

便携式偏振纠缠量子光源

李凤娇, 邹雪峰, 崔亮, 杨磊, 李小英, 黄战华*

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 基于色散位移光纤中的自发四波混频过程, 制备了具备光学输出以及电子辅助信号输出的 1550 nm 通讯波段便携式偏振纠缠量子光源, 标准单模光纤端口可输出信号波长和闲置波长分别为 1558.17 nm 和 1548.51 nm 的偏振纠缠光子对, 同轴电缆端口可输出用于单光子探测器和数据采集系统的经延时调谐和分频的电信号。结果表明, 当单通道光子产生率约为 0.0007 pair/pulse 时, 符合计数率与随机符合计数率之比可达 22.8; 偏振纠缠干涉条纹可见度为 87%。

关键词 量子光学; 偏振纠缠; 四波混频; 色散位移光纤; 延时; 分频

中图分类号 O431.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.092701

Portable Polarization-Entangled Quantum Photon Source

Li Fengjiao, Zou Xuefeng, Cui Liang, Yang Lei, Li Xiaoying, Huang Zhanhua*

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

School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract A portable polarization-entangled quantum photon source with an optical output as well as an auxiliary electronic output in the 1550 nm telecom band is developed based on spontaneous four-wave mixing in a dispersion-shifted fiber. The polarization-entangled photon pairs of signal and idler waves with wavelengths of 1558.17 nm and 1548.51 nm are outputted from the standard single-mode fiber port, respectively. The electrical signals with tunable delay and frequency division are outputted from the coaxial cable port, which are used for the single photon detectors and the data acquisition system. The results show that when the photon generation rate in a single channel is about 0.0007 pair/pulse, the ratio between the coincidence count rate and the accidental coincidence count rate is up to 22.8, and the visibility of polarization-entangled interference fringes is 87%.

Key words quantum optics; polarization-entangled; four-wave mixing; dispersion-shifted fiber; delay; frequency division

OCIS codes 270.5290; 270.5570; 060.2270

1 引言

纠缠光子不仅是验证量子力学基本定律的重要工具, 还是研究量子信息的重要基础性资源^[1]。常见的光子纠缠自由度有动量和位置、时间和能量、频率、偏振态、光场正交振幅及相位信息等^[2], 其中光子的偏振态因易于操控使偏振纠缠光子对成为量子信息相关研究中的一个重要资源。基于晶体二阶非线性效应的自发参量下转换过程是产生偏振纠缠光子对的一种有效方法^[3-4], 但是该方法的分立元件

多、体积较大, 将自由空间的纠缠光子耦合进光纤时效率较低。基于光纤中三阶非线性效应的自发四波混频过程也可以产生偏振纠缠光子对, 而且该方法具有成本低、易于维护、与光纤网络耦合效率高等优点。Takesue 等^[5]利用零色散位移光纤(DSF)中的自发四波混频过程产生了 1550 nm 通讯波段的偏振纠缠光子对, 并验证了贝尔不等式被违背。

偏振纠缠光子在量子成像、量子密集编码、量子密钥分发和量子度量学等方面有着广泛的应用^[6-9]。量子成像不同于经典成像, 可以实现成像和探测分

收稿日期: 2018-10-22; 修回日期: 2018-11-23; 录用日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(61675148)

* E-mail: zhanhua@tju.edu.cn

离,在大气通信中可以克服大气湍流和散射介质造成的能量衰减问题;量子密集编码增加了通信系统的信道容量,可以突破经典物理的极限;量子密钥分发可以保证在进行身份认证、传输加密以及数字签名等过程的绝对安全;利用纠缠光子对测量光学相位可以突破标准量子极限,而双光子纠缠态则可使测量精度提升 $\sqrt{2}$ 倍。基于偏振纠缠光子的广泛应用,制备小型化、结构灵活、低成本的实用化量子光源成为量子信息技术发展的需要。美国 NuCrypt 公司利用 DSF 中的自发四波混频过程制备了便携式偏振纠缠量子光源,其量子光源具有标准单模光纤输出端口和时钟信号输出端口,但是不能对时钟信号进行分频和延时,所以在进行光子探测等相关研究时,需要配置额外的电路模块完成对时钟信号的分频和延时,以满足单光子探测器的探测要求。

