

基于百公里量子通信实验的可移动式 一体化纠缠源

周飞¹, 曹原², 印娟², 任继刚², 彭承志^{2*}

(1. 清华大学物理系低维量子物理国家重点实验室, 北京 100084;

2. 中国科学技术大学微尺度物质科学国家实验室, 安徽合肥 230026)

摘要:利用准相位匹配技术和 Sagnac 环结构设计研制了一套高亮度、高稳定性、小型化、可移动式的一体化纠缠源系统。此纠缠源基于周期极化磷酸钛氧钾(PPKTP)晶体参量下转换过程,亮度达到了 13.8 Mcps,偏振对比度好于 98%,纠缠度达到 0.9357,温度变化和机械振动测试引起的计数率抖动小于 5%。此系统成功地应用到了外场百公里量子纠缠分发和连续长时间关联速度下限测量试验中,从而为进一步实现空间纠缠源载荷提供了良好的试验技术基础。

关键词:纠缠源;小型化;一体化;稳定性

中图分类号:0437.4 **文献标识码:**A

Integrated and portable entanglement source used for quantum communication over 100 kilometers

ZHOU Fei¹, CAO Yuan², YIN Juan², REN Ji-Gang², PENG Cheng-Zhi^{2*}

(1. Department of Physics and State Key Laboratory of Low Dimensional Quantum Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. National Laboratory for Physical Sciences at Microscale and Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: An integrated miniaturized portable entanglement source with high-brightness and high-stability has been designed using quasi-phase matching and Sagnac loop structure. Based on parametric down conversion process of PPKTP crystal, the entanglement source has the brightness of 13.8 Mcps, the polarization contrast better than 98%, the tangle of 0.9357, and the jitter of counts rate caused by temperature variation and mechanical vibration less than 5%. The system has been successfully and effectively applied to the field test of 100 km quantum entanglement distribution and lower-limit measurement of association speed under continuous running, which provides a good trial basis for further realizing the spatial entanglement source load.

Key words: entanglement source, miniaturization, integration, stability

PACS: 03.67.Mn, 42.60.Lh, 42.65.Lm

引言

量子纠缠是量子信息科学中的重要资源,也是未来量子网络应用中的重要资源。以两粒子自旋量子纠缠为例,处于自旋纠缠中的两个粒子,当把它们放到足够远时,在短时间内它们之间不可能有相互作用,如果对它们的自旋进行相关测量,会发现在任

何基失下,其结果都呈现出完美的关联性,这个结果是不能用经典的定域实在论解释的。目前,纠缠源的产生方式多种多样,其中有通过非线性晶体自发参量下转换^[1-3]、基于连续变量光场^[4-6]以及固态系统方式等^[7-10]。但截止目前为止,在产生高品质纠缠源方面,利用非线性光学技术所产生的纠缠源被证明依然是最成功的。

收稿日期:2014-05-30,修回日期:2015-02-04

基金项目:国家自然科学基金(61078012)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61078012)

作者简介(Biography):周飞(1983-),男,湖北武汉人,博士,主要从事于远距离自由空间量子通信技术。E-mail:zhoufei@jqt.org

* 通讯作者(corresponding author): E-mail:pcz@ustc.edu.cn

Received date: 2014-05-30, revised date: 2015-02-04

传统的非线性纠缠源制备方法是通过硼酸钡 (BBO) 非线性晶体进行参量下转换, 再经薄晶体和波片进行横向和纵向走离效应的补偿, 产生较好品质的纠缠源. 1995 年 Kwiat 用 BBO 晶体制备出的纠缠源亮度为 $0.1 \text{ cps/mw}^{[1]}$, 伴随空间滤波技术和模式匹配技术的发展, 2001 年纠缠源的亮度提高到 1000 cps/mw 量级^[11]. 随着高非线性系数晶体的出现和准相位匹配技术的发展^[12-15], 2004 年麻省理工学院的科学家利用周期极化磷酸钛氧钾 (PPKTP) 晶体将纠缠源的亮度再次大幅的提升^[16]. 同时慕尼黑的科学家也开始了紧凑型纠缠源系统的研究^[17], 因其使用的仍是 BBO 晶体, 亮度只有 220 cps/mw . 而在实验室条件下, 利用 PPKTP 晶体和 Sagnac 干涉环技术^[18] 已使得纠缠源的亮度增加到 $0.64 \text{ Mcps/mw}^{[19]}$. 近年来, 基于准相位匹配技术的 PPKTP 晶体纠缠源^[20] 已经成为高亮度、高品质纠缠源的一个绝佳选择. 利用相关技术, 通过优化设计, 我们研制出了适应外场工作条件的高亮度、高稳定性、小型化、可移动式的纠缠源系统, 整个纠缠源外形尺寸为: $500 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$, 总重量小于 10 kg , 亮度达到 13.8 Mcps , 偏振相关对比度好于 98% , 纠缠度达到 0.9357 , 并成功应用于户外的多项重要科学实验中^[21-23], 进而为量子科学实验卫星中纠缠源载荷的研制, 以及星地量子通信的发展打下了一个良好的基础.

