi\rangle_2, \quad (2)$$

其中

$$|\Psi\rangle_1 = \frac{|2\rangle_a|0\rangle_b - |0\rangle_a|2\rangle_b}{\sqrt{2}}, \quad (3)$$

$$|\Psi\rangle_2 = |1\rangle_a|1\rangle_b. \quad (4)$$

$|\Psi\rangle_1$ 是同一对光子从相同端口输出的量子态; $|\Psi\rangle_2$ 是同一对光子从不同端口输出的量子态. 新产生的光子对继承抽运光的相位, δ 可表示为

$$\delta = \delta_{p1} + \delta_{p2} + \delta_d, \quad (5)$$

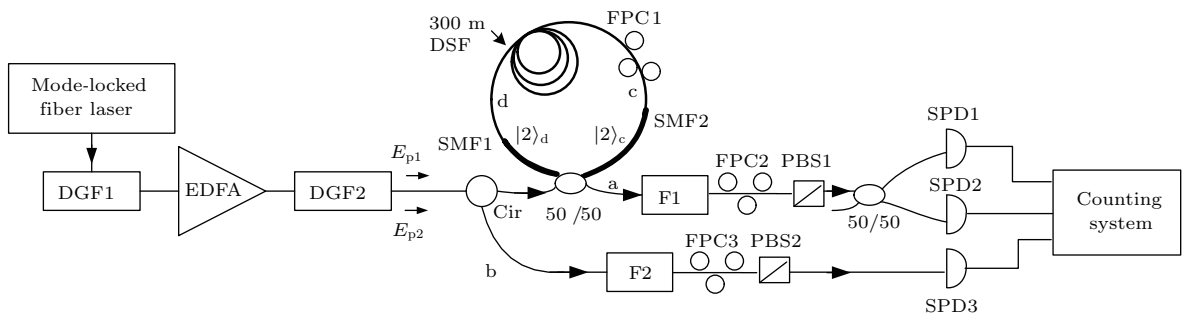


图 1 利用 Sagnac 光纤环产生和分离简并关联光子对的实验装置

Fig. 1. The experimental arrangement for generating and splitting degenerate photon pairs in Sagnac fiber loop.

式中 $\delta_{pi}(i = 1, 2)$ 为抽运光 $E_{pi}(i = 1, 2)$ 的对向传播相位差, 可由 FPC1 调节. δ_d 是 SMF 色散引起的相位差, 能够表示为

$$\delta_d = (k'_{p1} + k'_{p2} - 2k'_c)L_1 - (k_{p1} + k_{p2} - 2k_c)L_2, \quad (6)$$

式中 $k_{pi}(k'_{pi})(i = 1, 2)$ 和 $k_c(k'_c)$ 分别表示抽运光和信号光子在 SMF1(SMF2) 中传输的波矢, L_1 和 L_2 分别是 SMF1 和 SMF2 的长度. (6) 式经二阶色散展开能够化简为

$$\delta_d = -\Delta\Omega^2\beta_2\Delta L, \quad (7)$$

式中

$$\Delta\Omega = \frac{\omega_{p1} - \omega_{p2}}{2} = \frac{2\pi C\Delta\lambda}{\lambda_{p1}\lambda_{p2}}, \quad \Delta\lambda = \frac{\lambda_{p2} - \lambda_{p1}}{2}$$

为抽运光与关联光子之间的波长失谐, C 为光速, β_2 是单模光纤的二阶色散系数.

实验中, Sagnac 光纤环的状态通过监测 a 端口与 b 端口输出抽运光的功率值来判断, 通过调节 FPC1 来改变, FPC1 锁定后 Sagnac 光纤环的状态能够保持 8 个小时以上不变化. 调节 FPC1 使 a 端口的功率值最小且 b 端口输出功率值最大, Sagnac 光纤环为全反射状态 ($\delta_{p1} + \delta_{p2} = \pi$), 此时 $\delta = \delta_d + \pi$; 同时调整 SMF1 与 SMF2 之间的长度差为 3.3 m, 控制光子对的对向传播相位差 $\delta = 2\pi$. 以上两个实验环节既保证了对向传播光子对的偏振模式匹配, 又保证了光子对完全空间分离的相位差条件.