本文研究并制备了基于 DSF 中自发四波混频过程的便携式偏振纠缠量子光源,并将其集成了具有延时和分频功能的电子系统,同时将飞秒脉冲激光器、光纤、滤波装置以及辅助信号电路集成于一个 3U(34 cm×34 cm×12 cm)的机箱中。量子光源整机采用 220 V 交流供电且同时具备标准单模光纤输出端口和同轴电缆时钟信号输出端口,可以高效、便

捷地与外部光纤网络和单光子探测器耦合,为量子信息技术的相关研究提供了有力的工具。

2 偏振纠缠量子光源装置

2.1 偏振纠缠光子对的产生

基于 DSF 中自发四波混频过程的偏振纠缠量子光源装置示意图如图 1 所示,对应的实物图如图 2 所示。由图 1 可知,该装置分为偏振纠缠光子对产生装置和电子系统装置两部分。在产生偏振纠缠光子对的装置中飞秒激光器是抽运源,其谱宽为 40 nm,中心波长典型值为 1550 nm,重复频率为 150 MHz,输出的抽运光为线偏光,通过调节光纤偏振控制器(FPC)可以控制抽运光功率。抽运光滤波器 F_p 的 -3 dB 带宽为 1.0 nm,经其滤波后的抽运脉冲中心波长为 1553.33 nm,接近 DSF 的零色散波长,可以满足四波混频的相位匹配条件^[10]。光纤偏振分束器(FPBS)将抽运光分为两束偏振方向互相垂直的线偏光并通过保偏光纤输出,FPBS 输出的其中一束光作为抽运线偏光输入到下一级的偏振分束器(PBS),而另一束光通过面板上的标准单模光纤端口输出,用于反映 F_p 滤波后的抽运功率大小。

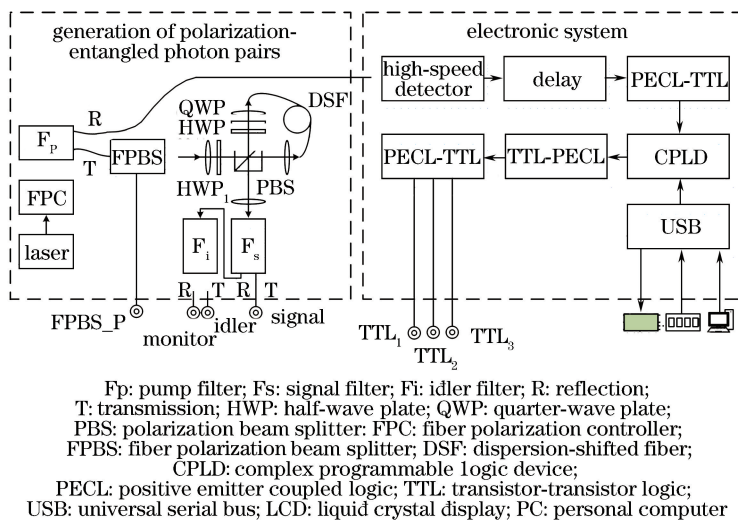


图 1 偏振纠缠量子光源示意图

Fig. 1 Schematic of polarization-entangled quantum photon source

抽运线偏光经 PBS 可分解为偏振方向互相垂直的线偏光 P_H 和 P_V 。两者分别在 DSF 中逆时针和顺时针传输,并通过自发四波混频过程产生关联的信号光子和闲置光子,关联光子对的偏振方向与抽运保持一致,分别记为 $|H\rangle_s |H\rangle_d$ 和 $|V\rangle_s |V\rangle_d$ 。四分之一波片(QWP)和半波片 2 (HWP_2)用于控制和补偿光纤弯曲引起的双折射,保证光子的偏振

