

纠缠比特在不同噪声环境和信道下演化规律的实验研究

曹连振 刘霞 赵加强 杨阳 李英德 王晓芹 逯怀新

Evolutions of two-qubit entangled system in different noisy environments and channels

Cao Lian-Zhen Liu Xia Zhao Jia-Qiang Yang Yang Li Ying-De Wang Xiao-Qin Lu Huai-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 030303 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.030303

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030303>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

量子 BB84 协议在联合旋转噪声信道上的安全性分析

Security analysis of bb84 protocol in the collective-rotation noise channel

物理学报.2016, 65(3): 030302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030302>

光学体系宏观-微观纠缠及其在量子密钥分配中的 $\square\tau$

Macro-micro entanglement in optical system and its application in quantum key distribution

物理学报.2015, 64(14): 140303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.140303>

杨-巴克斯特自 $\square 1/2$ 链模型的量子关联研究

Properties of quantum correlations in the Yang-Baxter spin-1/2 chain mode

物理学报.2015, 64(7): 070302 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.070302>

利用非稳定子态容错实现密集旋转操作

Fault-tolerantly implementing dense rotation operations based on non-stabilizer states

物理学报.2014, 63(22): 220304 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.220304>

超导转变边沿单光子探测器原理与研究进展

Review on superconducting transition edge sensor based single photon detector

物理学报.2014, 63(20): 200303 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.200303>

纠缠比特在不同噪声环境和信道下演化规律的实验研究*

曹连振 刘霞 赵加强 杨阳 李英德 王晓芹 逯怀新†

(潍坊学院物理与光电工程学院, 山东省多光子纠缠与操纵重点实验室, 潍坊 261061)

(2015年8月27日收到; 2015年11月12日收到修改稿)

量子信息技术主要基于量子纠缠, 量子纠缠源作为重要的相干叠加态, 其相干性很容易受到环境的影响而变得非常脆弱, 甚至导致量子信息处理的失败. 因此, 全面揭示不同噪声环境和不同噪声信道下量子纠缠源演化规律, 进而探寻抑制退相干的方法就显得至关重要. 本文以量子信息最基本的单元-两比特纠缠对作为研究对象, 实验上利用线性光学系统模拟了比特翻转和相移噪声(集体和非集体), 研究了纠缠源在不同噪声环境及单、双和混合噪声信道下保真度的变化规律. 实验结果表明: 对同一种噪声类型, 当纠缠比特经过双通道噪声环境时, 其纠缠特性破坏得快; 当纠缠比特经过非集体环境时, 其纠缠特性消失得快. 对不同噪声类型比较, 结果表明比特翻转噪声相对于相移噪声更容易破坏纠缠特性. 所得结论对纠缠退相干的理论和实验研究具有重要的借鉴意义, 同时对基于非线性光学系统的量子信息处理技术具有重要的应用价值.

关键词: 比特翻转噪声, 相移噪声, 量子通道, 量子消相干

PACS: 03.67.-a, 42.50.Dv, 42.50.Lc

DOI: 10.7498/aps.65.030303

1 引言

量子纠缠是实现量子隐形传态、量子密集编码和量子计算等许多量子信息工作的至关重要的元素^[1-5]. 量子退相干是由量子系统与其他非需要的系统等发生不希望的耦合所引起, 产生量子噪声且使量子纠缠度减小, 甚至导致量子信息处理方案的失败. 因此, 研究量子纠缠在不同退相干模式和退相干信道下的演化过程并进一步实现量子相干性的保护对实际的量子信息应用是至关重要的^[6-10].

为研究不同噪声模式对纠缠体系的影响, 物理学家们对不同噪声环境中纠缠体系的动力学演化做了很多理论研究工作^[11-14]. 如Knoll等^[11]提出用共生纠缠度、Vedral等^[12]提出用Renyi纠缠度、国内研究小组分别提出用Von Neumann熵、纠缠相对熵及密度算符之间的距离等来度量纠缠体

系量子关联演化的规律. 但是研究一个经过动力学演化以后的量子末态与其初态的差别程度时, 特别是初态为纯态的情况, 一般直接用保真度来衡量. 采用纠缠保真度随噪声强度的变化来刻画纠缠体系在不同噪声环境中的变化规律相对于其他方法是非常直观且易于处理的.

