

文章编号: 0253-2239(2007)04-0727-8

克尔介质中双模纠缠相干光与贝尔态原子相互作用系统的光子统计特性*

林继成^{1,2} 曹卓良² 何龙庆¹

(¹ 南京晓庄学院物理系, 南京 210017
² 安庆师范学院物理与电气工程学院, 安庆 246011)

摘要: 运用全量子理论并结合数值计算方法,研究了克尔介质腔中处于贝尔态的两个全同二能级纠缠原子与双模纠缠相干光场相互作用系统的光子统计特性。讨论了双原子体系的初态、初始光场的平均光子数、双模纠缠相干光场的纠缠程度以及克尔介质与双模光场的耦合强度对光子统计特性的影响。结果表明:忽略克尔介质的作用时,只有当双原子体系的初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 或 $|\beta_{11}\rangle$ 时,在一定的条件下才可出现光子的反聚束效应,而当双原子体系的初态为 $|\beta_{00}\rangle$ 、 $|\beta_{10}\rangle$ 时,光场在其演化过程中不出现光子的反聚束效应。而当考虑克尔介质的作用时,四种初态下光场演化过程中均有可能出现光子的反聚束效应。光子的反聚束效应出现的次数、时间和深度极其敏感地依赖于初始光场的平均光子数和克尔介质与双模光场的耦合强度,同时也受到双模纠缠光场的纠缠程度的影响。

关键词: 量子光学; 光子统计; 克尔介质; 贝尔态; 双模纠缠相干光场

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

Statistic Properties of Photon in the System of the Two-Mode Entangled Coherent Field Interacting with Atoms in Bell States in Kerr Medium

Lin Jicheng^{1,2} Cao Zhuoliang² He Longqing¹

(¹ Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017
² School of Physics and Electric Engineering, Anqing Teachers College, Anqing 246011)

Abstract: The statistic properties of photon in the system of two-mode entangled coherent field interacting with two identical two-level atoms in the Bell state in Kerr medium are investigated by means of quantum theory and numerical method. Induced by the atomic initial state, mean photon numbers of field, the degree of the entanglement for the entangled coherent fields, and the coupling strength of the Kerr medium with the light field, the effects on the statistic properties of photon are discussed. The results indicate that, if the medium is not present, photon anti-bunching effect does not appear for the Bell state $|\beta_{00}\rangle$ or $|\beta_{10}\rangle$, there can appear the photon anti-bunching effect under some conditions for the Bell state $|\beta_{01}\rangle$ or $|\beta_{11}\rangle$. If the medium is considered, there can appear the photon anti-bunching effect for all of initial states. In the case, the number of occurring, interval and intensity of the photon anti-bunching effects sensitively depend on the coupling strength of the Kerr medium with the light field, the mean photon numbers and the degree of entanglement of the two-mode entangled coherent field.

Key words: quantum optics; statistic properties of photon; Kerr medium; Bell states; two-mode entangled coherent field

1 引言

Jaynes-Cummings(J-C)模型^[1]是描述原子与光场相互作用的精确可解的理想模型,对这个模型及其

拓展形式的深入研究,已经揭示出原子与光场相互作用系统的许多重要的非经典特性^[2~8],光场的压缩就是其中最重要的非经典特性之一。由于压缩态光场

* 安徽省自然科学基金(03042401)和安徽省教育厅重点项目基金(2004kj005zd)资助课题。

作者简介: 林继成(1956—),男,浙江台州人,副教授,主要从事量子光学方面的研究。E-mail: lcc126@163.com

收稿日期: 2006-06-01; 收到修改稿日期: 2006-09-07

的噪声低于最小量子极限,因此在光通信、高精度干涉测量以及弱信号检测等方面有着潜在的应用前景,多年来对压缩态的研究一直受到人们的高度关注。量子纠缠现象首先被爱因斯坦-波尔多斯基-罗森(Einstein-Podolsky-Rosen, EPR)^[9] 和薛定谔^[10] 注意到,它是量子力学有别于经典物理的最奇特的特征之一。在量子信息学中,纠缠态扮演着极其重要的角色,在隐形传态、稠密编码、密钥分配以及量子纠错等方面起着关键作用,是实现量子通信的理论基础。近年来,人们对原子与纠缠相干光场的作用体系的压缩特性、纠缠原子与光场作用体系的压缩特性进行了详细的研究^[11~18]。介质环境为原子与场相互作用系统的真实环境,研究介质的存在对系统的量子特性的影响具有实际意义,因此人们对克尔介质对这些压缩特性以及其它量子特性的影响也进行了讨论^[19~21]。对纠缠光与纠缠原子相互作用动力学的研究,不仅能加深对量子力学的理解,而且能为量子信息学提供基础性的研究,因此本文对克尔介质腔中双模纠缠相干光场与贝尔态原子相互作用系统的光场统计特性进行了研究,讨论了克尔介质与双模纠缠相干辐射场的耦合强度、光场的初始光子数、双模纠缠光场的纠缠程度和原子的初始状态对光子统计性质的影响。

2 理论模型和态矢量

考虑在充满克尔介质的高 Q 腔中,两个全同的处在某个贝尔态的二能级原子与双模纠缠相干光场构成的系统,原子和克尔介质均与光场具有耦合作用。其中原子与光场通过双模双光子共振跃迁过程相耦合,而克尔介质与光场的作用在绝热近似下可用二次谐振子来描述^[20]。当忽略两全同原子间偶极相互作用时,在 J-C 模型和旋波近似条件下,系统