态经 DSF 传输后保持不变。一个抽运脉冲在 500 m DSF 中的传输时间为 μs 量级^[11],忽略 ms 量级的环境抖动及声热噪声影响,关联波包 $|H\rangle_s |H\rangle_d$ 和 $|V\rangle_s |V\rangle_d$ 通过 PBS 相干叠加,此时的信号光子与闲置光子处于偏振纠缠态,其所处的量子态^[12]可表示为

$$|\psi\rangle = |H\rangle_s |H\rangle_d + \exp(i\varphi) |V\rangle_s |V\rangle_d, \quad (1)$$

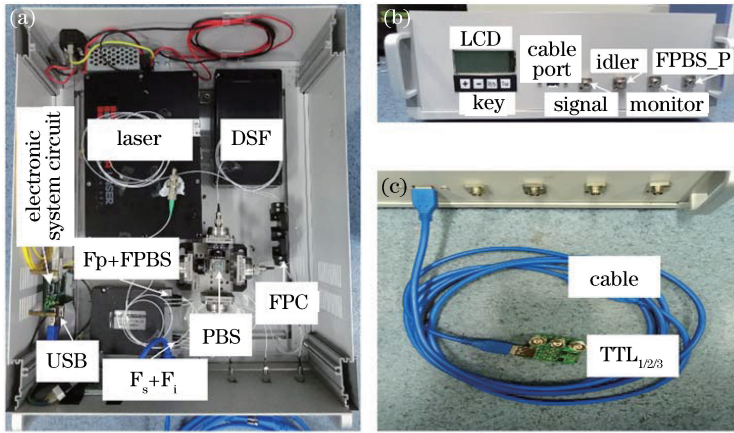


图2 偏振纠缠量子光源实物图。(a)俯视图;(b)正视图;(c)线缆及晶体管-晶体管逻辑电路(TTL)电平输出
Fig. 2 Practical map of polarization-entangled quantum photon source. (a) Top view; (b) front view; (c) cable and TTL level output

式中: φ 是波包 $|H\rangle_s |H\rangle_d$ 和 $|V\rangle_s |V\rangle_d$ 之间的相位差,其值取决于两波包各自传输过程中信号光子、闲置光子和抽运光子的累积相位差。由于四波混频满足相位匹配条件,而且在本装置中顺时针和逆时针方向传输的抽运光子相位累积抵消,因此 φ 只取决于不同偏振态的抽运光子 P_H 和 P_V 的初始相位差 φ_p ,且 $\varphi=2\varphi_p$ 。旋转半波片 1(HWP₁)使抽运线偏光 45° 入射 PBS,此时 $\varphi_p=0$,纠缠光子对所处的量子态表示为

$$|\psi\rangle = |H\rangle_s |H\rangle_d + |V\rangle_s |V\rangle_d, \quad (2)$$

信号光滤波器 F_s 的 -3 dB 带宽为 1.0 nm,中心波长为 1558.17 nm,闲置光滤波器 F_i 的 -3 dB 带宽为 1.0 nm,中心波长为 1548.51 nm,经过 F_s 和 F_i 滤波后的信号光和闲置光中心波长分别为 1558.17 nm 和 1548.51 nm, F_i 反射口输出的剩余抽运光作为监视光,用于反映输入到 DSF 中的抽运光功率大小。信号光、闲置光和监视光均通过面板上的标准单模光纤端口输出。

2.2 量子光源电子系统设计

测量分析纠缠光子时,单光子探测器和数据采集系统都需要一个与产生纠缠光子同步的时钟作为触发电信号。其频率必须小于单光子探测器的响应频率且需要具有一定的可调延时,延时范围至少为产生纠缠光子的周期,以保证单光子探测器的触发电脉冲与信号(闲置)光脉冲同时到达^[13]。基于上述要求,设计了量子光源的电子系统,实现了光信号的光-电转换并输出 24 种不同分频的电信号,同时也可以对电信号进行可编程延时,延时增量为 10 ps,延时范围为 6.66 ns。

