

全光纤便携式量子关联光子对源

李小英 张秀婷 王 堃 崔 亮

(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)

摘要 实验演示了一台全光纤量子关联光子对源。该量子光源的全部器件均集成在一个 3U 标准机箱中, 其脉冲抽运光的重复频率约为 20 MHz, 输出的信号与闲置光子波长均在 1550 nm 通信波段, 且带宽均约为 0.55 nm。输出光子对的亮度最高可达每秒 4×10^5 对, 当光子对的亮度约为每秒 10^4 对时, 其符合计数与随机符合计数之比为 10, 说明信号和闲置光子之间存在很强的量子关联。该量子光源空间模式纯净, 工作位置便于移动, 可以低损耗地与现有的光纤通信网络耦合。

关键词 量子光学; 关联光子对; 四波混频; 光纤; 量子通信

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0927003

A Portable All-Fiber Source of Quantum-Correlated Photon-Pairs

Li Xiaoying Zhang Xiuting Wang Kun Cui Liang

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

Abstract An all-fiber source of photon-pairs is experimentally demonstrated. All the components of the source are integrated in a 3U standard case. The repetition rate of pump pulses is about 20 MHz. The wavelengths of both signal and idler photons are in the 1550 nm telecom band, and the bandwidths are about 0.55 nm. The highest brightness of the photon pairs out of the source is about 4×10^5 pairs per second. When the brightness of photon pairs is about 10^4 pairs per second, the ratio between the coincidence and accidental coincidence rates is about 10, which shows there is a strong quantum correlation between the signal and idler photon pairs. Our quantum light source of photon pairs, which is portable and has the advantage of modal purity, can be coupled into the existing fiber network with extremely low loss.

Key words quantum optics; correlated photon-pairs; four-wave mixing; fiber; quantum communication

OCIS codes 270.5290; 190.4370; 190.4380

1 引 言

量子关联光子对不仅是验证量子力学基本定律的重要工具, 也是研究量子信息的关键资源^[1]。在诸多产生量子关联光子对的方法中, 自发光学参量过程是一种有效方法。利用晶体二阶非线性效应的参量下转换过程产生关联光子对, 是一种常用的方法, 但是实验系统成本高、体积庞大、分立元件多、操作和维护都很困难^[1]。而利用光纤三阶非线性效应的参量过程所产生关联光子对, 则具有成本低、实验系统体积小、结构简单、易于操作和维护的优势^[2]。

近年来, 利用光纤中的自发四波混频(FWM)参量过程产生量子关联光子对引起了人们广泛的关注^[2-7]。目前, 人们已经通过色散位移光纤(DSF)、高非线性光纤和光子晶体光纤等多种光纤产生了不同波段的关联光子对^[2-8], 并在此基础上实现了不同自由度的纠缠光子对、量子逻辑门和单光子^[9-12]。得益于光纤通信技术四十多年来的高速发展, 在 1550 nm 通信波段有许多质量高、价格低的商售光纤器件, 在这些基于光纤的关联光子对源中, 抽运光、信号光以及闲置光的波长均在 1550 nm

收稿日期: 2013-03-26; **收到修改稿日期**: 2013-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(10774111)、国家 973 计划(2010CB923101)、国家博士后科学基金(20100470784)

作者简介: 李小英(1918—), 女, 博士, 教授, 主要从事非线性光学、量子光学和量子信息等方面的研究。

E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

波段的光子对源更具有全光纤化的可能^[2]。

信号和闲置光子均在 1550 nm 波段的小失谐光子对可由商售 DSF 中的自发 FWM 过程产生。但是,由于拉曼散射过程会伴随 FWM 过程而存在,导致了 DSF 中这种小失谐光子对纯度的降低^[4]。本文根据光子对纯度和失谐^[4]、光纤的温度^[5]、及自相位调制^[13]等因素的关系,优化了实验参数,实验演示了一台 1550 nm 波段的全光纤量子关联光子对源。输出光子对的亮度可达每秒 4×10^5 对。当输出光子对的亮度约为每秒 10^4 对时,光子对的符合计数与随机符合计数之比为 10。该量子光源全部器件均集成在一个 3U 的标准机箱中,整机采用 220 V 交流供电,总重量约为 9 kg,具有实用化的前景。