要从实验上研究不同噪声环境下纠缠体系的演化规律, 第一位的工作就是实验上能模拟各种噪声环境. 对于消相干效应中的相位阻尼模式或者相位消相干信道, 文献^[15, 16]以光子系统为研究对象, 把光子的偏振态作为信息编码态而将光子的频率作为“环境自由度”, 模拟了基于单光子纠缠对的消位相演化, 再通过对频率自由度求迹来确定消相干的影响. 2009年, Guo小组^[17]发现把光子的路径作为“环境”自由度, 利用Sagnac型干涉装置, 同样可模拟单纠缠光子对消位相信道. 对于振幅消相

* 国家自然科学基金(批准号: 11174224, 11404246, 11447225)、山东省自然科学基金(批准号: BS2015DX015)、山东省科技发展计划(批准号: 2011YD01049, 2013YD01016)和山东省高等学校科技计划(批准号: J13LJ54, J15LJ54)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: luhuaixin@wfu.edu.cn

干信道, Almeida等^[18]研究发现利用 Sagnac 型干涉装置同样也可以进行模拟, 此外, 利用偏转在布鲁斯特角的石英玻璃片也可以模拟消振幅信道^[19]. 但是在实验上用纯线性光学系统来模拟噪声环境特别是对每一个比特的影响都完全相同的白噪声环境等是很难实现的.

本文以高保真度的纠缠比特作为研究对象, 实验上采用线性光学器件模拟了比特翻转和相移(集体和非集体)噪声, 并研究了纠缠源在不同噪声环境下和经过不同的噪声信道时的演化规律. 实验结果表明, 对于同一种噪声类型, 当纠缠比特经过双通道噪声环境时, 其纠缠特性破坏得快; 当纠缠比特经过非集体环境时, 其纠缠特性消失得快; 对不同噪声类型, 比特翻转噪声相对于相移噪声更容易破坏纠缠特性.

2 不同噪声模式及实验实现

2.1 理论模型

实验上制备的两比特纠缠态为 $\frac{1}{\sqrt{2}}(|H_1H_2\rangle + |V_1V_2\rangle)$, 当此纠缠源通过量子信道传输到使用者时, 定义两比特分别为比特1和比特2. 当某一个比特经过退化信道时, 将会使其以一定的概率 p 变成混态, 同时以 $1-p$ 的概率保持不变. 对于一个比特来说, 其操作算符可以通过下式给出^[7]:

$$\begin{aligned} O_1^{(j)} &= \sqrt{1-p}I^{(j)}, & O_2^{(j)} &= \sqrt{p/3}\sigma_x^{(j)}, \\ O_3^{(j)} &= \sqrt{p/3}\sigma_y^{(j)}, & O_4^{(j)} &= \sqrt{p/3}\sigma_z^{(j)}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $I^{(j)}\sigma_i^{(j)}$, $i = x, y, z$, $j = 1, 2$ 为单位和泡利算符. 作为计算基矢时, 上述算符可以表述为

$$\begin{aligned} I^{(j)} &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|, \\ \sigma_x^{(j)} &= |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|, \\ \sigma_y^{(j)} &= -i|0\rangle\langle 1| + i|1\rangle\langle 0|, \\ \sigma_z^{(j)} &= |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|. \end{aligned} \quad (2)$$

