量子通信技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251010003

基于BBO晶体的小型化量子纠缠源实验研究

周　雷，刘　慧，刘仁德，李东东*，赵于康，唐世彪

（科大国盾量子技术股份有限公司，合肥 230088）

摘　要： 量子纠缠是量子信息与量子通信研究中的核心资源。文章基于BBO晶体设计并搭建了一套小型化、低成本、可移动的纠缠源系统。该系统尺寸为400 mm×300 mm×100 mm，采用单模光纤收集纠缠光子，纠缠源亮度达到611 cps/mW。系统性能通过偏振对比度、CHSH不等式和纠缠并发度三个指标进行综合评价：水平/垂直偏振对比度为142∶1，45°/－45°偏振对比度为22∶1，CHSH不等式测得值为2.68，纠缠并发度为0.808。实验结果表明，该纠缠源质量良好，可有效应用于纠缠型量子密钥分发、量子测量、量子隐形传态等多种科研实验。

关键词： 纠缠源；BBO晶体；小型化

中图分类号： O413.1　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0253－06

Experimental Study of a Compact Entanglement Source with a BBO Crystal

ZHOU Lei, LIU Hui, LIU Rende, LI Dongdong, ZHAO Yukang, TANG Shibiao

(**QuantumCTek Co. Ltd., Hefei 230088, CHN**)

Abstract: Quantum entanglement is a core resource in the field of quantum information and communication. In this study, a compact, low-cost, and portable entangled-photon source system was designed and constructed based on a BBO crystal. The system, with dimensions of 400 mm × 300 mm × 100 mm, employed a single-mode fiber for entangled photon collection, and achieved a source brightness is 611 cps/mW. The system's performance was comprehensively evaluated using three metrics: polarization contrast, the CHSH inequality value, and concurrence. The measured horizontal/vertical polarization contrast, 45°/－45° polarization contrast, CHSH inequality value, concurrence were 142∶1, 22∶1, 2.68, and 0.808, respectively. These experimental results confirm the high quality of the developed entangled photon source , which can thus be effectively applied in various research experiments, such as entanglement-based quantum key distribution, quantum measurement, and quantum teleportation.

Key words: entanglement source; BBO crystal; miniaturization

0　引言

量子纠缠[1-3]作为量子信息科学的核心资源，以其独特的非局域关联性支撑起一系列重大科技突破。2012年，潘建伟团队在多光子纠缠与干涉领域取得关键进展，首次实现无局域性漏洞的量子纠缠关联塌缩速度测量[4]；2017年，“墨子号”实现1 200 km星地量子纠缠分发[5]及1 000 km级量子隐形传态[6]；2020年，“墨子号”完成1 120公里基于纠缠的双向量子密钥分发实验[7]；2023年，中科大团队在51个超导量子比特的一维簇态方面突破了光子系统在纠缠规模上的瓶颈[8]，进一步拓展了纠缠源的应用边界。目前，量子纠缠已成为量子通信、量子精密测量、片上量子操控等前沿领域的技术基石。

收稿日期：2025－10－10.

*通信作者：李东东

自20世纪80年代中期起，基于非线性晶体的自发参量下转换（SPDC）技术因制备工艺成熟，始终是纠缠态生成的主流方案。近年来，随着准相位匹配（QPM）技术在周期性极化非线性材料（如周期性极化钛酸钾磷酸盐）中的应用，纠缠源在亮度与保真度上持续突破[9-10]。然而，复杂的光路设计与科研级设备的高昂成本，仍显著制约着量子纠缠源在科研场景中的普及应用——许多场景亟需易操作的实验平台，以帮助使用者直观理解纠缠特性，并为后续开展前沿研究奠定基础。因此，开发易操作、高性能小型化量子纠缠源，对拓展量子基础实验应用场景、推动量子基础研究普及至关重要。

本实验利用BBO晶体的参量下转换过程，成功制备出小型化、可移动式偏振纠缠光子源。通过优化泵浦激光器的输出功率与纠缠光子的收集策略，实现了每秒超30 000对纠缠光子的高效收集，其亮度相较于前期科研级紧凑型BBO纠缠源[11]提升近6倍；相较于早期的BBO纠缠系统[12]，符合光子数有数量级的提升。从光子对亮度、偏振对比度、Bell不等式违背程度、纠缠并发度等关键指标的表征结果来看，该系统能够满足量子力学基础验证、纠缠实验拓展等多样化实验场景需求，为量子力学基础研究与拓展性实验研究提供了有力的平台支撑。