的哈密顿量可表为(取 $\hbar=1$)

$$H = H_0 + V, \quad (1)$$

$$H_0 = \sum_{i=1}^2 \omega_i a_i^\dagger a_i + \sum_{i=1}^2 \omega_0 s_3^{(i)}, \quad (2)$$

$$V = g \sum_{i=1}^2 (a_1 a_2 s_+^{(i)} + a_1^\dagger a_2^\dagger s_-^{(i)}) + \chi \prod_{i=1}^2 a_i^\dagger a_i, \quad (3)$$

其中 a_i 和 a_i^\dagger 分别表示第 i ($i=1,2$) 模光子的湮没算符和产生算符; $s_3^{(i)}$ 和 $s_{\pm}^{(i)}$ 是第 i ($i=1,2$) 个原子的能量算符和跃迁算符; ω_i 是第 i ($i=1,2$) 模光子的频率, ω_0 为二能级原子的本征跃迁频率; g 是辐射场与原子偶极共振相互作用的耦合常量; χ 是表征克尔介质与双模光场相互作用强度的耦合常量,而(3)式的最后一项 $\chi \prod_{i=1}^2 a_i^\dagger a_i$ 是在绝热近似和忽略相位自调制效应近似下克尔介质与双模光场的相互作用项^[21]。

通过么正变换可得,在相互作用绘景中当仅考虑双光子共振情况(即 $\omega_0 = \omega_1 + \omega_2$)时,相互作用哈密顿量为

$$V^I(t) = g \sum_{i=1}^2 (a_1 a_2 s_+^{(i)} + a_1^\dagger a_2^\dagger s_-^{(i)}) + \chi \prod_{i=1}^2 a_i^\dagger a_i, \quad (4)$$

设初始时刻双原子体系处于如下贝尔态之一:

$$\begin{aligned} |\beta_{00}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|-, -\rangle + |+, +\rangle), \\ |\beta_{01}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|-, +\rangle + |+, -\rangle), \\ |\beta_{10}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|-, -\rangle - |+, +\rangle), \\ |\beta_{11}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|-, +\rangle - |+, -\rangle), \end{aligned} \quad (5)$$

而光场为双模纠缠相干光场^[15],即

$$|\psi_F(0)\rangle = \alpha |\alpha_1\rangle |\alpha_2\rangle + \beta |-\alpha_1\rangle |-\alpha_2\rangle = \sum_{n_1, n_2=0}^{\infty} F_{n_1, n_2} |n_1, n_2\rangle, \quad (6)$$

其中

$$F_{n_1, n_2} = \exp[-(m^2 + n^2)/2] \cdot \frac{\alpha n^{n_1} m^{n_2} + \beta (-n)^{n_1} (-m)^{n_2}}{\sqrt{n_1! n_2!}}, \quad (7)$$

$$\alpha_1 = m \exp(i\psi_1), \quad \alpha_2 = n \exp(i\psi_2),$$

这里, m 和 n 为光场两个模的平均光子数的平方根, ψ_1 和 ψ_2 是光场两个模的相位因子,为方便计已取 $\psi_1 = \psi_2 = 0$ 。(7)式中的 α 和 β 是描述双模纠缠相干光场纠缠度的参量(设为实数), $\alpha, \beta \in [0, 1]$, 且满足 $\alpha^2 + \beta^2 = 1$ 。因此,系统的初态可表为

$$|\psi_{AF}(0)\rangle = |\beta_{ij}\rangle \otimes |\psi_F(0)\rangle, \quad (i, j = 0, 1) \quad (8)$$

系统在任意时刻 t 的态矢可表为

$$|\psi_{AF}^I(t)\rangle = \sum_{n_1, n_2} [a_{n_1, n_2}(t) |-, -, n_1, n_2\rangle + b_{n_1-1, n_2-1}(t) |+, -, n_1-1, n_2-1\rangle + c_{n_1-1, n_2-1}(t) |-, +, n_1-1, n_2-1\rangle + d_{n_1-2, n_2-2}(t) |+, +, n_1-2, n_2-2\rangle], \quad (9)$$

将(4)式和(9)式代入相互作用绘景下的薛定谔方程

$$i \frac{\partial}{\partial t} |\psi_{AF}^I(t)\rangle = V^I(t) |\psi_{AF}^I(t)\rangle, \quad (10)$$

解之得

$$\begin{cases} a_{n_1, n_2}(t) = A_1 \exp(-i\gamma_1 gt) + A_2 \exp(-i\gamma_2 gt) + A_3 \exp(-i\gamma_3 gt), \\ b_{n_1-1, n_2-1}(t) = B_1 \exp(-i\gamma_1 gt) + B_2 \exp(-i\gamma_2 gt) + B_3 \exp(-i\gamma_3 gt), \\ c_{n_1-1, n_2-1}(t) = C_1 \exp(-i\gamma_1 gt) + C_2 \exp(-i\gamma_2 gt) + C_3 \exp(-i\gamma_3 gt), \\ d_{n_1-2, n_2-2}(t) = D_1 \exp(-i\gamma_1 gt) + D_2 \exp(-i\gamma_2 gt) + D_3 \exp(-i\gamma_3 gt), \end{cases} \quad (11)$$