1 小型化纠缠源设计原理

1.1 光学原理设计

采用了成熟的自发参量下转换过程产生纠缠光子对, 利用准相位匹配技术和 Sagnac 干涉环结构进行了纠缠源设计, PPKTP 晶体纠缠源原理示意图如图 1 所示.

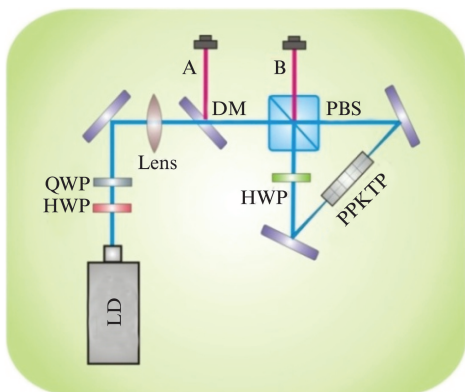


图 1 PPKTP 晶体纠缠源示意图

Fig. 1 Schematic drawing of PPKTP entanglement source

泵浦光经半波片 (HWP) 和四分之一波片 (QWP) 调节, 经过双波长极化分束器 (PBS) 后, 被分为顺时针 (1 路) 和逆时针 (2 路) 两路光束进入 Sagnac 环. 经非线性晶体产生两路参量光 (信号光 s , 闲频光 i), 经双波长 PBS 出射后, 形成双光子纠缠态, 可写成如下形式:

$$\cos\theta |H_{1s}\rangle_B |V_{1i}\rangle_A + e^{i\phi} \sin\theta |V_{2s}\rangle_B |H_{2i}\rangle_A. \quad (1)$$

根据理论分析^[18], 通过调节路径中的 QWP 和 HWP, 使得 $\phi = \pi, \theta = \pi/4$, 最终得到最大纠缠态:

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|H_{1s}\rangle |V_{1i}\rangle - |V_{2s}\rangle |H_{2i}\rangle). \quad (2)$$

基于 PPKTP 晶体与 Sagnac 干涉环的纠缠源主要具备两个方面的优势: 1. 共轴输出模式, 使得纠缠光的产生效率和收集效率大幅提高, 从而可以有效降低对泵浦光功率的需求, 更符合远距离空间通信的要求; 2. 使用具有路径对称结构的 Sagnac 干涉环, 使得纠缠源的相位稳定性更加鲁棒, 更有利于集成化设计.

1.2 光学与机械结构设计

采用 25 mm PPKTP 晶体, 参量光强度 $I_{2\omega}$ 与晶体长度 L 及内部光斑束腰大小 ω_0 的关系为^[20]:

$$I_{2\omega} \propto \frac{L^2}{\omega_0^2}. \quad (3)$$

可见, 束腰半径 ω_0 越小, 转换效率越高, 但泵浦光作为高斯光束, 光束截面会随着光束在晶体中的传播距离的增加而变大, 而光束截面的增加不会增大转换效率, 所以晶体长度确定后, 存在最佳的束腰大小使得晶体转换效率最大, 通常选择晶体长度为 4 倍的瑞利长度 ($z_0 = \pi\omega_0^2/\lambda$). 因此计算得到最佳效率时, 激光在晶体中束腰半径约为 $28 \mu\text{m}$. 为使聚焦光斑的束腰达到要求, 而且尽量减小远场发散角, 这里采用了两透镜系统. 已知泵浦光发射准直透镜焦距为 2 mm , W_0 代表 405 nm 单模光纤芯径 (直径为 $3 \mu\text{m}$), W_p 表示最终光斑束腰直径. 当取最优直径 $56 \mu\text{m}$ 时, mathematics 数值模拟可得到两透镜安装位置 L_1, L_2 以及后透镜 B 的焦距选取大小.

