

腔外原子操作控制腔内原子的偶极压缩

卢道明

(武夷学院电子工程系, 福建 武夷山 354300)

摘要 将初始处于 W 态的 3 个二能级原子中的两个原子分别注入处于真空态的两个腔中, 并与光场发生共振相互作用。采用数值计算方法, 比较了进行原子态选择性测量和原子旋转操作时的腔内原子偶极压缩效应。讨论了对腔外原子的旋转操作和测量对腔内原子偶极压缩效应性质的影响。研究表明: 通过对腔外原子的旋转操作和原子态的选择性测量, 可控制腔内原子偶极压缩效应; 在第一象限内随旋转角的增大, 腔内原子的偶极振幅 S_x 分量经历从不压缩→出现压缩→压缩增强→压缩减弱的过程。这表明可通过操控旋转角来控制腔内原子的偶极压缩效应强弱。

关键词 量子光学; 旋转操作; 选择测量; 偶极压缩

中图分类号 0431.2

OCIS 270.0270 020.0020

文献标识码 A

Controllable Dipole Squeezing of Two Atoms Inside Cavities by Manipulating Atom Outside Cavity

Lu Daoming

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

Abstract Two of three two-level atoms which are initially in the W state are injected into two empty cavities respectively to have resonant interaction with the light field. The dipole squeezing of the two atoms inside cavities under a rotation operation and direct selective measurement are compared numerically. The influences of the manipulation and state-selective measurement of the atom outside the cavities on the dipole squeezing of the atoms inside cavities are discussed. The results show, the dipole squeezing of atoms inside the cavities can be controlled by the manipulation of the atoms outside the cavities; when the rotation angle increases from zero to $\pi/2$, the term of amplitude S_x displays a changing process from squeeze strengthening to weakening. It indicates that the dipole squeezing of the atoms inside the cavities can be controlled by the manipulation of the rotation angle of the atom outside.

Key words quantum optics; rotation operation; state-selective measurement; dipole squeezing

1 引言

原子的偶极压缩效应不仅反映了原子与辐射场相互作用中的重要量子特性, 而且在超标准量子极限的高精度光学测量、超低噪声通信、微弱信号检测和量子通信等领域都有着广泛的应用前景。它的研究对于了解减小原子行为的量子噪声的途径具有重要的意义, 因此对原子偶极压缩效应的研究一直受到人们的普遍关注。近年来人们已利用 Jaynes-Cummings(J-C)模型^[1]及其拓展形式对光场与原子相互作用系统中原子偶极压缩效应做了大量的研究^[2~6], 取得了许多有意义的成果。另一方面, 1997年, C. C. Gerry等^[7]提出采用选择原子测量的方法可以加强光场的压缩效应。最近, C. P. Yang等^[8]提出通过对腔外原子的操作会控制腔内原子的发射性质。吴怀志等^[9]研究了双模相干场与 Λ 型三能级原子相互作用系统中的非经典性质, 詹佑帮等^[10]研究了 Kerr 介质 J-C 模型中去纠缠态的场性质。宋克慧等^[11, 12]研究了对原子的选择电离和测量对腔场压缩的影响。但涉及采用选择原子测量方法, 对光场与初始处于 W 态的 3 个二能级原子相互作用系统中, 对腔外原子操作控制原子偶极压缩的影响研究尚未见报道。本文考虑初始处于 W 态的 3 个二

收稿日期: 2010-03-22; **收到修改稿日期:** 2010-04-15

基金项目: 福建省自然科学基金(2008J0217)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

能级原子,将其中两个原子分别注入处于真空态的两个腔中,发生共振相互作用的情况。讨论了通过对腔外原子的旋转操作和测量对腔内原子偶极压缩的影响。

2 系统态矢的演化

首先回顾一个二能级原子,通过单光子跃迁与单模腔场发生共振相互作用,在旋转波近似下,在相互作用表象中,原子和腔场体系的哈密顿能量为

$$H_I = g(as^+ + a^+s^-), \quad (1)$$

式中 a^+ , a 分别为光场的产生和湮没算符; s^+ 和 s^- 为原子的赝自旋算符; g 为原子与光场间的耦合系数。在(1)式作用下,系统态矢演化规律为

$$\begin{aligned} |g\rangle|0\rangle &\rightarrow |g\rangle|0\rangle, & |e\rangle|0\rangle &\rightarrow \cos(gt)|e\rangle|0\rangle - i\sin(gt)|g\rangle|1\rangle, \\ |g\rangle|1\rangle &\rightarrow \cos(gt)|g\rangle|1\rangle - i\sin(gt)|e\rangle|0\rangle. \end{aligned} \quad (2)$$