其中 $\lambda = \frac{\chi}{g}$, $\gamma_1 = 2r \cos \phi - \frac{B}{3}$, $\gamma_2 = 2r \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) - \frac{B}{3}$, $\gamma_3 = 2r \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) - \frac{B}{3}$,

$$r = \sqrt{\frac{|P|}{3}}, \quad \phi = \frac{1}{3} \arccos\left(-\frac{3}{2} \sqrt{\frac{3Q^2}{|P^3|}}\right), \quad B = \lambda(N_1^2 + N_2^2 + N_3^2),$$

$$N_1 = \sqrt{n_1 n_2}, \quad N_2 = \sqrt{(n_1-1)(n_2-1)}, \quad N_3 = \sqrt{(n_1-2)(n_2-2)},$$

$$P = C - \frac{B^2}{3}, \quad Q = D + \frac{2B^3}{27} - \frac{BC}{3},$$

$$C = \lambda^2(N_1^2 N_2^2 + N_2^2 N_3^2 + N_3^2 N_1^2) - 2(N_2^2 + N_3^2), \quad D = \lambda N_1^2 [\lambda^2 N_2^2 N_3^2 - 2(N_2^2 + N_3^2)],$$

而 $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, C_1, C_2, C_3, D_1, D_2, D_3$ 均为待定常数, 它们的值由系统初始状态确定。将这些值代入(11)式即可得到四组对应于不同初态的系数 $a_{n_1, n_2}, b_{n_1-1, n_2-1}, c_{n_1-1, n_2-1}, d_{n_1-2, n_2-2}$, 将每组系数代入(9)式即可得到在四种原子初态下, 系统在任意时刻的态矢。

3 光子的统计性质

3.1 光子的聚束效应与反聚束效应

光子的聚束与反聚束效应可用二阶关联函数来描述^[22], 双模光场第 i 模的二阶关联函数定义为^[15]

$$g_i^{(2)}(t) = \frac{\langle (a_i^+ a_i)^2 \rangle - \langle a_i^+ a_i \rangle^2}{\langle a_i^+ a_i \rangle^2}, \quad (i = 1, 2) \quad (12)$$

$$\text{令 } G_i(t) = g_i^{(2)}(t) - 1, \quad (i = 1, 2) \quad (13)$$

若满足 $G_i(t) > 0$, 则称光子呈现聚束效应, 此时光场呈现出经典特性; 若满足 $G_i(t) < 0$, 则称光子呈现反聚束效应, 此时光场呈现出纯量子特性; 若 $G_i(t) = 0$, 光场处于经典和非经典之间的临界状态。

由(9)式可算出下列算符平均值:

$$\begin{aligned} \langle (a_1^+ a_1)^2 \rangle &= \sum_{n_1, n_2} \{n_1^2 |a_{n_1, n_2}|^2 + (n_1-1)^2 |b_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_1-1)^2 |c_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_1-2)^2 |d_{n_1-2, n_2-2}|^2\}, \\ \langle (a_2^+ a_2)^2 \rangle &= \sum_{n_1, n_2} \{n_2^2 |a_{n_1, n_2}|^2 + (n_2-1)^2 |b_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_2-1)^2 |c_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_2-2)^2 |d_{n_1-2, n_2-2}|^2\}, \\ \langle a_1^+ a_1 \rangle &= \sum_{n_1, n_2} \{n_1 |a_{n_1, n_2}|^2 + (n_1-1) |b_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_1-1) |c_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_1-2) |d_{n_1-2, n_2-2}|^2\}, \\ \langle a_2^+ a_2 \rangle &= \sum_{n_1, n_2} \{n_2 |a_{n_1, n_2}|^2 + (n_2-1) |b_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_2-1) |c_{n_1-1, n_2-1}|^2 + (n_2-2) |d_{n_1-2, n_2-2}|^2\}, \end{aligned} \quad (14)$$

依据(12)式~(14)式, 运用数值计算方法即可计算出 $G_1(t)$ 和 $G_2(t)$ 。

通过对计算结果的分析发现, 如果忽略克尔介质的作用, 当原子初态为 $|\beta_{00}\rangle, |\beta_{10}\rangle$ 时, 则光场在其演化过程中不会出现光子的反聚束效应。当原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 或 $|\beta_{11}\rangle$ 时, 在满足一定的条件时可出现光子的反聚束效应; 若计及克尔介质的作用, 则在四种初态下满足一定的条件时, 均可出现光子的反聚束效应(见图 1, 所有图的坐标均为归一化的量)。这表明, 克尔介质的存在对系统的量子特性有着十分显著的影响。

