

脉冲抽运光啁啾对全光纤量子关联光子对纯度的影响*

王堃 崔亮 张秀婷 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)

(2013年1月26日收到; 2013年5月2日收到修改稿)

信号与闲置光子波长均为 1550 nm 通信波段的全光纤关联光子对源, 具有低成本以及可与现有光纤网络低损耗连接的特点. 进一步优化其纯度, 将有助于提高这种量子光源的实用化程度. 当抽运脉冲光在光纤中传输时, 由于色散和 Kerr 非线性效应的影响, 会不可避免地引入啁啾. 本文利用脉冲激光抽运零色散位移光纤, 研究了抽运光啁啾对关联光子对纯度的影响. 结果表明, 通信波段小失谐关联光子对的纯度随啁啾的增大而下降. 若采用变换极限的锁模激光为抽运源, 将有助于抑制 Raman 散射对自发四波混频的影响, 提高光子对的纯度.

关键词: 关联光子对, 光纤, 自发四波混频, 啁啾

PACS: 42.50.Ar, 42.65.Lm, 42.50.Dv, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.62.164205

1 引言

量子关联光子对是量子信息处理技术中的重要资源. 光纤中的自发四波混频 (spontaneous four wave mixing, SFWM) 过程产生的光子对由于具有空间模式纯净、可以低损耗地与光纤耦合的优点而引起了人们广泛的兴趣^[1]. 目前, 人们已利用零色散位移光纤 (dispersion shifted fiber, DSF)、光子晶体光纤和双折射光纤等多种光纤产生了具有不同波长和频谱特性的关联光子对^[1-4]. 在此基础上, 所产生的关联光子对不仅被进一步用于产生偏振纠缠光子对和单光子等不同量子态^[5-8], 还被用于实现量子逻辑门和高精度色散测量^[9,10].

利用 DSF 可产生 1550 nm 通讯波段的光子对, 由于该波段有许多质量高、价格低的商售光学器件, 因此这种光子对在装置的实用化和低成本化等方面更具优势^[11]. 但是, 对基于 DSF 的光子对而言, 信号和闲置光子之间的失谐较小 (通常小于 20 nm), 所以光纤中的 Raman 散射引起的噪声光

子会不可避免地导致光子对纯度的下降^[12,13]. 因为在满足位相匹配条件的 DSF 中, Raman 散射所产生噪声光子的强度与抽运光平均功率成正比, 而 SFWM 过程所产生光子对的强度与抽运光的峰值功率的平方成正比, 所以根据脉冲光具有在低平均功率下提供高峰值功率的特点, 实验中通常采用锁模激光脉冲为抽运源以抑制 Raman 散射. 目前, 光子对频率失谐和光纤温度等因素对光子对纯度的影响已经有文献进行了深入的研究^[12,14,15]. 实际上, 当脉冲光在光纤中传输时, 由于色散和自位相调制效应的影响, 将不可避免地引入啁啾, 而抽运光啁啾对于光子对纯度的影响还有待研究.

本文采用具有线性啁啾和高斯频谱的脉冲激光为抽运源, 在理论分析的基础上, 实验研究脉冲抽运光的啁啾对基于 DSF 的关联光子对纯度的影响. 结果表明, 这种通讯波段的小失谐关联光子对的纯度随啁啾的增大而减小. 本文的研究将为进一步优化参数, 提高全光纤量子关联光子对源的纯度提供依据.

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

† 通讯作者. E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

2 理论分析

在 SFWM 过程中, 两个频率为 ω_p 的抽运光子通过三阶非线性效应 $\chi_{xxxx}^{(3)}$ 同时散射成频率分别为 ω_s 和 ω_i 的一对光子. 该参量过程满足能量和动量守恒条件. 本文将频率较抽运光上移的 ω_i 光子称为闲置光子, 而将频率较抽运光下移的 ω_s 光子称为信号光子. 当抽运脉冲光的中心波长接近 DSF 的零色散波长, 并位于其反常色散区时, 可满足 SFWM 位相匹配条件, 且具有很宽的增益频谱.