1 实验原理

当光子进入非线性晶体BBO（β-BaB_2O_4）时[13]，会有一定的几率发生自发参量下转换过程，一个泵浦光子会有一定概率劈裂为两个光子，其中一个光子为信号光s，另一个光子为闲频光i。通过选取合适的泵浦激光的极化方向、BBO晶体的切割角度以及BBO晶体沿光轴的旋转角度，可使出射光子一个为水平偏振（H），另一个为垂直偏振（V）。

另外，自发参量下转换过程满足动量守恒条件和能量守恒条件：

$$\begin{aligned}\vec{p}_p&=\vec{p}_s+\vec{p}_i\\E_p&=E_s+E_i\end{aligned}\qquad(1)$$

式中，泵浦光记作下标p，信号光记作下标s，闲频光记作下标i。

在大量光子以特定角度入射至BBO晶体时，信号光的分布会形成一个光锥，同时闲频光的分布也会形成一个光锥。

由于动量守恒，每次发生参量下转换过程出现的一对信号光和闲频光都会对称地出现在两光锥上。如图1所示，信号光光锥和闲频光光锥的两个交点（记作a和b）存在两种可能的状态，即$|s\rangle_a|i\rangle_b$和$|i\rangle_a|s\rangle_b$，其中下标a/b表示光子的空间状态（a处光子极化状态为$|s\rangle$和$|i\rangle$叠加，b处为$|i\rangle$和$|s\rangle$的叠加）。于是两光子便处于叠加态，即：

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|s\rangle_a|i\rangle_b+e^{i\alpha}|i\rangle_a|s\rangle_b)\qquad(2)$$

写成光子偏振的形式：

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle+e^{i\alpha}|V\rangle|H\rangle)\qquad(3)$$

基于此原理便可制备出两光子的偏振纠缠态。

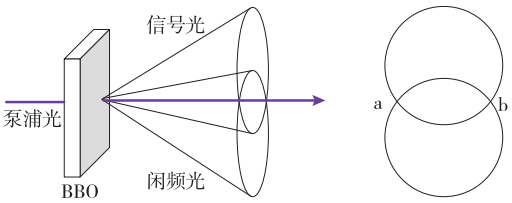


图1 纠缠光子对制备原理图

为提高纠缠源品质，光路中采用半波片和补偿BBO晶体来对纠缠源的两路光程差和在主BBO晶体中走离进行补偿。补偿原理如图2所示。

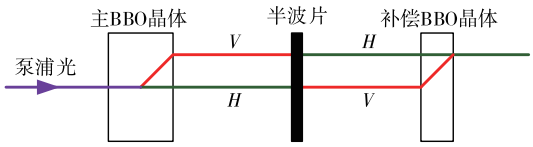


图2 纠缠性能补偿

半波片旋转45°，可将光子极化方向旋转90°，使参量下转换产生的两光子互换极化方向。在主BBO中传播速度较快光子经过半波片后，极化方向旋转90°，在补偿BBO中降低传播速度，不仅可补偿两光子在主BBO中产生的光程差，同时，由于两光子极化方向的互换，引起两光子在补偿BBO晶体中的折射率变化，从而改变了光子的行走路径，可补偿两光子在主BBO晶体中的走离效应。

另外，通过调节光子入射至补偿BBO晶体的角度或BBO晶体的光轴，可以得到Bell态中的两个量子态，即：

$$\begin{aligned}|\varphi^+\rangle&=\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle+|V\rangle|H\rangle)\\|\varphi^-\rangle&=\frac{1}{\sqrt{2}}(|H\rangle|V\rangle-|V\rangle|H\rangle)\end{aligned}\qquad(4)$$

2　光学系统搭建

系统中采用厚度为 2 mm 的 BBO 晶体作为主晶体，采用厚度为 1 mm 的 BBO 晶体作为补偿晶体，选用波长为 405 nm 的激光泵浦主 BBO 晶体，产生中心波长为 810 nm 的纠缠光子。如图 3 所示为基于 BBO 晶体的纠缠源示意图。

