

文章编号: 0253-2239(2005)08-1131-5

非等同两原子与光场相互作用系统的腔场谱^{*}

李悦科 张桂明 高云峰

(聊城大学教育传播技术学院, 聊城 252059)

摘要: 研究了两个二能级原子与单模腔场具有不同耦合常量系统的腔场谱, 讨论了量子化光场分别处于不同的光子数态时腔场谱结构随相对耦合常量 R 变化的新特性。发现随着 R 由 0 到 1 的增加, 腔场谱各对应峰峰位相对腔场原共振频率 ω_0 对称偏移; 真空场 ($n=0$) 的峰高在 $0 < R < 0.3$ 内变化较快, 其拉比峰个数按 $2 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ 规律变化; 弱场 ($n=1$) 峰高在 $0 < R < 0.5$ 内变化较快, 其峰数量按 $2 \rightarrow 6 \rightarrow 12 \rightarrow 9 \rightarrow 7$ 规律变化; 强场 ($n=8$) 峰高在 $0 < R < 0.1$ 内改变迅速, 其峰数量按 $2 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 5$ 规律变化, 谱结构显得更加复杂; 进一步的计算表明, 当 $n \gg 8$ 时, 其峰的数量按 $3 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ 规律变化。同时发现, $R=0$ 和 $R=1$ 时, 峰的数量相对较少。各峰峰高之和由最小单调增至最大, 这在物理上反映了原子的协作效应。

关键词: 量子光学; 腔场谱; 非等同两原子; 单模腔场; 原子的协作效应

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

Cavity-Field Spectrum of Two Nonidentical Atoms Interacting with Single-Mode Quantized Radiation Field

Li Yueke Zhang Guiming Gao Yunfeng

(College of Educational Technology and Massmedium, Liaocheng University, Liaocheng 252059)

Abstract: The cavity field spectrum of a pair of two-level atoms interacting with single-mode field with different coupling constants is studied. The new properties of the spectrum structure are discussed when the fields are initially in various number states. It is found that the shifts of peak-positions are symmetrical with the increase of R from 0 to 1. With the increase of R , the number of the Rabi peaks changes according to $2 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ when the field is vacuum initially; and the peak number changes according to $2 \rightarrow 6 \rightarrow 12 \rightarrow 9 \rightarrow 7$ for weak initial fields; the peak number changes according to $2 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 5$ for strong fields. The peak-height changes rapid when the increase of R is from 0 to 0.3 for vacuum field, from 0 to 0.5 for weak field, and from 0 to 0.1 for strong field. When the photon-number of the initial field is vary large, the peak number changes according to $3 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ with the increase of R . The total height of the peaks increases monotonously with R changing from 0 to 1. The cooperative effect of atoms was shown.

Key words: quantum optics; cavity field spectrum; two nonidentical atoms; single-mode field; cooperative effect of atoms

1 引 言

光谱是人类探究物质结构、揭示光与物质相互作用本质的有力工具, 也是研究光与原子相互作用系统量子特性的重要手段, 因而受到了普遍关注。目前, 腔场谱的研究作为获得原子与光场相互作用信息的重要方法得到较多的重视^[1~9], 并且已成为当前量子电动力学中十分活跃的前沿课题之一。这是因为, 在微波波段腔场谱不易直接测量, 需通过对原子状态

的测量来推断腔场的量子性质, 因而研究腔内原子的辐射谱有重要意义, 而在光波段利用光子计数器可直接测量腔场谱, 且能测得十分准确的结果^[2]。测量腔场谱不仅有利于加深对腔内量子化光场自身特性的理解, 还可推断光与原子相互作用的性质。最近 Li 等^[10]分析了 Jaynes-Cummings(J-C)模型原子辐射谱和腔场谱结构的异同, 并首次明确提出了测量腔场谱的方法, 这使腔场谱的研究不仅具有学术上的价值, 而且具有实际意义。

