

# 利用双光子过程耦合腔系统实现量子信息转移

卢道明

(武夷学院电子工程系, 福建 武夷山 354300)

**摘要** 给出了利用两个二能级原子和耦合腔双光子过程相互作用系统实现量子信息转移的方案。该方案中二能级原子通过双光子跃迁与单模腔场发生共振相互作用。通过控制原子与光场的相互作用时间,实现量子信息从一个原子转移到另一个原子。

**关键词** 量子光学;双光子过程;耦合腔;二能级原子;量子信息转移

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0627001

## Transfer of Quantum Information with the System of Atoms Interacting with Coupled Cavities Via Two-Photon Hopping Interaction

Lu Daoming

(Department of Electronic Engineering, Wuyi University, Wuyishan, Fujian 354300, China)

**Abstract** A scheme is proposed for transferring quantum information with the system of atoms interacting with coupled cavities. The scheme is based on the resonant interaction of two-level atom with cavity field via a two-photon hopping. Through controlling the time of atom interacting with the cavity field, the quantum information can be transferred from an atom to another atom or from a cavity to another cavity.

**Key words** quantum optics; two-photon process; coupling cavities; two-level atom; quantum information transfer

**OCIS codes** 270.5585; 020.5580

### 1 引 言

在量子通信领域,量子信息转移是一个必不可少的环节。而实现量子信息转移的方法通常有两种:量子隐形传态和量子态转移。至今,人们在利用离子阱<sup>[1]</sup>、腔量子电动力学(QED)<sup>[2]</sup>、核磁共振<sup>[3]</sup>和超导系统<sup>[4]</sup>等进行量子信息处理方面开展了广泛的研究。其中腔 QED 技术被认为是实现多比特纠缠态、量子信息处理和量子计算等最有前途的技术之一。近年来,人们已提出了许多利用腔 QED 技术进行量子态制备和转移的方案<sup>[5~7]</sup>。例如,Cirac 等<sup>[5]</sup>提出了基于两个耦合二能级原子与单模腔场发生大失谐相互作用实现量子态转移。向少华等<sup>[7]</sup>提出利用腔 QED 技术实现量子信息转移。近年来,耦合腔系统由于它在量子信息处理中具有潜在的应用价值,使其成为量子信息处理的物理实现的热门

研究之一<sup>[8~19]</sup>。例如,Zheng 等<sup>[10]</sup>提出一种利用耦合腔系统实现纠缠转移的方案。Yin 等<sup>[20]</sup>提出一种利用原子与耦合腔相互作用系统实现量子态转换和逻辑门的方案。Serafini 等<sup>[21]</sup>研究了利用光纤与腔 QED 系统的共振耦合实现量子门。Li 等<sup>[22]</sup>提出了利用三个原子与耦合腔相互作用系统产生  $W_n$  态的方案。但在以往对耦合腔系统的研究中主要集中在研究原子与腔场通过单光子过程耦合的情况。另一方面,由于双光子微波激射器的成功运转和双光子过程中原子具有周期性量子力学通道的特性,使双光子 Jaynes-Cummings 模型成为量子光学的重要模型和量子通信中正确传递量子信息的重要工具。因此,双光子过程成为人们深入研究的热点<sup>[23~25]</sup>。例如,刘小娟等<sup>[24]</sup>研究了双光子过程中任意初态原子的信息熵压缩。最近 Alexanian<sup>[26]</sup>提

收稿日期: 2011-11-08; 收到修改稿日期: 2012-01-19

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J01018)资助课题。

作者简介: 卢道明(1963—),男,教授,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: daominglu79@hotmail.com

出了利用双光子过程耦合腔系统实现双光子转换的方案,但总的来说对双光子过程耦合腔系统的研究少见报道。本文在单光子过程的基础上进行推广,研究两个二能级原子和耦合腔构成的系统,考虑原子与腔场通过双光子过程耦合的情况。提出了利用该系统,通过控制原子与腔场的相互作用时间,实现量子态转移的方案。