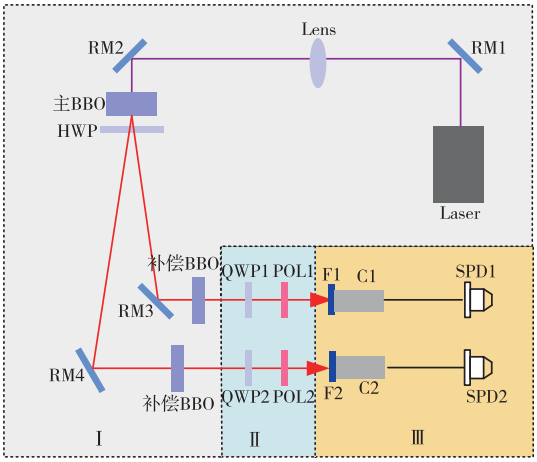


图 3　纠缠源示意图

纠缠源共分为三部分：Ⅰ部分为纠缠光子的制备模块，Ⅱ部分为纠缠性能测量模块，Ⅲ部分为纠缠光子收集与探测模块。光路中除收光耦合器 1（Coupler 1，C1）与单光子探测器 1（Single Photon Detector 1，SPD1）、收光耦合器 2（Coupler 2，C2）与单光子探测器 2（Single Photon Detector 2，SPD2）之间为单模光纤连接，其余均为自由空间光模式。泵浦激光器（Laser）出射中心波长为 405 nm 的连续光，依次经反射镜 1（Reflector Mirror 1，RM1）反射、透镜（Lens）聚焦和反射镜 2（Reflector Mirror 2，RM2）反射后，入射至主 BBO 晶体，经主 BBO 晶体的自发参量下转换过程产生偏振纠缠的光子源。偏振纠缠光子的两路均由半波片（Half-wave Plate，HWP）和补偿 BBO 晶体进行补偿后，分别经滤光片 1（Filter 1，F1）和滤光片 2（Filter 2，F2）滤除泵浦光和杂散光后，由收光耦合器收集至单模光纤然后进入单光子探测器进行探测，后处理模块为一个时间符合系统，主要用于判定纠缠光子的时间关联。为使光路更加小型化和紧凑化，纠缠光子的两路分别采用反射镜 3（Reflector Mirror 3，RM3）和反射镜 4（Reflector Mirror 4，RM4）对纠缠光子进行反射。采用 1/4 波片（Quarter-wave Plate，QWP）和极化片（Polarizer，POL）组成测量装置，从而进行偏振对比度、CHSH 不等式和纠缠并发度测量。

光学系统搭建后的实物如图 4 所示，采用 20 个光学器件完成了泵浦光出射、泵浦光反射、自发参量下转换、纠缠性能补偿、杂散光滤除、纠缠光收集和纠缠源品质测量等一系列实验过程。405 nm 激光器采用北京镭志威生产的单纵模激光器，其中心波长为 405.87 nm，半高全宽（FWHM）为 0.126 nm，如图 5(a)所示。采用焦距为 200 mm 的透镜对泵浦光进行聚焦，从而提高主 BBO 晶体处泵浦光的功率密度，BBO 晶体处泵浦光光斑直径约为 200 μm，聚焦至 BBO 晶体处的光斑形态如图 5(b)。根据光斑直径及主 BBO 晶体距耦合器的距离可计算出耦合器中透镜焦距，系统中选用焦距为 11 mm 的离焦耦合器配合芯径为 5 μm 的单模光纤，可高效率地收集纠缠光子。

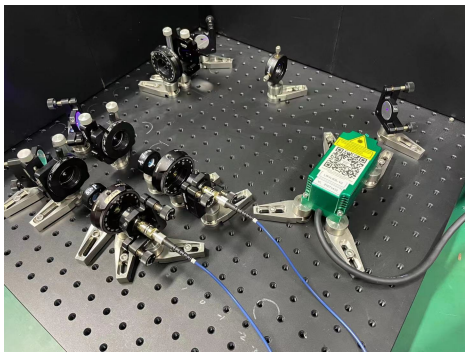
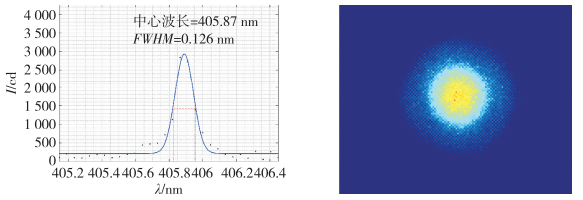