由图 2 可以得到, 当选择透镜 B 的焦距 $f_2 = 75 \text{ mm}$ 时, 选择透镜 A 的位置 $L_1 = 3 \text{ mm}$, 透镜 B 的位置有 $L_2 = 106 \text{ mm}, L_3 = 301 \text{ mm}$.

如图 3 为 PPKTP 晶体纠缠源的一体化结构, 纠缠源的光学设计尺寸为: $440 \text{ mm} \times 165 \text{ mm} \times 85 \text{ mm}$; 总重量小于 8 kg (不包括激光器部分); 下部黄色部件为 PPKTP 晶体固定件, 采用导热性好、热膨胀系数小的锌白铜材质, 用于晶体温度的整体调

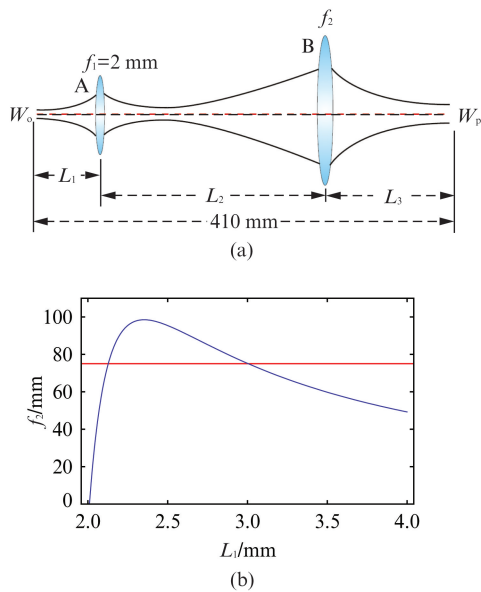


图2 数值模拟透镜焦距及位置 (a) 模拟光路, (b) 模拟计算曲线
Fig. 2 Numerical simulation of focal length and location of the lens (a) The simulation model of beamline, (b) numerical simulation curve

控. 中间装有热敏电阻(NTC)监测晶体温度,通过半导体电子温控器件(TEC)控制晶体温度. Sagnac 环设计周长为 205 mm,参量光子接收端分别距离 PPKTP 晶体中心 150 mm 和 200 mm. 整体结构如下:

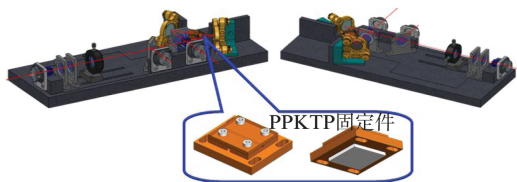


图3 纠缠源一体化结构
Fig. 3 Integrated design of the entanglement source

组装调试完成后的纠缠源实物如图 4:

纠缠源的总尺寸为: 450 mm × 300 mm × 150 mm(不计外置激光器部分). 纠缠源光学主体放置在 500 mm × 400 mm × 160 mm 的保温铝箱中,内置锡箔纸和自动电子温控装置,控制箱体内环境温度变化 ± 1 °C.

2 纠缠源品质

泵浦光源采用连续泵浦单纵模激光器,中心波长为 405.6 nm,线宽 5 M,通过调节 TEC 控制 NTC 电阻值为 2.054 kΩ,使晶体工作在简并温度 75 °C,此时通过光谱仪测量参量光中心波长约为 811 nm,搭建干涉仪测量参量光线宽为 0.22 nm. 进一步测