## 2 系统态矢的演化

两个二能级原子与两个直接耦合的单模腔相互作用系统如图 1 所示。在耦合腔 A 和 B 中各注入一个二能级原子。原子 1 和原子 2 通过双光子跃迁分别与腔场 A 和腔场 B 发生共振相互作用。在旋波近似下,在相互作用绘景中系统的哈密顿为

$$H_I = f_1(a_A^2 s_1^+ + a_A^{+2} s_1^-) + f_2(a_B^2 s_2^+ + a_B^{+2} s_2^-) + J(a_A a_B^+ + a_A^+ a_B), \quad (1)$$

式中  $f_1, f_2$  分别表示两个腔中原子与腔场的耦合系数,  $J$  为两个腔之间的耦合系数。 $a_A^+, a_A$  ( $a_B^+, a_B$ ) 分别为腔场的产生和湮没算符,  $s_i^+$  和  $s_i^-$  ( $i = 1, 2$ ) 为第  $i$  个原子的赝自旋算符。定义激发数算符  $\hat{N} = |e\rangle_1 \langle e| - |g\rangle_1 \langle g| + |e\rangle_2 \langle e| - |g\rangle_2 \langle g| + a_A^+ a_A + a_B^+ a_B$ , 因  $[\hat{N}, H_I] = 0$ , 所以在系统演化过程中激发数守恒。 $|e\rangle_i$  和  $|g\rangle_i$  ( $i = 1, 2$ ) 分别表示二能级原子的激发态和基态。

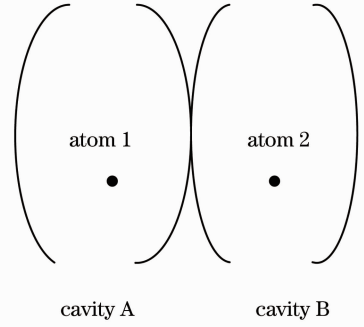


图 1 系统的示意图

Fig. 1 Sketch of the set-up

当系统总激发数等于 2 时,在演化过程中,系统将保留在以  $|\varphi_1\rangle = |g\rangle_1 |g\rangle_2 |2\rangle_A |0\rangle_B$ ,  $|\varphi_2\rangle = |g\rangle_1 |g\rangle_2 |0\rangle_A |2\rangle_B$ ,  $|\varphi_3\rangle = |e\rangle_1 |g\rangle_2 |0\rangle_A |0\rangle_B$ ,  $|\varphi_4\rangle = |g\rangle_1 |e\rangle_2 |0\rangle_A |0\rangle_B$  和  $|\varphi_5\rangle = |g\rangle_1 |g\rangle_2 |1\rangle_A |1\rangle_B$  为基矢构成的子空间中。在  $|g\rangle_1 |g\rangle_2 |2\rangle_A |0\rangle_B$  表示的态中下标分别表示原子 1, 原子 2, 腔 A 和腔 B 的状态。在这子空间中,系统的哈密顿的矩阵表示为

$$\mathbf{H}_I = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \sqrt{2}f_1 & 0 & \sqrt{2}J \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{2}f_2 & \sqrt{2}J \\ \sqrt{2}f_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{2}f_2 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{2}J & \sqrt{2}J & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

为简单起见,设  $f_1 = f_2 = f$ 。这时  $\mathbf{H}_I$  的本征值为:  $E_1 = 0, E_{2,3} = \pm \alpha, E_{4,5} = \pm \beta, \alpha = (2f^2 + 4J^2)^{1/2}, \beta = (2f^2)^{1/2}$ 。相应的本征态为