图 4　纠缠源实验装置实物图



(a) 泵浦光波长和半高全宽　　(b) 泵浦光聚焦后光斑形态

图 5　泵浦光参数和聚焦后光斑形态

3　纠缠源性能测试

3.1　纠缠源亮度和偏振对比度

实验测试了不同泵浦光功率对应的纠缠源亮度，如图 6 所示。鉴于纠缠源亮度与泵浦光功率存在近似线性依赖关系，同时考虑实验成本和人身安全，故确定后续实验采用 50 mW 的泵浦功率评估纠缠源关键性质。此条件下的亮度测量结果如表 1 所示。探测到纠缠光子对数为 30 553 cps，纠缠光子符合计数约为 611 cps/mW。

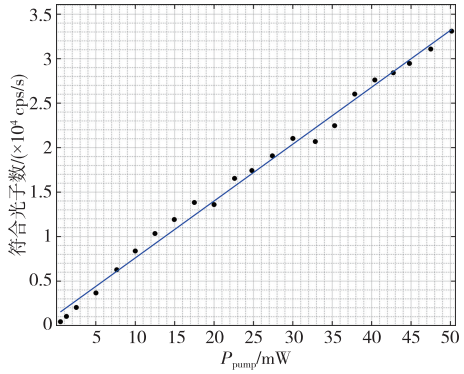


图6 纠缠源亮度随泵浦光功率的变化曲线

表1 纠缠源亮度

泵浦光功率	单路计数(N_a)	单路计数(N_b)	符合计数(N_{ab})	纠缠源亮度
50 mW	151 500 cps	159 045 cps	30 553 cps	611 cps/mW

纠缠源不同基矢的偏振对比度测量结果如表2和表3所示。根据表2,H/V(H表示0°偏振态,V表示90°偏振态)对比度由相应符合计数计算得到,具体计算公式为:H/V对比度$=(N_{HV}+N_{VH})/(N_{HH}+N_{VV})=142/1$。根据表3,同样可计算得到$D/A$($D$表示45°偏振态,$A$表示−45°偏振态)对比度为22/1。

表2 H/V偏振对比度测量数据

测量基矢	N_a/cps	N_b/cps	N_{ab}/cps
HH	60 938	61 607	63
HV	61 471	59 063	7 463
VH	53 554	61 266	8 075
VV	53 283	59 248	46

表3 *D/A*偏振对比度测量数据

测量基矢	N_a/cps	N_b/cps	N_{ab}/cps
DD	56 984	61 205	398
DA	56 756	56 577	7 250
AD	57 762	60 738	7 836
AA	57 964	56 744	296

为测量纠缠源的偏振关联品质,将其中一条路径的偏振片分别放置于0°,90°,45°和−45°四个不同基矢的角度上,将另一路的偏振片从0°到360°进行旋转,得到相应的偏振关联曲线如图7所示。

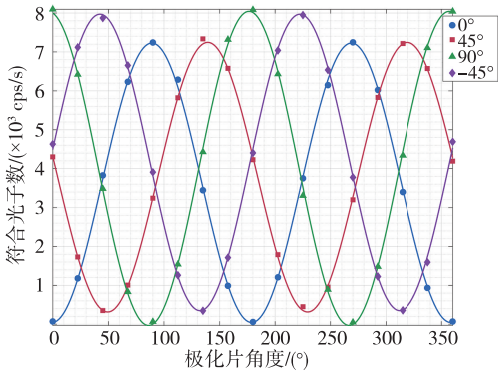


图7 纠缠源偏振关联曲线

实验观测到D/A基偏振对比度显著低于H/V基,这可能与实验器件引入了与基矢相关的相位误差有关。由于D/A基是H与V偏振态的相干叠加,其对两个分量间的相对相位涨落极为敏感。首先,尽管采用了BBO晶体与半波片组合进行走离补偿,晶体在旋转对准、厚度或平行度上的微小偏差仍会在纠缠分量(HV与VH)间引入稳定或频散的相对相位差,从而显著破坏D/A基下的量子相干性,导致对比度下降,而对H/V基影响较小。其次,反射镜对s与p分量可能存在固有相位延迟,会在光路中引入非期望的$H-V$相对相位;该相位在H/V基测量中表现为全局相位,因而无影响,但在D/A基测量中会使理想线偏振态(D/A)退化为椭圆偏振态,造成对比度劣化。此外,用于基矢测量的偏振片在H/V与D/A方向的消光比存在固有误差,这也会进一步导致D/A基偏振对比度降低。