* 山东省自然科学基金(Y2004A09)资助课题。

作者简介: 李悦科(1966~), 男, 山东冠县人, 副教授, 主要从事量子光学的科研与物理教学工作。E-mail: lyk@lctu.edu.cn

收稿日期: 2004-07-19; 收到修改稿日期: 2004-12-13

近年来,有不少研究者对非等同双原子与单模或双模腔场相互作用的辐射谱进行了深入研究^[11~14],得出了令人满意的结论。最近,文献[3]研究了两原子双光子 J-C 模型的腔场谱,这对应于两原子间距小于或等于原子跃迁波长的情况,此时两原子与单模腔场具有相同的耦合常量,同时应计入原子间的偶极相互作用,得到真空场拉比峰为 4 个,强场($n \gg 1$)时为 3 峰,弱场时为 5 峰结构的结论^[3],这充分显示了两原子系统腔场谱的复杂性。而在多数情况下,高 Q 腔内嵌制的两个原子是动态的,两原子所处的位置以及它们间的距离也是不断变化的。这样,由于两原子所处的位置不同,两者所感受到的电场强度也不相同^[15],因此,两个原子与腔场间应具有不同的耦合常量($g_2 \neq g_1$)^[14]。本文研究了与单模腔场具有不同耦合常量的两原子相互作用系统的腔场谱。

2 模型和腔场谱的计算公式

在绝热近似和旋转波近似下,一个注入单模辐射场的高 Q 腔内嵌制两个二能级原子。两原子相距较远时,原子间的偶极相互作用可以忽略,两个原子与腔场间具有不同的耦合常量。此时系统的哈密顿量为^[16](取 $\hbar=1$)

$$H = \omega_0 a^\dagger a + \frac{1}{2} \omega_0 \sum_{i=1}^2 \sigma_{z,i} + \sum_{i=1}^2 g_i (\sigma_i^+ a + \sigma_i a^-), \quad (1)$$

其中 ω_0 为原子跃迁及腔场的共振频率, a, a^\dagger 分别为腔场光子的湮没和产生算符; $\sigma_{z,i}, \sigma_i^+, \sigma_i^-$ 分别为第 i 个原子的赝自旋算符; g_i 为第 i 个原子与腔场间的耦合常量。

系统的基矢可取为

$$\begin{cases} |\psi_1^n\rangle = |+, +, n\rangle, \\ |\psi_2^n\rangle = |+, -, n+1\rangle, \\ |\psi_3^n\rangle = |-, +, n+1\rangle, \\ |\psi_4^n\rangle = |-, -, n+2\rangle, \end{cases} \quad (2)$$

(2) 式中三个量子数 $+$ ($-$) 和 n 分别表示两原子所处的能级和腔场的光子数。

1) 式的本征方程为

$$H |\varphi_j^n\rangle = E_j^n |\varphi_j^n\rangle, \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (3)$$

$$|\varphi_j^n\rangle = \sum_{m=1}^4 C_{jm}^n |\psi_m^n\rangle, \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (4)$$

E_j^n 和 $|\varphi_j^n\rangle$ 分别表示 H 的本征值和本征态,其表达式可用标准方法求出。

$$E_j^n = \omega_0 (n+1) \pm$$

$$g_1 \sqrt{(1+R^2)(2n+3) \pm A^n} / \sqrt{2}, \quad (5)$$

(5) 式中, $R = g_2/g_1$, R 称为相对耦合常量,当 j 取 2, 4(1, 3) 时根号外取 $+$ ($-$), 当 j 取 3, 4(1, 2) 时根号内取 $+$ ($-$)。

$$\begin{cases} C_{11}^n = C_{21}^n = -C_{34}^n = -C_{44}^n = \\ \quad -\sqrt{1+(1+R^2)/A^n}/2, \\ -C_{12}^n = C_{22}^n = C_{33}^n = -C_{43}^n = \\ \quad -\sqrt{1-(1-R^2)/A^n}/2, \\ C_{13}^n = -C_{23}^n = -C_{32}^n = C_{42}^n = \\ \quad \sqrt{1+(1-R^2)/A^n}/2, \\ C_{14}^n = C_{24}^n = C_{31}^n = C_{41}^n = \\ \quad \sqrt{1-(1+R^2)/A^n}/a, \end{cases} \quad (6)$$

