

两原子与数态场相互作用系统中纠缠的调控

廖庆洪 刘 晔

(南昌大学电子信息工程系, 江西 南昌 330031)

摘要 通过计算并发度研究了两个处于初始激发态的两能级原子与数态场相互作用系统的纠缠动力学特性,并讨论了场的光子数、原子和场的失谐量以及原子操作对并发度的影响。结果表明当不存在原子操作时,两原子之间的纠缠出现突然产生现象,并且可以通过调节光子数和原子与场的失谐量来控制产生纠缠的阈值时间和纠缠的最大值。当存在原子操作时,两原子之间的纠缠随着时间的演化可以立即产生,而且通过对经典场的操作和控制可以实现两原子之间纠缠的调控。

关键词 量子光学;量子纠缠;并发度;纠缠调控

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0327002

Control of the Entanglement Between the Two Atoms Interacting with a Fock State Field

Liao Qinghong Liu Ye

(Department of Electronic Information Engineering, Nanchang University,
Nanchang, Jiangxi 330031, China)

Abstract The dynamics of entanglement of two two-level atoms initially in excited state interacting with a Fock state field is examined by means of concurrence. The effects of photon number, atom-cavity detuning and manipulation of the atom on the time evolution of concurrence are investigated. The results show that the phenomenon of sudden birth of entanglement between two atoms occurs in the absence of the manipulation of the atom. Moreover, the threshold time for the creation of entanglement and the maximum of the entanglement can be controlled by the photon number and the atom-cavity detuning. The entanglement between two atoms can be created immediately as time develops in the presence of manipulation of the atom. The atom-atom entanglement can be manipulated by the application of the classical field.

Key words quantum optics; quantum entanglement; concurrence; entanglement control

OCIS codes 270.5565; 270.5585; 270.5580

1 引 言

量子纠缠态具有独特的量子关联特性,是量子力学最显著的特征之一。量子纠缠一方面体现了量子态的非定域性,导致了 Bell 不等式的违背以及量子力学基本问题的完善;另一方面,作为一种重要的物理资源被广泛地应用于量子通信和量子计算领域中^[1]。纠缠态的产生与操纵问题是量子纠缠研究的一个重要课题,具有重要的理论意义和应用前景。

已经报道了在许多系统中纠缠态的产生和制备,如原子^[2]、光子对^[3]、囚禁离子^[4]、超导比特^[5]和玻色-爱因斯坦凝聚体^[6]等。2002年, Kim 等^[7,8]研究了两个原子同时和热场通过单光子和双光子发生相互作用的模型,结果发现两原子之间纠缠的产生依赖于原子的初态,当两原子初始都处于激发态时,两原子之间不能产生纠缠。2004年, Zhou 等^[9]研究了两个原子通过不同的耦合强度与热场相互作用的模

收稿日期: 2011-09-15; **收到修改稿日期**: 2011-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(10647133)、江西省自然科学基金(2009GQS0080)和江西省教育厅科技项目(GJJ11339)资助课题。

作者简介: 廖庆洪(1982—),男,博士,讲师,主要从事量子光学和量子信息等方面的研究。E-mail: nculqh@163.com

型,结果发现当两原子初始都处于激发态时,两原子之间可以产生纠缠。2008年,Ficek等^[10]研究了耦合于真空场中的两个两能级原子,两原子初始处于解纠缠态,通过自发辐射,经过一段有限的时间后两原子之间可以产生纠缠,即纠缠的推迟产生现象,他们把这种初始处于解纠缠的两原子在经过有限时间之后产生纠缠的现象称为纠缠的突然产生现象(ESB)。近年来,人们对 Tavis-Cummings 模型以及多体系统中的原子纠缠特性进行了深入的研究^[11,12]。