现在考虑 3 个二能级原子初始处于 W 态,让其中两个原子(原子 1 和 2)分别同时注入处于真空态的两个单模腔中(腔 1 和腔 2),发生共振相互作用,如图 1 所示。其中 D 表示对原子的选择性测量, $R(\theta)$ 表示对原子的旋转操作。

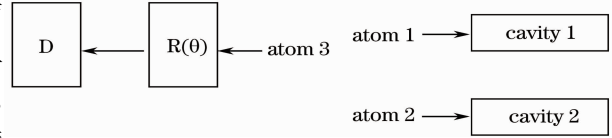


图 1 装置图

Fig. 1 Sketch of setup

整个系统的初态为

$$|\varphi(0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|egg\rangle_{123} + |geg\rangle_{123} + |gge\rangle_{123})|0\rangle_1|0\rangle_2, \quad (3)$$

为简单起见,设原子 1 与腔 1 的耦合系数等于原子 2 与腔 2 的耦合系数,均为 g 。 t 时刻整个系统态矢为

$$\begin{aligned} |\varphi(t)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}}\{[\cos(gt)|e\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|1\rangle_1|0\rangle_2 + \cos(gt)|g\rangle_1 \times \\ &|e\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|1\rangle_2]\}|g\rangle_3 + |g\rangle_1|g\rangle_2|e\rangle_3|0\rangle_1|0\rangle_2\}. \end{aligned} \quad (4)$$

3 原子的偶极压缩效应

为了分析双原子体系的偶极压缩效应,定义两个正交的偶极振幅分量算符为

$$S_x = S_x^1 + S_x^2, \quad S_y = S_y^1 + S_y^2, \quad (5)$$

式中 S_x^l, S_y^l ($l=1,2$) 为原子 1,2 的算符。它们的矩阵形式为

$$\mathbf{S}_x^l = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_y^l = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

满足对易关系和测不准关系

$$[S_x, S_y] = iS_z, \quad \langle(\Delta S_x)^2\rangle\langle(\Delta S_y)^2\rangle \geq \frac{1}{4}|\langle S_z\rangle|^2. \quad (7)$$

式中 $S_z = S_z^1 + S_z^2, S_z^l = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \langle(\Delta S_j)^2\rangle = \langle S_j^2\rangle - \langle S_j\rangle^2, j = x, y$ 。定义压缩量为

$$F_x = \langle(\Delta S_x)^2\rangle - \frac{1}{2}|\langle S_z\rangle|, \quad F_y = \langle(\Delta S_y)^2\rangle - \frac{1}{2}|\langle S_z\rangle|. \quad (8)$$

若 $F_x < 0$ 或 $F_y < 0$ 则称 S_x 分量或 S_y 分量出现压缩效应。利用(4)式计算得出

$$F_x = F_y = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt}{3} - \frac{1}{2}|\langle S_z\rangle| > 0. \quad (9)$$

双原子 1,2 体系不出现偶极压缩效应。

4 基于选择原子测量的原子的偶极压缩效应

若利用场电离技术对原子 3 进行测量,测得原子 3 处于态 $|g\rangle_3$,那么由原子 1,2 和腔场 1,2 构成的系统

的态塌缩到态

$$|\varphi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[\cos(gt)|e\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|1\rangle_1|0\rangle_2 + \cos(gt)|g\rangle_1|e\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|1\rangle_2], \quad (10)$$

利用(10)式计算得出

$$F_x = F_y = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt}{2} - \frac{1}{2}|\langle S_z \rangle| > 0. \quad (11)$$