其中 $A^n = \sqrt{(1+R^2)^2 + 16R^2(n^2 + 3n + 2)}$ 。

按照 Eberly 物理谱的定义^[17],该系统的腔场谱按下式计算:

$$S(\omega) = 2\Gamma \int_0^T dt' \exp[-(\Gamma - i\omega)(T - t')] \times \int_0^T dt \exp[-(\Gamma + i\omega)(T - t)] \times \langle \phi(0) | a^\dagger(t') a(t) | \phi(0) \rangle, \quad (7)$$

其中 Γ 为谱仪的带宽, T 为测量时间, $|\phi(0)\rangle$ 为系统的初态。

若系统初始时刻两原子处于激发态而腔场处于

任意态,即 $|\phi(0)\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} q_n |+, +, n\rangle$ 。

经繁琐计算得

$$S(\omega) = 2\Gamma \sum_{n=0}^{\infty} P(n) F(n), \quad (8a)$$

$$F(n) = \sum_{m=1}^4 \left| \sum_{j=1}^4 G_{jm}^n Z_{jm}^n \right|^2, \quad (8b)$$

$$G_{jm}^n = \sum_{k=1}^4 C_{j1}^n C_{jk}^n C_{mk}^{n-1} b_k^n, \quad (8c)$$

$$Z_{jm}^n = \frac{-e^{-\Gamma T} + e^{i[\omega - (E_j^n - E_m^{n-1})]T}}{\Gamma + i[\omega - (E_j^n - E_m^{n-1})]}, \quad (8d)$$

(8) 式中 $b_1^n = \sqrt{n}, b_2^n = b_3^n = \sqrt{n+1}, b_4^n = \sqrt{n+2}$, $P(n) = q_n^+ q_n$ 为初始光场的光子数分布。

3 谱结构的数值计算与结果讨论

利用(5)式,(6)式,(8)式可以计算腔场处于任意态, R 取不同数值时的腔场谱。由 8(a) 式知,任意态

可看成数态叠加的结果,其特性可由数态腔场谱分析得出,在此仅给出腔场光子处于数态时腔场谱的计算结果,如图 1 ~ 图 3(取 $\Gamma = 0.1g_1, T = 40/g_1$)。

3.1 $n = 0$, 即真空场拉比峰

图 1 给出了真空场中两原子相对耦合常量 R 取不同数值时腔场谱的数值计算结果,结果表明,随着 R 的增大,腔场谱峰相位对共振频率 ω_0 对称偏移,在 $0 < R < 0.4$ 内各峰高变化明显, $R > 0.5$ 后峰高变化缓慢。峰的数量按 $2 \rightarrow 6 \rightarrow 4$ 的规律变化。这是由于当 $R = 0$ 时,相当于单个原子与腔场相互作用的情况,即标准的真空场 J-C 模型,其结果与文献 [1,2] 给出的结论完全相同,腔场谱呈现对称 2 峰结构;而当 $R = 1$ 时,相应于两个等同原子与腔场相互作用的情况,即推广的真空场 J-C 模型,其结果与文献 [3] 的结论完全相同,腔场谱呈现对称 4 峰结构;而当 $0 < R < 1$ 时, R 由 0 逐渐增大,相当于第二个原子逐渐由弱到强的参与腔场相互作用的结果。此时,由于第二个原子感受到的电场强度逐渐增大,对腔场谱结构的影响越来越显著,使得腔场谱的峰高、峰位、峰的数量发生显著变化。这充分显示了谱结构对原子相对耦合常量的依赖性。

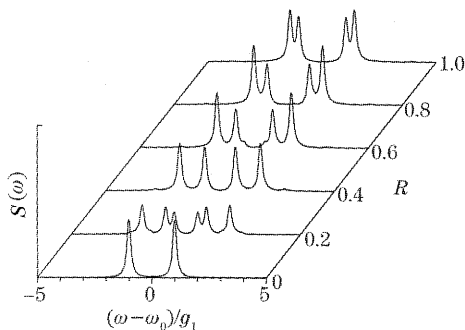


图 1 R 取不同数值时真空场($n=0$)的腔场谱结构
Fig.1 Cavity field spectrum $S(\omega)$ versus R for $n=0$