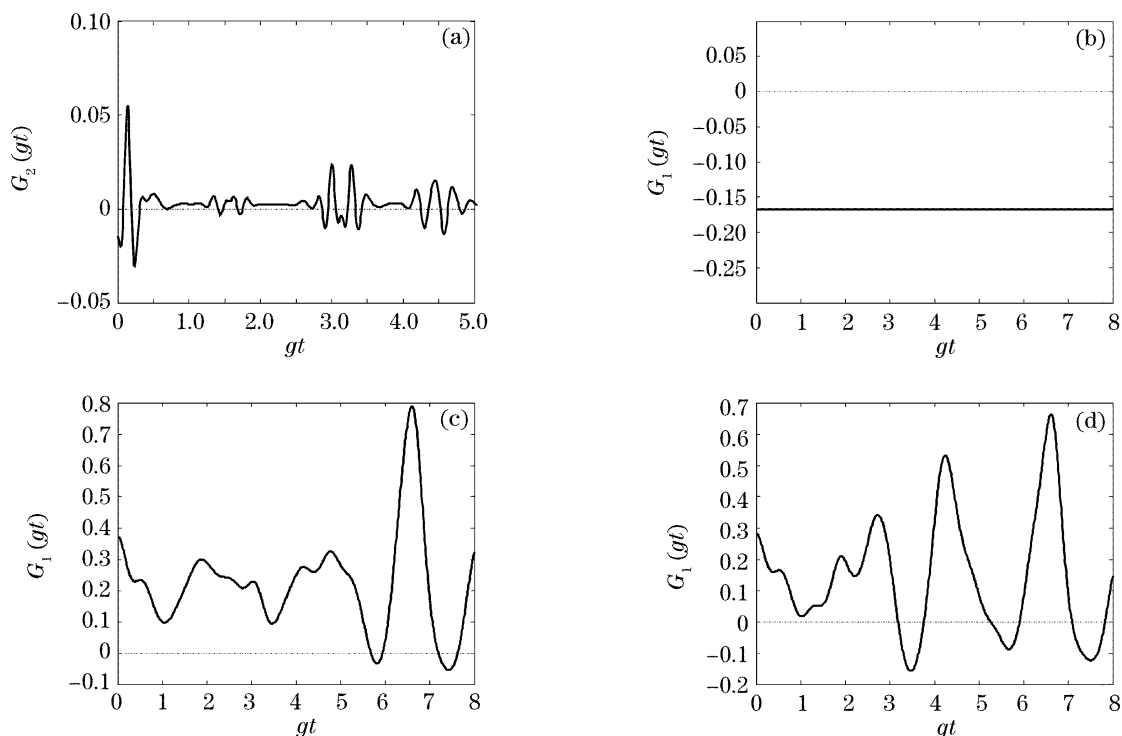


图 1 四种初态下均有可能出现光子反聚束效应

Fig. 1 There can appear the photon anti-bunching effect for all of initial states

下面以原子初态 $|\beta_{01}\rangle$ 为例, 详细描述初始光场的平均光子数、双模纠缠光场的纠缠程度以及克尔介质与双模光场的耦合强度对光场演化过程中出现的反聚束效应的影响。

图 2(a)~图 2(d) 给出了原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 且 $\alpha=0.1$ 和 $\lambda=\chi/g=0.1$ 时, 初始光场的平均光子数

m 和 n 对 G_2 的时间演化曲线的影响。当平均光子数较少时, G_2 的值在零点附近来回振荡, 表现为模 2 光场在演化过程中光子的聚束效应和反聚束效应交替出现[如图 2(a)]。随着平均光子数的增加, 振荡的幅度迅速减小且曲线中心缓慢下移, 使得光子出现聚束效应的时

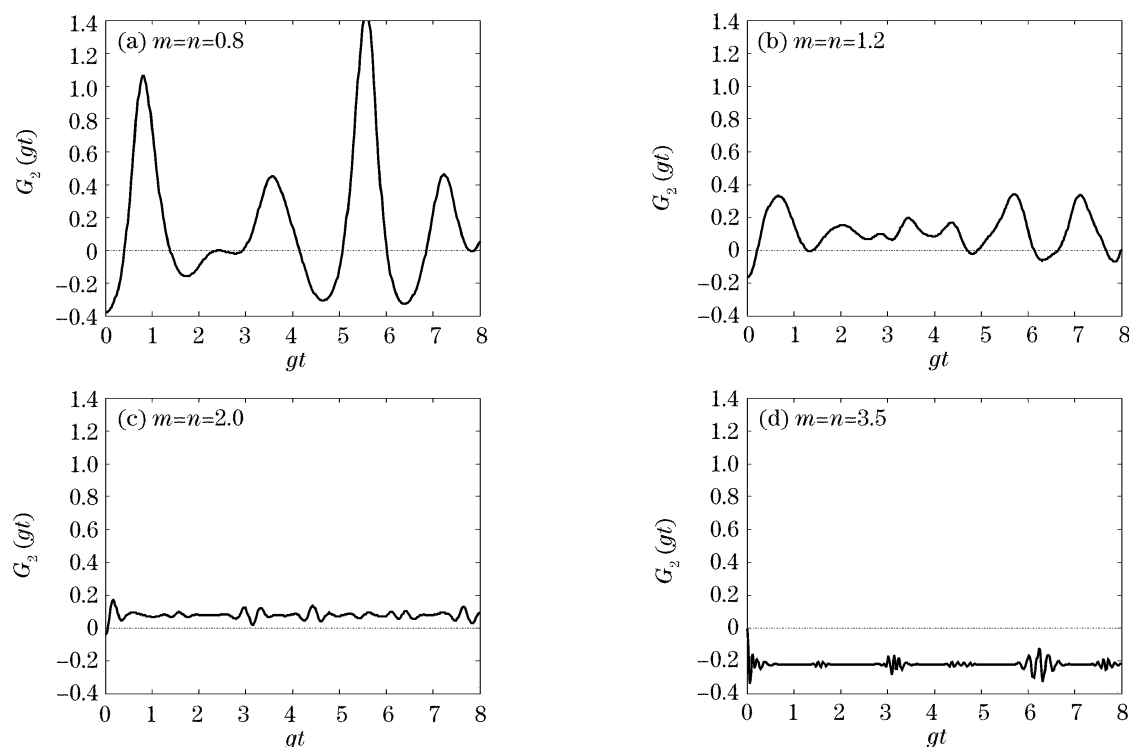


图 2 G_2 的时间演化曲线(原子初态 $|\beta_{01}\rangle$, $\alpha=0.1$, $\lambda=\chi/g=0.1$)

Fig. 2 The time evolution of G_2 (atomic initial state $|\beta_{01}\rangle$, $\alpha=0.1$, $\lambda=\chi/g=0.1$)

