

基于光子晶体光纤的高纯度量子关联光子对的制备*

崔亮 李小英[†] 李璐

(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)

(2011 年 4 月 25 日收到; 2011 年 5 月 14 日收到修改稿)

使用脉冲光在室温下抽运一根长 1 m 的高非线性光子晶体光纤, 产生了中心波长分别位于 830 nm 和 1411 nm 的具有量子关联性的闲频与信号光子. 实验中闲频和信号通道的带宽分别是 15 nm 和 35 nm. 对单通道光子计数率的拟合结果显示光子几乎全部来源于光纤中的自发四波混频过程, 未受到 Raman 散射噪声的影响. 当闲频和信号通道的光子产生率约为每脉冲 0.0085 个时, 测得符合计数率与随机符合计数率的比值为 102, 接近理论极限, 不仅证明了光子对的低噪声性, 而且表明所产生的光子对本身具有窄带频谱特性, 因而实验中对收集效率很高. 此外, 这种高纯度关联光子对还联接了不同波段, 在量子信息技术中有着潜在的应用.

关键词: 量子关联光子对, 光子晶体光纤, 自发四波混频

PACS: 42.50.Dv, 03.67.Mn, 42.65.-k

1 引言

量子关联光子对是量子密码和量子计算等量子信息处理 (quantum information processing, QIP) 技术中的重要资源^[1,2]. QIP 对于量子关联光子对通常有以下基本要求: 1) 高亮度, 即关联光子对的产生率高; 2) 高纯度, 即非关联的背景噪声光子少; 3) 输出模式单一, 易于高效率地收集和传输, 实现长距离量子通讯; 4) 结构紧凑, 体积小. 这些要求使得基于光纤中自发四波混频 (spontaneous four wave mixing, SFWM) 参量过程的关联光子对近年来受到了普遍的关注^[3-5]. 与基于自由空间非线性晶体中自发参量下转换 (spontaneous parametric down-conversion, SPDC) 过程的关联光子对相比, 光纤小尺寸的纤芯和较长的作用距离使得其中的非线性过程得到加强, 有利于提高光子对的亮度, 而且其纯净的传输模式使得所产生的光子更易于与传输光纤高效的耦合和操控. 然而基于光纤的关联光子对也具有不足之处, 即其纯度会受到来源于 Raman 散射的噪声光子的影响. 光纤中的 Raman 散射光谱覆盖了距离抽运光频率失谐约 40 THz 的范围, 其峰值位于 13 THz 处^[6]. 普通色散位移光纤由于色散性质的局限, 其产生的关联光子与抽运光频率失

谐通常小于 2 THz, 不可避免地会受到 Raman 光子的影响. 尽管可以通过使用物理方法冷却光纤等途径一定程度上抑制 Raman 散射光子^[5], 但这将显著增加实验装置的复杂程度.

光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 这种新型光纤出现后, 由于其具有高非线性、无限单模特性、色散可控性等优点, 被迅速应用到了量子关联光子的制备工作中^[4,7-10]. 利用其零色散点可移动到特定波段的特点, PCF 可用来产生相应波段的小失谐关联光子对. 通过该途径, Sharping 等演示了波长位于铷原子吸收线附近的关联光子对^[4]; 而本研究小组则获得了 1.5 μm 通讯波段的关联光子对^[7]. 然而, 这种基于 PCF 的小失谐关联光子对同样因为受到 Raman 噪声的影响而纯度受限. 若利用 PCF 的高阶色散并选择合适的抽运波长, 可使产生的关联光子对与抽运光之间的频率失谐大于 Raman 增益的频率范围, 从而避开 Raman 噪声光子, 提高关联光子的纯度^[8-10]. 本文报道的工作即为利用 PCF 产生这种具有大失谐特征的关联光子对.

在本文中, 我们使用一台基于掺铋 PCF 的飞秒锁模激光器抽运一根长 1 m 的光子晶体光纤, 获得了中心波长分别位于 830 nm 和 1411 nm 的具有量

* 国家自然科学基金 (批准号:11074186) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号:2010CB923101) 资助的课题.

[†] E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

子关联特性的闲频与信号光子. 对光子单通道计数率及符合计数率的测量结果显示, 所测得的光子几乎全部来源于光纤中的 SFWM 过程, 说明了所制备的关联光子对具有高纯度的特征.