此时,真空场系统存在

$$(j \rightarrow m \Rightarrow 1, 2, 3, 4 \rightarrow 2, 3, 4)$$

共 $3 \times 4 = 12$ 种跃迁,拉比峰理论上应有 12 峰,但由于 (j, m) 分别取 $(1, 3)$ 、 $(2, 4)$ 、 $(3, 2)$ 、 $(3, 4)$ 、 $(4, 2)$ 、 $(4, 3)$ 时峰高几乎为零,故实际只可见到 6 峰,其中 (j, m) 分别取 $(2, 1)$ 、 $(2, 2)$ 时,对应两峰

由最强逐渐减弱直至消失,其余 4 峰均由 0 逐渐增强到各自的极大值; (j, m) 分别取 $(1, 4)$ 、 $(2, 3)$ 时对应的峰总比取 $(3, 3)$ 、 $(4, 4)$ 时高,这就形成了图 1 所示的对称谱结构。其峰位的近似变化规律如(9)式所示:

$$(\omega_{jm} - \omega_0)/g_1 \doteq \begin{bmatrix} R-1 & \times & -2+0.59R \\ 1-R & 2-0.59R & \times \\ \times & -0.41-0.62R & \times \\ \times & \times & 0.41+0.62R \end{bmatrix}, \quad (9)$$

“ \times ”代表峰高近于零的峰位,下同。可以看出峰位是关于共振频率 ω_0 对称偏移的。

3.2 $n = 1$, 即弱场腔场谱

图 2 给出两原子与量子化光场相对耦合常量取 R 不同数值, $n=1$ 时腔场谱的数值计算结果。结果表明,随着 R 的增大,各峰峰高在 $0 < R < 0.5$ 内单调变化显著, $R > 0.5$ 后变化缓慢。系统存在 $(j \rightarrow m \Rightarrow 1, 2, 3, 4 \rightarrow 1, 2, 3, 4)$ 共 $4 \times 4 = 16$ 种跃迁,理论上应出现 16 峰谱结构,但由于 (j, m) 分别取 $(1, 2)$ 、 $(2, 1)$ 、 $(3, 4)$ 、 $(4, 3)$ 时峰高几乎为零,故实际最多可见 12 峰,其中 (j, m) 分别取 $(1, 1)$ 、 $(2, 2)$ 时,对应两峰由最强略有减弱而趋于恒定,其余 10 峰均由 0 逐渐增强到各自的极大值;其中 (j, m) 分别取 $(3, 3)$ 、 $(4, 4)$ 时对应峰总比其余 8 峰高,峰的数量按 $2 \rightarrow 6 \rightarrow 12 \rightarrow 9 \rightarrow 7$ 的规律变化,这都是第二个原子逐渐参与系统相互作用的结果。

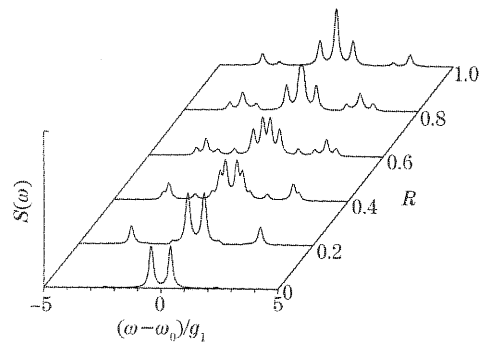


图 2 R 取不同数值时弱场($n=1$)的腔场谱结构
Fig.2 Cavity field spectrum $S(\omega)$ versus R for ($n=1$)

数值计算还表明,各峰峰位对称偏移,偏移的近似规律如(10)式:

$$(\omega_{jm} - \omega_0)/g_1 \doteq \begin{bmatrix} -0.41+0.41R & \times & 2.45R & -2.83+0.38R \\ \times & 0.41-0.41R & 2.83-0.38R & -2.45R \\ -0.73-2.3R & -2.73-0.43R & -0.32-0.4R & \times \\ 2.73+0.43R & 0.73+2.3R & \times & 0.32+0.4R \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3.3 $n \gg 1$, 即强场腔场谱