为了达到对于抽运光子 100 dB 的隔离, 从 a 端口和 b 端口输出的光子分别经过滤波器 F1 和 F2. F1 和 F2 均由可调谐滤波器和 WDM 滤波器串接组成, 且传输频谱相同(中心波长等于 1544.53 nm, -3 dB 带宽等于 1.1 nm), 对于抽运光的隔离度约为 120 dB. FPC2(3) 和偏振分束器 PBS1(2) 的作用是选择与抽运光同偏振的光子通过, 抑制与抽运光垂直偏振的自发拉曼散射光子^[15]. 装置中, 滤波器 F1 和 F2 的传输效率分别约为 44% 和 55%, FPC2(3), PBS1(2), Cir 的传输效率分别约为 90%、90% 和 80%.

从 a 端口输出的光子经由 50/50 分束器分别由单光子探测器 SPD1 和 SPD2 探测, 获取单通道计数率 N_1 和 N_2 ; 从 b 端口输出的光子直接由单光子探测器 SPD3 探测, 获取单通道计数率 N_3 . 探测

器工作于门模盖革模式下^[18], 系统的触发频率为 2.58 MHz, 是入射抽运脉冲重复频率的 1/16, 并设置死时间为 10 μ s. 系统中, SPD1、SPD2 和 SPD3 的探测效率分别为 10%, 7% 和 10%. 单光子探测器的输出电信号经由数据采集卡(National Instruments, PCI8251) 写入计算机, 在 Labview8.2 的软件环境中记录单通道计数率和任意两个探测器之间的符合计数率. SPD1 与 SPD2 之间的符合计数率 C_{12} 和 SPD1 与 SPD3 之间的符合计数率 C_{13} 可分别表示为

$$C_{12} = N_1N_2g^{(2)} + N_2\eta_1\xi_c\frac{1 - \cos\delta}{2}, \quad (8)$$

$$C_{13} = N_1N_3 + N_3\eta_1\xi_c\frac{1 + \cos\delta}{2}, \quad (9)$$

式中 $g^{(2)}$ 为 50/50 分束器输出两光场的归一化二阶关联函数^[19]; η_1 为 SPD1 探测效率与被探测光子传输效率的乘积; ξ_c 为光子对的宣布效率^[20], 与抽运光的 -3 dB 带宽和光子对 -3 dB 带宽有关. (8) 式中第一项表示随机符合计数率与聚束效应产生的额外符合计数率, 第二项为真实符合计数率 C_s , 反映了光子对从同一端口输出的概率. (9) 式中第一项表示随机符合计数率, 第二项为真实符合计数率 C_d , 反映了光子对从不同端口输出的概率.

3 实验结果

实验中 DSF 双折射特性较弱, 因此抽运光的入射角度不影响光子对的产生效率^[21]. 实验结果如图 2 和 3 所示. 图 2 是探测器 SPD3 记录到的单光子计数率 N_3 与双抽运光平均抽运功率 P_{ave} 之间的关系. 其中, 图 2(a) 描述的是与抽运光偏振平行输出光子的单通道计数率, 并利用二次多项式 $N_3 = s_1P_{ave} + s_2P_{ave}^2$ 对数据点进行了拟合, 一次项 s_1P_{ave} 代表自发拉曼散射光子强度, 二次项 $s_2P_{ave}^2$ 代表自发四波混频光子强度. 图 2(b) 描述的是与抽运光偏振垂直输出光子的单通道计数率, 数据表示和拟合的方法同图 2(a). 由图可知, 来源于自发四波混频的光子是输出光子的主要组成部分, 且与抽运光子偏振平行.