间片减小[如图 2(a)~图 2(c)]。当平均光子数增大到某个值时,除了开始阶段一个极短时间内出现光子的反聚束效应外,在随后的光场演化过程中不再出现光子的反聚束效应。然而,当平均光子数进一步增大时,整个曲线将移至 gt 轴的下方[如图 2(d)]。也就是说,当平均光子数大于某个值时,光场的演化过程将不再出现聚束效应而自始至终呈现反聚束效应。由图 2(d)还可以看出,当平均光子数增加到一定值后, G_2 的时间演化将呈现周期性的

崩塌-回复现象。

图 3(a)~图 3(b)给出了原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 且取 $m=n=1.2$ 和 $\lambda=\chi/g=0.1$ 时,光场的纠缠程度对 G_2 的时间演化曲线的影响。可以看出,光场的纠缠程度的大小对演化曲线的振荡频率和曲线中心位置基本上没有影响而仅仅对振幅产生影响。当光场纠缠程度增大时, gt 轴上各处的振幅随之做不均匀地增减,在图示条件下使得光场在演化过程中光子呈现反聚束效应的次数变多时间变长。

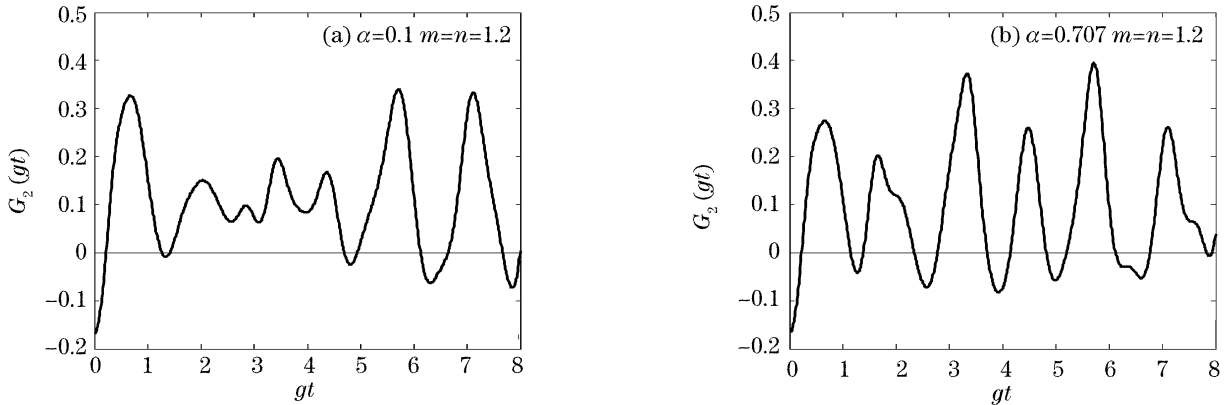


图 3 G_2 的时间演化曲线(原子初态 $|\beta_{01}\rangle, m=n=1.2, \lambda=\chi/g=0.1$)

Fig. 3 The time evolution of G_2 (atomic initial state $|\beta_{01}\rangle, m=n=1.2, \lambda=\chi/g=0.1$)

图 4(a)~图 4(d)给出了原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 且 $m=n=2$ 和 $\alpha=0.2$ 时,克尔介质与双模光场的耦合强度对 G_2 的时间演化曲线的影响。可以看出,当克尔介质与双模光场的耦合强度很小时,对 G_2 的时间

演化曲线的影响可以忽略[如图 4(a)、图 4(b)];当克尔介质与双模光场的耦合达到一定强度时,对 G_2 时间演化曲线的影响非常明显,主要表现为随耦合强度的增大振荡幅度迅速减小而曲线中心下移,从

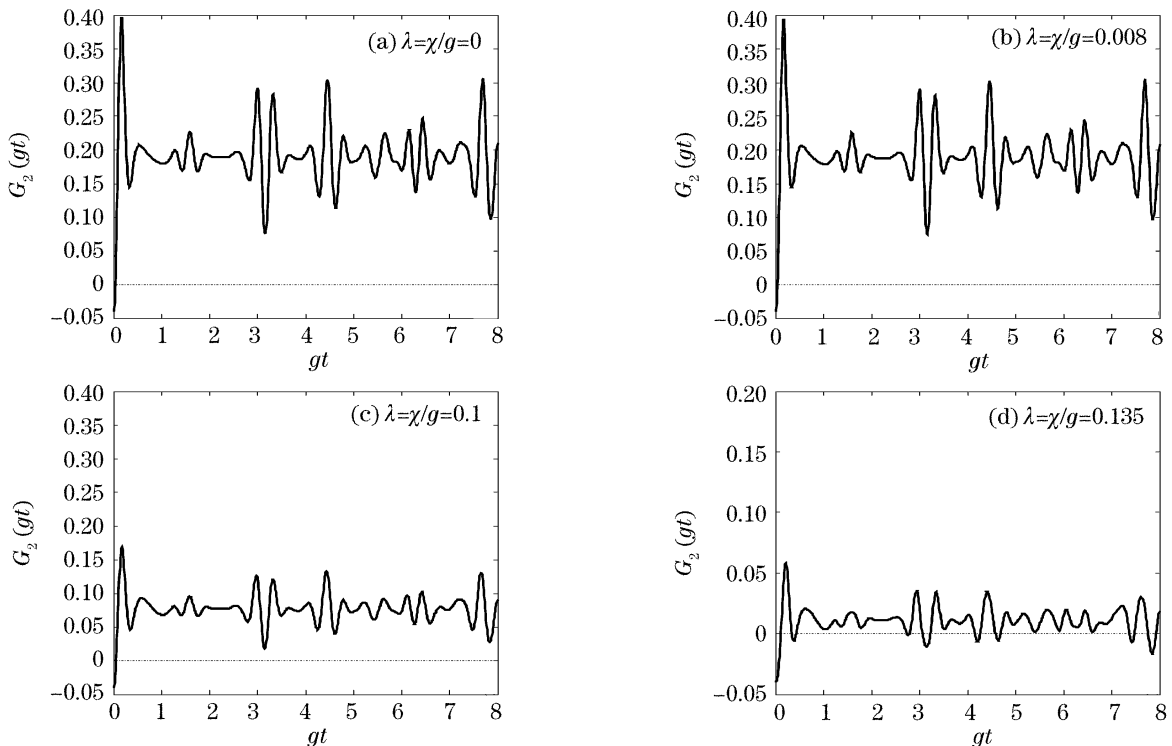


图 4 G_2 的时间演化曲线(原子初态 $|\beta_{01}\rangle, m=n=2, \alpha=0.1$)