图 3 给出 $n=8$, R 取不同数值时腔场谱的数值计算结果。分析可知, 随着 R 的增大, 峰高在 $0 < R < 0.1$ 内单调急剧变化, 峰位对称偏移。峰的数量按 $2 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 5$ 的规律变化。在 $0.1 < R < 1$ 内峰的高度基本保持不变, 有 4 个峰的峰位对称偏移显著。

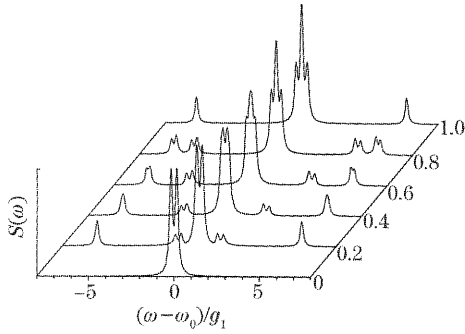


图 3 R 取不同数值时强场 ($n=8$) 的腔场谱结构

Fig. 3 Cavity field spectrum $S(\omega)$ versus R for $n=8$

当 $n \gg 8$ 时, 峰的数量按 $3 \rightarrow 5 \rightarrow 3$ 的规律变化。随着 R 的增大, 在 $0 < R < 0.05$ (甚至更小的范围) 内峰高单调急剧变化, 在 $0.05 < R < 1$ 内高度基本保持不变; 中心经典共振峰峰位不变, 最外侧两峰基本定位于 $\pm 2\sqrt{n}$, 内侧两峰基本定位于 $\pm 2\sqrt{n}R$, 如 (11) 式:

$$(\omega_{jm} - \omega_0)/g_1 \doteq \begin{bmatrix} 0 & \times & 2\sqrt{n}R & -2\sqrt{n} \\ \times & 0 & 2\sqrt{n} & -2\sqrt{n}R \\ -2\sqrt{n}R & -2\sqrt{n} & 0 & \times \\ 2\sqrt{n} & 2\sqrt{n}R & \times & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

可见 R 对强场也有不同程度的影响, R 反映的是第二个原子参与相互作用的强度。

4 腔场谱特性的解析分析

4.1 峰的数量与对称性

由谱结构表达式 (8d) 知, 峰的位置由 $\omega_{jm} = E_j^n - E_m^n$ ($j, m=1, 2, 3, 4$; 真空场 $m \neq 1$) 决定。再由能量表达式 (5) 知, 该系统存在 ($j \rightarrow m \Rightarrow 1, 2, 3, 4 \rightarrow 1, 2, 3, 4$) 共 $4 \times 4 = 16$ 种跃迁, 因而理论分析腔场谱应有 16 峰 (真空场 12 峰)。

数值计算结果表明, 随 R 的增加部分峰位会接近或重合, 部分峰高为 0、减弱或消失, 结果使得腔场谱实际至多可呈现 12 峰 (拉比峰可呈现 6 峰)。

两个原子虽然与单模腔场具有不同的耦合常

量, 但研究发现其谱结构总是关于中心频率 ω_0 左右对称。由 (5) 式、(8d) 式知, 峰位偏离中心频率 ω_0 的数值 $\Delta_{jm} = (E_j^n - E_m^n - \omega_0)/g_1$ 的等量关系由 (12) 式表达:

$$\begin{bmatrix} -\Delta_{11} & -\Delta_{12} & \Delta_{13} & -\Delta_{14} \\ -\Delta_{31} & -\Delta_{32} & -\Delta_{33} & -\Delta_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta_{22} & \Delta_{21} & -\Delta_{24} & \Delta_{23} \\ \Delta_{42} & \Delta_{41} & \Delta_{44} & \Delta_{43} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

由 (6) 式、(8c) 式知, 相对峰高 $F_{jm} = |G_{jm}^n|^2$ 的等量关系如 (13) 式所示:

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & F_{14} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} & F_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{22} & F_{21} & F_{24} & F_{23} \\ F_{42} & F_{41} & F_{44} & F_{43} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