图 3 是记录到的符合计数率与双抽运光平均抽运功率 P_{ave} 之间的关系. 其中, 图 3(a) 是 SPD1 与 SPD2 之间的符合计数率 C_{12} 与 P_{ave} 之间的关系. 由图中数据可知, 符合计数率 C_{12} 主要来源于

随机符合计数率和来自于光场聚束效应的额外符合计数率, 并没有来自于光子对的真实符合计数率 ($C_s \approx 0$), 因此说明无光子对从同一个端口输出. 图 3(b) 是 SPD1 和 SPD3 之间的符合计数率 C_{13} 与 P_{ave} 之间的关系, 符合计数率 C_{13} 主要来源于光子对的真实符合计数率 C_d , 且远大于随机符合计数率, 结合图 3(a) 中的数据说明, 同一对光子对完全从两个端口输出. 在较小抽运功率的条件下, 符合计数率与随机符合计数率的比值能够达到 47 : 1, 光子对的纯度较高. 实验中制备出了空间模式分离的高纯度简并关联光子对.

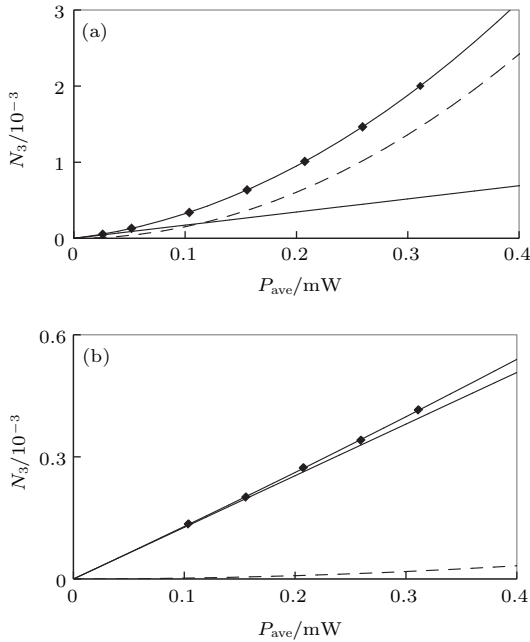


图 2 单通道光子计数率 N_3 与双抽运光平均抽运功率 P_{ave} 之间的关系 (a) 与抽运光偏振平行光子的单通道计数率, 利用二次多项式 $N_3 = s_1 P_{ave} + s_2 P_{ave}^2$ 对实验数据进行拟合, 系数 $s_1 = 0.00288$, $s_2 = 0.01758$; 图中菱形点为数据, 实线为拟合曲线, 虚线为一次项, 点划线为二次项; (b) 与抽运光偏振垂直光子的单通道计数率, 表示方法与图 2(a) 相同, 拟合系数 $s_1 = 0.00198$, $s_2 = 0.00019$

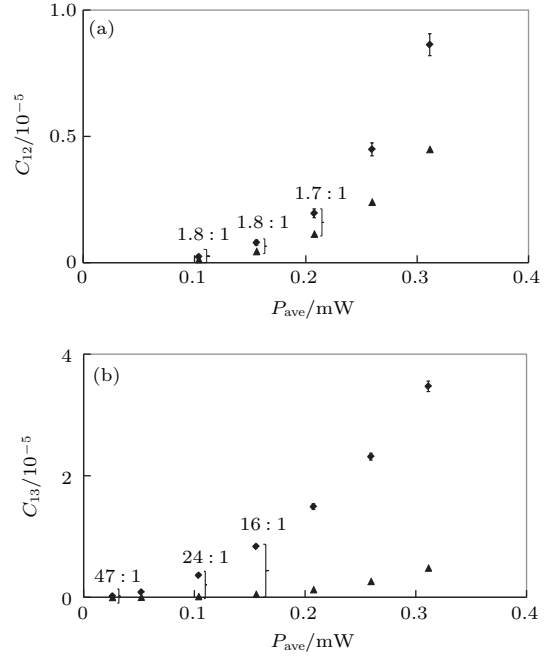


图 3 符合计数率与双抽运光平均抽运功率 P_{ave} 之间的关系 (a) 从同一端口输出光子经过 50/50 分束器的符合计数率 C_{12} , 其中菱形点代表同一脉冲的符合计数率, 三角形点代表相邻脉冲的随机符合计数率, 图中数字表示符合计数率与随机符合计数率之间的比值; (b) 从两端口输出光子的符合计数率 C_{13} , 表示方法与图 3(a) 相同

