

# 利用高非线性光纤产生量子关联光子对的实验研究

杨磊 马晓欣 崔亮 郭学石 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)

**摘要** 光纤中基于三阶(克尔)非线性效应的自发四波混频是制备量子关联光子对的有效方法之一。若采用商售高非线性光纤作为产生光子对的非线性介质,则有利于减小所需光纤的长度,从而缩小实验装置体积并降低对于抽运源的要求。利用脉冲光抽运 20 m 的高非线性光纤产生通讯波段的频率近简并关联光子对,研究了光纤的弱双折射特性对于光子对产生的影响。当抽运光沿高非线性光纤的偏振轴入射时,具有最大的光子对产生效率,且光子对绝大部分与抽运光偏振平行;抽运光沿与光纤偏振轴  $45^\circ$  入射时,光子对的产生效率最小,约为最大值的 80%。

**关键词** 量子光学;关联光子对;四波混频;高非线性光纤;弱双折射

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1027001

## Experimental Investigations on Producing Quantum Correlated Photon Pairs in High Nonlinear Fiber

Yang Lei Ma Xiaoxin Cui Liang Guo Xueshi Li Xiaoying

(Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Ministry of Education,

College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Spontaneous four-wave mixing originated from third-order (Kerr) nonlinear effect in fiber, is an efficient way to produce quantum correlated photon pairs. If the commercially available high-nonlinear fiber can be used as the Kerr nonlinear medium, it will be beneficial for simplifying the experimental setup, because the length of fiber and power of pump can be reduced. Near-degenerate photon pairs in telecom band are produced in 20 m-long high nonlinear fiber by pulsed laser. The influence of weak-birefringence of high nonlinear fiber upon the production efficiency of photon pairs is experimentally investigated and analyzed. When the polarization of pump is along the fast or slow axis of the high nonlinear fiber, the production efficiency of photon pairs is maximal, and photon pairs are co-polarized with the pump; when the polarization of pump is along the  $45^\circ$  in respect to the fast axis, the production efficiency of photon pairs is minimal, which is about 80% of maximum.

**Key words** quantum optics; correlated photon pairs; four-wave mixing; high nonlinear fiber; weak-birefringence

**OCIS codes** 190.4380; 270.5585; 030.5260

## 1 引言

量子关联光子对是探索量子力学基本原理和实现量子信息处理的重要资源和工具<sup>[1]</sup>。基于光纤  $\chi^{(3)}$  效应的自发四波混频过程是产生关联光子对的有效方法之一<sup>[2]</sup>。这种方法产生的光子对能够与光纤网络高效耦合,特别是光通讯波段的光子对能够

在光纤中远距离、低损耗传输,适合在大规模量子通信中应用<sup>[3]</sup>。且当抽运光为脉冲激光时,可以精确定义光子对的产生时间,使光子对能够应用于同步通讯系统中。

自从关联光子对首次由色散位移光纤产生以来<sup>[2]</sup>,科学家们在利用光纤产生光子对方面开展了

收稿日期: 2011-04-06; 收到修改稿日期: 2011-05-11

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)和教育部留学回国基金(2009D4-0003)资助课题。

作者简介: 杨磊(1982—),男,博士,讲师,主要从事量子光学领域中非经典光场产生和探测等方面的研究。

E-mail: yanglei@tju.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: xiaoyingli@tju.edu.cn

一系列的工作<sup>[4~7]</sup>。本课题组也在近期分别演示了 300 m 色散位移光纤<sup>[8]</sup>和 11 m 微结构光纤<sup>[9]</sup>中产生通讯波段光子对的实验。而由于色散位移光纤的非线性系数  $\gamma$  较小 [ $\gamma \approx 2 / (W \cdot \text{km})$ ], 因此需要较长的光纤或者较高的抽运功率才能产生明亮的光子对, 不利于这种光子源的小型化。微结构光纤虽然具有高非线性、无限单模和色散可控等特性, 但是价格昂贵, 基于这种光纤的光子源成本较高。如果光子对由商售高非线性光纤 (HNLf) 产生, 则在较低的抽运功率和较短的光纤长度下就能够产生明亮的光子对, 节省了光子源的研制成本。