2 实验原理

在光纤中的 SFWM 过程中, 两个来源于强抽运光波频率为 ω_p 的光子通过 Kerr 非线性效应同时散射成一对频率分别是 ω_i 和 ω_s 的闲频光子和信号光子. 此过程中能量是守恒的, 即满足 $2\omega_p = \omega_i + \omega_s$, 而且此过程的进行需要满足位相匹配条件^[5]:

$$k(\omega_i) + k(\omega_s) - 2k(\omega_p) + 2\gamma P_p = 0, \quad (1)$$

其中 $k(\omega_j)$ ($j = p, i, s$) 是相应频率光波的传播常数, γ 是光纤的非线性系数, P_p 是抽运光峰值功率.

若光纤 (包括普通色散位移光纤和 PCF) 的高阶色散较小, 一般处理时可以忽略, 即将 Δk 近似为 $k''(\omega_p)\Delta\omega$ (这里失谐 $\Delta\omega = |\omega_i - \omega_p| = |\omega_p - \omega_s|$). 因此, 如果抽运波长位于靠近光纤零色散点的反常色散区 ($k''(\omega_p) < 0$), 即可实现 SFWM 的位相匹配. 而本文所用 PCF 的高阶色散无法忽略^[8], 所以不能使用上述近似, 应直接使用 (1) 式计算 SFWM 位相匹配波长. 所需的传播常数可以通过将 PCF 等效为阶跃光纤, 并使用数值方法计算得到^[11].

衡量关联光子对的纯度或判别其噪声大小, 可通过以下途径. 第一, 测量闲频 (信号) 光子的产生率与抽运光功率 P_p 的关系并将结果进行多项式拟合. 由于 Raman 光子产生率 R_r 及来源于 SFWM 的光子的产生率 $R_{ci(cs)}$ 分别与 P_p 及 P_p^2 成正比^[5], 因此拟合结果中的一次项和二次项就分别代表了两种不同非线性过程产生的光子. 二次项占的比重越大, 光子对的纯度就高. 第二, 符合计数率 C 与随机符合计数率 A 的比值 (CAR) 可反映关联光子的纯度. 在没有噪声光子及忽略单光子探测器暗记数的

情况下, CAR 可以写为

$$CAR = \varepsilon_i \frac{\eta_i \eta_s R_{cs}}{\eta_i R_{ci} \eta_s R_{cs}} = \varepsilon_s \frac{\eta_i \eta_s R_{ci}}{\eta_i R_{ci} \eta_s R_{cs}}, \quad (2)$$

其中 $\eta_{i(s)}$ 是闲频 (信号) 光子的探测效率, 包括滤波通道中心波长的传输效率和探测器的量子效率. $\varepsilon_{i(s)}$ 是闲频 (信号) 光子的收集效率^[12], 一般情况下与抽运光频谱、SFWM 位相匹配情况以及滤波通道带宽有关. 当抽运光为具有一定带宽的脉冲光时, 产生的关联光子也有一定的频谱宽度, 如果这时两个滤波通道的带宽分别远大于各自光子的带宽, 即可使 $\varepsilon_{i(s)}$ 近似为 1, 此时有 $R_{cs} = R_{ci} = R_c$, $CAR = 1/R_c$. 实验测量的 CAR 值通常小于 (2) 式的计算结果, 二者越接近, 说明光子对纯度越高.

3 实验装置与结果

3.1 实验装置

利用 PCF 产生关联光子对的实验装置如图 1 所示. 抽运光来源于一台掺镱光子晶体光纤锁模飞秒激光器^[13], 其输出光谱中心波长为 1042 nm, 半高宽 (full width at half maximum, FWHM) 为 8 nm, 平均输出功率为 400 mW, 脉冲重复频率 54.4 MHz. 实验中使用的 PCF (NL-1050-ZERO, crystal fibre) 具有较高的非线性系数, 厂商提供的数据显示其在 1064 nm 处 $\gamma = 37 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$, 单模传输的截止波长小于 300 nm. 我们首先使用白光干涉法测量了光纤的色散特性^[14]. 结果表明该 PCF 具有微弱的双折射, Δn 约为 2.5×10^{-5} ; 而且它在快轴方向上有两个零色散波长, 分别为 $942 \pm 4 \text{ nm}$ 和 $1175 \pm 4 \text{ nm}$. 利用这些数据并将 PCF 等效为阶跃光纤, 我们计算得到当抽运光波长为 1045 nm 并沿该 PCF 的快轴入射时, 通过 SFWM 产生的闲频和信号光子中心波长分别约为 830 nm 和 1411 nm, 对应的失谐约为 73 THz. 因此关联光子可以完全避开 Raman 光谱的范围, 预计 Raman 光子噪声将几乎消失.