Fig. 4 The time evolution of G_2 (atomic initial state $|\beta_{01}\rangle, m=n=2, \alpha=0.1$)

而使得出现反聚束效应的次数增多时间变长[如图 4(c)、图 4(d)]。

3.2 模间相干性

双模光场模间相干度的定义为^[15]

$$g_{12}^{(2)}(t) = \frac{\langle a_1^+ a_2^+ a_1 a_2 \rangle}{\langle a_1^+ a_1 \rangle \langle a_2^+ a_2 \rangle}, \quad (15)$$

令:

$$G_{12}(t) = g_{12}^{(2)}(t) - 1, \quad (16)$$

若满足 $G_{12}(t) > 0$, 则称双模光场两模间呈现正相关; 反之, 若满足 $G_{12}(t) < 0$, 则称双模光场两模间呈现负相关。

由(9)式可以算出下列算符平均值:

$$\begin{aligned} \langle a_1^+ a_2^+ a_1 a_2 \rangle = & \sum_{n_1, n_2} [(n_1 n_2 | a_{n_1, n_2} |^2 + \\ & (n_1 - 1)(n_2 - 1) | b_{n_1-1, n_2-1} |^2 + \\ & (n_1 - 1)(n_2 - 1) | c_{n_1-1, n_2-1} |^2 + \\ & (n_1 - 2)(n_2 - 2) | d_{n_1-2, n_2-2} |^2], \quad (17) \end{aligned}$$

依据初始条件算出 $a_{n_1, n_2}(t)$ 、 $b_{n_1-1, n_2-1}(t)$ 、 $c_{n_1-1, n_2-1}(t)$ 和 $d_{n_1-2, n_2-2}(t)$, 再利用(15)式~(17)式即可计算出 $G_{12}(t)$ 。

通过对数值计算结果的分析发现, 腔内没有克

尔介质时, 无论原子初态为四种贝尔态中的哪一种, 也无无论在什么样的条件下, 光场在其演化过程中两模间均始终呈现正相关特性。而当加入克尔介质时, 四种初态下光场的演化过程中均有可能呈现模间正相关与负相关交替出现的情况。

图 5(a)~图 5(d)给出了原子初态为 $|\beta_{10}\rangle$ 且 $\alpha=0.2, m=n=2.5$, 克尔介质与光场耦合系数取不同值时的 G_{12} 时间演化曲线。可见, 当耦合系数很小时, 两模间始终保持正相关特性[图 5(a)、图 5(b)]; 随着耦合系数增大, G_{12} 的振荡幅度增大但振荡频率和曲线中心位置基本不变, 模间相关性呈现正相关和负相关交替出现的特性[图 5(c)、图 5(d)]。比较图 5(c)和图 5(f)可以看出光场的初始光子数的多少也会对 G_{12} 的演化曲线产生影响: 随初始光子数的增加, 演化曲线的振幅增大、曲线中心下移, 光场在演化过程中出现模间负相关的次数和时间增加。比较图 5(c)和图 5(e)可见, 光场纠缠程度的大小对 G_{12} 时间演化曲线的振荡频率以及曲线中心位置均没有明显影响, 但振幅会随纠缠程度的增大而略有增大, 使得出现模间负相关的次数变多和时间变长。