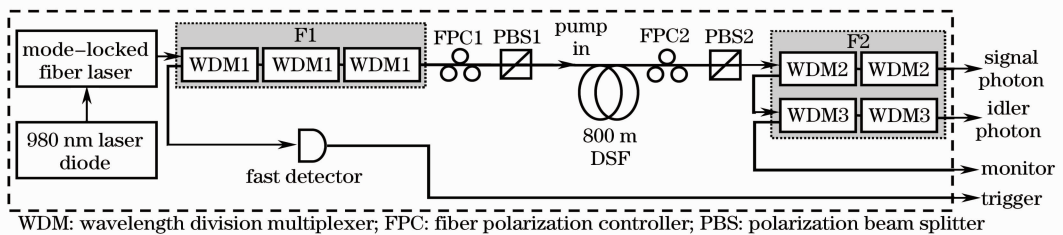


图 1 全光纤量子关联光子对源的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the all-fiber source of quantum-correlated photon-pairs

980 nm 半导体激光二极管抽运的掺铒光纤锁模激光器是该实验系统的抽运源。光纤激光器的重复频率为 20.21 MHz,输出激光的中心波长、半峰全宽 (FWHM) 和功率分别为 1534 nm, 4 nm 和 2 mW。为了满足位相匹配条件,并滤除抽运源中所包含的信号和闲置光子,在激光器的输出端串联了由三个相同的 200 GHz 波分复用滤波器 (WDM1) 构成的滤波器 F1。由于 F1 的中心波长为 1533.47 nm,接近 DSF 的零色散波长,可满足 DSF 中的 FWM 位相匹配条件^[2]。F1 的 FWHM 为 1 nm,输出脉冲抽运光的功率可达 350 W,脉宽约为 6 ps。

输入 DSF 的抽运光功率可通过偏振控制器 FPC1 和偏振分束器 PBS1 进行调整。因为对于由自发 FWM 过程产生的信号和闲置光子对而言,绝大多数光子对的偏振与抽运光的相同;而对于由拉曼散射产生的信号或闲置光子,其强度在与抽运光偏振平行和垂直的方向上区别不大。所以,在 DSF 的输出端,通过调整偏振控制器 FPC2,使得和抽运光同偏振的光子通过偏振分束器 PBS2,从而阻止与抽运光偏振垂直的拉曼散射的光子,减小拉曼散射^[4]。

2 实 验

实验装置如图 1 所示,包括 980 nm 半导体激光器、锁模光纤激光器、DSF、滤波器和快速探测器在内的所有光纤和光纤耦合器件都焊接在一起,并与电源一起置于一个 3U (45 cm × 42 cm × 18 cm) 标准机箱内。整机采用 220 V 交流供电,总重量约为 9 kg。800 m DSF 的零色散波长为 1532 nm,关联光子对由其中满足能量守恒和动量守恒的自发 FWM 产生。在此参量过程中,两个中心频率为 ω_p 的泵浦光子通过 DSF 的三阶非线性 $\chi_{xxxx}^{(3)}$ 同时散射为一对能量-时间纠缠的、频率分别为 ω_s 和 ω_i 的信号光子和闲置光子。

通过 PBS2 的光子包括剩余抽运光子、信号光子以及闲置光子。为了隔离抽运光子并将信号和闲置光子分离,将 PBS2 的输出通过滤波器 F2 进行滤波。F2 由两个 100 GHz 的 WDM2 和两个 100 GHz 的 WDM3 组成。为了保证在减小光子对失谐、进一步抑制拉曼散射的同时,光子对纯度仍不受抽运光自位相调整效应引起的频谱展宽的影响^[4,13],将滤波器 F2 两个通道的中心波长分别固定在 1537.4 nm 和 1529.55 nm,每个通道的 FWHM 为 0.55 nm,对抽运光子的隔离度约为 120 dB。

为了便于监视和测试该关联光子对源的特性,将滤波器 F1 中第一个 WDM1 的反射光接入快速探测器。探测器的输出可用作与光子对同步的触发电信号。滤波器 F2 中,第一个 WDM3 反射口输出的剩余泵浦光可以用于监视 DSF 的抽运光功率。

