

文章编号: 1007-4627(2002)02-0250-03

阶梯型三能级原子-腔耦合系统中 Fock 态的产生*

龚尚庆, 冯勋立, 徐至展

(中国科学院上海光机研究所强光光学实验室, 上海 201800)

摘要: 探讨了阶梯型三能级原子-腔耦合系统中由绝热跟随技术引起的光子 Fock 态的产生. 结果发现: 对于单模腔 QED 系统, 通过受激拉曼绝热跟随技术, 在微波区域内可实现单光子 Fock 态的制备; 对于双模腔 QED 系统, 通过斯塔克移动的快绝热跟随技术可实现双光子对 Fock 态的产生.

关键词: 阶梯型三能级原子; 腔 QED; 光子 Fock 态

中图分类号: O562.1 **文献标识码:** A

1 引言

光子 Fock 态在量子信息过程中有着非常重要的应用, 故此对其产生的研究引起了科学家们的极大兴趣. 在腔 QED 方面, 人们在微波及光学波区域提出了许多产生非经典光的方案^[1-5], 并且最近在实验上也实现了单光子 Fock 态的产生^[6-8]. 在微波区域内, Fock 态的制备是基于 Rydberg 态二能级原子的真空 Rabi 振荡: 如果开始处于激发态 $|e\rangle$ 的原子穿过真空腔, 其有效的共振原子-腔相互作用时间 t 满足 $\Omega t = \pi$, 其中 Ω 为真空 Rabi 频率, 那么该耦合系统将从 $|0, e\rangle$ 态演化到 $|1, g\rangle$ 态. 移去原子后即可产生单光子 Fock 态^[1]. 该方案的物理原理非常简单, 但在实验上却不太容易实现, 因为它需要精确控制场脉冲的面积. 在光学波区域内, Fock 态的产生是基于 Λ 型三能级原子-腔耦合系统的受激拉曼绝热跟随技术: 当处于 $|g_1\rangle$ 态的 Λ 型原子穿过真空腔, 通过绝热跟随技术, 初始耦合态 $|0, g_1\rangle$ 可绝热地转变为 $|1, g_2\rangle$ 态, 从而实现单光子 Fock 态的产生. 该方案不需要精确控制脉冲面积, 但需要满足绝热跟随条件. 而该条件只有在强耦合极限下才能满足. 在光学区域内, 强耦合条件一般不太容易实现.

人们发现^[9,10] 阶梯型的三能级原子系统亦可用来实现量子态的相干几率转移, 而该转移过程需要在比原子激发态的寿命短的时间范围内实现. 我们知道原子的 Rydberg 能级满足该条件. 因此本工作

考虑阶梯形的 Rydberg 态的三能级原子, 通过绝热跟随技术, 探讨了单模及双模腔 QED 情形下的耦合原子-腔特性. 结果发现: 对于单模腔 QED 系统, 通过受激拉曼绝热跟随技术, 在微波区域内可实现单光子 Fock 态; 对于双模腔 QED 系统, 通过斯塔克移动的快绝热跟随技术, 可实现双光子 Fock 态. 该方案不需要精确控制脉冲面积, 另外在微波区域内也容易满足绝热跟随条件.

2 单模腔 QED 系统中单光子 Fock 态的产生

为了解释腔模式单光子态的制备, 我们考虑阶梯型三能级原子模型, 其中 $|g\rangle$ 表示该原子基态, $|i\rangle$ 及 $|e\rangle$ 分别表示该原子的低和高激发态. 其中 $P(t)$ 是经典场, 作用于态 $|i\rangle$ 与态 $|e\rangle$ 间的跃迁上, 而腔场模式则耦合于态 $|g\rangle$ 与态 $|i\rangle$ 之间. 假设场频率与相对应的原子跃迁频率共振, 在旋转波近似下的相互作用哈密顿量为

$$H(t) = -i\hbar g(t)[|i\rangle\langle g| a - a^+ |g\rangle\langle i|] - i\hbar P(t)[|e\rangle\langle i| - |i\rangle\langle e|], \quad (1)$$