3.2 CHSH不等式测量

为进一步衡量纠缠源品质,测量了系统的CHSH不等式[14],CHSH不等式计算公式为:

$$E(\varphi_A,\varphi_B)=\frac{N(\varphi_A,\varphi_B)+N(\varphi_A+\frac{\pi}{2},\varphi_B+\frac{\pi}{2})-N(\varphi_A,\varphi_B+\frac{\pi}{2})-N(\varphi_A+\frac{\pi}{2},\varphi_B)}{N(\varphi_A,\varphi_B)+N(\varphi_A+\frac{\pi}{2},\varphi_B+\frac{\pi}{2})+N(\varphi_A,\varphi_B+\frac{\pi}{2})+N(\varphi_A+\frac{\pi}{2},\varphi_B)} \tag{5}$$

式中,$N(\varphi_A,\varphi_B)$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。S值计算公式为:

$$S=\left|E(0,67.5^\circ)-E(0,22.5^\circ)+E(45^\circ,22.5^\circ)+E(45^\circ,67.5^\circ)\right| \tag{6}$$

通过旋转偏振片测量得到相应测量基矢下的符合计数,见表4,计算得出$S=2.68$。

表4 CHSH不等式测量数据

θ	−22.5°	67.5°	22.5°	112.5°
−45°	1 649	6 619	7 267	1 288
45°	6 330	1 188	1 532	5 910
0°	947	6 352	1 308	6 142
90°	7 044	831	6 227	1 563

3.3　纠缠并发度测量和系统稳定性测试

为评价纠缠的纯度，研究同时测量了纠缠源的纠缠度。要计算纠缠度，首先需获取制备的光子态的密度矩阵，采用量子态的Tomography分析[15]技术可根据有限测量结果来获得实际光子态密度矩阵。

本实验采用16组测量基矢的符合计数进行Tomography分析[16]，这16组测量基矢的符合计数测试数据如表5所示。根据表中数据，可计算出纠缠源的密度矩阵$\hat{\rho}$为：

表5　Tomography分析数据

测量基矢	*HH*	*HV*	*VV*	*VH*	*LH*	*LV*	*DV*	*DH*	*DL*	*DD*	*LD*	*HD*	*VD*	*VR*	*HL*	*LR*
符合计数	69	7 420	48	7 837	3 926	3 585	3 395	3 768	3 732	345	3 423	3 880	3 524	4 156	3 862	7 346

$$\hat{\rho}=\begin{pmatrix} 0.004\,5 & 0.008\,8-0.007\,6i & -0.012\,0-0.001\,8i & 0.021\,5+0.008\,1i \\ 0.008\,8+0.007\,6i & 0.482\,6 & -0.424\,1-0.033\,0i & -0.022\,1-0.009\,7i \\ -0.012\,0+0.001\,8i & -0.424\,1+0.033\,0i & 0.509\,8 & -0.027\,2-0.013\,9i \\ 0.021\,5-0.008\,1i & -0.221\,0+0.009\,7i & -0.027\,2+0.013\,9i & 0.003\,1 \end{pmatrix} \tag{7}$$

根据纠缠并发度(Concurrence)定义，通过非厄米共轭矩阵$\hat{R}=\hat{\rho}\sigma_y\otimes\sigma_y\hat{\rho}^{\mathrm{T}}\sigma_y\otimes\sigma_y$，可计算得出$C$值。其中$\sigma_y$为泡利矩阵，即$\sigma_y=\begin{pmatrix}0 & -i\\ i & 0\end{pmatrix}$，计算$\hat{R}$四个本征值$r_1,r_2,r_3,r_4$，按照递减顺序排列。定义参量$C$：$C=\mathrm{Max}\left\{0,\sqrt{r_1}-\sqrt{r_2}-\sqrt{r_3}-\sqrt{r_4}\right\}$。根据密度矩阵，可计算出$C$=0.808。