Fig. 3. Measured coincidence counting rates as a function of the average power of two pumps P_{ave} : (a) Coincidence counting rates C_{12} originated from photons output from same port and pass by the 50/50 beamsplitter versus P_{ave} , where the diamonds represent the total-coincidence counts produced by a single pump pulse and the triangles represent the accidental coincidence counts produced by two adjacent pump pulses, the numbers on the figure represent the ratio between total-coincidence counts and accidental coincidence counts; (b) coincidence counting rates C_{13} originated from photons output from two ports versus P_{ave} , where the showing is same as Fig. 3(a).

4 讨 论

根据 (8) 和 (9) 式, 在图 1 的实验装置中 ($\Delta\lambda = 8.75 \text{ nm}$) 可以通过调节 Sagnac 光纤环中单模光纤的长度差 ΔL 控制对向传播光子对的相位差 δ , 进而获取光子对从不同端口输出的状态, 如图 4 所示. 当 Sagnac 光纤环中的单模光纤长度差 $\Delta L = 3.3 \text{ m}$ 时, C_d 取得最大值, C_s 取得最小值, 与图 3 的光子对符合计数率实验结果一致, 证明调节单模光纤长度差 ΔL 是控制光子对输出空间模式的有效技术手段.

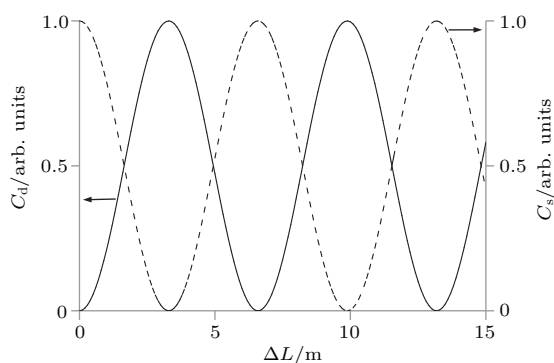


图4 真实符合计数率 $C_d(C_s)$ 与单模光纤长度差 ΔL 之间的关系 C_d 由主坐标轴表示, C_s 由次坐标轴表示

Fig. 4. The relationship between true coincidence count rates $C_d(C_s)$ and fiber length difference ΔL . C_d is represented by primary axis, and C_s is represented by secondary axis.

同时, 我们也可获得真实符合计数率 C_d 与失谐 $\Delta\lambda$ 之间的关系 ($\Delta L = 3.3$ m), 如图5所示. C_d 随 $\Delta\lambda$ 以周期越来越小的近似余弦规律变化, 曲线的第一个包络的 -3 dB 带宽约为 4.6 nm, 第二个包络的 -3 dB 带宽约为 2.5 nm. 在制备不同空间模式简并光子对的实验装置中, 选择光子对滤波器的中心波长应与 C_d 曲线的峰值对应, 且带宽小于于包络的带宽, 因此本文的技术手段仅适用于窄带简并光子对的产生.

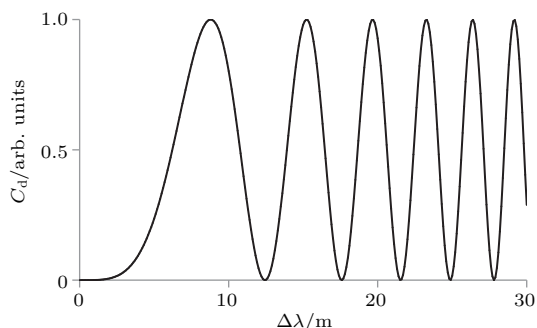


图5 真实符合计数率 C_d 随失谐 $\Delta\lambda$ 变化的曲线

Fig. 5. The relationship between true coincidence count rates C_d and wavelength detuning $\Delta\lambda$.