其中 a 和 a^+ 分别是场模式的消灭和产生算子, $g(t)$ 为原子-腔耦合强度. 该相互作用哈密顿量有如下特性: 它只耦合缀饰态流形 ($|e, n\rangle, |i, n\rangle$ 及 $|g, n+1\rangle$) 内的态. 其中 $|e, n\rangle \equiv |e\rangle |n\rangle, |i, n\rangle \equiv |i\rangle |n\rangle$

收稿日期: 2002-02-28; 修改日期: 2002-05-22

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目资助项目

作者简介: 龚尚庆(1963-), 男(汉族), 山东泰安人, 研究员, 博士生导师, 从事原子分子物理学、量子信息学及量子光学研究.

及 $|g, n+1\rangle \equiv |g\rangle |n+1\rangle$, $|n\rangle$ 表示腔模式的 n 光子 Fock 态. 根据(1)式, 很容易可以导出相互作用哈密顿量 $H(t)$ 对应零本征值的本征态:

$$|\Phi\rangle = \cos\theta |g, n+1\rangle + \sin\theta |e, n\rangle, \quad (2)$$

其中

$$\tan\theta = \frac{g(t)\sqrt{n+1}}{P(t)}, \quad (3)$$

角 θ 为标准受激拉曼绝热跟随^[10]中的混合角, 需要说明的是在这里并没有给出其它非零本征值相对应的本征态. 这是因为在绝热近似下, $|\Phi\rangle$ 与 $|\Psi_{E \neq 0}\rangle$ 间的耦合可以忽略. 本征态(2)具有如下的时间渐进特性:

$$|\Phi\rangle \rightarrow |e\rangle |n\rangle, \quad \text{当 } \frac{P(t)}{g(t)\sqrt{n+1}} \rightarrow 0 \text{ 时,}$$

$$|\Phi\rangle \rightarrow |g\rangle |n+1\rangle, \quad \text{当 } \frac{g(t)\sqrt{n+1}}{P(t)} \rightarrow 0 \text{ 时.}$$

(4)

由本征态 $|\Phi\rangle$ 的渐进特性可以看出: 当与原子相互作用的经典场脉冲 $P(t)$ 迟于腔场脉冲 $g(t)$ 条件下, 经过相互作用以后, 可实现由态 $|e, n\rangle$ 到态 $|g, n+1\rangle$ (或由态 $|e, 0\rangle$ 到态 $|g, 1\rangle$) 的绝热转移. 这里的初始原子态 $|e\rangle$ 可通过经典的受激拉曼绝热跟随技术来实现^[9]. 从而可以看出, 在微波区域内, 通过受激拉曼绝热跟随技术, 在阶梯型三能级原子-腔耦合系统内可实现单光子 Fock 态的产生. 该方案与二能级模型相比较, 不需要精确控制场脉冲面积. 另外由于在微波区域内, 适宜跃迁的高激发原子态 (Rydberg 态) 具有大偶极动量和较长的寿命, 达到强耦合极限并不困难. 因此可以说, 我们提出的方案在实验上可能更容易实现.

3 双模腔 QED 系统中双光子对 Fock 态的产生

这一节里我们将考虑双模腔 QED, 在此情形下, 作用于态 $|i\rangle$ 与态 $|e\rangle$ 及态 $|g\rangle$ 与态 $|i\rangle$ 的场均为微腔模式. 类似于上一节, 此时的相互作用哈密顿量 $H(t)$ 只耦合缀饰态流形 ($|e, n_L, n_R\rangle, |i, n_L, (n+1)_R\rangle$ 及 $|g, (n+1)_L, (n+1)_R\rangle$) 内的态^[11], 其中 $|e, n_L, n_R\rangle \equiv |e\rangle |n_L\rangle |n_R\rangle$, $|i, n_L, (n+1)_R\rangle \equiv |e\rangle |n_L\rangle |n+1\rangle_R$ 以及 $|g, (n+1)_L, (n+1)_R\rangle \equiv |g\rangle |n+1\rangle_L |n+1\rangle_R$ (这里我们只考虑两个腔模式具有相同

光子数情形).