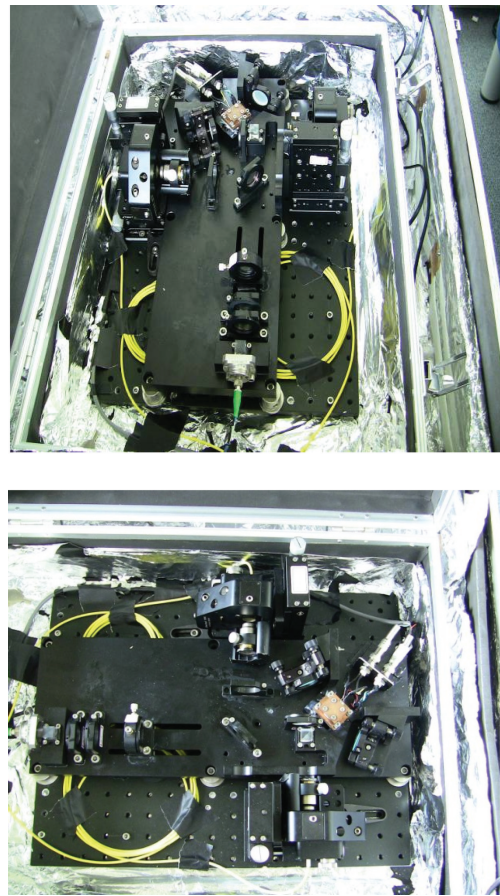


图4 纠缠源实物图
Fig. 4 Photo of the entanglement source

量纠缠源的亮度和品质.

2.1 纠缠源亮度、对比度

表1 纠缠源亮度、对比度参数

Table 1 Brightness and visibility of the entanglement source

| 泵浦功率 | 近端单路 | 远端单路 | 总符合 | 符合/mw | H/V 对比度 | +/- 对比度 | 符合 效率 |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|----------|
| 1.14 mw | 291 434 | 229 108 | 48 720/s | 42 736/mw | 219:1 | 58:1 | 18.85% |
| 12 mw | 3 059 233 | 2 326 503 | 511 227/s | 42 602/mw | 45:1 | 29:1 | 19.2% |

如表 1 所示,当发射单模光纤输出功率为 12 mW 时,探测纠缠光子对数为 0.51 M/s,此时纠缠源产生的纠缠光子对数为 13.8 M/s,纠缠光子符合计数约为 42 kcps/mW,结合参量光线宽,可得到纠缠源亮度为 191 kcp(s⁻¹mW⁻¹nm⁻¹). 当单模光纤输出的最大功率为 18 mW,最大的探测符合计数大于 750 k/s. 在小功率时,测量相应的符合计数的极化关联曲线如图 5.

可见,在小功率泵浦时,纠缠源极化对比度好于 98%. 同样方式测量在大功率泵浦时,纠缠源极化对比度好于 95%. 这些测量包含偶然符合计数,纠缠

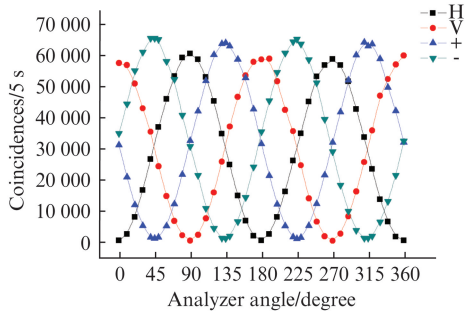


图 5 纠缠源极化关联曲线
Fig. 5 Polarization-correlation

源品质相比其他研究小组^[25]仍处于领先水平。

2.2 CHSH 不等式测量

为进一步验证纠缠源品质,测量 CHSH 不等式^[24],通过测量 1 s 时间内符合结果为:

表 2 CHSH 不等式测量

Table 2 Result of the CHSH inequality test

| 角度 | 22.5° | 112.5° | 67.5° | -22.5° |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 0° | 2 551 | 13 721 | 13 471 | 2 103 |
| 90° | 12 910 | 2 507 | 2 333 | 12 196 |
| 45° | 12 875 | 2 510 | 13 693 | 2 337 |
| -45° | 2 302 | 13 964 | 2 549 | 12 352 |

误差 $\sigma(E)$ 为:

$$\sigma(E) = 2 \times (N(\phi_A, \phi_B) + N(\phi_A + \pi/2, \phi_B + \pi/2))^{1/2} (N(\phi_A, \phi_B + \pi/2) + N(\phi_A + \pi/2, \phi_B))^{1/2} (N(\phi_A, \phi_B) + N(\phi_A + \pi/2, \phi_B + \pi/2) + N(\phi_A, \phi_B + \pi/2) + N(\phi_A + \pi/2, \phi_B))^{-2/3}, (4)$$