双原子1,2体系也不出现偶极压缩效应。另一方面,若对原子3进行探测之前,先对原子3进行旋转操作,经操作后原子3的状态演化为

$$|g\rangle_3 \rightarrow \cos\theta|g\rangle_3 + \sin\theta|e\rangle_3, \quad |e\rangle_3 \rightarrow \cos\theta|e\rangle_3 - \sin\theta|g\rangle_3. \quad (12)$$

式中 θ 为旋转角,经旋转操作后整个系统态矢演化为

$$|\varphi(t)\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}\{\cos(gt)|e\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|1\rangle_1|0\rangle_2 + \cos(gt)|g\rangle_1|e\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|1\rangle_2\}(\cos\theta|g\rangle_3 + \sin\theta|e\rangle_3) + |g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2(\cos\theta|e\rangle_3 - \sin\theta|g\rangle_3). \quad (13)$$

若利用场电离技术对原子3进行测量,测得原子3处于态 $|g\rangle_3$,那么由原子1,2和腔场1,2构成的系统状态塌缩为

$$|\varphi(t)\rangle = C\{\cos(gt)|e\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|1\rangle_1|0\rangle_2 + \cos(gt)|g\rangle_1|e\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2 - i\sin(gt)|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|1\rangle_2\}\cos\theta - \sin\theta|g\rangle_1|g\rangle_2|0\rangle_1|0\rangle_2\}. \quad (14)$$

式中 $C^{-2} = 1 + \cos^2\theta$, C 为归一化常数。利用(14)式可得到

$$\langle S_z \rangle = -\frac{2\sin^2 gt \cos^2\theta + \sin^2\theta}{1 + \cos^2\theta}, \quad F_y = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta} - \frac{1}{2}|\langle S_z \rangle| > 0, \\ F_x = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt \cos^2\theta}{1 + \cos^2\theta} - \frac{\cos^2 gt \sin^2 2\theta}{(1 + \cos^2\theta)^2} - \frac{1}{2}|\langle S_z \rangle|. \quad (15)$$

可见 F_y 分量不压缩。利用(15)式可计算出对腔外原子3进行旋转操作和选择测量后,腔内原子1,2的偶极压缩参量 F_x 随时间的演化。旋转角 θ 分别取 $0, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}, \frac{5\pi}{12}, \frac{\pi}{2}, \frac{7\pi}{12}, \frac{2\pi}{3}$ 和 $\frac{3\pi}{4}$ 时,腔内原子1,2的偶极压缩参量 F_x 随时间的演化曲线如图2所示。数值计算结果表明,旋转角 θ 在 $[0, \pi]$ 区间变化时,偶极压缩参量 F_x 的时间演化曲线随 θ 变化具有对称性,其对称轴为 $\theta = \frac{\pi}{2}$,如 $\theta = \frac{\pi}{3}$ 与 $\theta = \frac{2\pi}{3}$, $\theta = \frac{5\pi}{12}$ 与 $\theta = \frac{7\pi}{12}$, $\theta = \frac{\pi}{4}$ 与 $\theta = \frac{3\pi}{4}$ 有相同的演化规律。另一方面,在第一象限内随旋转角 θ 的增大,腔内原子1,2的偶极振幅 S_x 分量经历从不压缩→出现压缩→压缩增强→压缩减弱的过程,如图2所示 $\theta=0$ 和 $\theta=\frac{\pi}{2}$ 时不压缩。可见通过对原子3的旋转操作和选择性测量,可使腔内原子呈现偶极压缩效应。并且,可通过操控旋转角 θ 来控制腔内原子的偶极压缩效应强弱。