比较如 (12)、(13) 式知, 凡是相对峰位关于 ω_0 对称峰的相对峰高都相等, 因此, 腔场谱结构总是关于中心频率 ω_0 对称。

4.2 原子的协作效应的验证

图 4 给出了 $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$ 时各峰峰高之和与 R 的关系曲线。结果表明, 随 R 的逐渐增大, 各峰峰高之和也随之增大。这是因为当 $R=0$ 时, 相当于第 2 个原子与腔场隔离, 只有单个原子与腔场相互作用, 此时各峰峰高之和最低; 当 R 逐渐增大时, 第 2 个原子参与相互作用的程度越来越强, 各峰峰高之和逐渐增大; 当 $R=1$ 时, 第 2 个原子与第 1 个原子对腔场谱做出同样的贡献, 此时各峰峰高之和达到最大值, 这一现象, 在物理上反映了原子的协作效应 (cooperative effect)^[12]。

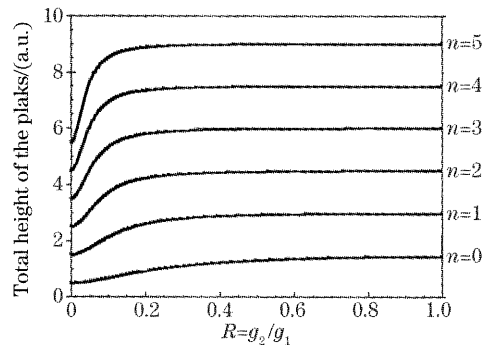


图 4 n 取不同数值时各峰峰高之和与 R 的关系曲线

Fig. 4 Total height of the peaks versus R for $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$

5 结 论

本文研究了两个二能级原子与单模腔场具有不同耦合常量时, 系统的腔场谱的量子特性, 给出了量子化光场分别处于不同数态时的计算结果, 发现随 R

的增强,腔场谱峰位、峰高都单调对称变化,峰高在 R 较小(弱场在 $0 < R < 0.5$ 内,强场在 $0 < R < 0.1$ 内)时变化尤为显著, R 较大时变化不明显;利用腔场谱特性证实了原子的协作效应;同时,还理论分析了该相互作用系统腔场谱一般可呈对称 16 峰(真空场 12 峰),而实际至多可展现 12 峰(真空场 6 峰)结构的原因。