1997年,Gerry等^[13]对 Jaynes-Cummings 模型中场的压缩特性进行了研究,结果发现通过对腔对原子的操作可以大大地提高场的压缩效应。Yang等^[14]研究了初始处于爱因斯坦-波多尔斯基-罗逊(EPR)态的两个两能级原子系统,结果表明腔内原子的发射性质受腔外原子操控的影响。林秀等^[15]研究了初始与腔外原子相纠缠的腔内原子的发射性质,结果表明通过对腔外原子的操作可改变腔内原子的发射性质。郑小兰等^[16]研究了对相干态与原子相互作用系统的非经典性质,结果发现对原子的选择性测量可以增强腔场的双模压缩性。卢道明^[17~19]研究了腔外原子的测量和旋转操作对腔内原子纠缠动力学特性的影响以及原子测量对耦合腔系统中纠缠特性和光场量子特性的影响。本文采用文献[20]中的物理模型,不同的是原子 A_1 与场之间通过非共振相互作用,当原子 A_2 通过腔后,对原子 A_1 实施一个经典场操作,主要讨论原子与场的失谐量、场的光子数以及原子 A_1 实施经典场操作对两原子之间纠缠特性的影响,从而探讨两原子之间纠缠调控的物理机制,结果表明可以通过调节光子数和原子与场的失谐量来控制产生纠缠的阈值时间和纠缠的最大值。

2 物理模型与基本方程

考虑与文献[20]中几乎相同的物理模型,不同的是原子 A_1 与场之间通过非共振相互作用,当原子 A_2 通过腔后,对原子 A_1 实施一个经典场操作。假设原

子和腔的相互作用时间远远小于腔的寿命,所以可以忽略腔的耗散导致的退相干效应。在旋波近似下,在相互作用绘景中,系统的哈密顿量为

$$H_1 = g[\sigma_+ a \exp(i\Delta t) + a^\dagger \sigma_- \exp(-i\Delta t)], \quad \hbar = 1, \quad (1)$$

式中 $\sigma_+ = |e\rangle\langle g|$ 和 $\sigma_- = |g\rangle\langle e|$ 为原子的上升和下降算符, $|e\rangle$ 为激发态, $|g\rangle$ 为基态, a^\dagger 和 a 为单模腔场的产生和湮灭算符, g 为原子和场的耦合常数。

原子 A_1 初始处于激发态 $|e_1\rangle$, 腔场处于数态 $|n\rangle$, 原子 A_1 和腔场相互作用时间 t 后离开了腔, 在哈密顿量(1)式的作用下, 可以得到第一个原子 A_1 和场的态矢量为

$$|\psi(t)_{A_1 f}\rangle = M|e_1, n\rangle + N|g_1, n+1\rangle, \quad (2)$$

式中

$$M = \left[\cos\left(\frac{\Omega_n t}{2}\right) - \frac{i\Delta}{\Omega_n} \sin\left(\frac{\Omega_n t}{2}\right) \right] \exp\left(\frac{i\Delta t}{2}\right), \quad (3)$$

$$N = -\frac{2ig\sqrt{n+1}}{\Omega_n} \sin\left(\frac{\Omega_n t}{2}\right) \exp\left(-\frac{i\Delta t}{2}\right), \quad (4)$$

$$\Omega_n = \sqrt{\Delta^2 + 4g^2(n+1)}, \quad (5)$$

式中 Δ 为原子 A_1 与场的失谐量。然后让初始处于激发态 $|e_2\rangle$ 的原子 A_2 进入该腔, 原子 A_2 和场的相互作用时间也为 t , 通过原子 A_2 与腔场的共振相互作用, 两个原子之间产生了关联, 两个原子 A_1, A_2 和场 f 构成的系统态矢量为

$$|\psi(t)_{A_1 A_2 f}\rangle = M_1|e_1 e_2, n\rangle + M_2|e_1 g_2, n+1\rangle + M_3|g_1 e_2, n+1\rangle + M_4|g_1 g_2, n+2\rangle, \quad (6)$$

式中系数 M_1, M_2, M_3 和 M_4 的表达式为

$$M_1 = M \cos(\sqrt{n+1}gt), \quad M_2 = -iM \sin(\sqrt{n+1}gt), \\ M_3 = N \cos(\sqrt{n+2}gt), \quad M_4 = -iN \sin(\sqrt{n+2}gt), \quad (7)$$

当原子 A_2 离开腔后, 对原子 A_1 实施一个经典场操作, 操作后原子 A_1 的状态演化为^[21,22]

$$\begin{cases} |g_1\rangle \rightarrow \cos\alpha|g_1\rangle + \sin\alpha|e_1\rangle \\ |e_1\rangle \rightarrow -\sin\alpha|g_1\rangle + \cos\alpha|e_1\rangle \end{cases}, \quad (8)$$