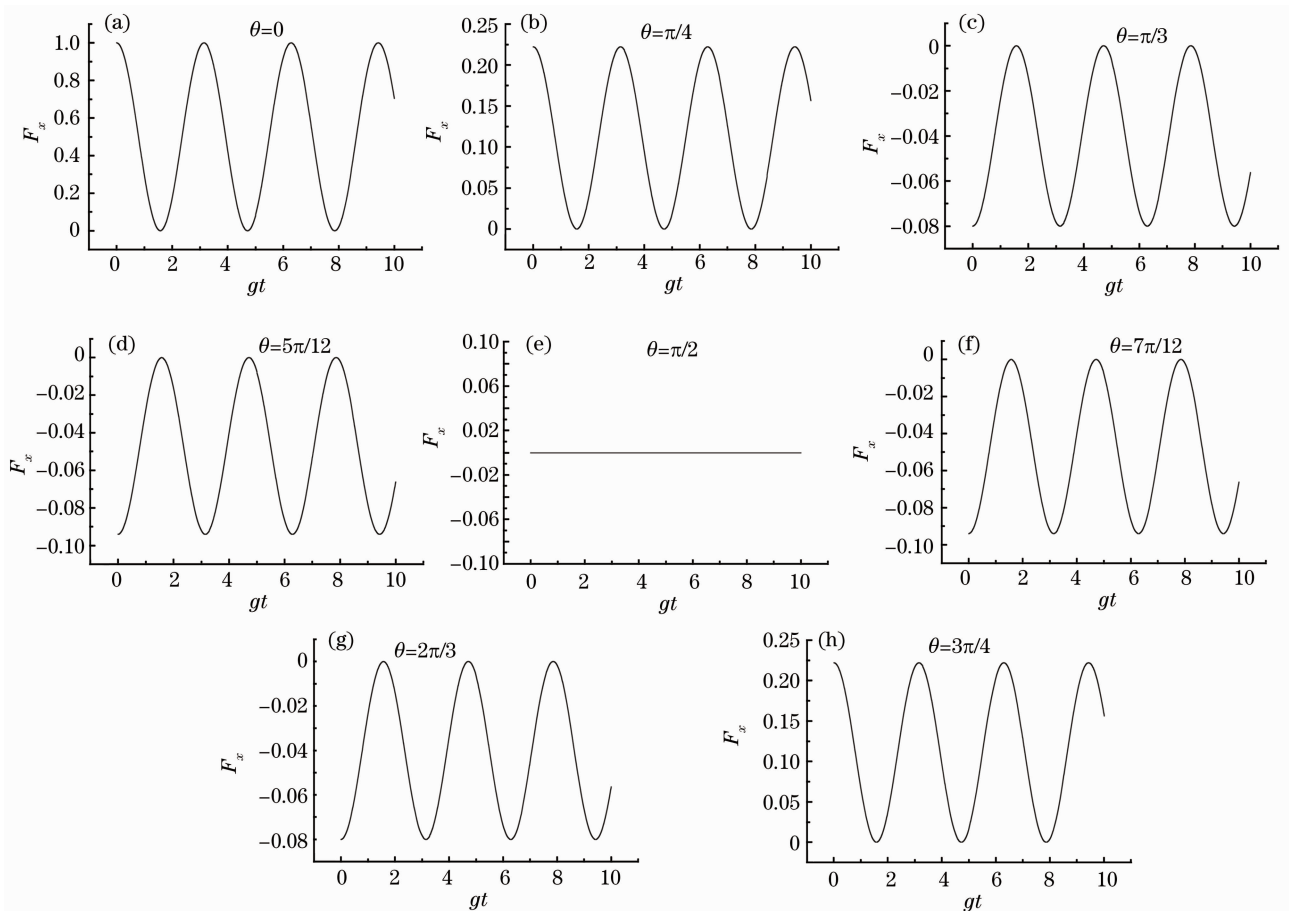
若利用场电离技术对原子3进行测量,测得原子3处于态 $|e\rangle_3$,通过计算可得出

$$\langle S_z \rangle = -\frac{2\sin^2 gt \sin^2\theta + \cos^2\theta}{1 + \sin^2\theta}, \quad F_y = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt \sin^2\theta}{1 + \sin^2\theta} - \frac{1}{2}|\langle S_z \rangle| > 0, \\ F_x = \frac{1}{2} + \frac{\cos^2 gt \sin^2\theta}{1 + \sin^2\theta} - \frac{\cos^2 gt \sin^2 2\theta}{(1 + \sin^2\theta)^2} - \frac{1}{2}|\langle S_z \rangle|. \quad (16)$$

由(15)式作变换 $\theta \rightarrow \theta + \frac{\pi}{2}$ 就可得到(16)式。可见经旋转操作后测得原子3处于 $|e\rangle_3$ 态与处于 $|g\rangle_3$ 态的结果相似。