电子系统中的器件主要包括高速光电探测器、

可编程延时芯片、复杂可编程逻辑器件(CPLD)、电平转换芯片、USB 高速微控制器、薄膜按键和液晶屏(LCD)。

高速光电探测器的中心波长为 1550 nm,响应频率为 2.5 GHz,远高于纠缠光子对的产生频率,可以将 150 MHz 光脉冲信号转化为对应码率的差分正射极耦合逻辑(PECL)电信号并以交流耦合的方式输出。可编程延时芯片是一款用来进行时钟偏斜补偿或时间调整的芯片,可以对输入的差分信号进行延时,其对输入脉冲的响应频率 >1.2 GHz,远高于纠缠光子对的产生频率,芯片内部固有延时为 2.2 ns,可编程延时增量为 10 ps,由于一个抽运脉冲的周期为 6.66 ns,因此设置延时可选范围为 6.66 ns。CPLD 可以对 TTL 电信号进行分频并输出二分频、三分频、五分频、六分频等 24 种不同频率的 TTL 信号以满足单光子探测器的响应频率。由于高速 TTL 电信号不适合中长距离的电缆传输,而 PECL 信号的输入阻抗高,驱动能力较强,适用于远距离的信号传输,因此需要通过电平转换芯片将 TTL 信号转换为差分 PECL 信号。电子系统中经过延时和分频的电信号由同轴电缆端口输出,作为单光子探测器和数据采集系统的时钟信号。

延时和分频参数的设置都是由 USB 高速微控制器控制传输的,针对参数设置设计了两种控制方式:1) 通过在 Visual Studio 平台上开发的上位机 MFC 程序对 USB 传输指令和数据进行参数设置;2) 通过外置的薄膜按键进行参数设置。延时和分频的参数信息可显示在一块带中文字库的液晶屏上。

3 实验结果与讨论

3.1 电子系统性能测试

为了测试量子光源电子系统的性能,选用一个 24 MHz 的差分信号作为测试信号输入高速光电探测

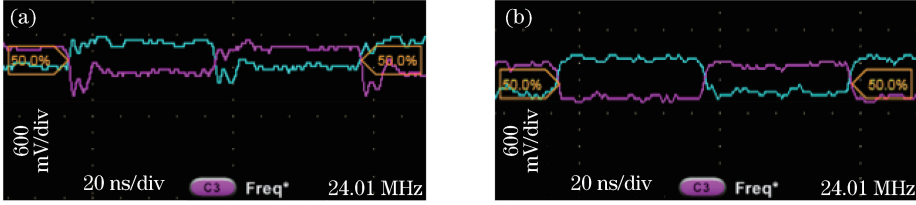


图 3 电子系统性能测试。(a)测试信号;(b)高速光电探测器输出信号

Fig. 3 Performance test of electronic system. (a) Test signal; (b) output signal of high-speed photoelectric detector

设置二分频、三分频、五分频、六分频等 8 个不同的分频 f_s 测试电子系统的分频性能,测试结果如图 4 所示,可以看出所测得的信号频率 f_m 与理论值相符,拟合结果的绝对误差平均值为 0.013 MHz。

延时芯片内部固有延时会随工作温度的升高略有变化,因此选择电子系统刚启动时和工作 1 h 后的两个时间点分别测试其延时性能,测得的结果如图 5 所示。可以看出,电子系统刚启动时测得的延时 t_m 与设置的延时 t_s 满足线性关系,拟合结果的绝对误差平均值为 0.013 ns。工作 1 h 后芯片温度升高,内部固有延时变大,在设置相同延时的情况下测得的延时比刚启动时的延时稍高,但仍满足线性关系,拟合结果的绝对误差平均值为 0.010 ns,在两个时间点的测试结果中由芯片温度变化引起的延时平均漂移量为 0.270 ns。