根据量子理论, 具有高峰值功率的抽运脉冲光可视为经典场, 而信号和闲置光场为量子化的光场. 光纤中传输的具有线性偏振特性的脉冲抽运光可以表示为^[15-17]

$$E_p^{(+)} = E_{p0} e^{-i\gamma P_p z} \int d\omega_p \times \exp\left(-\frac{(\omega_p - \omega_{p0})^2(1 + iC_p)}{2\sigma_p^2}\right) \times e^{ik_p z - i\omega_p t}, \quad (1)$$

其中 C_p 表示线性啁啾参量, ω_{p0} , σ_p 和 k_p 分别为抽运脉冲的中心频率、频谱宽度和传输常数, γ 为光纤的非线性系数. 抽运光的峰值功率 $P_p \propto \sigma_p E_{p0}^2 / T_p$, 其中 T_p 是抽运脉冲的脉宽, 与频谱宽度的关系为^[10]

$$T_p = 2\sqrt{\ln 2} \sqrt{1 + C_p^2} / \sigma_p, \quad (2)$$

当 $C_p = 0$ 时, 抽运光为变换极限的脉冲. 由峰值功率和脉宽的关系可知, 抽运光平均功率 P_{ave} 与 P_p 的关系为 $P_p \propto \sigma_p P_{ave} / \sqrt{1 + C_p^2}$.

对于 DSF 中由 SFWM 过程产生的信号和闲置光子对, 在采用单光子探测器测量前, 需经过滤波器以隔离抽运光, 并将频率非简并的信号和闲置光子分离. 根据文献 [7] 和 [14] 中的理论分析可知, 在信号 (闲置) 通道测得的源于 SFWM 的光子产生率为

$$P_{s(i)} = A_{s(i)} \eta_{s(i)} (\gamma P_p L)^2 \sqrt{1 + C_p^2} \frac{\sigma_{s(i)}}{\sigma_p} \propto \eta_{s(i)} (\gamma P_{ave} L)^2 \sigma_p \sigma_{s(i)} / \sqrt{1 + C_p^2}, \quad (3)$$

其中, 待定系数 $A_{s(i)}$ 与实验细节有关, L 是光纤的长度, $\eta_{s(i)}$ 是信号 (闲置) 通道总的传输效率, $\sigma_{s(i)}$ 是信号 (闲置) 通道的滤波器带宽.

当抽运脉冲光在 DSF 中传输时, 在通过 SFWM 产生量子关联光子对的同时, 还伴随着自发 Raman

散射过程^[12]. 与四波混频过程不同, 自发 Raman 散射是一个抽运光子和一个光学声子相互作用的结果, 信号和闲置通道源于 Raman 散射的光子是随机产生的, 它们之间不存在关联, 可视为关联光子对的噪声. 在经过信号和闲置通道的滤波器后, 测得的源于 Raman 散射的光子产生率分别为^[13]

$$R_s \propto \eta_s g(\Omega) P_p L (1 + n_{th}) \sqrt{1 + C_p^2} \frac{\sigma_s}{\sigma_p} \propto \eta_s g(\Omega) P_{ave} L (1 + n_{th}) \sigma_s, \quad (4)$$

$$R_i \propto \eta_i g(\Omega) P_p L n_{th} \sqrt{1 + C_p^2} \frac{\sigma_i}{\sigma_p} \propto \eta_i g(\Omega) P_{ave} L n_{th} \sigma_i, \quad (5)$$

其中, $g(\Omega)$ 是失谐为 $\Omega = (\omega_{s(i)} - \omega_p) / 2\pi$ 的 Raman 增益, $n_{th} = 1 / [\exp(\hbar\Omega / kT) - 1]$ 为玻色因子, \hbar 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为光纤的温度. 由 (4) 和 (5) 式可知, 冷却光纤的温度^[6], 以及通过改变光子对的失谐以减小增益系数 $g(\Omega)$ ^[2,3,11,12], 均可以减小 Raman 背景噪声光子的产生率 $R_{s(i)}$.