5 结 论

考虑初始处于W态的3个二能级原子,将其中两个原子分别注入处于真空态的两个腔中,发生共振相

图2 F_x 随 gt 的演化曲线Fig. 2 Time evolution of F_x with time gt for different θ

相互作用,而另一原子处于腔外的情况。采用数值计算方法,研究了对腔外原子的旋转操作和测量对腔内原子偶极压缩效应的影响,研究表明:通过对腔外原子的旋转操作和测量,选择合适的旋转角可使腔内两原子系统的偶极振幅 S_x 分量出现压缩效应,而 S_y 分量不出现压缩效应。另一方面,随旋转角 θ 的增大,腔内原子 1,2 的偶极振幅 S_x 分量经历从不压缩→出现压缩→压缩增强→压缩减弱的过程。可见通过操控旋转角 θ 大小还可控制腔内原子的偶极压缩效应强弱。

参 考 文 献

- 1 E. T. Jaynes, F. W. Cummings. Comparison of quantum and semiclassical radiation theories with application to the beam maser[J]. *IEEE*, 1963, **51**: 89~109
- 2 P. Zhou, J. S. Peng. Dipole squeezing in the two-photon Jaynes-Cummings model with superposition state preparation[J]. *Phys. Rev. A.*, 1991, **44**(5): 3331~3335
- 3 Zheng Xiaohu, Cao Zuoliang. Dipole squeezing of the system of the two-mode entangled coherent states interacting with a V-type three-level atom[J]. *J. Atomic and Molecular Physics*, 2004, **21**(4): 570~574
郑小虎, 曹卓良. 双模纠缠相干光场与 V 型三能级原子相互作用系统的原子偶极压缩效应[J]. *原子与分子物理学报*, 2004, **21**(4): 570~574
- 4 Nie Yiyong, Liu Sanqiu, Shen Shihua *et al.*. Atomic squeezing effects in a two-photon process under strong coherent field of initial state[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11): 1066~1070
聂义友, 刘三秋, 申世华 等. 强场作用下二能级原子双光子过程中原子的压缩效应[J]. *光子学报*, 1999, **28**(12): 1066~1070
- 5 Tian Yonghong, Peng Jinsheng. Dipole squeezing effects of a three-level cascade atom interacting with a correlated two-mode field[J]. *J. Atomic and Molecular Physics*, 2000, **17**(3): 481~487
田永红, 彭金生. 与关联双模辐射作用的级联三能级原子的偶极压缩效应[J]. *原子与分子物理学报*, 2000, **17**(3):

481~487

- 6 Wu Meijun, Peng Jinsheng. Dipole squeezing of a three-level atom driven by the two-mode coherent state field[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 1997, **14**(4): 315~320
吴美均, 彭金生. 在双模相干光场作用下三能级原子的偶极压缩效应[J]. *量子电子学报*, 1997, **14**(4): 315~320
- 7 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
- 8 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
- 9 H. Z. Wu, W. J. Su. Nonclassical properties in the resonant interaction of a three level wedge-type atom with two-mode field in coherent state[J]. *Chinese Physics*, 2007, **16**(1): 106~110
- 10 Zhan Youbang, Zhou Ping. Properties of the field of the de-entangled state in the J-C model with Kerr-Like medium[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 1999, **16**(5): 398~405
詹佑邦, 周平. Kerr 介质中 J-C 模型去纠缠态的场性质[J]. *量子电子学报*, 1999, **16**(5): 398~405
- 11 Song Kehui. Comparison of squeezing properties of a cavity field via selective different atomic ionization and measurement [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(12): 1599~1603
宋克慧. 不同原子的选择电离和测量产生腔场压缩的比较[J]. *光学学报*, 1999, **19**(12): 1599~1603
- 12 Yang Xiong, Song Kehui. Selective different atomic ionization and measurement to influence of cavity field squeezing properties[J]. *J. Atom and Molecular Physics*, 2006, **23**(1): 143~146
杨雄, 宋克慧. 原子的选择电离和测量对腔场压缩性质的影响[J]. *原子与分子物理学报*, 2006, **23**(1): 143~146