本文利用脉冲光抽运 20 m 高非线性光纤 [ $\gamma \approx 11 / (W \cdot \text{km})$ ] 产生通讯波段近简并关联光子对, 实验研究了光纤弱双折射特性对于光子对产生效率的影响。

## 2 实验原理

光纤中的四波混频起源于介质的束缚电子对电磁场的非线性响应  $P_{\text{NL}}^{[10]}$ 。两个频率为  $\omega_p$  的抽运光子通过与光纤的  $\chi^{(3)}$  项相作用, 产生频率分别为  $\omega_s$  和  $\omega_i$  的信号光子和闲频光子, 满足能量守恒关系  $2\omega_p = \omega_s + \omega_i$ 。由于石英光纤是各项同性的, 满足  $\chi_{xxxx}^{(3)} = 3\chi_{xxyy}^{(3)} = 3\chi_{xyxy}^{(3)}$  的关系, 因此产生的光子对大部分是平行于抽运光子的<sup>[10,11]</sup>。

要得到显著的四波混频过程, 需要满足净波矢失配  $\Delta k = 0$  的相位匹配条件。当四个光波偏振平行时,  $\Delta k = k_s + k_i - 2k_p + 2\gamma P_p = \beta_2^2 \Omega^2 + 2\gamma P_p$ , 式中  $k_{p,s,i}$  分别为抽运光、信号光和闲频光的波矢的模,  $\gamma$  是光纤的非线性系数,  $P_p$  是抽运光的峰值功率,  $\Omega$  是抽运光与信号光之间的频率失谐,  $\beta_2$  是频率  $\omega_p$  的色散系数。当抽运光的中心波长在光纤的反常色散区, 且接近零色散波长  $\lambda_0$  时, 容易满足相位匹配条件。

产生的四波混频光子经过滤波器滤波, 并由单光子探测器探测。每个抽运脉冲的信号 (闲频) 光子探测率  $r_{s(i)}$  可以表示为<sup>[12]</sup>

$$r_{s(i)} = A_{s(i)} \eta_{s(i)} (\gamma P_p L)^2 \frac{\sigma_{s(i)}}{\sigma_p}, \quad (1)$$

式中  $A_{s(i)}$  是与实验细节有关的参数,  $L$  是光纤的长度,  $\eta_{s(i)}$  是信号 (闲频) 通道总的探测效率,  $\sigma_{p,s,i}$  分别是抽运光、信号光和闲频光的 -3 dB 带宽。

当抽运光注入光纤时, 同时伴随着与光学声子有关的自发拉曼散射。包括两个过程: 1) 抽运光子湮没, 产生低频信号光子和另一个具有适当能量与动量的光学声子; 2) 抽运光子吸收一个具有适当能量和动量的声子, 在闲频频带处产生一个更高能量的光子<sup>[10]</sup>。

每个抽运脉冲由拉曼散射产生的信号和闲频光子探测率  $R_{s(i)}$  为

$$R_s \propto \eta_s g(\Omega) P_p L (1 + n_{\text{th}}) \frac{\sigma_s}{\sigma_p}, \quad (2)$$

$$R_i \propto \eta_i g(\Omega) P_p L n_{\text{th}} \frac{\sigma_i}{\sigma_p}. \quad (3)$$

式中  $g(\Omega)$  为失谐为  $\Omega$  的拉曼增益,  $n_{\text{th}} = 1 / [\exp(\hbar\Omega/kT) - 1]$  为玻色因子, 其中  $\hbar$  为普朗克常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为光纤的温度。拉曼散射光子会降低关联光子对的纯度, 冷却光纤<sup>[4,13]</sup>或者避开拉曼增益峰<sup>[5]</sup>均能够减小拉曼光子的影响。