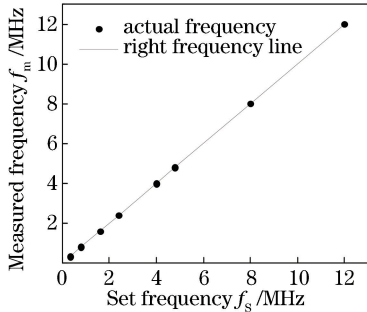


图 4 分频测试

Fig. 4 Test of frequency division

3.2 符合计数实验

为了量化描述量子光源的质量,定义了符合计数率与随机符合计数率之比 T_{CAR} 标定关联光子对的纯度^[14]。其中符合计数率 P_c 包含由同一抽运脉冲产生的信号和闲置光子的真符合计数率 P_{true} 以及由不同抽运脉冲产生的信号和闲置光子的随机符

测器,经过电-光/光-电转换输出相应频率的电信号。测试信号和高速光电探测器输出的电信号分别如图 3(a)、(b)所示,可以看出高速光电探测器可以实现电信号的电-光/光-电转换,输出的差分信号波形稳定且频率正确,信号摆幅约为 300 mV。

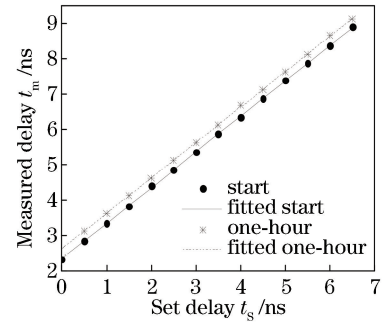


图 5 延时测试

Fig. 5 Test of delay

合计数率 $P_s P_i$, T_{CAR} 的表达式为

$$T_{CAR} = \frac{P_c}{P_s P_i} = \frac{P_{true} + P_s P_i}{P_s P_i} = 1 + \frac{P_{true}}{P_s P_i}, \quad (3)$$

式中: P_s 、 P_i 分别为信号光和闲置光通道的单通道计数率; $P_{s(i)}$ 中包含由自发四波混频过程产生的信号(闲置)光子计数率 $P'_{s(i)}$ 以及拉曼噪声光子计数率 $R_{s(i)}$, 即 $P_{s(i)} = P'_{s(i)} + R_{s(i)}$; $P'_{s(i)}$ 和 $R_{s(i)}$ 的大小均与抽运光的参数有关, $P'_{s(i)} \propto L^2 \sigma_p P_{ave}^2 / f_{rep}^2$ 且 $R_{s(i)} \propto P_{ave}$, 其中 L 为 DSF 长度; σ_p 为抽运脉冲谱宽; P_{ave} 为抽运平均功率; f_{rep} 为抽运脉冲的重复频率。

T_{CAR} 随监视功率 P_m ($P_m / P_{ave} = 0.73$) 变化的实验结果如图 6 所示,比较两条实线可以看出单光子探测器的暗计数对 T_{CAR} 产生影响,因此需要减去暗计数的 T_{CAR} 变化曲线。在减去暗计数的结果中,随着抽运功率的增大 T_{CAR} 先迅速增大再减小,这是由拉曼散射和四波混频共同作用造成的。在抽运功率较小时,拉曼散射产生的噪声光子 $R_{s(i)}$ 占比很高,而 P_{true} 占比很小,又因为 $R_{s(i)} \propto P_{ave}$ 且 $P_{true} \propto P_{ave}^2$, 所以当抽运功率增大时 T_{CAR} 迅速增大,但是随着抽运功率的继续增大, $P_s P_i$ 的增幅大于 P_{true} 的

增幅,因此 T_{CAR} 又逐渐减小。当单通道光子产生率为 0.0007 pair/pulse 时, T_{CAR} 可达 22.8; 当单通道光子产生率 < 0.008 pair/pulse 时, T_{CAR} 始终保持 > 10 。