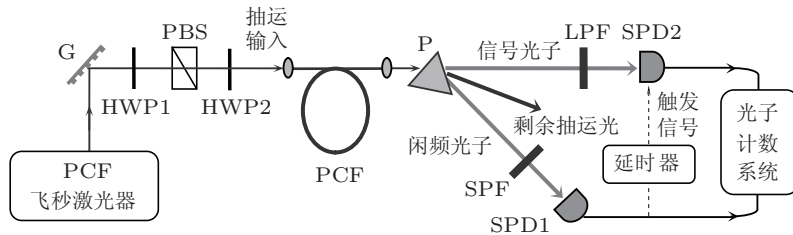


图 1 实验装置图 PCF, 光子晶体光纤; G, 光栅; HWP, 半波片; PBS, 偏振分束器; P, 色散棱镜; LPF, 长波通滤光片; SPF, 短波通滤光片; SPD, 单光子探测器

基于以上分析, 我们使用图 1 中的衍射光栅 G 对激光器的输出进行滤波并通过非球面透镜将抽运光耦合入 PCF. 抽运光的中心波长和 FWHM 分别为 1045 nm 和 1 nm. 半波片 HWP1 和偏振分束器 PBS 的作用是控制抽运光功率及确保其线偏振态; 而半波片 HWP2 可以调整抽运光偏振方向与 PCF 的快轴方向一致. PCF 的输出首先通过色散棱镜 P, 使得其中包含的信号光子、闲频光子以及剩余抽运光分离开. 为了提高对抽运光子的隔离度, 信号光和闲频光通道中还分别加入了长波通滤光片 LPF (截止波长 1380 nm) 和短波通滤光片 SPF (截止波长 870 nm), 使两个通道对抽运光子的隔离度大于 100 dB. 在此之后, 信号和闲频光子分别使用光纤耦合的探测器进行测量. 所测信号光通道的中心波长为 1411 nm, FWHM 约 35 nm; 而闲频光通道的中心波长为 830 nm, FWHM 约 15 nm.

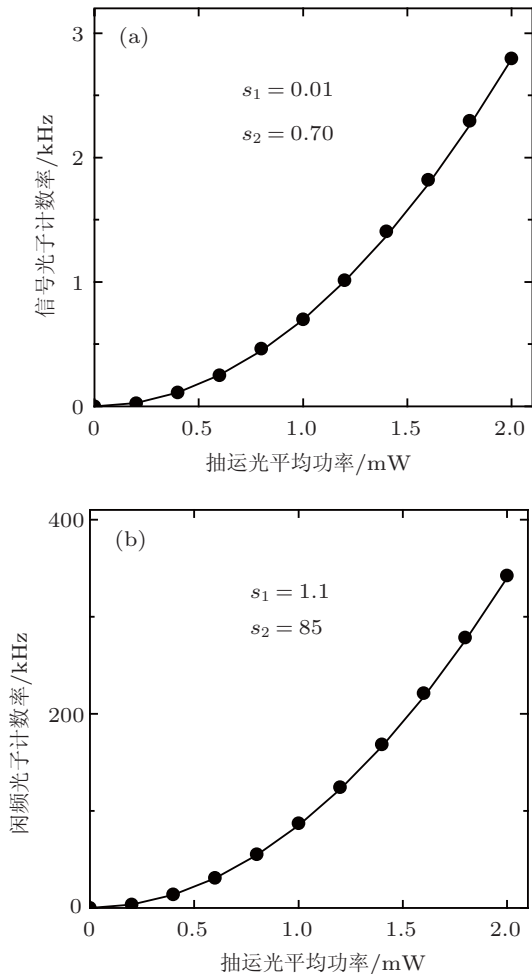


图 2 信号光子和闲频光子计数率 (N_s 和 N_i) 与抽运光平均功率 P_a 的关系. 其中圆点代表实验测得的计数率, 数据的测量误差小于圆点的尺度大小; 实线代表对计数率使用多项式 $N_{s(i)} = s_1 P_a + s_2 P_a^2$ 拟合后的二次项.