这个矩阵是厄米共轭的,对应的实部和虚部可绘制三维图形如图 6(图形底部左边数字代表矩阵行数,右边代表矩阵列数):

通过对纠缠光子态的 Tomography 分析,得到最终纠缠源纠缠度: $T = 0.9357 \pm 0.0016$ 。

3 纠缠源稳定性

通过研制此高亮度、高品质纠缠源,一方面作为关键技术服务于科学实验,另一方面是作为量子纠缠源的原型样机对未来的工程产品进行预研,所以在保证纠缠源的各项性能都达到设计指标的同时,对其稳定性也要进行初步的考核和摸底性测试。此纠缠源系统在设计上采用了一体化的设计思路,保

$N(\phi_A, \phi_B)$ 表示其中一个测量角度为 ϕ_A ,另一个测量角度为 ϕ_B 的符合计数,可得到 E 值和相应误差 $\sigma(E)$ 为:

表 3 E 值与误差 $\sigma(E)$

Table 3 E values and standard deviation error $\sigma(E)$

| | | |
|---------------------------|----------------|-----------|
| $E(0^\circ, 22.5^\circ)$ | -0.680 772 508 | 0.004 115 |
| $E(0^\circ, 67.5^\circ)$ | 0.705 278 54 | 0.004 086 |
| $E(45^\circ, 22.5^\circ)$ | 0.695 933 78 | 0.004 036 |
| $E(45^\circ, 67.5^\circ)$ | 0.684 071 | 0.004 147 |

即有:

$$S = |E(0, 67.5^\circ) - E(0, 22.5^\circ) + E(45^\circ, 22.5^\circ) + E(45^\circ, 67.5^\circ)| = 2.766 \pm 0.008, \text{ 在 } 1 \text{ s 时间内能够以 } 93.9 \text{ 倍标准差破坏 Bell 不等式。}$$

2.3 纠缠光子态 Tomography 分析

由于器件、结构、探测效率等各种因素的不完美性,使得实物纠缠源存在着不完美性,对比度通常小于 1。这里引入纠缠度(Tangle)来评价纠缠的纯度,纯态 Bell 态的纠缠度度量为 1。因为不完美性,实际的纠缠光子不是一个完全纯态,所以纠缠度是对纠缠源品质评价的一个很好的参数。而要计算纠缠度,首先需要得到实际光子态的密度矩阵,量子态的 tomography 分析就是一种根据有限测量结果来得到实际光子态密度矩阵的技术。

通过对纠缠源进行对应基矢的测量和 tomography 分析^[25],可以计算得到两光子纠缠源的四维态密度矩阵 $\hat{\rho}$:

$$\hat{\rho} = \begin{pmatrix} 0.0033 & 0.0051 - 0.0183i & -0.0040 + 0.0254i & -0.0023 - 0.0001i \\ 0.0051 + 0.0183i & 0.5225 & -0.4794 + 0.0478i & 0.0034 + 0.0114i \\ -0.0040 - 0.0254i & -0.4794 - 0.0478i & 0.4711 & -0.0014 - 0.0021i \\ -0.0023 + 0.0001i & 0.0034 - 0.0114i & -0.0014 + 0.0021i & 0.0032 \end{pmatrix}. (5)$$

证了外场试验对其长时间稳定性的需求。作为工程化器件,有两个最基本的测试内容:温度稳定性和机械稳定性。这里就其关键部位,进行了初步测试,测试结果如下:

从以上测试结果可以看出,关键部件由机械振动和温度变化引起的计数率变化都在 5% 以内,这里还包括了探测器本身计数和光源自身的漂浮抖动。针对该纠缠源进行的以上测试仅仅属于初步的摸底试验,距离工程上的力学、热循环和热真空等环境模拟试验的要求还有较大差距,但相比于实验室级的纠缠源在工程化方面已经有了显著地改善,为未来真正的工程产品的研制提供了良好的技术和经验积累。