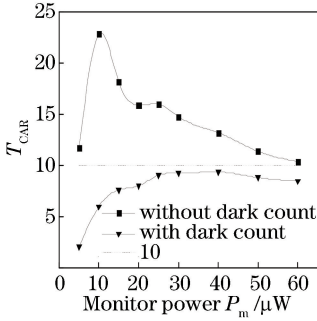


图 6 不同监视功率下的 T_{CAR} 变化曲线
Fig. 6 T_{CAR} versus monitor power

在信号光和闲置光通道分别放置四分之一波片、半波片和 PBS 时可以构成偏振分析装置, 旋转波片组合使偏振分析装置中信号光和闲置光分别以 θ_1 、 θ_2 角度入射, 则偏振纠缠信号光与闲置光的符合计数率与两通道角度的关系^[15]为

$$P_c = \frac{1}{2} \xi \eta_s \eta_i \alpha \times [\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2 +$$

$$2 \cos(2\varphi_p) \sin \theta_1 \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_2], \quad (4)$$

式中: $\eta_{s(i)}$ 为单光子探测器效率; α 为光子对的产生率; ξ 为一个由抽运通道、信号通道和闲置通道滤波器决定的系数。

调整半波片(HWP₁)使纠缠光子对处于(2)式所示的量子态, 保持抽运功率不变, 将偏振分析装置中信号光通道的角度 θ_1 设为 45° , 根据(4)式可知此时符合计数率与 θ_2 的关系为

$$P_c = \frac{1}{4} \xi \eta_s \eta_i \alpha [1 + \sin(2\theta_2)]. \quad (5)$$

旋转闲置光通道的角度 θ_2 并记录两通道角度差 $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$ 变化时信号光与闲置光的单通道计数率和符合计数率。单通道计数结果如图 7(a) 所示, 可以发现, 当 $\Delta\theta$ 变化时, 信号光和闲置光通道的单通道计数率都基本保持不变, 这与理论上信号光(闲置光)的单通道计数率 $P_{s(i)}$ 与其通道角度无关的特性是一致的, $P_{s(i)} = \eta_{s(i)} \alpha / 2$ 。符合计数的实验结果如图 7(b) 所示, 可以看出符合计数率的拟合曲线关于 $\Delta\theta$ 是周期为 π 的余弦函数, 该结果与(5)式是相吻合的。定义偏振纠缠干涉条纹可见度为

$$V = \frac{P_{\text{cmax}} - P_{\text{cmin}}}{P_{\text{cmax}} + P_{\text{cmin}}}, \quad (6)$$

计算出拟合结果的可见度为 0.87。

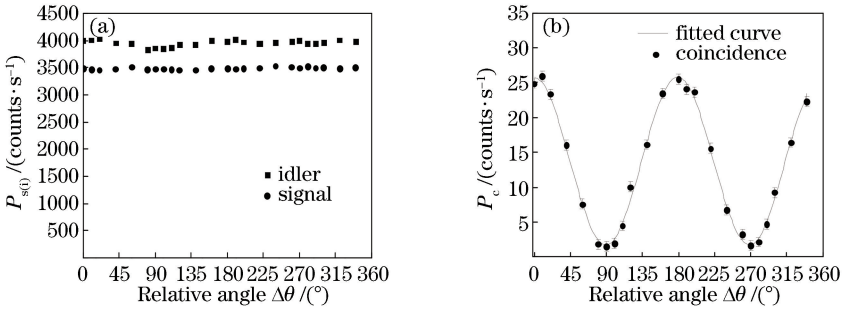


图 7 不同角度差下的单通道计数率和符合计数率。(a)单通道计数率;(b)符合计数率
Fig. 7 Single channel photon count rate and coincidence count rate versus relative angle.
(a) Single channel photon count rate; (b) coincidence count rate