$$\begin{aligned} |\psi_1\rangle &= \frac{\sqrt{2}J}{\alpha} (|\varphi_3\rangle + |\varphi_4\rangle - \frac{f}{J} |\varphi_5\rangle), \\ |\psi_2\rangle &= \frac{1}{2} (|\varphi_1\rangle + |\varphi_2\rangle + \frac{\sqrt{2}f}{\alpha} |\varphi_3\rangle + \frac{\sqrt{2}f}{\alpha} |\varphi_4\rangle + \frac{2\sqrt{2}J}{\alpha} |\varphi_5\rangle), \\ |\psi_3\rangle &= \frac{1}{2} (|\varphi_1\rangle + |\varphi_2\rangle - \frac{\sqrt{2}f}{\alpha} |\varphi_3\rangle - \frac{\sqrt{2}f}{\alpha} |\varphi_4\rangle - \frac{2\sqrt{2}J}{\alpha} |\varphi_5\rangle), \\ |\psi_4\rangle &= \frac{1}{2} (|\varphi_1\rangle - |\varphi_2\rangle + |\varphi_3\rangle - |\varphi_4\rangle), \\ |\psi_5\rangle &= \frac{1}{2} (|\varphi_1\rangle - |\varphi_2\rangle - |\varphi_3\rangle + |\varphi_4\rangle). \end{aligned} \quad (3)$$

在相互作用绘景中,态矢演化满足薛定谔方程:

$$i\hbar \frac{\partial |\varphi(t)\rangle}{\partial t} = \mathbf{H}_I |\varphi(t)\rangle, \quad (4)$$

取  $\hbar = 1$ , 解(4)式可得出初态分别为  $|\varphi_1\rangle$ 、 $|\varphi_2\rangle$ 、 $|\varphi_3\rangle$ 、 $|\varphi_4\rangle$  和  $|\varphi_5\rangle$  时,  $t$  时刻其相应的态矢演化为

$$\begin{aligned}
 |\varphi_1(t)\rangle &= \frac{1}{2}(\cos at + \cos \beta t)|\varphi_1\rangle + \frac{1}{2}(\cos at - \cos \beta t)|\varphi_2\rangle + \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at + \sin \beta t\right)|\varphi_3\rangle + \\
 &\quad \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at - \sin \beta t\right)|\varphi_4\rangle + i\frac{\sqrt{2}J}{\alpha}\sin at|\varphi_5\rangle, \\
 |\varphi_2(t)\rangle &= \frac{1}{2}(\cos at - \cos \beta t)|\varphi_1\rangle + \frac{1}{2}(\cos at + \cos \beta t)|\varphi_2\rangle + \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at - \sin \beta t\right)|\varphi_3\rangle + \\
 &\quad \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at + \sin \beta t\right)|\varphi_4\rangle + i\frac{\sqrt{2}J}{\alpha}\sin at|\varphi_5\rangle, \\
 |\varphi_3(t)\rangle &= i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at + \frac{1}{2}\sin \beta t\right)|\varphi_1\rangle + i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at - \frac{1}{2}\sin \beta t\right)|\varphi_2\rangle + \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at + \frac{\cos \beta t}{2}\right)|\varphi_3\rangle + \\
 &\quad \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at - \frac{\cos \beta t}{2}\right)|\varphi_4\rangle + \frac{2fJ}{\alpha^2}(\cos at - 1)|\varphi_5\rangle, \\
 |\varphi_4(t)\rangle &= i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at - \frac{1}{2}\sin \beta t\right)|\varphi_1\rangle + i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at + \frac{1}{2}\sin \beta t\right)|\varphi_2\rangle + \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at - \frac{\cos \beta t}{2}\right)|\varphi_3\rangle + \\
 &\quad \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at + \frac{\cos \beta t}{2}\right)|\varphi_4\rangle + \frac{2fJ}{\alpha^2}(\cos at - 1)|\varphi_5\rangle, \\
 |\varphi_5(t)\rangle &= i\frac{\sqrt{2}J}{\alpha}\sin at(|\varphi_1\rangle + |\varphi_2\rangle) + \frac{2fJ}{\alpha^2}(\cos at - 1)(|\varphi_3\rangle + |\varphi_4\rangle) + \left(\frac{4J^2}{\alpha^2}\cos at - \frac{2f^2}{\alpha^2}\right)|\varphi_5\rangle. \quad (5)
 \end{aligned}$$