采用如图 2 所示的光子计数系统对这台全光纤关联光子对源的性能进行测试。信号光子和闲置光子分别采用单光子探测器 SPD1 和 SPD2 进行测量。每个 SPD 均工作在门模盖革模式下,死时间均设置为 10 μ s。为了抑制 SPD 的后脉冲效应,将系统输出的 20.21 MHz 的触发信号进行了 16 分频。

分频后的信号经过延时器后作为 SPD 的门模触发信号,以保证 SPD 的触发电脉冲与信号(闲置)光脉冲同时到达。信号和闲置光通道的传输效率约为 75%,而 SPD1 和 SPD2 的效率约为 19%和 17%,所以信号光子和闲置光子的总探测效率分别为 14%和 13%。

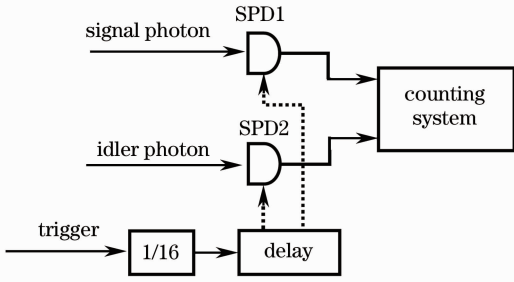


图 2 光子计数装置图

Fig. 2 Scheme of photon counter

测试过程中,在不同的平均抽运功率 P_{ave} 下,记录了信号光子的单通道光子计数率 N_s 以及源于同一脉冲和相邻脉冲的信号与闲置光子之间的符合计数

率,测试结果如图 3(a)、(b)所示。在图 3(a)中,用二阶多项式 $N_s = s_1 P_{ave} + s_2 P_{ave}^2$ 对信号光子的单通道计数进行了拟合(实线),其中,一次项代表拉曼光子的计数率(虚线),二次项代表四波混频光子的计数率(点划线)。拟合系数 s_1 和 s_2 分别表示拉曼光子和四波混频光子的强度。由 N_s 和抽运功率的关系可以看出,当平均抽运功率大于 0.22 mW 时,源于自发 FWM 的光子开始起主导作用。根据抽运光带宽和滤波器 F2 带宽所决定的光子对收集效率^[10]以及信号通道的探测效率可知,当抽运光平均功率为 0.3 mW 时,输出光子对的亮度可达每秒 4×10^5 对。由图 3(b)中的符合计数率与信号通道光子计数率 N_s 的关系可以看出,源自同一脉冲的信号和闲置光子之间的符合计数率 C_c 远高于源自相邻脉冲的信号和闲置光子之间的随机符合计数率 C_a ,说明源于同一脉冲的信号和闲置光子对存在着很强的量子关联。根据信号光通道的探测效率可知,当信号光通道的光子产生率约为每个脉冲 0.02 时,符合计数与随机符合计数之比为 8。当信号光通道的光子产生率约为每个脉冲 0.013 时,符合计数与随机符合计数之比为 10,此时,每秒输出的光子对约为 10^4 对。

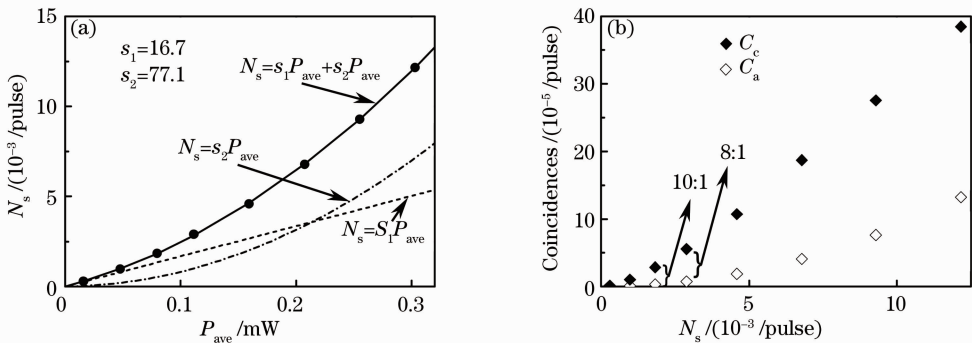


图 3 光子计数测试结果。(a)信号通道光子计数率 N_s 与抽运光平均功率 P_{ave} 的关系;