4 结 论

基于 DSF 中的自发四波混频过程, 研究且制备了便携式偏振纠缠量子光源, 该量子光源集成了具有分频和延时功能的电子系统, 而且配备了标准单模光纤输出端口和同轴电缆电子辅助信号输出端口, 其中激光脉冲的重复频率为 150 MHz, 中心波长为 1553.33 nm, 由自发四波混频过程所产生的信号和闲置光子中心波长分别为 1558.17 nm 和 1548.51 nm; 电子系统可以实现二分频、三分频、五

分频和六分频等 24 种不同的分频, 并且可以进行延时调谐, 其延时增量为 10 ps, 可选延时范围为 6.66 ns, 电子系统输出的 TTL 电信号可以作为单光子探测器和数据采集系统的同步时钟信号。实验结果表明, 所设计的电子系统功能正常, 可以实现指定的分频和延时, 分频测量拟合结果的绝对误差平均值为 0.013 MHz; 在电子系统刚启动时和工作 1 h 后延时测量拟合结果的绝对误差平均值分别为 0.013 ns 和 0.010 ns, 由芯片温度变化引起的延时平均漂移量为 0.270 ns; 当单通道光子产生率为

0.0007 pair/pulse时, T_{CAR} 可达 22.8, 偏振纠缠干涉条纹可见度为 87%。该量子光源结构紧凑且便于移动, 输出的偏振纠缠光子对适用于长距离的光纤传输, 为量子信息技术相关研究提供了一种重要的工具。

参 考 文 献

- [1] Tittel W, Weihs G. Photonic entanglement for fundamental tests and quantum communication [J]. *Quantum Information and Computation*, 2001, 1(2): 3-56.
- [2] Zhang W, Zhou Q, Huang Y D, *et al.* Polarization entangled two-photon generation system: 103034015A [P]. 2013-04-10.
张巍, 周强, 黄翊东, 等. 偏振纠缠双光子产生系统: 103034015A [P]. 2013-04-10.
- [3] Shih Y H, Sergienko A V, Rubin M H, *et al.* Two-photon entanglement in type-II parametric down-conversion [J]. *Physical Review A*, 1994, 50(1): 23-28.
- [4] Kwiat P G, Waks E, White A G, *et al.* Ultrabright source of polarization-entangled photons [J]. *Physical Review A*, 1999, 60(2): R773-R776.
- [5] Takesue H, Inoue K. Generation of polarization-entangled photon pairs and violation of Bell's inequality using spontaneous four-wave mixing in fiber loop [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(3): 031802.
- [6] Ekert A K. Quantum cryptography based on Bell's theorem [J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(6): 661-663.
- [7] Shor P W. Scheme for reducing decoherence in quantum computer memory [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(4): R2493-R2496.
- [8] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement [J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429- R3432.
- [9] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L. Quantum metrology [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(1): 010401.
- [10] Yang L, Li X Y, Wang B S. 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.
- [11] Zeng Z L, Zhu Y, Lu L, *et al.* Research of peak count rate scanning method for single photon detector used in high precision optical transfer time measurement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0508003.
曾智龙, 朱勇, 卢麟, 等. 单光子探测峰值扫描法高精度光纤传输时间测量研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0508003.
- [12] Li X Y, Voss P L, Sharping J E, *et al.* Optical-fiber source of polarization-entangled photons in the 1550 nm telecom band [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(5): 053601.
- [13] Li X Y, Zhang X T, Wang K, *et al.* A portable all-fiber source of quantum-correlated photon-pairs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0927003.
李小英, 张秀婷, 王堃, 等. 全光纤便携式量子关联光子对源 [J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0927003.
- [14] Wang K. All-fiber quantum-correlated photon-pair source [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
王堃. 全光纤量子关联光源 [D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [15] Li X Y, Liang C, Lee K F, *et al.* Integrable optical-fiber source of polarization-entangled photon pairs in the telecom band [J]. *Physical Review A*, 2006, 73(5): 052301.