### 3 量子信息在原子与原子间的转移

利用上述系统将量子信息从一个原子转移到另一个原子。假设原子 1 携带欲转移的未知量子信息, 原子 2 为信息的接收者。腔场 A 和 B 初始时刻处于真空态。将原子 1 和原子 2 初始时刻制备于如下的状态

$$|\psi\rangle_{12} = (c|e\rangle_1 + d|g\rangle_1)|g\rangle_2, \quad (6)$$

式中  $c, d$  为未知系数, 表示要转移的一个未知态的信息, 满足  $|c|^2 + |d|^2 = 1$ 。即系统的初态为

$$|\psi\rangle = (c|e\rangle_1 + d|g\rangle_1)|g\rangle_2|0\rangle_A|0\rangle_B. \quad (7)$$

在(1)式表示的哈密顿量作用下, 经过一段相互作用时间  $t$  后, 系统的态矢演化为

$$\begin{aligned}
 |\psi(t)\rangle &= c(C|\varphi_1\rangle + D|\varphi_2\rangle + F|\varphi_3\rangle + G|\varphi_4\rangle + \\
 &\quad K|\varphi_5\rangle) + d|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_A|0\rangle_B. \quad (8)
 \end{aligned}$$

式中

$$\begin{aligned}
 C &= i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at + \frac{1}{2}\sin \beta t\right), \\
 D &= i\left(\frac{f}{\sqrt{2}\alpha}\sin at - \frac{1}{2}\sin \beta t\right), \\
 F &= \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at + \frac{\cos \beta t}{2}\right), \\
 G &= \left(\frac{2J^2}{\alpha^2} + \frac{f^2}{\alpha^2}\cos at - \frac{\cos \beta t}{2}\right), \\
 K &= \frac{2fJ}{\alpha^2}(\cos at - 1). \quad (9)
 \end{aligned}$$

通过控制双原子的速度来调节原子与腔场的相互作用时间  $t$ , 使其满足  $at = 2k\pi, \beta t = 2l\pi - \pi$  时 ( $k$  和  $l$  为正整数), 整个系统的态矢演化为

$$|\psi(t)\rangle = |g\rangle_1(c|e\rangle_2 + d|g\rangle_2)|0\rangle_A|0\rangle_B. \quad (10)$$

至此, 实现了量子信息从原子 1 到原子 2 的转移。

现在将以上方案与文献[22]报道的利用单光子过程耦合腔系统实现原子态转移方案进行比较。在本方案中最快实现量子态转移的时间为  $\beta t = \pi$ , 即  $\sqrt{2}ft = \pi$ , 而在单光子过程中最快实现量子态转移的时间为  $ft' = \pi$ , 在相同参数条件下有  $t < t'$ 。这一结果表明利用双光子过程耦合腔系统实现量子信息在原子间的转移比单光子过程耦合腔快。

### 4 量子信息在腔场与腔场间的转移

假设要转移的腔 A 的未知量子信息为  $|\psi\rangle_A = (c|2\rangle_A + d|0\rangle_A)$ , 腔 B 为信息的接收者。同样  $c, d$  为未知系数, 表示要转移的一个未知态的信息, 满足  $|c|^2 + |d|^2 = 1$ 。腔场 B 初始时刻处于真空态, 原子 1 和原子 2 初始时刻被制备于基态。那么, 系统的初态为

$$|\psi\rangle = (c|2\rangle_A + d|0\rangle_A)|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_B. \quad (11)$$