关联光子对的纯度通常可采用源于同一抽运脉冲的信号与闲置光子的符合计数率 C_c 和源于相邻脉冲的信号与闲置光子的随机符合计数率 C_{ac} 之比 CAR 表示^[7], 即

$$CAR = \frac{C_c}{C_{ac}}, \quad (6)$$

其中, 符合计数率与随机符合计数率之差 $C_c - C_{ac} \propto P_{s(i)}$ 源于关联光子对, 而随机符合计数率 $C_{ac} \propto (P_s + R_s)(P_i + R_i)$ 源于信号和闲置通道的多光子事件^[6]. 一般来讲, 在光子对产生率一定的情况下, CAR 的值越大, 光子对的纯度越高. 在无噪声的理想情况下, (6) 式可以表示为 $CAR - 1 \propto 1 / P_{s(i)}$.

由 (3)–(5) 式可知, 当抽运脉冲的带宽和平均功率一定时, $P_{s(i)}$ 和啁啾的关系为 $P_{s(i)} \propto 1 / \sqrt{1 + C_p^2}$, 而 $R_{s(i)}$ 与啁啾无关. 因此, 在一定的单通道光子探测率下, 啁啾参量的绝对值 $|C_p|$ 的增大将导致源于 SFWM 光子 P_s 或 P_i 在总探测光子数中所占比例的下降. 相应地, (6) 式中表征光子对纯度的 CAR 值也将下降.

3 实验

实验中采用如图 1 所示的装置对上述分析进行验证. 光子对由置于液氮 ($T = 77$ K) 中的 300 m DSF 产生, DSF 的零色散波长 λ_0 约为 1538 nm, 而

在 λ_0 附近的色散斜率约为 $0.075 \text{ ps}/(\text{km}\cdot\text{nm}^2)$. 光纤飞秒激光器的输出经过由光栅构成的、3 dB 带宽为 1.1 nm 的滤波器 F1, 即可得到所需的抽运光, 其重复频率为 41 MHz. 为达到所需抽运功率, F1 输出的光先经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 再经过滤波器 F2 以滤除抽运光中包含的信号和闲置波段的光子. 滤波器 F2 由两个 3 dB 带宽为 1.1 nm 可调谐滤波器 (型号 TBF-1550-1.0, Newport) 串接组成. 抽运光的 3 dB 带宽为 0.9 nm, 中心波长与滤波器 F1 和 F2 的一致, 均为 1538.2 nm, 而实验测得的抽运光脉宽为 5.8 ps. 由 (2) 式可知, 经上述方法得到的抽运脉冲并非变换极限脉冲, 对应的啁啾参量为 $|C_p| = 1.12$.

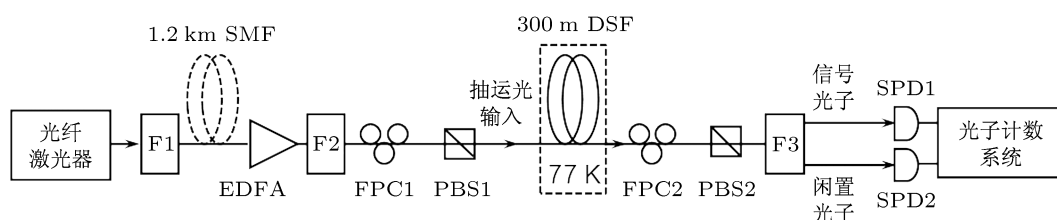


图 1 实验装置图 F1, F2, 抽运光滤波器; F3, 双通道滤波器; SMF, 单模光纤; DSF, 色散位移光纤; EDFA, 掺铒光纤放大器; FPC, 光纤偏振控制器; PBS, 偏振分束器; SPD, 单光子探测器

输入 DSF 的抽运光, 其功率可通过偏振控制器 FPC1 和偏振分束器 PBS1 控制. 在 DSF 的输出端, 由于绝大多数源于 SFWM 的光子与抽运光的偏振一致, 而源于 Raman 散射的光子则既包含与抽运光偏振一致的光子, 也包含与抽运光偏振垂直的光子^[13]. 所以通过调整 FPC2 使仅与抽运光同偏振的光子通过 PBS2, 从而消除与抽运光偏振垂直的 Raman 噪声光子.