最后，为测试系统的可靠性与稳定性，对符合计数波动进行了短期检测，从而评估其在实际应用中的可靠性，符合计数在约1.5 h内的波动曲线如图8所示。根据测试结果可知，符合计数在整个测量期间保持稳定，波动幅度较小，其相对标准差(RSD)约为1.3%，低于2%。该结果表明系统具有较好的长期稳定性，能够满足如量子密钥分发、量子隐形传态等对光源稳定性要求较严格的纠缠应用实验。

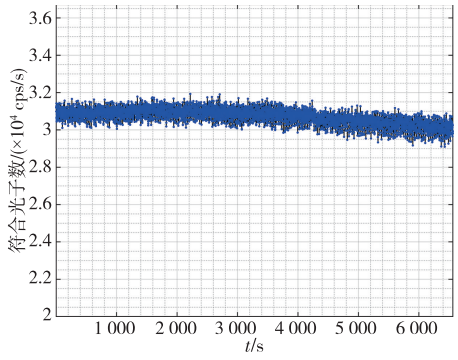


图8　纠缠源亮度随时间的变化

4　结论

本文利用BBO晶体的自发参量下转换性质制备出小型化、低成本、可移动式的纠缠光子源，并对纠缠源的亮度和品质进行测量。测量结果表明，采用单模光纤配合单光子探测器收集到的纠缠源的亮度为611 cps/mW，H/V偏振对比度可达142∶1，D/A偏振对比度可达22∶1，CHSH不等式破缺程度为2.68，纠缠并发度为0.808。该量子纠缠源可有效应用于量子纠缠、量子通信、量子测量等科研实验中。

参考文献：

[1] Einstein A, Podolsky B, Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? [J]. Physical Review, 1935, 47(10): 777-780.

[2] Bohr N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?[J]. Physical Review, 1935, 48(8): 696-702.

[3] Nielsen M A, Chuang I L. Quantum Computation and Quantum Information[M]. New York, Cambridge University Press, 2010.

[4] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y, et al. Multiphoton entanglement and interferometry[J]. Reviews of Modern Physics, 2012, 84(2): 777-838.

[5] Yin J, Cao Y, Li Y H, et al. Satellite-based entanglement distribution over 1200 kilometers[J]. Science, 356(6343): 1140-1144.

[6] Ren J G, Xu P, Yong H L, et al. Ground-to-satellite quantum teleportation[J]. Nature, 2017, 549(7670): 70-73.

[7] Yin J, Li Y H, Liao S K, et al. Entanglement-based secure quantum cryptography over 1 120 kilometres[J]. Nature, 2020, 582(7813): 501-505.

[8] Cao S, Wu B, Chen F, et al. Generation of genuine entanglement up to 51 superconducting qubits[J]. Nature, 2023, 619(7971): 738-742.

[9] Zhuang S C, Li B, Zheng M Y, et al. Ultrabright entanglement based quantum key distribution over a 404 km optical fiber [J]. Physical Review Letters, 2025, 134,

230801.

[10] Cao Y, Li Y H, Zou W J, et al. Bell test over extremely high-loss channels: towards distributing entangled photon pairs between earth and the moon [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(14): 140405.

[11] Trojek P, Schmid C, Bourennane M, et al. Compact source of polarization-entangled photon pairs [J]. Optics Express, 2004, 12(2): 276-281.

[12] 孙文博, 王合英, 陈宜保, 等. Ⅰ类量子纠缠实验教学系统 [J]. 物理实验, 2016, 36(6): 1-5.
Sun Wenbo, Wang Heying, Chen Yibao, et al. Experimental teaching system of type- Ⅰ quantum entanglement [J]. Physics Experimentation, 2016, 36(6): 1-5.

[13] Kwiat P, Mattle K, Weinfurter H, et al. New high-intensity source of polarization-entangled photon pairs [J]. Physical Review Letters, 1995, 75(24): 4337-4341.

[14] Clauser J F, Horne M A, Shimony A, et al. Proposed experiment to test local hidden-variable theories [J]. Physical Review Letters, 1969, 23(15): 880-884.

[15] Munro W J, James D F V, White A G, et al. Maximizing the entanglement of two mixed qubits [J]. Physical Review A, 2001, 64(3): 030302.

[16] Altepeter J B, James D F V, Kwiat P G. 4 Qubit Quantum state Tomography[M]. Heidelberg: Springer, 2004.

作者简介：

周 雷(1981—),男,高级工程师,主要从事量子通信方面的研究;

李东东(1989—),男,高级工程师,主要研究方向为量子通信、超导量子计算。