

文章编号: 0258-7025(2009)02-0410-03

利用光子晶体光纤产生纠缠光子对

罗思行 姚 立 杨伯君

(北京邮电大学理学院光通信与光波技术教育部重点实验室, 北京 100876)

摘要 利用激光脉冲抽运 40 m 的色散平坦光子晶体光纤(PCF),通过四波混频(FWM)效应获得了高质量、高计数率的纠缠光子源。实验测得信号与闲频光分别处于 1545 nm 和 1555 nm 处。光子对的符合与偶然符合比可达 8, 对应的符合速率达 1.43 kHz。理论结果与实验结果基本吻合,该系统可作为量子密钥分发系统的光源,误码率可小于 6%。

关键词 量子光学; 光子晶体光纤; 纠缠光子对; 四波混频; 量子密钥分发系统

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0410

Generation of Entangled Photon Pairs through Photonic Crystal Fiber

Luo Sixing Yao Li Yang Bojun

(Key Laboratory of Optical Communication and Lightwave Technologies, Ministry of Education, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract We demonstrate a high quality and high counting rate source of entangled photon pairs through four-wave-mixing (FWM) by pumping a 40m dispersion-flattened photonic crystal fiber (PCF). This pair of photons, which are called signal/idle wave, is found at 1545 nm and 1555 nm, respectively. The coincidence and accidental coincidence ratio (C/A) can reach to 8, with the coincidence rate of 1.43 kHz. The computer results have tallied in general with the experiment. Such a system can be used as the source of quantum key distribution system with a bit error rate less than 6%.

Key words quantum optics; photonic crystal fiber; entangled photon pairs; four wave mixing; quantum key distribution system

1 引 言

在目前进行的各种量子通信的实验中,包括量子远程传态、量子密集编码与量子保密通信,都依赖光子纠缠对的产生与传输^[1~4],因此其产生与有效长距离传送,在量子通信研究中起着十分重要的作用。目前国内外关联光子纠缠对大多是利用 BBO 晶体 II 型参量下转换产生^[5]的,利用晶体产生的光子对,耦合入光纤的效率很低。为了提高关联光子对的光纤效率,2002 年 M. Fiorentino 等^[6]利用色散位移光纤,在三阶非线性作用下通过四波混频(FWM)的参数荧光过程产生了关联光子纠缠对。

既然色散位移光纤在零色散点附近通过四波混频能产生关联纠缠光子对,则对于有较大非线性系

数的光子晶体光纤(PCF),更有可能来产生关联光子纠缠对。2003 年 A. Dogaria 等^[7]已经从实验上证实,可以利用光子晶体光纤产生关联光子纠缠对。利用光子晶体光纤的优势,除有较大的非线性系数以外^[8,9],因它的零色散点可以在较大范围内变化,则可以根据需要在较宽的波长范围(800~1600 nm)产生关联光子纠缠对,以满足光通信系统的需要。本文报道了一个利用光子晶体光纤在通信波段 1550 nm 附近得到了高品位纠缠光子对的实验。

2 实 验

如图 1 所示,抽运光源采用 CALMAR 公司 FPL-03TTUPC12 的皮秒级脉冲激光器,频谱宽度

收稿日期: 2008-08-25; 收到修改稿日期: 2008-10-26

基金项目: 国家自然科学基金(60578043)和北京市教委共建项目(XK100130937)资助课题。

作者简介: 罗思行(1985—),男,硕士研究生,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: lsxfs@bupt.cn

导师简介: 杨伯君(1938—),男,教授,博士生导师,主要从事非线性光学与量子光学等方面的研究。

E-mail: bojunyang99@sina.com

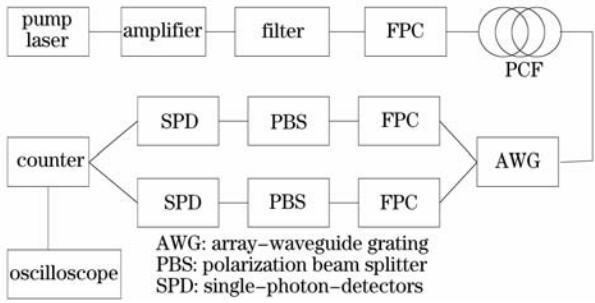


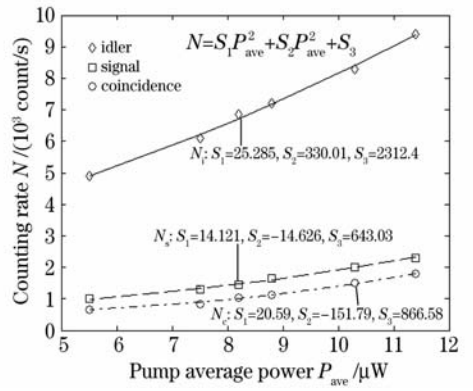
图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