参 考 文 献

- 1 Tahira Nasreen, M. S. K. Razmi. Atomic emission and cavity field spectra for a two-photon Jaynes-Cummings model in the presence of the Stark shift [J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1993, **10**(7): 1292~1300
- 2 M. M. Ashraf. Cavity field spectra of the nondegenerate two-photon Jaynes-Cummings model [J]. *Phys. Rev. (A)*, 1994, **50**(6): 5116~5121
- 3 Gao Yunfeng, Feng Jian, Song Tongqiang. Cavity field spectra of the two-atom two-photon Jaynes-Cummings model [J]. *Acta Physica Sinica*, 1999, **48**(9): 1650~1658 (in Chinese)
高云峰,冯 健,宋同强. 两原子双光子 Jaynes-Cummings 模型的腔场谱[J]. *物理学报*, 1999, **48**(9): 1650~1658
- 4 Gao Yunfeng, Feng Jian, Shi Shuren. Cavity field spectra of an atom interacting with two mode field through raman process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, **50**(8): 1496~1500 (in Chinese)
高云峰,冯 健,史舒人. 二能级原子与双模场喇曼相互作用模型的腔场谱[J]. *物理学报*, 2001, **50**(8): 1496~1500
- 5 Yunfeng Gao, Jian Feng, Shuren Shi. Cavity field spectra of the intensity-dependent two-mode Jaynes-Cummings model [J]. *Int. J. Theoretical Physics*, 2002, **41**(5): 867~875
- 6 Gao Yunfeng, Feng Jian. Influence of AC-Stark shift on cavity field spectra in the non-degenerate Raman process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(3): 762~766 (in Chinese)
高云峰,冯 健. 非简并拉曼过程中交流斯塔克位移对腔场谱的影响[J]. *物理学报*, 2004, **53**(3): 762~766
- 7 Li Yueke, Zhang Guiming, Gao Yunfeng. Effects of self-phase modulation on the cavity field spectra of the nondegenerate two-photon J-C model [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2004, **21**(5): 627~632 (in Chinese)
李悦科,张桂明,高云峰. 相位自调制效应对两模双光子 J-C 模型腔场谱的影响[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(5): 627~632
- 8 Li Yueke, Zhang Guiming, Gao Yunfeng. Cavity field spectrum of a pair of coupled atoms Jaynes-Cummings model [J]. *J. Atomic and Molecular Physics* 2004, **21**(4): 705~709 (in Chinese)
李悦科,张桂明,高云峰. 耦合双原子 Jaynes-Cummings 模型的腔场谱[J]. *原子与分子物理学报*, 2004, **21**(4): 705~709
- 9 Zhang Guiming, Li Yueke, Gao Yunfeng. Cavity field spectrum of two different atoms interacting with a two-mode field through Raman process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(11): 3739~3743 (in Chinese)
张桂明,李悦科,高云峰. 非等同双原子与双模腔场拉曼相互作用模型的腔场谱[J]. *物理学报*, 2004, **53**(11): 3739~3743
- 10 Li Fuli, Gao Shaoyan, Zhao Yongtao. Atomic emission and cavity field spectra of the Jaynes-Cummings model [J]. *Chinese Physics*, 2003, **12**(8): 872~878
- 11 Song Tongqiang, Feng Jian, Wang Wenzheng *et al.*. Dynamical properties of the atoms and the field in the Raman interaction of two atoms with a single-mode cavity field [J]. *Acta Physica Sinica*, 1995, **44**(7): 1056~1063 (in Chinese)
宋同强,冯 健,王文正等. 双原子与单模腔场 Raman 相互作用过程中原子与场的动力学特性 [J]. *物理学报*, 1995, **44**(7): 1056~1063
- 12 Feng Jian, Song Tongqiang, Wang Wenzheng *et al.*. Emission spectra of two atoms interacting with two modes of the cavity field through Raman process ($g_1 \neq g_2$) [J]. *Acta Physica Sinica*, 1996, **45**(8): 1304~1312 (in Chinese)
冯 健,宋同强,王文正. 两原子与双模腔场喇曼相互作用 ($g_1 \neq g_2$) 的辐射谱 [J]. *物理学报*, 1996, **45**(8): 1304~1312
- 13 Feng Jian, Song Tongqiang, Gao Yunfeng. Multi photon emission spectrum of two atoms interacting with two modes of radiation field with different coupling constants [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, **26**(10): 893~901
- 14 Gao Yunfeng, Song Tongqiang, Feng Jian. Emission spectra of two atoms interacting with two-mode cavity field with different coupling constants [J]. *Chinese J. Atomic and Molecular Physics*, 1997, **14**(2): 323~329 (in Chinese)
高云峰,宋同强,冯 健. 与双模腔场具有不同耦合常量的两原子辐射谱 [J]. *原子与分子物理学报*, 1997, **14**(2): 323~329
- 15 Luo Zhenfei, Xu Zhizhan, Xu Lei. Raman interaction of a pair of two-level atoms with a radiation field [J]. *Acta Physica Sinica*, 1992, **41**(12): 1950~1954 (in Chinese)
罗振飞,徐至展,徐 磊. 两个双能级原子与辐射场的喇曼相互作用 [J]. *物理学报*, 1992, **41**(12): 1950~1954
- 16 Luo Zhenfei, Xu Zhizhan, Xu Lei *et al.*. A general theory of spontaneous-emission line shape of two atoms [J]. *Acta Physica Sinica*, 1993, **42**(6): 925~929 (in Chinese)
罗振飞,徐至展,徐 磊. 两原子自发辐射线型的一般理论 [J]. *物理学报*, 1993, **42**(6): 925~929
- 17 J. H. Eberly, K. Wodkiewicz. The time-dependent physical spectrum of light [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1977, **67**(9): 1252~1261