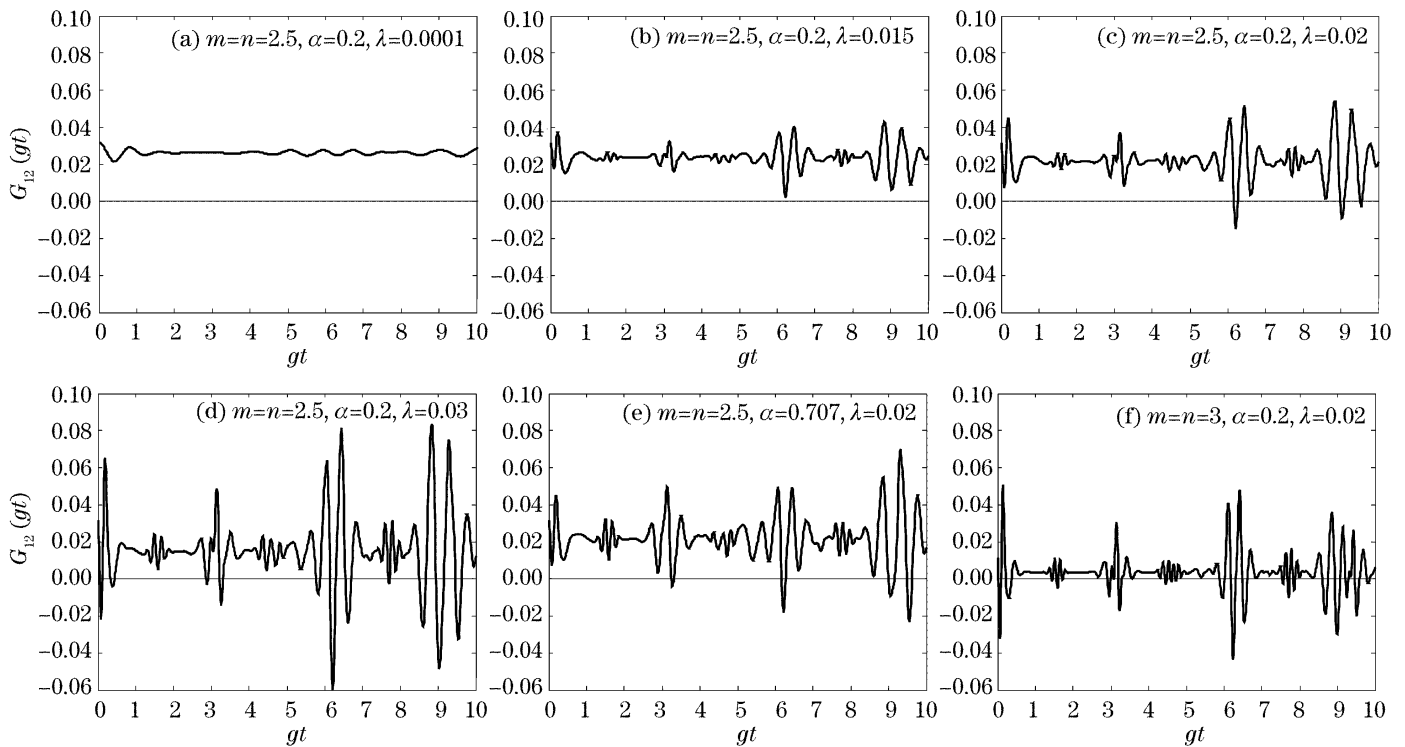


图 5 G_{12} 的时间演化曲线(原子初态 $|\beta_{10}\rangle$)

Fig. 5 The time evolution of G_{12} (atomic initial state $|\beta_{10}\rangle$)

3.3 柯西-施瓦茨(Cauchy-Schwarz)不等式

对于双模光场, 柯西-施瓦茨不等式写为^[15]

$$\langle a_1^+ a_2^+ a_1 a_2 \rangle^2 \leq \langle a_1^{+2} a_1^2 \rangle \langle a_2^{+2} a_2^2 \rangle, \quad (18)$$

令

$$I(t) = \frac{(\langle a_1^{+2} a_1^2 \rangle \langle a_2^{+2} a_2^2 \rangle)^{1/2}}{|\langle a_1^+ a_1 \rangle \langle a_2^+ a_2 \rangle|} - 1, \quad (19)$$

若满足 $I(t) \geq 0$, 则表示柯西-施瓦茨不等式成立, 光场的两模间为经典相关; 反之, 若 $I(t) < 0$, 则表示光

场的两模间为非经典相关。因为

$$\begin{cases} \langle a_1^{+2} a_1^2 \rangle = \langle (a_1^+ a_1)^2 \rangle - \langle a_1^+ a_1 \rangle^2, \\ \langle a_2^{+2} a_2^2 \rangle = \langle (a_2^+ a_2)^2 \rangle - \langle a_2^+ a_2 \rangle^2, \end{cases} \quad (20)$$

所以依据初始条件算出 $a_{n_1, n_2}(t)$ 、 $b_{n_1-1, n_2-1}(t)$ 、 $c_{n_1-1, n_2-1}(t)$ 和 $d_{n_1-2, n_2-2}(t)$, 再利用(19)式、(20)式即可求出 $I(t)$ 。

对计算结果的分析表明: 腔内没有克尔介质时, 当双原子体系的初态为四种贝尔态中的任意一种时, 无论其他条件如何光场在其演化过程中两模间均始终呈现非经典相关特性。而当加入克尔介质时, 光场的演化规律会有所变化, 但两模间保持非经典相关特性这一点没有改变。