用来探测闲频光子的 SPD1 为基于 Si 雪崩二极管的单光子探测器, 工作于主动抑制模式; 而用来探测信号光子的 SPD2 为基于 InGaAs 雪崩二极管的单光子探测器, 工作于门模 Geiger 模式. 在测量单通道光子计数时, 触发 SPD2 的门脉冲信号为 3.4 MHz, 来源于对激光脉冲序列信号的 1/16 分频; 而在测量关联光子符合计数时, 触发信号来源于 SPD1 的光子探测信号. 整个系统对闲频 (信号) 光子的探测率 $\eta_i(\eta_s)$, 包括滤波效率和探测器效率约为 10%(1.3%).

3.2 实验结果

我们首先测量了单通道光子计数率随抽运功率的变化趋势, 结果分别如图 2(a) 和 (b) 所示. 其中的数据点代表不同抽运光平均功率 P_a 下采集到的信号 (闲频) 光子计数率 $N_{s(i)}$ (已减探测器暗记数). 我们使用二次多项式 $N_{s(i)} = s_1 P_a + s_2 P_a^2$ 分别对两组数据进行了拟合, 拟合系数在相应的图中给出. 图中的实线代表拟合结果的二次项, 而一次项由于很小没有画出. 从拟合结果可以看出所采集到的光子绝大部分是来源于 SFWM 的关联光子, 背景噪声光子几乎没有, 说明关联光子的纯度较高.

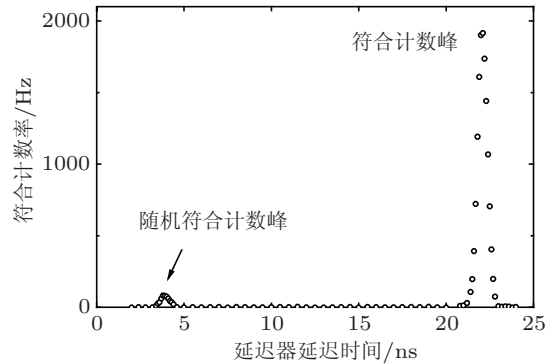


图 3 符合计数率与延时器延迟时间的关系

然后我们测量了闲频和信号光子之间的符合计数率. 这时 SPD2 的脉冲触发信号来源于 SPD1 的闲频光子探测信号. 我们使用了一个可调延时器对 SPD1 的探测信号进行延时, 以确保被测光子到达 SPD2 的时候, 触发信号刚好使其探测窗口打开. 当到达 SPD2 的光子与相应的触发信号对应于同一个激光脉冲时, SPD2 测到的光子计数率为两通道关联光子对的符合计数率; 而当两者对应于不同激光脉冲时, SPD2 测到的计数为两通道光子计数率的自然随机符合, 即随机符合计数率. 例

如, 在 $P_a = 1.5 \text{ mW}$ 时, 通过调整延时器所引入的信号延迟时间 τ , 我们得到了如图 3 所示的 SPD2 计数率随延迟时间变化的数据. 其中, $\tau = 22.1 \text{ ns}$ ($\tau = 3.8 \text{ ns}$) 对应的计数率峰值就是来源于同一 (相邻) 抽运脉冲的光子之间的符合计数率 (随机符合计数率), 两个峰值之间的时延差即抽运光脉冲的间隔时间.

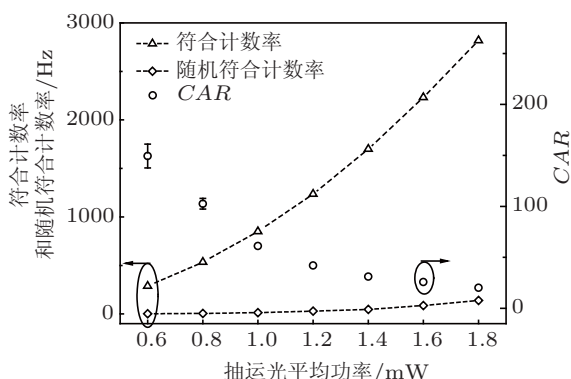


图 4 符合计数、随机符合计数率及两者比值 CAR 与抽运功率的关系 (虚线仅为方便读图, 无实际意义)

图 4 是我们在不同平均抽运功率 P_a 下所测得的关联光子符合计数率、随机符合计数率及它们之间的比值 CAR , 实验数据处理时仅减去了探测器暗记数. 可以看出, 测得的 CAR 值随着 P_a 的增大而减小, 符合 (2) 式的推断. 实验结果还显示, 当 $P_a = 0.8 \text{ mW}$ 时, 光子产生率 R_c 约为每脉

冲 0.0085 个, 而测到的 CAR 值为 102. 通过 (2) 式可得出实验中光子对收集效率 $\varepsilon_{i(s)}$ 接近 1, 尽管两个滤波通道的带宽并不一致 (5 THz 和 6.5 THz). 这不仅再次证明了所获光子对的低噪声性, 而且说明实验中关联光子的收集效率很高, 从而可推断其频谱宽度小于滤波器的带宽, 即本关联光子对具有窄带特性.