双通道滤波器 F3 的作用是将产生的信号与闲置光子与剩余抽运光分离, 信号和闲置通道的中心波长分别为 1544.53 和 1531.9 nm. 由于实验中 SFWM 的效率比较低, 每 10^7 个抽运光子可产生 0.1 对关联光子对. 要实现信号和闲置光子的可靠探测, 对抽运光的隔离需大于 100 dB. 因此, F3 由两个超高斯型密集波分复用滤波器串联而成, 在信号和闲置波段的 3 dB 谱宽均为 1.1 nm, 每个滤波通道对抽运光的隔离度均大于 120 dB.

经过 F3 的信号和闲置光子分别采用工作于门模盖革模式的单光子探测器 SPD1 和 SPD2 (型号均为 id200, IDQ) 进行探测. 探测器触发频率均为 2.58 MHz, 为抽运脉冲重复频率的 1/16; 它们的暗计数率分别为每个脉冲 1.79×10^{-5} 和 5.8×10^{-5} .

当脉冲光在色散介质中传输时, 由色散而引入的啁啾可表示为 $C_p = \beta_2 \sigma_p L$, 其中, β_2 为介质的二阶色散系数, L 为介质长度. 为了揭示抽运脉冲啁啾对实验结果的影响, 我们分别在两种情况下进行实验和测量. 一种是在 EDFA 之前不加入图 1 所示的长度约为 1.2 km 的普通单模光纤 (single mode fiber, SMF), 另一种是将该 SMF 加入以改变抽运光的啁啾. 该 SMF 在 1550 nm 处的二阶色散系数 β_2 约为 $20 \text{ ps}^2/\text{km}$. 这段 SMF 的加入对抽运脉冲光的频谱没有明显影响, 但可以使抽运光的脉冲宽度由 5.8 ps 变为 19.3 ps, 也即啁啾参量由 $|C_p| = 1.12$ 变为 $|C_p| = 4.91$.

为了进一步抑制后脉冲效应, 两个探测器的死时间均设定为 $10 \mu\text{s}$. 探测器的输出信号由基于 LabView 软件的数据处理系统进行记录和处理. 实验中信号 (闲置) 光子总的探测效率约为 6.0% (5.8%), 其中包括 DSF 和单模光纤的连接效率 80%, 信号 (闲置) 通道的传输效率 58% (48%), 以及 SPD1 (SPD2) 的量子效率 13% (15%).

在实验中, 首先测量不加入 1.2 km SMF 的实验结果, 此时抽运脉冲的啁啾参量 $|C_p| = 1.12$. 我们不仅记录了改变平均抽运功率 P_{ave} 时, 由探测器 SPD1 (SPD2) 测得的单通道信号 (闲置) 光子计数率 N_s (N_i), 还记录了 SPD1 和 SPD2 的符合计数, 包括由同一抽运脉冲产生的信号和闲置光子的符合计数率 C_c , 以及由相邻脉冲产生的信号和闲置光子的随机符合计数 C_{ac} . 图 2 的主图是对信号光子的测量结果, 方形数据点表示了信号光子计数率 N_s 与平均抽运功率 P_{ave} 的关系. 根据理论分析部分的讨论, 我们利用二次多项式 $N_s = s_1 P_{\text{ave}} + s_2 P_{\text{ave}}^2$ 对信号光子计数率进行拟合, 其中一次项代表源于 Raman 散射的光子计数率 R_s , 二次项代表源于 SFWM 的光子计数率 P_s . 拟合结果如图 2 的主图所示, 多项式的一次项和二次项拟合系数分别为 $s_1 = 0.00385$,

$s_2 = 0.09397$. 从拟合结果中可以看出, 当 P_{ave} 大于 0.04 mW 时, 源于 SFWM 的光子产生率超过源自 Raman 散射的光子产生率, 开始成为主导部分. 图 2 的插图是信号与闲置光子符合计数率 C_c 和随机符合计数率 C_{ac} 与信号光子单通道探测率 N_s 的关系. 从图中可以看出 C_c 远大于 C_{ac} , 说明了信号和闲置光子之间存在着量子关联.