5 结 论

光纤中产生的频率简并光子对由于具有良好的模式特性, 易于完成高可见度的 Hong-Ou-Mandel 双光子干涉, 成为量子信息处理和高精密测量的重要资源. Sagnac 光纤环是制备空间模式

分离简并关联光子对的典型实验装置, 但光纤环中对向传播光子对的偏振模式匹配仍是实验实现的技术难点, 目前还未有报道直接判定偏振模式匹配的方法. 本文利用在光纤环特定状态下光子对偏振模式自动匹配的特性, 通过环中单模光纤色散引入的相位差改变光子对输出的空间模式, 实验获取了空间模式分离的 1.1 nm 带宽高纯度简并关联光子对. 该实验装置操作简便, 工作状态稳定, 利于全光纤窄带简并关联光子源的工程化和实用化.

参考文献

- [1] Shi Y H 2003 *Rep. Prog. Phys.* **66** 1009
- [2] Bouwmeester D, Pan J W, Mattle K, Eibl M, Weinfurter H, Zeilinger A 1997 *Nature* **390** 575
- [3] Knill E, Laflamme R, Milburn G J 2001 *Nature* **409** 46
- [4] Nasr M B, Saleh B E A, Sergienko A V, Teich M C 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 083601
- [5] Fraine A, Simon D S, Minaeva O, Egorov R, Sergienko A V 2011 *Opt. Express* **91** 22820
- [6] Hong C K, Ou Z Y, Mandel L 1987 *Phys. Rev. Lett.* **59** 2044
- [7] Fan J, Dogariu A, Wang L J 2005 *Opt. Lett.* **30** 1530
- [8] Fan J, Migdall A 2005 *Opt. Express* **13** 5777
- [9] Chen J, Lee K F, Liang C, Kumar P 2006 *Opt. Lett.* **31** 2798
- [10] Chen J, Lee K F, Kumar P 2007 *Phys. Rev. A* **76** 031804R
- [11] Lin Q, Yaman F, Agrawal G P 2007 *Phys. Rev. A* **75** 023803
- [12] Mortimore D B 1988 *J. Lightwave Technol.* **6** 121
- [13] Li X Y, Yang L, Ma X X, Cui L, Ou Z Y, Yu D Y 2009 *Phys. Rev. A* **79** 033817
- [14] Yang L, Sun F W, Zhao N B, Li X Y 2014 *Opt. Express* **22** 2553
- [15] Li X Y, Voss P L, Chen J, Lee K F, Kumar P 2005 *Opt. Express* **13** 2236
- [16] Takesue H, Inoue K 2005 *Opt. Express* **13** 7832
- [17] Yang L, Li X Y, Wang B S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4933 (in Chinese) [杨磊, 李小英, 王宝善 2008 物理学报 **57** 4933]
- [18] Ribordy G, Gautier J D, Zbinden H, Gisin N 1998 *Appl. Opt.* **37** 2272
- [19] Ou Z Y, Rhee J K, Wang L J 1999 *Phys. Rev. A* **60** 593
- [20] Li X Y, Ma X X, Quan L M, Yang L, Cui L, Guo X S 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1857
- [21] Cui L, Li X Y, Fan H Y, Yang L, Ma X X 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 044209

Experimental research on generating and splitting degenerate correlated photon pairs in Sagnac fiber loop*

Yang Lei Liu Nan-Nan Li Xiao-Ying[†]

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(Received 22 April 2016; revised manuscript received 12 July 2016)