4 结论

本文实验演示了一种基于光子晶体光纤的具有高纯度、大失谐特性的量子关联光子对. 从实验结果可以看出: 一方面, 由于消除了 Raman 光子的影响, 光子对的纯度得到了很大提高; 另一方面, 所产生的闲频和信号光子的波长分别位于可见光波段和光通信波段附近, 而且通过进一步调整抽运光波长或微调 PCF 结构参数, 可以使信号光子波长移动到 $1.3 \mu\text{m}$ 或 $1.55 \mu\text{m}$ 通信波段. 以其为基础的宣布式单光子可同时具有可见光波段的探测器优势以及光通信波段的无源器件和传输效率优势. 需要指出的是, 本实验的光子探测效率受到了滤波系统的制约, 如果将实验中的分光棱镜换为效率更高的镀膜双色镜, 将用于光耦合的非球面镜换为消色差显微物镜, 会很大程度上提高关联光子对的探测效率.

- [1] Gisin N, Ribordy G G, Tittel W, Zbinden H 2002 *Rev. Mod. Phys.* **74** 145
- [2] Knill E, Laflamme R, Milburn G J 2001 *Nature* **409** 46
- [3] Fiorentino M, Voss P, Sharping J E, Kumar P 2002 *IEEE Photonic Tech. Lett.* **14** 983
- [4] Sharping J E, Chen J, Li X Y, Kumar P, Windeler R S 2004 *Opt. Express* **12** 3086
- [5] 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]
- [6] Agrawal G P 2001 *Nonlinear Fiber Optics* (San Diego: Academic Press) p298
- [7] Cui L, Li X Y, Fan H Y, Yang L, Ma X X 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 044209
- [8] Rarity J, Fulconis J, Duligall J, Wadsworth W J, Russell P 2005 *Opt. Express* **13** 534
- [9] Alibart O, Fulconis J, Wong G K L, Murdoch S G, Wadsworth W J, Rarity J G 2006 *New J. Phys.* **8** 67
- [10] Fan J, Migdall A, Wang L J 2005 *Opt. Lett.* **30** 3368
- [11] Wong G K, Chen A Y, Ha S, Kruhlak R, Murdoch S, Leonhardt R, Harvey J, Joly N 2005 *Opt. Express* **13** 8662
- [12] Li X Y, Ma X X, Quan L M, Yang L, Cui L, Guo X S 2010 *J. Opt. Soc. Am. B* **27** 1857
- [13] Song Y J, Hu M L, Liu B W, Chai L, Wang Q Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6425 (in Chinese) [宋有建, 胡明列, 刘博文, 柴路, 王清月 2008 物理学报 **57** 6425]
- [14] Cui L, Li X Y, Zhao N B 2012 arXiv:1202.0376 [quant-ph]

Generation of high purity quantum correlated photon pairs based on photonic crystal fiber*

Cui Liang Li Xiao-Ying[†] Li Lu

(*Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology of Ministry of Education, College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

(Received 25 April 2011; revised manuscript received 14 May 2011)

Abstract

A one-meter-long high nonlinear photonic crystal fiber is pumped by laser pulse train at room temperature, and the generated correlated idler and signal photons are centred at 830 nm and 1411 nm, respectively. The full widths at half maximum of the broad band filters of the two channel are 15 nm and 35 nm, respectively. The fitting results of single channel photon counts reveal that almost all the photons originate from spontaneous four wave mixing and the influence of Raman scattering is eliminated. When the production rate is 0.0085 photon per pulse, the ratio between coincidence rate and accidental coincidence rate is measured to be 102, which not only confirms the low noise property of the photon pair, but also shows that the photon pair are naturally narrow band, and the collecting efficiency in our experiment is high. Moreover, these high purity photon pairs connect different optical bands, and have potential applications in quantum information technologies.

Keywords: quantum correlated photon pairs, photonic crystal fiber, spontaneous four wave mixing

PACS: 42.50.Dv, 03.67.Mn, 42.65.-k

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11074186) and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB923101).

[†] E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn