

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0011-03

# 双模压缩真空场与三能级原子相互作用系统中 交流斯塔克位移对腔场谱的影响\*

高云峰<sup>1</sup> 冯 健<sup>1,2</sup> 史舒人<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 聊城师范学院教育工程系, 聊城 252059  
<sup>2</sup> 中国科学院安徽光学精密机械研究所激光光谱学实验室, 合肥 230031

**提要** 研究了双模腔场与  $\Lambda$  型三能级原子在大失谐耦合条件下的腔场谱。给出了原子与双模压缩真空场非简并拉曼耦合过程光谱结构的数值结果。讨论了光场的初始压缩因子和交流斯塔克位移对谱结构的影响。

**关键词** 双模压缩真空场, 非简并拉曼过程, 交流斯塔克位移, 腔场谱

**中图分类号** O431.2 **文献标识码** A

## Influence of AC-Stark Shift on Cavity Field Spectra of Two-Mode Squeezing Vacuum Field Interacting with $\Lambda$ -Type Three-Level Atom

GAO Yun-feng<sup>1</sup> FENG Jian<sup>1,2</sup> SHI Shu-ren<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Education Engineering, Liaocheng Teachers University, Liaocheng 252059  
<sup>2</sup> Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

**Abstract** The cavity field spectra of a  $\Lambda$ -type three-level atom interacting with a two-mode quantum cavity under the larger-detuning condition are investigated. The results for the initial field in two-mode Squeezing vacuum field are obtained. The influence of AC-Stark shift on the spectra is discussed.

**Key words** two-mode squeezing vacuum field, non-degenerate Raman process, AC-stark Shift, cavity field spectrum

### 1 引 言

近年来,腔场谱研究受到了较大关注。因为在光波波段,腔场谱可以利用光子计数技术测量,并且在测量所引起的损耗很小时,测到的腔场谱十分接近理想腔的谱<sup>[1]</sup>。随着单模双光子激光器的成功运转<sup>[2]</sup>,人们为实现双模双光子激光而对原子与双模腔场的相互作用过程进行了广泛而深入的研究<sup>[3-5]</sup>。在考虑  $\Lambda$  型三能级原子与双模场的耦合作用时,如果原子的高能级与两个非简并低能级之间的跃迁频率远离双模场共振频率,则高能级可被绝热删除<sup>[6]</sup>,系统可看作等效二能级原子与双模场相互作用的非简并拉曼耦合模型。以往对该模型的研究大多忽略了交流斯塔克位移的影响,而文献[7]指出,这种影响是必须考虑在内的。本文研究计及斯

达克位移的非简并拉曼耦合模型的腔场谱。

### 2 模型与腔场谱

理想腔内的双模光场与  $\Lambda$  型三能级原子组成的系统,在原子的高能级  $|3\rangle$  与两个非简并低能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  之间的跃迁频率远离双模场共振频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$  时,高能级可被绝热删除,应用旋波近似,系统的哈密顿量为<sup>[6]</sup>(取  $\hbar = 1$ )

$$H = \sum_{i=1}^2 \omega_i a_i^\dagger a_i + \frac{1}{2} \omega_0 \sigma_z + \frac{\lambda}{\gamma} a_1^\dagger a_1 |1\rangle \langle 1| + \gamma \lambda a_2^\dagger a_2 |2\rangle \langle 2| + \lambda (a_1 a_2^\dagger \sigma^+ + a_1^\dagger a_2 \sigma) \quad (1)$$

其中  $a_i^\dagger, a_i$  分别为第  $i$  模 ( $i = 1, 2$ ) 光场光子的产生和湮灭算符;  $\sigma^+, \sigma$  为原子在能级  $|1\rangle$  和  $|2\rangle$  之间的跃迁算符,  $\omega_0$  为其跃迁频率;  $\lambda = g_1 g_2 / \Delta, \gamma = g_2 / g_1, g_i$  ( $i = 1, 2$ ) 为原子-场耦合常数。

\* 山东省自然科学基金资助课题。

系统的基矢可取为

$$\left. \begin{aligned} |\Psi_1^N\rangle &= |2, n_1, n_2\rangle \\ |\Psi_2^N\rangle &= |1, n_1 + 1, n_2 - 1\rangle \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中的三个量子数  $1(2)$ 、 $n_1$ 、 $n_2$  分别表示原子所处的能级和两模光场的光子数,  $N$  代表  $(n_1, n_2)$ 。

(1) 式的本征方程为

$$H|\psi_j^N\rangle = E_j^N|\psi_j^N\rangle \quad (j = 1, 2) \quad (3)$$

$$|\psi_j^N\rangle = \sum_{m=1}^2 C_{jm}^N |\Psi_m^N\rangle \quad (j = 1, 2) \quad (4)$$

在共振相互作用条件下 ( $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ ), 利用标准

方法可求出本征值和本征态

$$E_1^N = \omega_1 n_1 + \omega_2 n_2 + \frac{\omega_0}{2} + \lambda \left( \frac{n_1 + 1}{\gamma} + n_2 \gamma \right)$$

$$E_2^N = \omega_1 n_1 + \omega_2 n_2 + \omega_0/2 \quad (5)$$

$$C_{jm}^N = \begin{pmatrix} \sin\theta_N & \cos\theta_N \\ -\cos\theta_N & \sin\theta_N \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中

$$\text{tg}\theta_N = [\gamma^2 n_2 / (n_1 + 1)]^{1/2}$$

按照 Eberly 物理谱的定义, 该系统的腔场谱按下式计算<sup>[8]</sup>

$$s(\omega) = 2\Gamma \int_0^T dt' \exp[-(\Gamma - i\omega)(T - t')] \int_0^T dt \exp[-(\Gamma + i\omega)(T - t)] \langle \Phi(0) | A^+(t') A(t) | \Phi(0) \rangle \quad (7)$$

式中,  $\Gamma$  是谱仪的带宽,  $T$  是测量时间,  $|\Phi(0)\rangle$  是系统的初态,  $A(t) = a_1(t) + a_2(t)$ 。

设初始时刻原子处于激发态而光场处于双模压缩真空态, 即取<sup>[5]</sup>

$$\left. \begin{aligned} |\Phi(0)\rangle &= |2, n, n\rangle \\ f_n &= \frac{[-\exp(i\xi)\tanh r]^n}{\cosh r} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中  $r$  为表征光场压缩程度的压缩因子,  $\xi$  为压缩方向角, 为简便起见, 本文取  $\xi = 0$ 。

将(8)式代入(7)式, 并利用(5)式和(6)式, 就可以计算系统的腔场谱。可以证明, 双模压缩真空场的腔场谱为两模腔场谱的简单叠加。

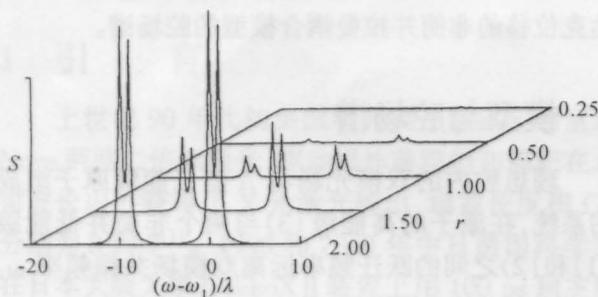


图1 腔场谱结构随双模场压缩因子  $r$  的变化  
 $\gamma = 1, \Gamma = 0.2\lambda, T = 20\lambda^{-1}, \omega_1 - \omega_2 = 10\lambda$

Fig. 1 Influence of  $r$  on the cavity field spectrum of an initial two-mode squeezed vacuum field. Parameters  $\gamma = 1, \Gamma = 0.2\lambda, T = 20\lambda^{-1}, \omega_1 - \omega_2 = 10\lambda$

### 3 数值结果与讨论

压缩因子  $r$  的变化对腔场谱结构的影响, 其数值计算结果由图 1 给出。由于参数  $r$  增大时两模光

场都增强, 所以两模腔场谱的峰高都增大。但峰的个数和峰位都不随其变化, 表明谱结构与初始场强无关。这与未计及交流斯塔克位移时非简并拉曼耦合模型的腔场谱明显不同, 后者的频率随两模初始场强的变化而改变。