其中参数 α 可以由经典场随意来操作和控制, 则操作后整个系统的态矢量由(6)式演化为

$$\begin{aligned} |\psi(t)'_{A_1 A_2 f}\rangle = & M_1 \cos\alpha|e_1 e_2, n\rangle + M_3 \sin\alpha|e_1 e_2, n+1\rangle + M_2 \cos\alpha|e_1 g_2, n+1\rangle + \\ & M_4 \sin\alpha|e_1 g_2, n+2\rangle - M_1 \sin\alpha|g_1 g_2, n\rangle + M_3 \cos\alpha|g_1 e_2, n+1\rangle - \\ & M_2 \sin\alpha|g_1 g_2, n+1\rangle + M_4 \cos\alpha|g_1 g_2, n+2\rangle. \end{aligned} \quad (9)$$

对于由两个原子 A_1, A_2 和场 f 构成的三体系统,这里只对两个原子 A_1 和 A_2 之间的纠缠感兴趣,在知道整个系统密度矩阵 $\rho_{A_1 A_2 f}(t) = |\psi(t)'\rangle_{A_1 A_2 f} \langle \psi(t)'\rangle_{A_1 A_2 f}$ 的情况下,对场自由度进行取迹,可以得到两个原子 A_1 和 A_2 的约化密度矩阵 $\rho_{A_1 A_2}(t)$,由两原子 A_1 和 A_2 的约化密度矩阵就可以得到关于两个原子 A_1 和 A_2 的纠缠信息。在标准基 $|e_1 e_2\rangle, |e_1 g_2\rangle, |g_1 e_2\rangle$ 和 $|g_1 g_2\rangle$ 下,两个原子 A_1

和 A_2 的约化密度矩阵具有表达式

$$\rho_{A_1 A_2}(t) = \text{Tr}_f[\rho_{A_1 A_2 f}(t)] = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \rho_{13} & \rho_{14} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \rho_{23} & \rho_{24} \\ \rho_{31} & \rho_{32} & \rho_{33} & \rho_{34} \\ \rho_{41} & \rho_{42} & \rho_{43} & \rho_{44} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

其中密度矩阵元为

$$\begin{cases} \rho_{11} = M_1 M_1^* \cos^2 \alpha + M_3 M_3^* \sin^2 \alpha, & \rho_{12} = M_3 M_2^* \sin \alpha \cos \alpha \\ \rho_{13} = M_3 M_3^* \sin \alpha \cos \alpha - M_1 M_1^* \sin \alpha \cos \alpha, & \rho_{14} = -M_3 M_2^* \sin^2 \alpha \\ \rho_{21} = M_2 M_3^* \sin \alpha \cos \alpha, & \rho_{22} = M_4 M_4^* \sin^2 \alpha + M_2 M_2^* \cos^2 \alpha \\ \rho_{23} = M_2 M_3^* \cos^2 \alpha, & \rho_{24} = M_4 M_4^* \sin \alpha \cos \alpha - M_2 M_2^* \sin \alpha \cos \alpha \\ \rho_{31} = M_3 M_3^* \sin \alpha \cos \alpha - M_1 M_1^* \sin \alpha \cos \alpha, & \rho_{32} = M_3 M_2^* \cos^2 \alpha \\ \rho_{33} = M_1 M_1^* \sin^2 \alpha + M_3 M_3^* \cos^2 \alpha, & \rho_{34} = -M_3 M_2^* \cos \alpha \sin \alpha \\ \rho_{41} = -M_2 M_3^* \sin^2 \alpha, & \rho_{42} = M_4 M_4^* \sin \alpha \cos \alpha - M_2 M_2^* \sin \alpha \cos \alpha \\ \rho_{43} = -M_2 M_3^* \cos \alpha \sin \alpha, & \rho_{44} = M_2 M_2^* \sin^2 \alpha + M_4 M_4^* \cos^2 \alpha \end{cases}. \quad (11)$$

采用 Wootters 在 1998 年提出的并发度^[23]来度量两原子之间的纠缠。并发度的定义为

$$C(t) = \max[0, \lambda_1(t) - \lambda_2(t) - \lambda_3(t) - \lambda_4(t)], \quad (12)$$