本文中, 首先研究了集体旋转噪声, 也就是说把所有的比特沿 y 轴旋转任意角度. 比如说, 可以选择旋转角度为 $\pm\theta$ 且等概率旋转, 这时纠缠态的密度矩阵在噪声环境下的演化可以表示为: $\rho \rightarrow 1/2(U_\theta^{\dagger\otimes 2}\rho U_\theta^{\otimes 2} + U_{-\theta}^{\dagger\otimes 2}\rho U_{-\theta}^{\otimes 2})$, 其中 $U_\theta = e^{i\theta\sigma_y}$, 对于单一比特来说, 这正好是比特翻转噪声 (bit-flip noise), 且使比特发生翻转的概

率为 $p = \sin^2 2\theta$, 对整个系统来说为集体翻转噪声 (collective bit-flip noise). 相对于集体翻转噪声, 非集体翻转噪声 (non-collective bit-flip noise) 模拟要求对每一个比特的旋转角度为独立非相干的. 同时, 我们研究了相移噪声 (phase-shift noise) 环境下纠缠特性的变化规律^[19].

2.2 实验

纠缠态制备及噪声模拟实验装置如图1所示^[20]. Tsunami 飞秒激光器出射 780 nm 的红外光, 此脉冲光经过硼酸锂晶体 (LiB_3O_5 , LBO) 发生参量上转换变为 390 nm 的紫光. 让此紫光经过四个双色镜 (dichroic mirror, DM, 未全部给出), DM 的作用是反射 390 nm、透射 780 nm 的光, 可以保证未发生参量上转换的红外光被过滤掉. 然后让抽运光经过 2 mm 硼酸钡晶体 (barium borate crystal, BBO), 将会发生参量下转换, 产生极化方向相互垂直的光子对. 为了补偿产生的水平和垂直光的空间和时间偏移, 让它们各自首先经过 1/2 波片 (half-wave plate, HWP) 和 1 mm 补偿 BBO 晶体组合.

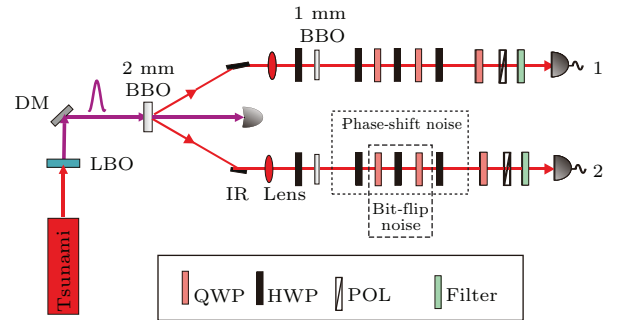


图1 (网刊彩色) 纠缠态及噪声模拟实验装置简图

Fig. 1. (color online) Schematic drawing of the experimental setup for the generation and detection of two qubit entangled state, and for engineering collective and non-collective noises.

实验上比特翻转和相移噪声全部都是纯光学器件实现. 对于比特翻转噪声, 是采用两块 1/4 波片 (quarter wave plate, QWP) 夹 HWP 的三明治结构, 其中两块 QWP 位于 0° , HWP 旋转不同的角度代表不同的噪声强度: $I = \sin^2(2\theta)$. 要想实现相移噪声, 只需在比特翻转噪声组合基础上在最前面和最后面分别加上处于 45° 的 HWP. 实验测量系统为 QWP+极化片 (polarizer, POL)+滤光片的组合.

3 实验结果与分析

本实验研究纯态在不同噪声环境和噪声信道下的变化规律, 因此能否制备高保真度的纠缠态是实验成功与否的前提^[21-24]. 为了提高制备纠缠态的保真度, 我们采取了多种措施: 首先, 采用多种措施减小脉冲激光输出功率的波动, 飞秒激光器非常容易受到周围温度、湿度和振动等的影响, 因此采用恒温、恒湿和减小机械振动等多种措施减小上述因素的影响; 其次, 通过多次实验验证得到了最佳激光功率为 30 mW, 此功率既可以保证有足够的符合计数, 同时对比度又足够高; 然后在光路中加入 QWP+HWP+QWP 组合(示意图中未画出)通过微调的方式提高纠缠态的保真度; 最后去除测量暗计数对测量数据的影响. 实验测得在 H/V 基矢下, 信噪比可以达到 299.