当描写斯塔克位移的参数  $\gamma$  改变时, 腔场谱结构会发生明显的变化(图 2)。在  $\gamma$  较小时, 模 I 腔场谱为不等高双峰结构, 模 II 只有单峰; 在  $\gamma = 1$  时, 两模腔场谱都为双峰结构, 四峰高度近似相等; 当  $\gamma$  继续增大时, 模 I 的双峰逐渐靠近最后合并为

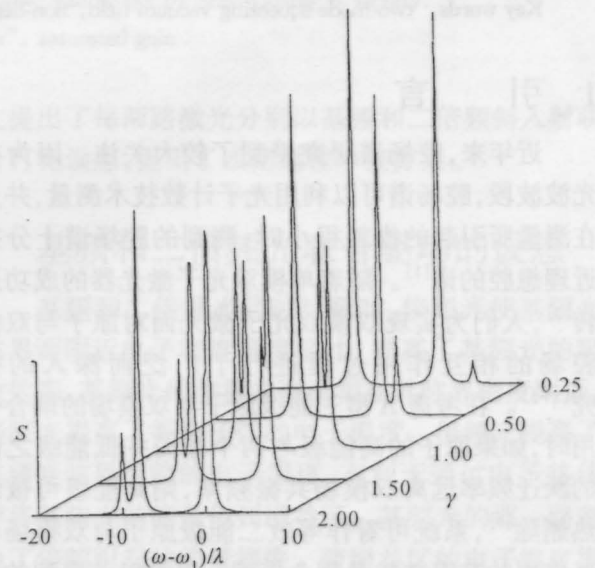


图2 交流斯塔克位移对腔场谱结构的影响

$$r = 2, \Gamma = 0.2\lambda, T = 20\lambda^{-1}, \omega_1 - \omega_2 = 10\lambda$$

Fig. 2 Influence of ac Stark shift on the cavity field spectrum. Parameters,  $r = 2, \Gamma = 0.2\lambda, T = 20\lambda^{-1}, \omega_1 - \omega_2 = 10\lambda$

### 4 结 论

在高 Q 腔中的双模压缩真空场与三能级原子非简并拉曼耦合相互作用过程中,交流斯塔克位移对腔场谱结构有明显的影响。在描写斯塔克位移的参数  $\gamma$  一定时,初始场强的变化不改变腔场谱的频率,这与未计及交流斯塔克位移的非简并拉曼耦合 J-C 模型的腔场谱明显不同。当  $\gamma$  值改变时,谱结构会有明显的变化。在  $\gamma$  较小时,模 I 腔场谱为不等高双峰结构,模 II 只有单峰;在  $\gamma = 1$  时,两模腔场谱都为双峰结构;当  $\gamma$  继续增大时,模 I 的双峰逐渐靠近最后合并为单峰,模 II 双峰的裂距缓慢加大。

### 参 考 文 献

- 1 M. M. Ashraf. Cavity field spectra of the nondegenerate two-photon Jaynes-Cummings model. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(6):5116~5121
- 2 D. J. Gauthier, Qilin Wu, S. E. Morrin *et al.*. Realization of a continuous-wave, two-photon optical laser. *Phys. Rev. Lett.*, 1992,**68**(4):464~467

- 3 M. M. Ashraf, M. S. K. Razmi. Atomic-dipole squeezing and emission spectra of the nondegenerate two-photon Jaynes-Cummings model. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **45**(11):8121~8128
- 4 Feng Jian, Song Tongqiang, Gao Yunfeng. Emission spectra of an atom in the nondegenerate two-photon Jaynes-Cummings model inside a high-Q cavity field with a Kerr-like medium. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1996, **25**(11):976~981 (in Chinese)
- 5 Huang Chunjia, Zhou Ming, Li Jiangfan *et al.*. Quantum properties of light in the system of two-mode squeezing vacuum field interacting with two coupling-atoms. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2000, **49**(11):2159~2164 (in Chinese)
- 6 Li Gaoxiang, Peng Jinsheng. Influences of ac Stark shifts on coherent population trapping in the atom-field coupling system via Raman two-photon processes. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **52**(1):465~471
- 7 Zhang Zhiming. Modified effective Hamiltonian for the nondegenerate Raman-coupled model. *Acta Sinica Quantum Optica* (量子光学学报), 1996, **2**(1):32~36 (in Chinese)
- 8 J. H. Eberly, K. Wodkiewicz. The time-dependent physical spectrum of light. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(9):1252~1261