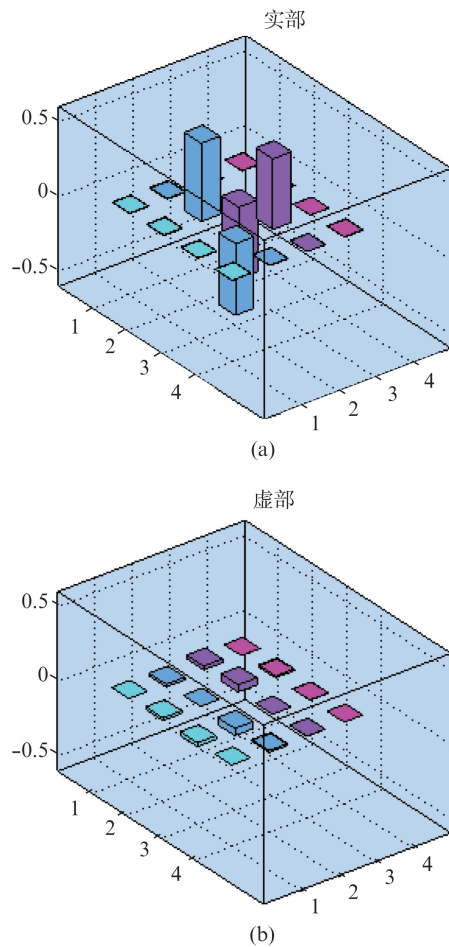


图6 两光子态密度矩阵 (a) 实部, (b) 虚部
Fig.6 Real and imaginary parts of the reconstructed density matrix of source (a) real, and (b) imaginary

表4 纠缠源稳定性测试结果

Table 4 The test results on stability of the source

| 测试项 | 测试条件 | 测试结果 |
|-----------------------|--|-----------------------------------|
| CCD长时间 监测泵浦光 抖动 | 监视时长: 10 h | 变化小于 μrad |
| 力学稳定性 | 按压接收端 按压位置: 接收透镜 按压力度: 2 kg 重物 按压次数: 20 | 计数率变化小于 4% |
| | 按压发射端 按压位置: 发射光纤 按压力度: 2 kg 重物 按压次数: 20 | 计数率变化小于 3% |
| | 敲击底板 敲击位置: 聚焦透镜位置 敲击速度: 0 ~ 1 g 敲击次数: 20 | 计数率变化小于 1% |
| 热学稳定性 | 温度拉偏 高温点: 30 $^{\circ}\text{C}$ 低温点: 20 $^{\circ}\text{C}$ 循环次数: 20 测试点温度: 25 $^{\circ}\text{C}$ | 计数率变化小于 5% (包含光源涨落) |
| | 长时间监测 纠缠源亮度 | 监测时长: 10 h 计数率变化小于 3% (包含光源涨落) |

4 结论

利用 PPKTP 晶体的准相位匹配技术、共轴输出模式和 Sagnac 干涉环结构将纠缠源亮度(相比 BBO 纠缠源)提高了一个多数量级,对比度也大大得到改善.整套纠缠源系统采用科学的一体化设计,结构更紧凑,器件更稳定,便于搬运,适用于户外恶劣条件中长时间使用.这套纠缠源系统在青海湖地区被成功地应用于百公里量子纠缠分发和基于 Bell 不等式关联速度下限测量这两个重要的实验研究中,为未来研制纠缠源载荷系统提供了一个很好的铺垫.伴随着星地时间同步^[26]等量子通信技术的进一步发展,未来实现全球化的量子通信网络将变得更为可能.

如果进一步利用这种基于 PPKTP 晶体纠缠源的设计结构,发挥其高亮度、高品质优势,采用脉冲泵浦激光光源,进行相应的频率时间滤波^[27],未来很可能为实现户外白天自由空间量子密钥分发提供帮助.