## 3 实 验

利用 HNLf 产生关联光子对的实验装置如图 1 所示。20 m HNLf 的色散斜率  $D_{\text{slope}}$ 、零色散点  $\lambda_0$  和偏振轴折射率差  $\Delta n$  分别为 0.0235 ps/(nm<sup>2</sup>·km), 1516 nm 和  $5 \times 10^{-6}$ 。实验中, 从飞秒光纤激光器输出的宽谱脉冲光经过衍射光栅色散分光, 选取特定波长和带宽的光波输入掺铒光纤放大器 (EDFA) 放大, 接下来将放大后的脉冲光输入可调谐滤波器, 抽运光的中心波长为 1538.2 nm, -3 dB 带宽为 0.6 nm。由于 HNLf 具有弱的双折射特性, 通过调整抽运光入射前的  $\lambda/2$  波片和光纤偏振控制器 (FPC) 使其沿特定的角度入射。光纤中关联

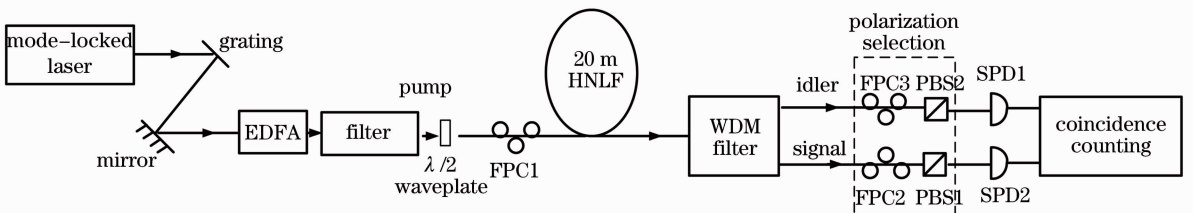


图 1 利用 HNLf 产生关联光子对的实验装置

Fig. 1 Schemes of generating correlated photon pairs in HNLf

光子对的转化效率约为  $10^7$  个抽运光子产生 0.1 对,因此需要对抽运光进行 100 dB 的隔离才能够有效地探测到光子对。HNLF 的输出端口接入两个串联的超高斯型的 WDM 滤波器(Santec, WDM-15)滤波,滤波器对于抽运光的隔离度约为 120 dB。信号和闲频通道的中心波长分别在 1544.53 和 1531.9 nm,  $-3$  dB 带宽均为 1.1 nm。

将滤波器输出的光子不经过偏振选择装置直接接入探测器(由 FPC 和偏振分束器 PBS 组成),进行光子探测。信号光子和闲频光子分别由工作于门模盖革模式的单光子探测器 SPD1 和 SPD2 进行探测,暗计数率分别为每个脉冲  $1.3 \times 10^{-4}$  和  $1.9 \times 10^{-5}$ 。探测频率是 2581 kHz,为抽运脉冲重复频率的 1/16,为了抑制后脉冲效应,设置两个探测器的死时间为  $10 \mu\text{s}$ 。探测器的输出信号由 PCI 数据采集卡送入单光子数据处理系统中进行记录和处理。实验中,HNLF 的效率为 73%,信号(闲频)通道滤波器的传输效率为 58%(48%),SPD1(SP2)的量子效率  $\eta_{1(2)}$  为 17%(20%),信号(闲频)通道总的探测率约为 8.4%(8.2%)。

记录当抽运光沿光纤的偏振轴(定义为  $a$  轴)入射时的光子计数结果,如图 2 所示。图 2(a)表示闲频通道每个脉冲探测率  $N_i$  与平均抽运功率  $P_{\text{ave}}$  的关系,并利用二阶多项式  $N_i = s_1 P_{\text{ave}} + s_2 P_{\text{ave}}^2$  对数据点进行拟合,其中一次项代表拉曼光子的探测率  $R_i$ ,二次项代表四波混频光子的探测率  $r_i$ 。图中圆形点是数据点,实线为它的拟合曲线,点划线代表拟合曲线的一次项,虚线代表拟合曲线的二次项;拟合系数  $s_1 = 0.00339, s_2 = 0.00493$ 。图 2(b)表示符合计数率随抽运功率的变化关系,空心方形点表示同一个脉冲之间的符合计数率  $N_{\text{coin}}$ ,空心三角形表示相邻脉冲之间的随机符合计数率  $N_{\text{coin}}^a$ 。 $N_{\text{coin}}$  与  $N_{\text{coin}}^a$  之间的差值是记录到的真实符合计数率  $N_{\text{coin}}^t$ ,它代表光子对的探测率。图 2(b)中的数字表示符合计数率  $N_{\text{coin}}$  与随机符合计数率  $N_{\text{coin}}^a$  的比值  $R_{\text{CAR}}$ ,虽然本实验中由于拉曼散射的影响, $R_{\text{CAR}}$  的值较低<sup>[5,13]</sup>,但是依然可以得到  $R_{\text{CAR}} > 2$ 。根据文献[14],可知信号光子与闲频光子之间存在量子关联。