我们制备的为贝尔态之一: $\frac{1}{\sqrt{2}}(|H_1H_2\rangle + |V_1V_2\rangle)$. 为了全面刻画制备的双光子纠缠态, 我们对其使用标准的量子态层析术进行重现. 在 16 组不同极化偏振设置下, 测量双光子符合计数, 并利用数据构建出纠缠态的密度矩阵, 实验测量结果如图 2 所示. 图 2 给出了密度矩阵的实部和虚部三维柱状图, 从数据可以得到该纠缠态的保真度可达 $\rho = 0.993 \pm 0.004$, 为非常高品质的两比特纠缠纯态.

纠缠比特在不同噪声模型和信道下变化规律的实验结果如图 3 所示. 首先研究了高保真度的纠缠态在经过比特-翻转噪声信道时的变化情况, 结果如图 3(a) 所示. 保真度 $F = \langle \psi_{in} | \rho_f | \psi_{in} \rangle$, 其中 $|\psi_{in}\rangle$ 和 ρ_f 分别代表初态和末态, 根据理论计算多比特纠缠态的纠缠特性被破坏的极限为保真度 $F = 0.5$ ^[25]. 实验结果表明, 当经过集体噪声和非集体比特-翻转噪声环境时, 保真度在非集体噪声环境时纠缠特性下降得比较快, 达到 $F = 0.5$ 极限的噪声强度分别为 0.14 ± 0.01 和 0.08 ± 0.02 ; 当经过单通道相移噪声环境时, 保真度相对于经过两通道集体噪声环境时纠缠特性下降得较慢, 达到 $F = 0.5$ 极限的噪声强度分别为 0.25 ± 0.01 .

图 3(b) 给出了纠缠比特在经过相移噪声环境时其保真度随噪声强度的变化关系. 实验研究了纠缠比特经过集体相移噪声环境、非集体相移噪声环境和只有一个比特经过相移噪声环境时的变化关

系. 可以容易看出, 当经过集体和非集体相移噪声环境时, 纠缠保真度也是在经过后者时纠缠特性下降得比较快, 达到 $F = 0.5$ 极限的噪声强度分别为 0.23 ± 0.2 和 0.14 ± 0.01 ; 当经过单通道相移噪声环境时, 保真度相对于经过两通道集体噪声环境时纠缠特性下降得较慢, 达到 $F = 0.5$ 极限的噪声强度分别为 0.26 ± 0.01 .

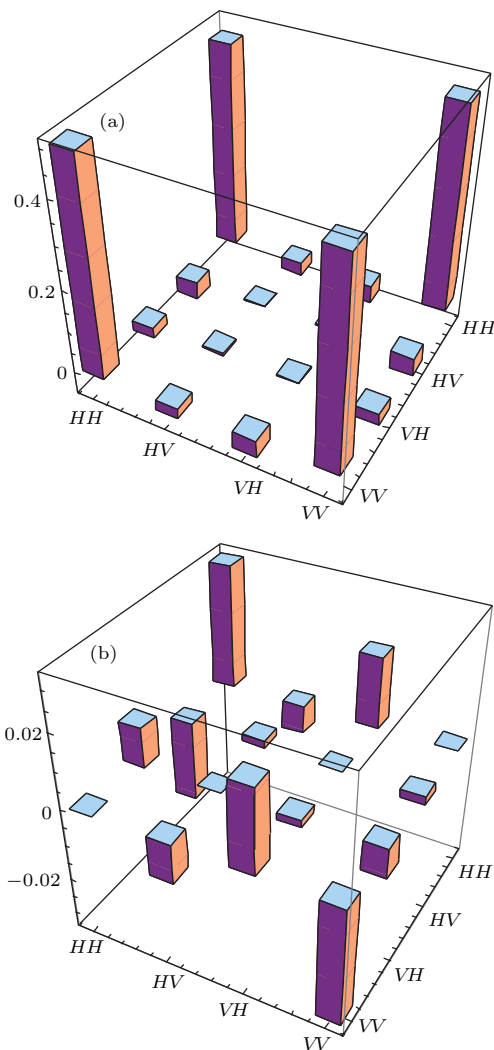


图 2 (网刊彩色) 实验重建密度矩阵 (a) 实数部分; (b) 虚数部分

Fig. 2. (color online) The density matrix of two qubit state: (a) Real part; (b) imaginary part.