式中 $\lambda_1(t), \lambda_2(t), \lambda_3(t), \lambda_4(t)$ 是算符 $[\sqrt{\rho \bar{\rho}} \sqrt{\rho}]^{1/2}$ 本征值的降序排列, $\bar{\rho}$ 是 ρ 的时间反演矩阵, 表达式为

$$\bar{\rho} = \sigma_y \otimes \sigma_y \rho^* \sigma_y \otimes \sigma_y, \quad (13)$$

式中 $*$ 表示取复共轭。 C 的取值范围为 $0 \leq C \leq 1$, 其中 $C = 0$ 说明两原子解纠缠, $C = 1$ 说明两原子为最大纠缠态。

3 数值计算与结果分析

图 1 给出了数态场的光子数 $n=3$, 原子和场之间的失谐量取不同值时, 并发度随时间的演化规律, 实线、点线和点虚线分别对应 $\Delta=0, 0.5g, 1.0g$ 。从图中可以看出, 原子 A_1 和 A_2 之间的纠缠发生了类似于文献[10]的纠缠突然产生现象, 也就是说, 原子间初始时刻不存在纠缠, 突然在一段有限时间之后, 两原子之间产生了纠缠。对比图 1 中的实线、点线和点虚线发现两原子之间纠缠产生的阈值时间与原子和场之间的失谐量无关, 然而, 两原子之间产生纠缠的最大值依赖于原子和场之间的失谐量, 原子和场之间的失谐量越大, 两原子间纠缠的最大值越大。由于原子和场之间的失谐量可以应用一个依赖于时间变化的电场来实现^[24,25], 因此可以通过调节

原子和场之间的失谐量实现对两原子之间纠缠的操控。

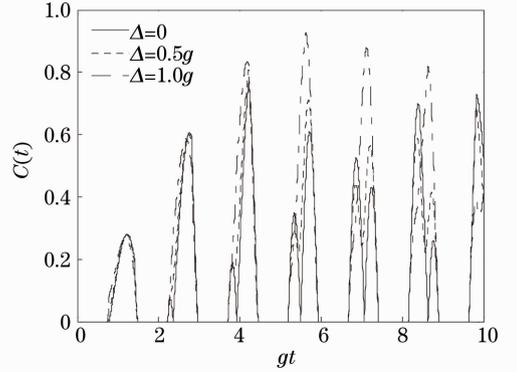


图 1 并发度 $C(t)$ 随时间的演化。数态场光子数 $n=3$, 失谐量取不同值, 实线、点线和点虚线分别对应 $\Delta=0, 0.5g, 1.0g$

Fig. 1 Time evolution of concurrence for $n=3$. The solid line, dotted line and dashed-dotted line correspond to $\Delta=0, 0.5g, 1.0g$ respectively

图 2 展示了原子和场的失谐量 $\Delta=10g$, 数态场的光子数取不同值时, 两原子之间纠缠随标度时间 gt 的演化规律, 实线、点线和点虚线分别对应光子数 $n=0, 3, 10$ 。两原子之间依然可以发生纠缠的突然产生现象。比较图 2 中的实线、点线和点虚线可以看到, 两原子之间纠缠产生的阈值时间以及纠缠最大值与数态场的光子数有关, 光子数越大, 两个原子之间产生纠缠的阈值时间越短, 纠缠的最大值越大。

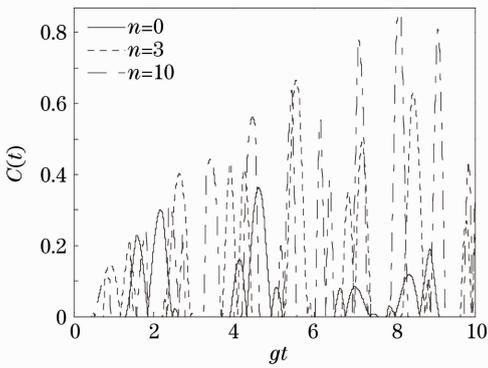


图2 并发度随时间的演化。失谐量 $\Delta=10g$, 数态场光子数取不同值, 实线、点线和点虚线分别对应 $n=0, 3, 10$

Fig. 2 Time evolution of concurrence for $\Delta=10g$. The solid line, dotted line and dashed-dotted line correspond to $n=0, 3, 10$, respectively