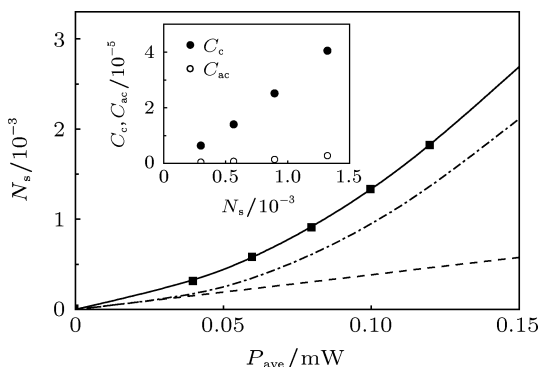


图 2 信号光子计数率 N_s 和平均抽运功率 P_{ave} 的关系, 实线是对测量结果 (方形点) 使用二次多项式 $N_s = s_1 P_{ave} + s_2 P_{ave}^2$ 进行拟合的结果, 虚线和点画线分别代表多项式的一次项和二次项, 拟合系数分别为 $s_1 = 0.00385, s_2 = 0.09397$; 插图是符合计数率 C_c (实心圆) 和随机符合计数率 C_{ac} (空心圆) 与信号光子计数率 N_s 的关系; 实验中的抽运光啁啾 $|C_p| = 1.12$

然后, 我们在 EDFA 之前接入 1.2 km 的 SMF (见图 1), 将抽运啁啾参量变为 $|C_p| = 4.91$, 并重复上述实验, 结果如图 3 所示. 对信号光子计数率 N_s 的二次多项式拟合系数为 $s_1 = 0.0038, s_2 = 0.02825$. 比较图 2 和图 3 的结果可以看出, 在加入 1.2 km 的 SMF 使抽运脉冲啁啾增大后, 一次项拟合系数 s_1 几乎不变, 而二次项拟合系数 s_2 显著减小, 从而使得当 P_{ave} 大于 0.14 mW 时, 源于 SFWM 的光子产生率才开始超过源自 Raman 散射的光子产生率. 而且从图 3 的插图中可以看到, 抽运脉冲啁啾的增大也使相同信号光子计数率 N_s 下测得的符合计数率 C_c 减小. 这些实验结果说明在一定的平均抽运功率下, 当抽运光的带宽一定而啁啾改变时, DSF 中源于 Raman 的光子产生率不变. 但是由于啁啾的增大导致了脉宽的增大和峰值功率的降低, 使得源于 SFWM 的光子对的产生率会随着抽运脉冲啁啾 $|C_p|$ 的增大减小.

最后, 为了更清楚地说明抽运光啁啾对光子对纯度的影响, 我们根据图 2 和图 3 插图中的结果,

计算了两种抽运光啁啾条件下, 符合计数率与随机符合计数率比值 CAR 与信号光子计数率 N_s 的关系, 如图 4 所示. 可以清楚地看出, 在一定的单通道光子计数率下, CAR 值随 $|C_p|$ 增大而降低.

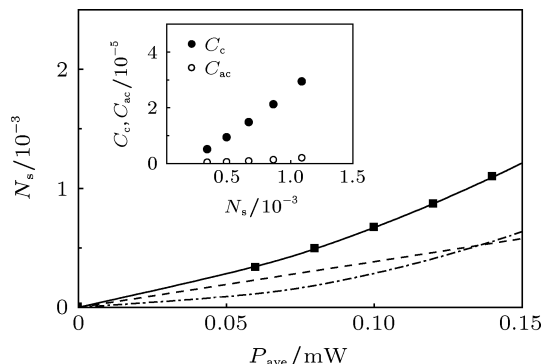


图 3 说明同图 2, 对信号光子计数率 N_s 的二次多项式拟合系数分别为 $s_1 = 0.0038, s_2 = 0.02825$, 实验中抽运光啁啾 $|C_p| = 4.91$