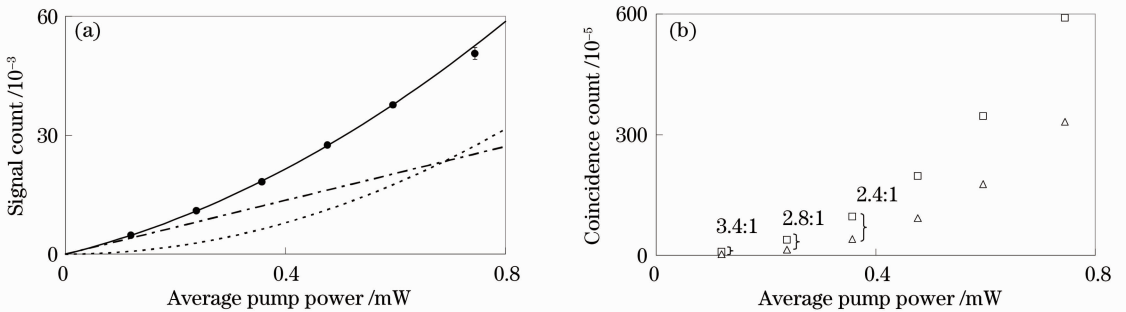


图 2 抽运光偏振沿 HNLF  $a$  轴入射时的光子计数结果。(a)信号通道计数率;(b)符合计数率

Fig. 2 Photon counting results when polarization of pump is along the  $a$  axis of HNLF. (a) Signal-channel counting rates versus average pump power; (b) coincidence counting rates versus average pump power

研究光纤的弱双折射特性对于光子对产生效率的影响。旋转抽运光入射前的  $\lambda/2$  波片,改变抽运光相对于  $a$  轴的角度,此时输出的抽运光并未退偏。当平均抽运功率为 0.48 mW 时,获得光子对真实符合计数率随抽运光入射角度的变化关系,如图 3 所示。观测到当抽运光沿 HNLF 的偏振轴入射时,具有最大的光子对产生效率;抽运光沿与偏振轴  $45^\circ$  入射时,光子对的产生效率最小;光子对的产生效率变化约为 20%。这是由于当抽运光不沿光纤的偏振轴入射时,抽运光与信号光的偏振方向在传输过程中会趋于不同,影响四波混频相位匹配过程,因此不满足光子对产生相干叠加增强的条件<sup>[15]</sup>,光子对的产生效率会降低。这与强双折射光纤中由于抽运

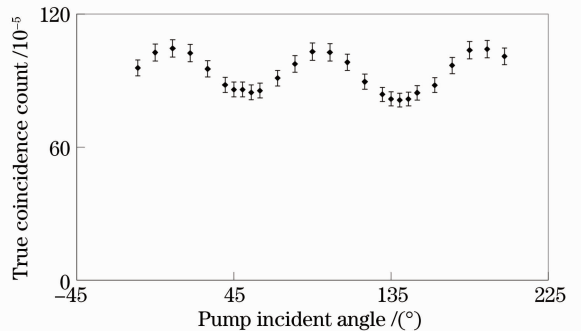


图 3 真实符合计数率随抽运光入射角度的变化  
Fig. 3 True coincidence counting rates versus pump incident angle