为了讨论原子 A_1 的操作对两原子之间纠缠的影响, 图3给出了光子数 $n=3$, 原子和场的失谐量 $\Delta=0$, 参数 α 取不同值时, 并发度随时间的演化特性, 实线、点线和点虚线分别对应参数 $\alpha=\pi/6, \pi/12, \pi/24$ 。比较图1和图3中的实线发现当对原子 A_1 实施经典场操作之后, 并发度随着时间的演化立刻就出现大于零的值, 也就是说当原子和数态场一旦开始发生相互作用, 场和原子间就发生能量交换, 两原子之间就立即产生纠缠, 并且两原子之间纠缠的最大值随着参数 α 的减小而增大。由于参数 α 可以由经典场随意来操作和控制, 因此可以通过调节经典场来实现两原子之间纠缠的调控。

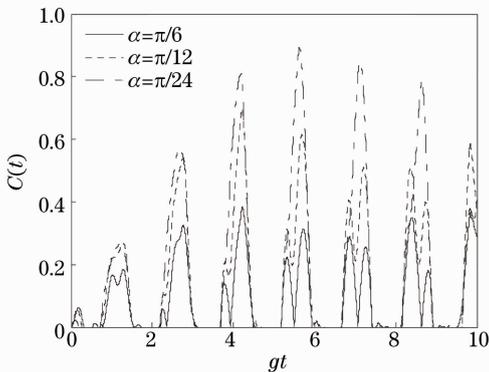


图3 并发度随时间的演化。失谐量 $\Delta=0$, 数态场光子数 $n=3$, 参数 α 取不同值, 实线、点线和点虚线分别对应 $\alpha=\pi/6, \pi/12, \pi/24$

Fig. 3 Time evolution of concurrence for $\Delta=0$ and $n=3$. The solid line, dotted line and dashed-dotted line correspond to $\alpha=\pi/6, \pi/12, \pi/24$, respectively

这里简单地给出该方案在实验上实现的可行性分析。文献[2]在实验上依次让两个原子陆续地通过一个高 Q 值的超导微波腔制备了两原子的 EPR 态。文献[26]在实验上实现了两个原子陆续地和两个腔模的相互作用。腔量子电动力学(CQED)实验上[27]已经显示原子和场的有效相互作用时间长度可以从 100 ns 变化到 $100\text{ }\mu\text{s}$, 而且, 实验上里德伯原子的寿命和高 Q 值超导腔的寿命可以远远大于原子和场的相互作用时间, 因此, 该方案利用里德伯原子和高 Q 值微波超导腔在实验上具备可行性。

4 结 论

利用并发度作为度量研究了初始都处于激发态的两个两能级原子与数态场相互作用系统的纠缠动力学性质, 其中原子 A_1 与场发生非共振相互作用, 原子 A_2 通过腔后, 对原子 A_1 实施一个经典场操作, 原子 A_2 与场发生共振相互作用。讨论了场的光子数、原子和场的失谐量以及原子 A_1 实施经典场操作对两原子之间纠缠的影响。结果表明, 当未对原子 A_1 实施经典场操作时, 两原子之间的纠缠出现突然产生现象, 光子数越大, 两个原子之间产生纠缠的阈值时间越短, 纠缠的最大值越大; 原子和场之间的失谐量越大, 两原子间纠缠的最大值越大。可以通过调节光子数和原子与场的失谐量来控制产生纠缠的阈值时间和纠缠的最大值。当对原子 A_1 实施经典场操作时, 两原子之间的纠缠随着时间的演化可以立即产生, 并且通过对经典场的操作和控制可以实现两原子之间纠缠的调控。

参 考 文 献

- 1 M. A. Nielsen, I. L. Chuang. Quantum Computation and Information[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000
 - 2 E. Hagley, X. Maitre, G. Nogues *et al.*. Generation of Einstein-Podolsky-Rosen pairs of atoms[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(1): 1~5
 - 3 A. Aspect, P. Grangier, G. Roger. Experimental tests of realistic local theories via Bell's theorem[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1981, **47**(7): 460~463
 - 4 Q. A. Turchette, C. S. Wood, B. E. King *et al.*. Deterministic entanglement of two trapped ions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(17): 3631~3634
 - 5 M. Steffen, M. Ansmann, C. Radoslaw *et al.*. Measurement of the entanglement of two superconducting qubits via state tomography[J]. *Science*, 2006, **313**(5792): 1423~1425
 - 6 Chen Jing, Guo Yanqing, Shi Xuguang. Study on preparation and characteristics of quantum entanglement in double wells using a spin-1/2 approximation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0527002
- 陈 菁, 郭彦青, 史旭光. 自旋-1/2 近似下双势阱中纠缠制备和特性研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0527002