1.5 nm, 波长 1550 nm, 脉宽 1.6 ps, 脉冲重复周期 50 MHz。单光子探测器 (SPD) 采用 Id Quantique 公司型号为 id200 的探测模组。PCF 的色散系数在 1550 nm 处约为 $-0.6 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$ 。偏振控制器 (FPC) 的作用是使光束偏振方向与光纤其中一个主轴平行, 有效抑制光纤内由于模式耦合而造成的噪声光子。同时, 为了避免抽运光子进入符合器, 系统采用波导阵列光栅 (AWG) 进行分光 and 滤波, 实验用 AWG 信道频宽 $\Delta\lambda \approx 0.8 \text{ nm}$, 相邻信道抗串扰大于 30 dB, 非相邻信道达到 40 dB 以上, 有效隔离抽运光和信号/闲频光。分光之后信号/闲频光分别进入由 FPC 和偏振分束器 (PBS) 共同组成的偏振控制模块。此模块的作用是过滤信号/闲频光的偏振态。这是由于光纤存在一定的双折射, 使得四波混频过程包含两个偏振态垂直的模式, 当信号/闲频光与抽运同偏振方向时, 自发拉曼增益也达到最大, 而且在低功率情况下拉曼散射的影响甚至超过 FWM^[10]。若采用垂直偏振的方案, 虽然 FWM 增益只有同向偏振方案的 1/3, 但是有效抑制拉曼效应。实验显示, 在同样环境下, 调整偏振模块使信号/闲频光偏振态与抽运光垂直 (亦即与拉曼散射光垂直), 尽管计数率略降低, 但符合与偶然符合比则显著增大达到 8。

图 2 是入纤平均功率 P_{ave} 与计数率的函数关系。 S_1, S_2, S_3 三个系数分别反映 FWM、拉曼散射和暗计数的强度^[11,12], N_i, N_s, N_c 分别为闲频光子、信号光子、符合光子对的计数率。 N_i 表达式中线性项系数 S_2 较 N_s 中对应系数大, 同时闲频光子与信号光子的计数率差 ($N_i - N_s$) 随着功率增大而扩大, 这都是由于拉曼散射在斯托克斯波段中的增益峰所造成^[12,13]。 N_s 与 N_c 曲线趋势吻合, 说明 FWM 光子在符合光子对中占主要地位。

光子纠缠对的产生效率通常以符合与偶然符合比来评价, 若同一抽运脉冲里一对抽运光子通过

图 2 平均功率 P_{ave} 与计数率的拟合曲线Fig. 2 Pump average power P versus counting rate

FWM 产生的信号/闲频光子对被探测, 则称为符合, 或称真符合。发生的偶然符合主要有两种可能: 暗计数, 即来自于探测器的假计数, 例如噪声电子引发的探测器计数脉冲; 相邻抽运脉冲产生的信号/闲频光子进行的符合。仪器手册上提供的暗计数率为 $5 \times 10^{-5} \text{ Hz}$, 事实上实验环境下暗计数更小, 平均小于 $2 \times 10^{-5} \text{ Hz}$, 这主要是由于设置了 $10 \mu\text{s}$ 死时间, 探测器在死时间内忽略由后脉冲引起的计数^[14]。因此估算第二种情况产生的偶然符合是最重要的, 实验的处理方法是将信号光 λ_s 延时一个脉冲周期再与闲频光进行符合测量以统计其值。经过多次测量取均值, 测得在 1555.7 nm 和 1545.3 nm 这一对波长上的光子对的符合与偶然符合比达到极值 8, 对应的符合速率达到 1.43 kHz。

3 仿 真

文献[15]给出信号光增益表达式

$$G_s = 1 + \left[\frac{\gamma P_p}{g} \sinh(gL) \right]^2, \quad (1)$$

式中 g 为增益参数, $g^2 = -k[k/4 + \gamma P_p]$, k 即传播常数 β , P_p 为抽运峰值功率, L 为 PCF 的长度, 把 $\Delta\beta$ 在零色散频率 ω_0 (这里设为 1560 nm) 处泰勒展开

$$\Delta\beta = \left\{ \beta_2 + \beta_3 (\omega_p - \omega_0) + \frac{\beta_4}{2} \left[(\omega_p - \omega_0)^2 + \frac{1}{6} (\omega_p - \omega_s)^2 \right] \right\} (\omega_p - \omega_s)^2, \quad (2)$$

忽略(2)式中 β_4 , 同时 $\beta_3 = \left(\frac{\lambda_0^2}{2\pi c} \right)^2 \frac{dD}{d\lambda}$, $\beta_2 = D(\omega_p)$, D 为光纤色散系数, 得

$$\Delta\beta = \frac{2\pi c}{\lambda_0^2} (\lambda_p - \lambda_s) \left[\beta_2 - \frac{dD}{d\lambda} (\lambda_p - \lambda_0) \right]. \quad (3)$$