光的退偏而引起光子对产生效率约 50% 变化的机理是不同的<sup>[9]</sup>。

还需要通过选择不同偏振模式的光子对进行探测,分析抽运光沿 HNLF 的  $a$  轴入射时关联光子对的来源。接入图 1 中的偏振选择装置,信号和闲频通道总的探测效率分别为 6.8% 和 6.9%。图 4,5 分别是与抽运光偏振平行和垂直的光子计数结果,表示方法同图 2。图 4(a)中拟合系数  $s_1 = 0.00136$ ,

$s_2 = 0.00397$ ;在图 4(b)中观测到了真实符合计数。图 5(a)中拟合系数  $s_1 = 0.00091$ ,  $s_2 = 0.00018$ ;在图 5(b)中并未观测到真实符合计数。以上数据说明抽运光沿  $a$  轴入射时,四波混频产生的光子对主要来源于与抽运光平行的方向,且平行和垂直于抽运光的方向都有拉曼光子的产生,选择与抽运光平行的光子通过能够有效消除垂直方向的拉曼噪声光子,提高  $R_{CAR}$  的值。

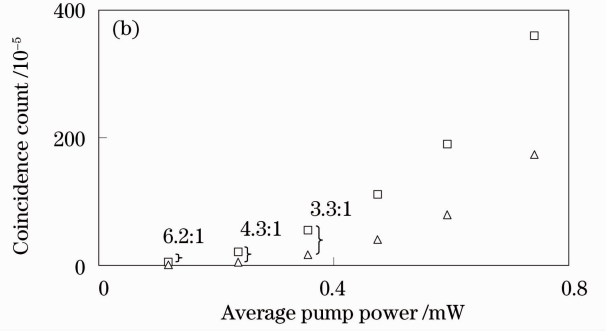
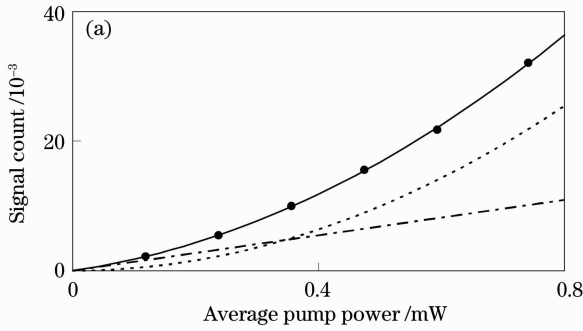


图 4 平行于抽运光方向的光子计数结果。(a)信号通道计数率;(b)符合计数率

Fig. 4 Photon counting results when the polarization of signal and idler photons co-polarized with that of the pump.

(a) Signal-channel counting rates; (b) coincidence counting rates

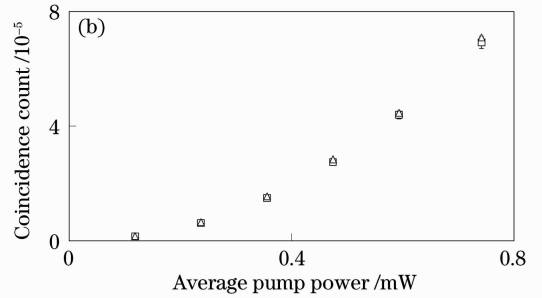
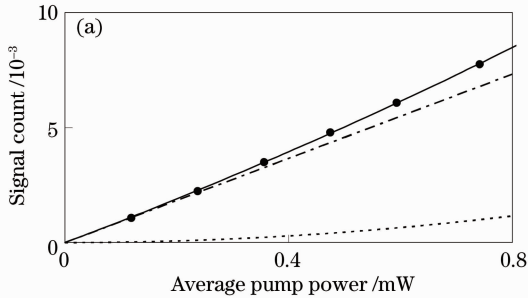


图 5 垂直于抽运光方向的光子计数结果。(a)信号通道计数率;(b)符合计数率

Fig. 5 Photon counting results when the polarization of signal and idler photons cross-polarized with that of the pump.