实验上同时研究了混合噪声信道, 也就是一个信道为比特-翻转噪声, 另一个信道为相移噪声时保真度的变化规律, 可以看到当噪声强度为 0.14 ± 0.01 时, 其纠缠特性遭到破坏. 纵向比较, 对于两种不同的噪声, 当都为集体噪声时, 比特翻转噪声使纠缠破坏得快, 同样当都为非集体噪声和通过单通道时, 都是比特翻转噪声破坏力较大.

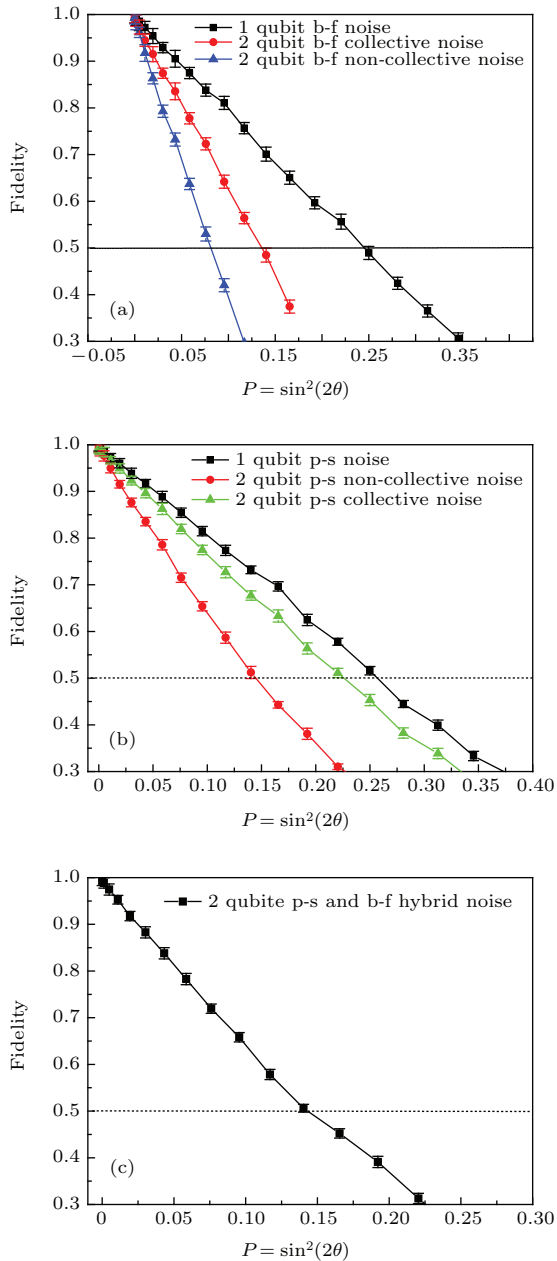


图3 (网刊彩色) 纠缠比特在不同噪声环境下的演化规律 (a) 比特翻转 (b-f) 噪声; (b) 相移 (p-s) 噪声; (c) 混合噪声
Fig. 3. (color online) The evolution of entangled qubit under different noisy quantum channels: (a) Bit-flip noise; (b) phase-shift noise; (c) mixed noise.