将(3)式代入(1)式, 得到 G_s 关于 λ_s 函数关系。用

Matlab 软件进行了数值仿真,如图 3 所示, $P_p=0.5\text{ W}$, $P_{ave}=11\ \mu\text{W}$, $L=40\text{ m}$, $\gamma=11\ (\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$,可见理论增益峰大约出现在 1545 nm 和 1556 nm 处。实验结果和理论仿真基本吻合。

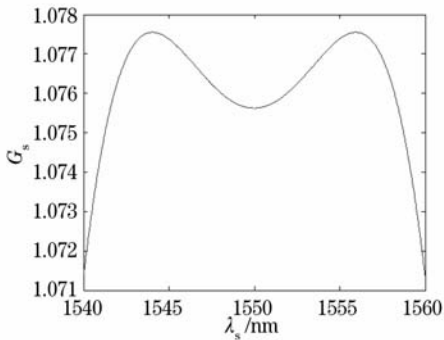


图 3 信号光相对增益 G_s 关于波长 λ_s 的函数关系

Fig. 3 Relative gain G_s of signal light versus wavelength λ_s

4 结 论

利用光子晶体光纤在低抽运功率条件下高效地产生纠缠光子对,结果表明符合与偶然符合比出现峰值时对应的波长跟理论仿真中增益峰值的波长非常接近,与预期的结果基本吻合。光子对的符合与偶然符合比达到 8,可作为量子密钥分发系统的光源,误码率可小于 6%。

参 考 文 献

- 1 Li Hongyi, Wu Wei, Liang Linmei *et al.*. High efficient quantum key distribution scheme based on partial entangled photons source [J]. *Acta Sinica Quantum Optica*, 2008, **14**(1): 34~38
李虹轶,吴伟,梁林梅等.基于部分纠缠光子源的高效量子密钥分配方案[J].量子光学学报,2008,**14**(1):34~38
- 2 Wang Juxia, Yang Zhiyong, An Yuying. Quantum information transfer via multi-photon interaction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1508~1512
王菊霞,杨志勇,安毓英.利用多光子相互作用实现量子信息传递[J].光学学报,2007,**27**(8):1508~1512

- 3 Yu Yafei, Zhang Zhiming. Analysis on unsecurity of quantum secret sharing based on smolin bound entangled states[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 556~559
於亚飞,张智明.束缚纠缠态量子秘密共享的不安全性分析[J].光学学报,2008,**28**(3):556~559
- 4 He Guangqiang, Zeng Guihua, Zhu Jun *et al.*. An integrable optic-fiber coherent state quantum identification system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7): 924~929
何广强,曾贵华,朱俊等.可光纤集成的相干态量子身份认证系统[J].中国激光,2007,**34**(7):924~929
- 5 P. G. Kiat, K. Mattle, A. Zeilinger *et al.*. New high intensity source of polarization-entangled photon pairs [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(24): 4337~4340
- 6 M. Fiorentino, P. L. Voss, J. E. Sharping *et al.*. All-fiber photon-pair source for quantum communication [J]. *Photon. Technol. Lett.*, 2002, **27**: 491~493
- 7 A. Dogaria, J. Fan, J. A. West *et al.*. Photon-pairs generation in micro-structured fiber[J]. *QELS*, 2003. QTUB6
- 8 Meng Jia, Hou Lantian, Zhou Guiyao *et al.*. Fabrication and study on the small-core index-guiding photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1350~1354
孟佳,侯蓝田,周桂耀等.小芯径折射率引导型光子晶体光纤的制备和研究[J].中国激光,2008,**35**(9):1350~1354
- 9 Gong Taorong, Yan Fengping, Wang Lin *et al.*. Analysis of properties of high birefringence photonic crystal fibers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4): 559~562
龚桃荣,延凤平,王琳等.高双折射光子晶体光纤特性分析[J].中国激光,2008,**35**(4):559~562
- 10 Q. Lin, F. Yaman, G. P. Agrawal. Photon-pair generation by four-wave mixing in optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(9): 1286~1288
- 11 X. Li, J. Chen, P. Voss *et al.*. All-fiber photon-air source for quantum communication: improved generation of correlated photons[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 3737~3744
- 12 Hiroki Takesue, Kyo Inoue. 1.5- μm band quantum-correlated Photon pair generation in dispersion-shifted fiber: suppression of noise photos by cooling fiber[J]. *Opt. Express*, 2006, **13**: 7832~7839
- 13 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. 3ed., Academic Press, 2002
- 14 Yao Li, Yang Bojun, Peng Jian *et al.*. Research on single-photon-detector in quantum communication[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2007, **31**(1): 47~48
姚立,杨伯君,彭建等.量子通信中单光子探测器的研究[J].光通信技术,2007,**31**(1):47~48
- 15 J. Hansryd, P. A. Anderson, M. Westlund *et al.*. Fiber-based optical parametric amplifiers and their applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(3): 506~520