在(1)式表示的哈密顿量作用下, 经过一段相互作用

时间  $t$  后,系统的态矢演化为

$$|\psi(t)\rangle = c(C'|\varphi_1\rangle + D'|\varphi_2\rangle + F'|\varphi_3\rangle + G'|\varphi_4\rangle + K'|\varphi_5\rangle) + d|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_A|0\rangle_B. \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} C' &= \frac{1}{2}(\cos at + \cos \beta t), \\ D' &= \frac{1}{2}(\cos at - \cos \beta t), \\ F' &= \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at + \sin \beta t\right), \\ G' &= \frac{i}{2}\left(\frac{\sqrt{2}f}{\alpha}\sin at - \sin \beta t\right), \\ K' &= i\frac{\sqrt{2}J}{\alpha}\sin at. \end{aligned} \quad (13)$$

通过控制双原子的速度来调节原子与腔场的相互作用时间  $t$ , 同样使其满足  $at = 2k\pi, \beta t = 2l\pi - \pi$  时( $k$  和  $l$  为正整数), 整个系统的态矢演化为

$$|\psi(t)\rangle = |g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_A(c|2\rangle_B + d|0\rangle_B), \quad (14)$$

实现了量子信息从腔 A 到腔 B 的转移。

现在给出其实验可行性的简要讨论。若选择使用 Rydberg 原子<sup>[27]</sup>, 其寿命为  $T_r = 3.0 \times 10^{-2}$  s, 腔场衰减时间  $T_c = 1.0 \times 10^{-3}$  s, 原子与腔场的耦合系数为  $f = 2\pi \times 25$  kHz<sup>[26]</sup>。选择  $J = \sqrt{3/2}f$ , 使得  $\alpha = 2\beta$ , 原子与腔场相互作用时间  $t = \pi/(\sqrt{2}f) = 1.414 \times 10^{-5}$  s, 远小于  $T_c$  和  $T_r$ 。因此, 用现在的腔 QED 技术, 该方案的实验实现是可能的。

## 5 结 论

提出了一种利用耦合腔与二能级原子双光子过程共振相互作用系统实现量子信息转移的方案。该方案只要通过控制原子的速度来调节原子与腔场的相互作用时间, 就能实现量子信息从一个原子转移到另一个原子, 或从一个腔转移到另一个腔。其优点是不需要对原子进行态选择性测量和腔场探测。另一方面, 通过对双光子过程与单光子过程耦合腔系统实现原子态转移的比较, 我们得出利用双光子过程耦合腔系统实现量子信息在原子间的转移比利用单光子过程耦合腔系统快的有意义的结果。

## 参 考 文 献

- 1 X. J. Zheng, M. F. Fang, J. W. Cai *et al.*. Quantum teleportation by entanglement swapping with trapped ions [J]. *Chin. Phys.*, 2006, **15**(3): 492~495
- 2 Song Kehui. Scheme for quantum information processing via  $\Lambda$ -type atoms interacting with bimodal cavity field [J]. *Acta Physics*