References

- [1] Kwiat P G, Mattle K, Weinfurter H, *et al.* New high-Intensity source of polarization-entangled photon pairs[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**: 4337.
- [2] PAN J W, Daniell M, Gasparoni S, *et al.* Experimental demonstration of four-photon entanglement and high-fidelity teleportation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**: 4435.
- [3] Yao X C, Wang T X, Xu P, *et al.* Observation of eight-photon entanglement[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**: 225.
- [4] Ou Z Y, Pereira S F, Kimb H J, *et al.* Realization of the EinsteinPodolsky-Rosen paradox for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**: 3663 - 3639.
- [5] Jing J T, Zhang J, Yan Y, *et al.* Experimental demonstration of tripartite entanglement and controlled dense coding for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, **90**: 167903 - 167906.
- [6] Su X L, Tan A H, Jia X J, *et al.* Experimental preparation of quadripartite cluster and Greenberger-Horne-Zeilinger entangled states for continuous variables [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **98**: 070502 - 070506.
- [7] Simmons S, Brown R M, Riemann H, *et al.* Entanglement in a solid-state spin ensemble[J]. *Nature*, 2011, **470**: 69 - 72.
- [8] Young R J, Stevenson R M, Shields A J, *et al.* Entangled photons from the biexciton cascade of quantum dots[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**: 081711.
- [9] Chou C W, Riedmatten H, Felinto D, *et al.* Measurement-induced entanglement for excitation stored in remote atomic ensembles[J]. *Nature*, 2005, **438**: 828 - 832.
- [10] Sharping J E, CHEN J, LI X, *et al.* Quantum Correlated twin photons from microstructured fibre[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 3086 - 3094.

- [11] Kurtsiefer C, Oberparleiter M, Weinfurter H. High-efficiency entangled photon pair collection in type-II parametric fluorescence[J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **64**: 023802.
- [12] Rangarajan R, Goggin M, Kwiat P G. Optimizing type-I polarization-entangled photons [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**: 18920 – 18933.
- [13] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J, *et al.* Interactions between light waves in a nonlinear dielectric [J]. *Phys. Rev.*, 1962, **127**: 1918 – 1939.
- [14] Franken P A, Ward J F. Optical harmonics and nonlinear phenomena[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1963, **35**: 23 – 39.
- [15] Fejer M M, Magel G A, Jundt D H, *et al.* Quasi-phase-matched second harmonic generation; tuning and tolerances [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1992, QE-28: 2631 – 2654.
- [16] Kuklewicz C E, Fiorentino M, Messin G, *et al.* High-flux source of polarization-entangled photons from a periodically poled KTiOPO4 parametric down-converter[J]. *Phys. Rev A*, 2004, **69**: 013807.
- [17] Trojek P, Schmid C, Bourennane M, *et al.* Compact source of polarization-entangled photon pairs[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**: 276 – 281.
- [18] Kim T, Fiorentino M, Wong F N C. Phase-stable source of polarization-entangled photons using a polarization Sagnac interferometer[J]. *Phys. Rev. A*, 2006, **73**: 12316.
- [19] Steinlechner F, Trojek P, Jofre M, *et al.* A high-brightness source of polarization-entangled photons optimized for applications in free space [J]. *Opt. Express*, 2012, **20**: 9640 – 9649.
- [20] Fedrizzi A, Herbst T, Poppe A, *et al.* A wavelength-tunable fiber-coupled source of narrowband entangled photons [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**: 15377 – 15386.
- [21] Cao Y, Liang H, Yin J, *et al.* Entanglement-based quantum key distribution with biased basis choice via free space [J]. *Opt. Express*, 2013, **21**: 27260 – 27268.
- [22] Yin J, Ren J G, Lu H, *et al.* Quantum teleportation and entanglement distribution over 100-kilometre free-space channels [J]. *Nature*, 2012, **488**: 185 – 188.
- [23] Yin J, Cao Y, Yong H L, *et al.* Lower bound on the speed of nonlocal correlations without locality and measurement choice loopholes [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2013, **110**: 260407.
- [24] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, *et al.* Holt. proposed experiment to test local hidden-variable theories [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1969, **23**: 880.
- [25] Altepeter J B, James D F V, Kwiat P G. *Qubit quantum state tomography* [M] (Springer, 2004).
- [26] REN Ji-Gang, YIN Juan, YANG Bin, *et al.* Time synchronization for quantum key distribution from ground to satellite [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (任继刚, 印娟, 杨彬, 等. 星地量子密钥分发中的时间同步研究. *红外与毫米波学报*), 2011, **30**(4): 381 – 384.
- [27] Shapiro J H, Wong F N C. An ultrabright narrowband source of polarization-entangled photon pairs [J]. *Journal of Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, 2000, **2**: L1-L4.