(a) Signal-channel counting rates; (b) coincidence counting rates

实验中,高非线性光纤的最大光子对产生率为每个脉冲  $1.57 \times 10^{-3}$  pair/(mW·m)<sup>2</sup>,而相同的实验装置中接入色散位移光纤的光子对产生率为  $5.99 \times 10^{-5}$  pair/(mW·m)<sup>2</sup>,前者约为后者的 26 倍。因此,高非线性光纤相比于普通光纤而言,光子对产生效率更高。在关联光子源的研制中,采用商售高非线性光纤作为产生光子对的非线性介质,则有利于减小所需光纤的长度,并降低对于抽运源的要求,从而缩小实验装置的体积。

光纤的偏振轴入射时,具有最大的光子对产生效率。实验中测量得到符合计数率与随机符合计数率的比值  $R_{CAR}$  还比较低,这是由于拉曼噪声光子的影响,通过冷却抑制拉曼散射能够提高  $R_{CAR}$  值。

虽然高非线性光纤的弱双折射特性会增加光子源操作的复杂性,但它的双折射特性也能够用来实现不同种类的四波混频相位匹配,当抽运光与  $\chi_{xxyy}^{(3)}$  项相作用时,产生垂直于抽运光的光子对<sup>[16]</sup>,丰富了关联光子对的类型。

## 4 结 论

利用脉冲光抽运 20 m 的商售高非线性光纤产生通讯波段的关联光子对,研究了光纤的弱双折射特性对于光子对产生的影响。当抽运光沿高非线性

## 参 考 文 献

- 1 Y. H. Shi. Entangled biphoton source-property and preparation [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2003, **66**: 1009~1044
- 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 C. Liang, K. F. Lee, T. Levin *et al.*. Ultra stable all-fiber telecom-band entangled photon-pair source for turnkey quantum communication applications[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(15): 6936~6941
  - 4 K. F. Lee, J. Chen, C. Liang *et al.*. Generation of high-purity telecom-band entangled photon pairs in dispersion-shifted fiber [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(12): 1905~1907
  - 5 J. Fulconis, O. Alibart, W. J. Wadsworth *et al.*. High brightness single mode source of correlated photon pairs using a photonic crystal fiber [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(19): 7572~7582
  - 6 Li Xibin, Chai Lu, Zhang Yuying *et al.*. Study on spectral characteristics of correlated photon pairs based on photon crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(5): 1368~1373  
李熙斌, 柴 路, 张玉颖 等. 基于光子晶体光纤关联光子对频谱特性的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(5): 1368~1373
  - 7 Luo Sixing, Yao Li, Yang Bojun. Generation of entangled photon pairs through photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **36**(2): 410~412  
罗思行, 姚 立, 杨伯君. 利用光子晶体光纤产生纠缠光子对 [J]. *光学学报*, 2009, **36**(2): 410~412
  - 8 Yang Lei, Li Xiaoying, Wang Baoshan. Experimental schemes for developing fiber-based source of entangled photon pairs[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8): 4933~4940  
杨 磊, 李小英, 王宝善. 利用光纤中自发四波混频产生纠缠光子的实验装置[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4933~4940
  - 9 L. Cui, X. Y. Li, H. Y. Fan *et al.*. Photonic crystal fiber source of quantum correlated photon pairs in the 1550 nm telecom band[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2009, **26**(4): 044209
  - 10 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. Academic Press, 2001. 289~417
  - 11 Q. Lin, F. Yaman, G. P. Agrawal. Photon-pair generation in optical fibers through four-wave mixing: role of Raman scattering and pump polarization[J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(2): 023803
  - 12 X. Y. Li, X. X. Ma, L. M. Quan *et al.*. Quantum efficiency measurement of single-photon detectors using photon pairs generated in optical fibers [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(9): 1857~1865
  - 13 S. D. Dyer, M. J. Stevens, B. Baek *et al.*. High-efficiency, ultra low-noise all-fiber photon-pair source [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(13): 9966~9977
  - 14 X. Y. Zou, L. J. Wang, L. Mandel. Violation of classical probability in parametric down-conversion[J]. *Opt. Commun.*, 1991, **84**(5-6): 351~354
  - 15 Ou Zheyu. *Multi-Photon Quantum Interference*[M]. New York: Springer, 2007. 17~47
  - 16 B. J. Smith, P. Mahou, O. Cohen *et al.*. Photon pair generation in birefringent optical fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23589~23602