(b)符合计数率与信号通道光子计数率 N_s 的关系

Fig. 3 Testing results of photon counting measurements. (a) Signal count rate N_s versus average pump power P_{ave} ;

(b) coincidence count rate versus the signal count rate N_s

3 结 论

在优化参数的基础上,采用色散位移光纤和低成本、高质量的光纤器件,研制了通信波段全光纤量子关联光子对源。测试结果说明所研制的样机输出了信号通道和闲置通道中心波长分别在 1537.4 nm 和 1529.55 nm 的通信波段全光纤量子关联光子对。当单通道光子产生率小于每个脉冲 0.013 时,

符合计数与随机符合计数之比可以大于 10。若进一步减小抽运脉冲的啁啾,使其接近变换极限,还可以进一步提高该量子关联光源的纯度。此外,光子对产生率(每秒)还可以通过将抽运源更换为高重复频率光纤激光器^[14],以及增加信号和闲置光子的带宽等途径进一步提高。

该量子光源可以低损耗地接入现有的光纤网

络,且工作位置便于移动;所输出的关联光子对不仅适用于光纤长距离传输,也可用于研究多光子干涉以及产生通信波段的宣布式窄带单光子。

参 考 文 献

- 1 W Tittel, G Weihs. Photonic entanglement for fundamental tests and quantum communication[J]. *Quantum Inf Comput*, 2001, 1(2): 3–56.
- 2 M Fiorentino, P L Voss, J E Sharping, *et al.*. All-fiber photon-pair source for quantum communications [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(7): 983–985.
- 3 J Fan, A Dogariu, L J Wang. Generation of correlated photon pairs in a microstructure fiber[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(12): 1530–1532.
- 4 X Li, J Chen, P Voss, *et al.*. All-fiber photon-pair source for quantum communications: improved generation of correlated photons[J]. *Opt Express*, 2004, 12(16): 3737–3744.
- 5 H Takesue, K Inoue. 1.5 μm band quantum-correlated photon pair generation in dispersion-shifted fiber: suppression of noise photons by cooling fiber[J]. *Opt Express*, 2005, 13(20): 7832–7839.
- 6 O Cohen, J S Lundeen, B J Smith, *et al.*. Tailored photon-pair generation in optical fibers[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 102(12): 123603.
- 7 J G Rarity, J Fulconis, J Duligall, *et al.*. Photonic crystal fiber source of correlated photon pairs[J]. *Opt Express*, 2005, 13(2): 534–544.
- 8 Yang Lei, Ma Xiaoxin, Cui Liang, *et al.*. Experimental investigations on producing quantum correlated photon pairs in high nonlinear fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1027001.
杨磊, 马晓欣, 崔亮, 等. 利用高非线性光纤产生量子关联光子对的实验研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1027001.
- 9 X Li, P Voss, J E Sharping, *et al.*. Optical-fiber source of polarization-entangled photon pairs in the 1550 nm telecom band [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 94(5): 053601.
- 10 A S Clark, J Fulconis, J G Rarity, *et al.*. All-optical-fiber polarization-based quantum logic gate[J]. *Phys Rev A*, 2009, 79(3): 030303.
- 11 L Yang, X Ma, X Guo, *et al.*. Characterization of a fiber-based source of heralded single photons[J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(5): 053843.
- 12 C Söller, O Cohen, B J Smith, *et al.*. High-performance single-photon generation with commercial-grade optical fiber[J]. *Phys Rev A*, 2011, 83(3): 031806.
- 13 X Ma, L Yang, X Guo, *et al.*. Generation of photon pairs in dispersion shift fibers through spontaneous four wave mixing: influence of self-phase modulation[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(19): 4558–4562.
- 14 Zhang Zhigang. Advances in high repetition rate femtosecond fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900130.
张志刚. 高重复频率飞秒光纤激光技术进展[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900130.

栏目编辑: 李文喆