在双模腔 QED 情形中, 由于两个原子-腔耦合强度 $g_L(t)$ 及 $g_R(t)$ 具有同样的时间相关性, 因此我们不可能直接利用受激拉曼绝热跟随技术来实现完全的相干几率转移. 尽管如此, 我们可以利用斯塔克移动的快绝热跟随技术^[12-15]来完成. 利用该技术, 双模腔 QED 耦合系统可用来制备腔场的双光子对 Fock 态.

在旋转波近似下, 该耦合系统的相互作用哈密顿量用矩阵元表示为

$$H(t) = \begin{pmatrix} -\Delta_R + \delta(t) & -g_R\sqrt{n+1} & 0 \\ -g_R\sqrt{n+1} & 0 & -g_L\sqrt{n+1} \\ 0 & -g_L\sqrt{n+1} & \Delta_L + \delta(t) \end{pmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\Delta_R = \omega_2 - \omega_1 - \nu_R$, $\Delta_L = \omega_3 - \omega_2 - \nu_L$ 是频率失谐项, $\delta(t)$ 是正比于激光强度的斯塔克移动. 为了简单起见, 我们考虑两个原子-腔耦合强度 $g_L(t)$ 及 $g_R(t)$ 具有相同的值 $g(t)$, 并且同时选取 $\Delta_R = \Delta_L = \Delta_0$ 及 $\delta(t) = Dt$. 此时的哈密顿(5)式简化为

$$H(t) = \begin{pmatrix} -\Delta_0 + Dt & -g\sqrt{n+1} & 0 \\ -g\sqrt{n+1} & 0 & -g\sqrt{n+1} \\ 0 & -g\sqrt{n+1} & \Delta_0 + Dt \end{pmatrix}. \quad (6)$$

我们注意到(6)式与文献[15]中的(19)式的形式完全一样, 其中文献[15]探讨了多能级系统中由啁啾激光脉冲引起的相干几率转移. 该系统的转移机制为非绝热态的能级交叉^[11-15]. 频率失调项 Δ_0 诱导了 $g_R(t)$ 及 $g_L(t)$ 间的一有效时间延迟, 延迟时间由 $t_d = \Delta_0/D$ 给出. $t_d < 0$ 相当于 $g_R(t)$ 超前于 $g_L(t)$, 而 $t_d > 0$ 相当于 $g_L(t)$ 超前于 $g_R(t)$. 因此我们得到了由斯塔克移动的快绝热跟随技术导致的几率转移特性:

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &\rightarrow |e\rangle |n\rangle_L |n\rangle_R, \\ &\text{当 } t_d < 0 \text{ 及 } t \rightarrow -\infty \text{ 时,} \\ |\Psi\rangle &\rightarrow |g\rangle |n+1\rangle_L |n+1\rangle_R, \\ &\text{当 } t_d > 0 \text{ 及 } t \rightarrow -\infty \text{ 时.} \end{aligned} \quad (7)$$

也就是说延迟时间 $t_d > 0$ (相当于 $g_L(t)$ 超前于 $g_R(t)$), 通过由斯塔克移动的快绝热跟随技术, 可以实现耦合态由 $|e\rangle |n\rangle_L |n\rangle_R$ 到 $|g\rangle |n+1\rangle_L |n+1\rangle_R$ (或由 $|e\rangle |0\rangle_L |0\rangle_R$ 到 $|g\rangle |1\rangle_L |1\rangle_R$) 的绝热转移. 因

此我们可以说利用快绝热跟随技术, 将初始态的原子 $|e\rangle$ 通过双模式真空腔, 可实现双光子对 Fock 态的产生.