- 7 M. S. Kim, J. Lee, D. Ahn *et al.*. Entanglement induced by a single-mode heat environment[J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(4): 040101
- 8 L. Zhou, H. S. Song, C. Li. Entanglement induced by a single-mode thermal field and the criteria for entanglement[J]. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, 2002, **4**(6): 425~429
- 9 L. Zhou, X. X. Yi, H. S. Song *et al.*. Entanglement of two atoms through different couplings and thermal noise[J]. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.*, 2004, **6**(9): 378~382
- 10 Z. Ficek, R. Tanaš. Delayed sudden birth of entanglement[J]. *Phys. Rev. A*, 2008, **77**(5): 054301
- 11 Han Mei, Zhang Yingjie, Xia Yunjie. Entanglement characteristics of two entangled atoms in classical driven Tavis-Cummings model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0427002
韩美, 张英杰, 夏云杰. 经典驱动 Tavis-Cummings 模型中原子纠缠特性的研究[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0427002
- 12 Sun Chao, Zhang Yingjie, Meng Xiangshui *et al.*. A study on the pairwise concurrence entanglement in the multipartite open system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3604~3609
孙超, 张英杰, 孟祥水等. 开放多体系统中共生纠缠的研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3604~3609
- 13 C. C. Gerry, H. Ghosh. Squeezing enhancement in the Jaynes-Cummings model via selective atomic measurements[J]. *Phys. Lett. A*, 1997, **229**(1): 17~22
- 14 C. P. Yang, G. C. Guo. Controllable emission properties of an atom inside a cavity by manipulating the atom outside the cavity[J]. *Phys. Lett. A*, 1999, **255**(3): 129~132
- 15 Lin Xiu, Li Hongcai. Controllable emission properties of two atoms inside cavities by manipulating the atom outside the cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1182~1185
林秀, 李洪才. 通过对腔外原子的操作控制腔内原子的发射性质[J]. 光学学报, 2001, **21**(10): 1182~1185
- 16 Zheng Xiaolan, Chen Zihong. Nonclassical properties of fields in pair coherent states interacting with two two-level atoms[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 3054~3058
郑小兰, 陈子翊. 对相干态与原子作用后非经典性质的演化[J]. 光学学报, 2010, **30**(10): 3054~3058
- 17 Lu Daoming. Remote control entanglement properties of two-atom inside cavities[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 2088~2092
卢道明. 远程控制原子的纠缠特性[J]. 光子学报, 2010, **39**(11): 2088~2092
- 18 Lu Daoming. Influences of selective atomic measurement on entanglement properties in a system of atoms interacting with coupled cavities[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(7): 0727002
卢道明. 原子测量对耦合腔系统中纠缠特性的影响[J]. 光学学报, 2011, **31**(7): 0727002
- 19 Lu Daoming. Effect of selective atomic measurement on quantum properties of light field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1804~1808
卢道明. 选择原子测量对光场量子特性的影响[J]. 光学学报, 2010, **30**(6): 1804~1808
- 20 S. B. Zheng. Scheme for approximate conditional teleportation of an unknown atomic state without the Bell-state measurement[J]. *Phys. Rev. A*, 2004, **69**(6): 064302
- 21 V. Bužek, S. L. Braunstein, M. Hillery *et al.*. Quantum copying: a network [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **56**(5): 3446~3452
- 22 C. C. Gerry, P. L. Knight. *Introductory Quantum Optics*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- 23 W. K. Wootters. Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **80**(10): 2245~2248
- 24 D. Gonta, S. Fritzsche. On the role of the atom-cavity detuning in bimodal cavity experiments[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2008, **41**(9): 095503
- 25 X. Maître, E. Hagley, G. Nogues *et al.*. Quantum memory with a single photon in a cavity[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79**(4): 769~772
- 26 A. Rauschenbeutel, 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
- 27 J. M. Raimond, M. Brune, S. Haroche. Manipulating quantum entanglement with atoms and photons in a cavity[J]. *Rev. Mod. Phys.*, 2001, **73**(3): 565~582

栏目编辑: 李文誌