研究量子退相干主要是为了理解量子相干性在量子信息处理过程中受到的影响, 进而提出克服量子退相干的方案以保证量子计算和量子信息处理的成功实现, 如已提出的量子纠错^[26]、无消相干子空间^[27]和纠缠纯化^[28]等方法. 最近的研究表明^[29,30], 采用量子弱测量 (quantum weak measurement) 和反弱测量 (quantum measurement reversal) 技术可以有效地在振幅耗散退相干环境下, 保护纠缠比特或 Qutrit 的纠缠特性, 特别是

可以避免纠缠猝死 (entanglement sudden death, ESD) 现象的发生. 因此, 我们正在开展基于弱测量和反弱测量技术的多比特纠缠体系相干性保护与恢复的实验研究.

4 结 论

本文以高保真度量量子纠缠比特为研究对象, 研究了其在不同噪声环境和噪声信道下的演化规律. 得到的主要结论为:

1) 对于同一种噪声模式, 非集体噪声破坏纠缠特性的能力大; 使纠缠特性破坏的非集体比特翻转和相移噪声强度 I 分别为 0.08 和 0.14, 而使纠缠特性破坏的集体比特翻转和相移噪声强度 I 可分别达到 0.14 和 0.23;

2) 对于同一种噪声模式, 光子对经过两路噪声信道时纠缠特性下降得快; 如使纠缠特性破坏的单通道比特翻转和相移噪声强度分别为 0.25 和 0.26, 都比光子对经过两路噪声信道时明显提高;

3) 纵向对比, 比特翻转噪声相对于相移噪声更易破坏纠缠相干性.

本文得到的结论对纠缠退相干的理论和实验研究具有重要的借鉴意义, 同时对基于线性光学系统的量子信息处理技术具有重要的应用价值.

参考文献

- [1] Pan J W, Chen Z B, Lu C Y, Weinfurter H, Zeilinger A, Zukowski M 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 777
- [2] Giovannetti V, Lloyd S, Maccone L 2004 *Science* **306** 1330
- [3] Varnava M, Browne D E, Rudolph T 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 060502
- [4] Chen L X, Zhang Y Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164210 (in Chinese) [陈理想, 张远颖 2015 物理学报 **64** 164210]
- [5] Ma H Y, Qin G Q, Fan X K, Chu P C 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160306 (in Chinese) [马鸿洋, 秦国卿, 范兴奎, 初鹏程 2015 物理学报 **64** 160306]
- [6] Pakshian E, Pouria P 2014 *Quantum Inf. Process.* **13** 1789
- [7] Dür W, Briegel H J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 180403
- [8] Aolita L, Chaves R, Cavalcanti D, Acín A, Davidovich L 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 080501
- [9] Zhang Y C, Bao W S, Wang X, Fu X Q 2015 *Chin. Rhys. B* **24** 080307
- [10] Yang G H, Zhang B B, Li L 2015 *Chin. Rhys. B* **24** 060302
- [11] Knoll L, Orłowski A 1995 *Phys. Rev. A* **51** 1622