4 讨论与总结

通过绝热跟随技术, 我们探讨了阶梯形三能级原子-腔耦合系统中 Fock 态的产生. 我们得到对于单模腔 QED 系统, 通过受激拉曼绝热跟随技术,

在微波区域内可实现单光子 Fock 态; 对于双模腔 QED 系统, 通过斯塔克移动的快绝热跟随技术, 可实现双光子 Fock 态. 在其制备过程中, 当绝热条件得到满足时, 不需要精确控制场脉冲面积. 而在微腔区域内, 在实验上达到满足绝热条件的强耦合极限并不困难. 因此可以说, 我们的方案为光子 Fock 态的制备提供了又一种可能性.

参 考 文 献:

- [1] Maitre X, Hagley E, Nogues G, *et al.* Quantum Memory with a Single Photon in a Cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 1997, **79**: 769.
- [2] Hyunchul Nha, Young-Tak Chough, Kyungwon An. Single-photon State in a Driven Jaynes-cummings System [J]. *Phys Rev*, 2000, **A63**: 010301.
- [3] Paikins A S, Marte P, Zoller P, *et al.* Synthesis of Arbitrary Quantum States Via Adiabatic Transfer of Zeeman Coherence [J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **71**: 309.
- [4] Kuhn A, Hennrich M, Biondo T, *et al.* Controlled Generation of Single Photons from a Strongly Coupled Atom-cavity System. [J]. *Appl Phys*, 1999, **B69**: 373.
- [5] Lange W, Kimble H J. Dynamic Generation of Maximally Entangled Photon Multiplets by Adiabatic Passage [J]. *Phys Rev*, 2000, **A61**: 063817.
- [6] Osnaghi S, Brune M, Raimond J M, *et al.* Seeing a Single Photon Without Destroying it [J]. *Nature(London)*, 1999, **400**: 239.
- [7] Varcoe B T H, Brattke S, Weidinger M, *et al.* Preparing Pure Photon Number States of the Radiation Field [J]. *Nature(London)*, 2000, **403**: 743.
- [8] Hennrich M, Legero T, Kuhn A, *et al.* Vacuum-stimulated Raman Scattering Based on Adiabatic Passage in a High-finesse Optical Cavity [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**: 4 872.
- [9] Shore B W, Bergmann K, Oreg J, *et al.* Multilevel Adiabatic Population Transfer [J]. *Phys Rev*, 1991, **A44**: 7 442.
- [10] Bergmann K, Theuer H, Shore B W. Coherent Population Transfer Among Quantum States of Atoms and Molecules [J]. *Rev Mod Phys*, 1998, **70**: 1 003.
- [11] Yoo H I, Eberly J H. Dynamical Theory of an Atom with Two or Three Levels Interacting with Quantized Cavity Fields [J]. *Phys Report*, 1985, **118**: 241.
- [12] Yatsenko L P, Shore B W, Halfmann T, *et al.* Source of Metastable H(2s) Atoms Using the Stark Chirped Rapid-adiabatic-passage Technique [J]. *Phys Rev*, 1999, **A60**: 4 237.
- [13] Rickes T, Yatsenko L P, Steuerwald S, *et al.* Efficient Adiabatic Population Transfer by Two-photon Excitation by a Laser-induced Stark Shift [J]. *J Chem Phys*, 2000, **113**: 534.
- [14] Vitanov N V, Halfmann T, Shore B W, *et al.* Coherent Manipulation of Atoms and Molecules by Sequential Laser Pulses [J]. *Adv At Mol Opt Phys*, 2001, **46**: 57.
- [15] Sola I R, Malinovsky V S, Chang Bo Y, *et al.* Coherent Population Transfer in Three-level Lambda Systems by Chirped Laser Pulses: Minimization of the intermediate-level population [J]. *Phys Rev*, 1999, **A59**: 4 494.

Generation of Fock States in Coupled Ladder Atom-cavity System

GONG Shang-qing, FENG Xun-li, XU Zhi-zhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract: The behavior of an atom-cavity system using a three-level ladder atom was investigated. It is found that, for one-mode cavity QED, a single photon can be generated via the technique of stimulated Raman adiabatic passage; for two-mode cavity QED, a two-photon pair can be generated via Stark-shift rapid adiabatic passage.

Key words: three-level ladder atom; cavity QED; fock state