Abstract

Degenerate correlated photon pairs (DCPPs) have been widely used in quantum information science, especially in the areas of quantum computation, quantum state control and precision measurement, which are typically generated in a $\chi^{(2)}$ nonlinear crystal through the spontaneous parametric down-conversion. However, such a source is not compatible with optical fiber as large coupling losses occur when the pairs are launched into it, which restricts its direct application to quantum information processing system. More recently, DCP generation from spontaneous four-wave mixing in $\chi^{(3)}$ optical fiber has aroused strong interest, due to its advantages of compatibility with existing fiber networks and free of alignment. The process of generating DCP in fiber can be described as follows: two pump photons at different frequencies ω_{p1} and ω_{p2} scatter through the $\chi^{(3)}$ nonlinearity to create a pair of identical photons at the mean frequency ω_c , such that $\omega_{p1} + \omega_{p2} = 2\omega_c$. Because the collinear tensor component $\chi_{xxxx}^{(3)}$ in a Kerr nonlinear medium is 3 times as large as the tensor component $\chi_{xyxy}^{(3)}$, the co-polarized four-wave mixing is preferred, which means the two pump photons and new-born twin photons are both co-polarized. Therefore, it is very challenging to deterministically separate the fiber-based DCP, since the twin photons share the same properties in all degrees of freedom: frequency, polarization and spatial. Sagnac fiber loop (SFL), composed of a piece of nonlinear fiber and 50/50 coupler, is presented as the splitter for DCP based on the reversed Hong-Ou-Mandel quantum interference of counter-propagating DCPs. The SFL can be configured as a total reflector, total transmitter or equally transmissive and reflective state, which sets the differential phases of counter-propagating DCPs meeting at 50/50 coupler to be π , 0 and $-\pi$, respectively. In order to satisfy the differential phase requirement for completely splitting the DCP, the SFL is always set to be equally transmissive and reflective state, however, the polarization-mode matching of counter-propagating DCPs is not easily achieved due to the disturbance of fiber birefringence. According to the Jones matrix derivation of DCP propagating in the SFL, the polarization mode of counter-propagating DCPs when interference at 50/50 coupler is automatically matched, if the SFL is set as a total reflector or total transmitter. In experimental scheme, utilizing the SFL as a total reflector, the 1.1 nm bandwidth and 1544.53 nm central wavelength DCPs are generated by two pulsed light beams pumping the 300 m dispersion-shifted fiber in the SFL. Using the two pieces of single mode fiber connecting the 300 m dispersion-shifted fiber and 50/50 coupler, whose length difference is fixed at 3.3 m, the differential phase of counter-propagating DCPs highly dependent on the dispersion properties of single mode fiber is managed at 2π for fully distributing DCPs into

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11504262), the National Special Fund for Major Research Instrument Development of China (Grant No. 11527808), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB340103), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20120032110055), the Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (Grant No. 14JCQNJC02300) and the Opening Fund of Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology, Ministry of Education of China (Tianjin University) (Grant No. 2015KFKT014).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

two spatial modes. The SFL is also cooled by liquid nitrogen to suppress the spontaneous Raman scattering photons, which degrades the fidelity of DCP source. The measured ratio of coincidence to accidental-coincidence of DCPs from one port is approximately 1.8 : 1, which indicates that the coincidence counts mainly originate from accidental coincidence counts and extra coincidence counts from photon bunching and there are not any DCPs outputting from one port. Meanwhile, the ratio of best measured coincidence to accidental-coincidence of DCPs from two ports reaches 47 : 1, when the average power of two pumps is fixed at 0.026 mW. The experimental results demonstrate that the high purity and fully spatial separation DCPs are successfully prepared in optical fibers, which is a very useful tool for realizing various quantum information systems. How the spatial state of outputting DCPs depends on the length difference between single-mode fiber and detuning wavelength is also discussed in detail.

Keywords: narrow-band degenerate correlated photon pairs, Sagnac fiber loop, spontaneous four-wave mixing, dispersion

PACS: 42.50.-p, 03.67.-a, 42.65.-k, 42.81.-i

DOI: [10.7498/aps.65.194202](https://doi.org/10.7498/aps.65.194202)