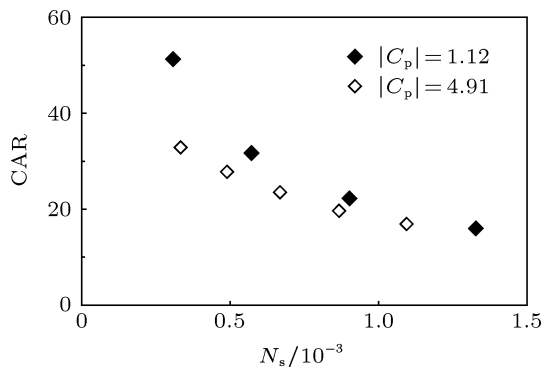


图 4 两种抽运光啁啾条件下, 符合计数率与随机符合计数率比值 CAR 与信号光子计数率 N_s 的关系

4 结论

本文研究了脉冲抽运光的啁啾对基于 DSF 的关联光子对纯度的影响. 通过比较脉冲抽运光啁啾不同时信号和闲置通道的光子计数结果, 表明了这种 1550 nm 通讯波段小失谐量子关联光子对的纯度随啁啾参量绝对值的增大而减小. 若采用变换极限的锁模激光为抽运源, 将有助于抑制 Raman 噪声, 提高光子对的纯度. 本文的研究结果为进一步优化参数, 提高全光纤量子关联光子对源的纯度提供了依据.

- [1] Fiorentino M, Voss P L, Sharping J E, Kumar P 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **27** 491
- [2] Rarity J G, Fulconis J, Duligall J 2005 *Opt. Express* **13** 534
- [3] Fan J, Dogariu A, Wang L J 2005 *Opt. Lett.* **30** 1530
- [4] Lim H C, Wang D, Tanemura T, Katoh K, Kikuchi K 2006 *IEEE LEOS Topical Meeting* Quebec City, Canada, July 17–19, 2006 paper TuB2.4
- [5] Li X Y, Voss P L, Sharping J E, Kumar P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 053601
- [6] Takesue H, Inoue K 2005 *Phys. Rev. A* **72** 041804(R)
- [7] Yang L, Ma X X, Guo X S, Cui L, Li X Y 2011 *Phys. Rev. A* **83** 053843
- [8] Goldschmidt E A, Eisaman M D, Fan J, Polyakov S V, Migdall A 2008 *Phys. Rev. A* **78** 013844
- [9] Chen J, Altepeter J B, Medic M, Lee K F, Gokden B, Hadfield R H, Nam S W, Kumar P 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 149903
- [10] Cui L, Li X Y, Zhao N B 2012 *Acta Opt. Sin.* **32** 0119002 (in Chinese) [崔亮, 李小英, 赵宁波 2012 光学学报 **32** 0119002]
- [11] Yang L, Wang B S, Li X Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4933 (in Chinese) [杨磊, 王宝善, 李小英 2008 物理学报 **57** 4933]
- [12] Li X Y, Chen J, Voss P L 2004 *Opt. Express* **12** 3737
- [13] Li X Y, Voss P L, Chen J, Lee K F, Kumar P 2005 *Opt. Express* **13** 2236
- [14] Takesue H, Inoue K 2005 *Opt. Express* **13** 7832
- [15] Ma X X, Yang L, Guo X S 2011 *Opt. Commun.* **284** 4558
- [16] Ma X X, Li X Y, Cui L, Guo X S, Yang L 2011 *Phys. Rev. A* **84** 023829
- [17] Cui L, Li X Y, Zhao N B 2012 *New J. Phys.* **14** 123001

Influence of pump chirp on the purity of an all fiber source of correlated photon pairs^{*}

Wang Kun Cui Liang Zhang Xiu-Ting Li Xiao-Ying[†]

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

(Received 26 January 2013; revised manuscript received 2 May 2013)

Abstract

The all fiber sources of photon pairs in the 1550 nm telecom band have the advantages of low cost and compatibility with the fiber network. Further improving the purity will improve the practicality of the quantum light sources. For the pulsed pump field propagating through the optical fiber, a certain amount of chirp will be inevitably induced due to the effects of chromatic dispersion and Kerr nonlinearity, but its influence on the purity has not been studied yet. In this paper, using photon pairs produced by the spontaneous four wave mixing in dispersion shifted fiber, we study the influence of pump chirp on the purity of photon pairs by varying the chirp of the pulsed pump. For the pump with a given bandwidth, our results demonstrate that the purity of photon pairs having a certain production rate, decreases with the increase of the absolute quantity of pump chirp. Therefore, the purity of the photon pairs with relatively small detuning can be improved by using the transform limited pump pulses due to the suppressed Raman scattering.

Keywords: photon-pairs, fiber, spontaneous four-wave mixing, chirp

PACS: 42.50.Ar, 42.65.Lm, 42.50.Dv, 03.67.Hk

DOI: 10.7498/aps.62.164205

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

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