*Sinica*, 2005, **54**(10): 4730~4735

- 3 宋克慧. 利用  $\Lambda$  型原子与双模腔场的相互作用进行量子信息处理 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(10): 4730~4735
- 3 N. A. Gershenfed, I. L. Chuang. Bulk spin-resonance quantum computation [J]. *Science*, 1997, **275**(5298): 350~356
- 4 Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, J. S. Tsai. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-Cooper-pair box [J]. *Nature*, 1999, **398**(6730): 786~788
- 5 J. I. Cirac, P. Zoller, H. J. Kimble *et al.*. Quantum state transfer and entanglement distribution among distant nodes in a quantum network [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **78**(16): 3221
- 6 A. Biswas, G. S. Agarwal. Transfer of an unknown quantum state, quantum networks, and memory [J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **70**(2): 022323
- 7 Xiang Shaohua, Song Kehui. Transfer of quantum information via cavity QED technique [J]. *Acta Physics Sinica*, 2005, **54**(3): 1190~1193
- 向少华, 宋克慧. 用腔 QED 技术实现量子信息转移 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(3): 1190~1193
- 8 C. D. Ogden, E. K. Irish, M. S. Kim. Dynamics in a coupled-cavity array [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **78**(6): 063805
- 9 M. J. Hartmann, F. G. S. L. Brandao, M. B. Plenio. Effective spin systems in coupled microcavities [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(16): 160501
- 10 S. B. Zheng, C. P. Yang, F. Nori. Arbitrary control of coherent dynamics for distant qubits in a quantum network [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **82**(4): 042327
- 11 Y. Q. Zhang, Z. D. Hu, J. B. Xu. Entanglement transfer through arrays of cavities coupled by optical fibers [J]. *Int. J. Theor. Phys.*, 2011, **50**(8): 2438~2445
- 12 Pellizzari. Quantum networking with optical fibres [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(26): 5242~5245
- 13 S. Y. Ye, S. B. Zheng. Scheme for reliable realization of quantum logic gates for two atoms separately trapped in two distant cavities via optical fibers [J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(5): 1306~1311
- 14 S. Y. Ye, Z. R. Zhong, S. B. Zheng. Deterministic generation of three-dimensional entanglement for two atoms separately trapped in two optical cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(1): 014303
- 15 F. Ciccarello. Resonant atom-field interaction in large-size coupled-cavity arrays [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(4): 043802
- 16 P. Peng, F. L. Li. Entangling two atoms in spatially separated cavities through both photon emission and absorption processes [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(6): 062320
- 17 J. Song, X. D. Sun, Y. Xia *et al.*. Efficient creation of continuous-variable entanglement for two atomic ensembles in coupled cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(5): 052309
- 18 S. B. Zheng, Z. B. Yang, Y. Xia. Generation of two-mode squeezed states for two separated atomic ensembles via coupled cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2010, **81**(1): 015804
- 19 B. Zhang. Entanglement between two atoms in two distant cavities connected by an optical fiber beyond strong fiber-cavity coupling [J]. *Opt. Commun.*, 2010, **283**(1): 196~199
- 20 Z. Q. Yin, F. L. Li. Multiatom and resonant interaction scheme for quantum state transfer and logical gates between two remote cavities via an optical fiber [J]. *Phys. Rev. A*, 2007, **75**(1): 012324
- 21 A. Serafini, S. Mancini, S. Bose. Distributed quantum computation via optical fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**(1): 010503
- 22 Y. L. Li, M. F. Fang. Generation of  $W_n$  state with three atoms trapped in two remote cavities coupled by an optical fibre [J]. *Chin. Phys. B*, 2011, **20**(5): 050314
- 23 Zhang Guiming, Li Yueke, Gao Yunfeng. Effects of stark shift

- on cavity field spectra of nondegenerate two-photon Jaynes-Cummings model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 555~558
- 张桂明, 李悦科, 高云峰. 斯塔克效应对两模双光子模型腔场谱的影响[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 555~558
- 24 Liu Xiaojuan, Zhou Bingju, Fang Maofa *et al.*. Information entropy squeezing of the atom of an arbitrary initial state via the two-photon process [J]. *Acta Physics Sinica*, 2006, **55**(2): 704~711
- 刘小娟, 周并举, 方卯发 等. 双光子过程中任意初态原子的信息熵压缩[J]. *物理学报*, 2006, **55**(2): 704~711
- 25 Fang Maofa, Liu Xiang. Quantum mechanical channel and quantum mutual entropy in the two-photon Jaynes-Cummings model [J]. *Acta Physics Sinica*, 2000, **49**(3): 435~440
- 方卯发, 刘翔. 双光子 Jaynes-Cummings 模型中量子力学通道与量子互熵[J]. *物理学报*, 2000, **49**(3): 435~440
- 26 M. Alexanian. Two-photon exchange between two three-level atoms in separate cavities [J]. *Phys. Rev. A*, 2011, **83**(2): 023814
- 27 A. Raushenbeutel, P. Bertet, S. Osnaghi *et al.*. Controlled entanglement of two field modes in a cavity quantum electrodynamics experiment [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **64**(5): 050301

栏目编辑: 李文喆