- [12] Vedral V, Plenin M B, Rippin M A, Knight P L 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 2275
- [13] Zheng S B, Guo G C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 2392
- [14] Zheng S B 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 230404
- [15] Kwiat R G, Berglund A J, Altepeter J B, White A G 2000 *Science* **290** 498
- [16] Lo F R, Bellomo B, Maniscalco S, Compagno G 2013 *Int. J. Mod. Phys. B* **27** 1345053
- [17] Xu J S, Li C F, Gong M, Zou X B, Chen L, Chen G, Tang J S, Guo G C 2009 *New J. Phys.* **11** 043010
- [18] Almeida M P, deMelo F, Meyll M H, Salles A, Walborn S P, Ribeiro P H S, Davidovich L 2007 *Science* **316** 579
- [19] Lu H, Chen L K, Liu C, Xu P, Yao X C, Li L, Liu N L, Zhao B, Chen Y A, Pan J W 2014 *Nat. Photon.* **8** 364
- [20] Lu H X, Cao L Z, Zhao J Q, Li Y D, Wang X Q 2014 *Sci. Rep.* **4** 4476
- [21] Cao L Z, Zhao J Q, Wang X Q, Lu H X 2013 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **43** 1079 (in Chinese) [曹连振, 赵加强, 王晓芹, 逯怀新 2013 中国科学: 物理学 力学 天文学 **43** 1079]
- [22] Zhao J Q, Cao L Z, Wang X Q, Lu H X 2012 *Phys. Lett. A* **376** 2377
- [23] Zhao J Q, Cao L Z, Lu H X, Wang X Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 120301 (in Chinese) [赵加强, 曹连振, 逯怀新, 王晓芹 2013 物理学报 **62** 120301]
- [24] Lu H X, Zhao J Q, Cao L Z, Wang X Q 2011 *Phys. Rev. A* **84** 44101
- [25] Wang X L, Cai X D, Su Z E, Chen M C, Wu D, Li L, Liu N L, Lu C Y, Pan J W 2015 *Nature* **518** 516
- [26] Chiaverini J 2004 *Nature* **432** 602
- [27] Prevedel R, Tame M, Stefanov A, Paternostro M, Kim M, Zeilinger A 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 250503
- [28] Reichle R 2006 *Nature* **443** 838
- [29] Pramanik T, Majumdar A S 2013 *Phys. Lett. A* **377** 3209
- [30] Xiao X, Li Y L 2013 *Eur. Phys. J. D* **67** 204

Evolutions of two-qubit entangled system in different noisy environments and channels*

Cao Lian-Zhen Liu Xia Zhao Jia-Qiang Yang Yang Li Ying-De
Wang Xiao-Qin Lu Huai-Xin[†]

(Shandong Provincial Key Laboratory of Multi-Photon Entanglement and Manipulation, Department of Physics and Optoelectronic Engineering, Weifang University, Weifang 261061, China)

(Received 27 August 2015; revised manuscript received 12 November 2015)

Abstract

Quantum information technology is mainly based on quantum entanglement. As an important coherent superposition state, the coherence of quantum entanglement source is easily affected by environment and becomes fragile, which will lead to the failure of the quantum information processing. Thus, it is critical to reveal the evolutions of quantum entanglement source under different noisy environments and different noisy channels. Firstly, we experimentally prepare a high-fidelity two-bit entangled state by several technical methods. The fidelity observed for the state prepared in our experiment is 0.993 and the signal-to-noise ratio can reach up to 299. Then, we simulate the bit-flip noise and phase-shift noise (collective and non-collective) using the all-optical experimental setup. Finally, based on the entanglement qubit state, we experimentally study the evolutions of entanglement characteristic under different noisy environments and the single, double and mixed noisy channels. The experimental results show that for the same type of noise, the entanglement properties disappear fast when entangled qubit passes through dual channel noisy environment. The upper bounds of noise intensity to destroy the entanglement property are 0.25 and 0.26 for the single bit-flip noise and phase-shift noisy channels, respectively. The comparison between the two different kinds of noisy environments shows that the entanglement properties disappear fast when entangled bit passes through non-collective environment. The upper bounds of noise intensity are 0.08 and 0.14 for non-collective bit-flip and phase-shift noise to destroy the entanglement property, while the noise intensities are 0.14 and 0.23 for collective bit-flip and phase-shift noise, respectively. For different kinds of noises, the results show that bit-flip noise is more likely to destroy the entanglement properties than the phase-shift. Our results have great significance for the theoretical and experimental studies of entanglement decoherence and have important application value for quantum information processing technology based on the nonlinear optical system.

Keywords: bit-flip noise, phase-shift noise, quantum channel, decoherence

PACS: 03.67.-a, 42.50.Dv, 42.50.Lc

DOI: 10.7498/aps.65.030303

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11174224, 11404246, 11447225), the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. BS2015DX015), the Science and Technology Development Program of Shandong Province, China (Grant Nos. 2011YD01049, 2013YD01016), and the Higher School Science and Technology Program of Shandong Province, China (Grant Nos. J13LJ54, J15LJ54).

[†] Corresponding author. E-mail: luhuaixin@wfu.edu.cn