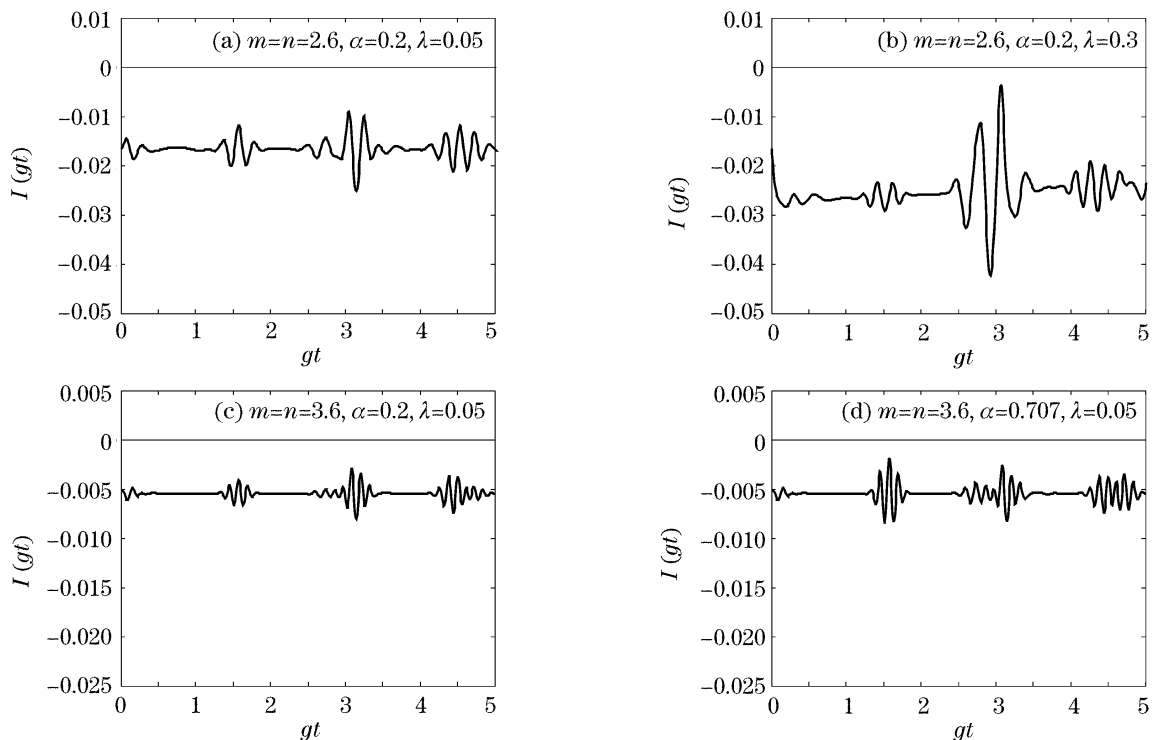


图 6 $I(t)$ 的时间演化曲线(原子初态 $|\beta_{01}\rangle$)

Fig. 6 The time evolution of $I(t)$ (atomic initial state $|\beta_{01}\rangle$)

4 结 论

结果表明, 当克尔介质的作用可忽略时, 若原子初态为 $|\beta_{00}\rangle$ 、 $|\beta_{10}\rangle$, 光场在其演化过程中不会出现光子的反聚束效应; 若原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 或 $|\beta_{11}\rangle$, 在满足一定的条件时可出现光子的反聚束效应。而当克尔介质的作用不可忽略时, 原子初态为任意一种贝尔态均有可能出现光子的反聚束效应。并且在光场的演化过程中, 光子的反聚束效应出现的次数、时间和深度与初始光场的平均光子数、双模纠缠光场的纠缠程度以及克尔介质与双模光场的相互作用的强度密切相关。另外, 当克尔介质的作用可忽略时, 无论原子初态为何种贝尔态, 光场在其演化过程中

图 6(a)~图 6(d) 给出了原子初态为 $|\beta_{01}\rangle$ 时, $I(t)$ 的时间演化曲线。比较图 6(a) 和图 6(b) 可知, 当克尔介质与光场的耦合系数较大时, $I(t)$ 的时间演化曲线的振荡幅度也较大而曲线中心下移, 但整个曲线仍然处在 gt 轴的下方使得两模间保持非经典相关特性不变。比较图 6(a) 和图 6(c) 可知, 随着光场的初始光子数的增多, $I(t)$ 曲线的振荡幅度迅速变小且整个曲线上移向 gt 轴逼近。比较图 6(c) 和图 6(d) 可知, 光场的纠缠程度的大小不影响 $I(t)$ 曲线的振荡频率和中心位置, 但振荡幅度会随着纠缠程度的增大而呈现少量的非均匀增加, 但同样不会改变两模间非经典相关特性。

两模间均始终呈现正相关特性; 而当克尔介质的作用不可忽略时, 四种初态下光场的演化过程中均有可能呈现模间正相关与负相关交替出现的情况。当原子初态为四种贝尔态中的任意一种时, 无论腔内有无克尔介质, 也无论其它条件如何, 双模光场在其演化过程中两模间始终呈现非经典相关特性。

参 考 文 献

- 1 E. T. Jaynes, F. W. Cummings. Comparison of quantum and semiclassical radiation theory with application to the beam maser [J]. *Proc IEEE*, 1963, **51**(1): 89~109
- 2 D. F. Walls. Squeezed states of light [J]. *Nature*, 1983, **306**(5940): 141~146
- 3 Ligan Wu, H. J. Kimble, J. L. Hall *et al.*. Generation of

- squeezed states by parametric down conversion[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **57**(20): 2520~2523
- 4 Zhou Peng, Peng Jinsheng. Evolution of the multiphoton Jaynes-Comings model[J]. *Acta Optica Sinica*, 1990, **10**(9): 837~844 (in Chinese)
周 鹏, 彭金生. 多光子 Jaynes-Comings 模型的演化[J]. *光学学报*, 1990, **10**(9): 837~844
- 5 Xu Jingping, Yang Yaping. The time-dependent atom-field coupling J-C model with an initial squeezing state; two-photon process[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(2): 251~255 (in Chinese)
许静平, 羊亚平. 压缩态光场变耦合系数双光子 J-C 模型性质[J]. *光学学报*, 2005, **25**(2): 251~255
- 6 Tian Yonghong, Peng Jinsheng. Phase properties of two two-level atoms interacting with two-mode cavity fields via multiphoton process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(5): 583~591 (in Chinese)
田永红, 彭金生. 两个原子与双模腔场多光子相互作用过程中光场的相位性质[J]. *光学学报*, 2000, **20**(5): 583~591
- 7 Sun Jingwen, Yang Qingyi, Ding Liangen. Anti-bunching effects of the photon-depleted squeezed vacuum states[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1573~1576 (in Chinese)
孙敬文, 杨庆怡, 丁良恩. 减光子压缩真空态的反群聚效应[J]. *光学学报*, 2005, **25**(11): 1573~1576
- 8 Zhang Lihui, Gan Zhongwei, Li Gaoxiang. The Tavis-Cummings model entropy property in a phase damping cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 993~999 (in Chinese)
张立辉, 甘仲惟, 李高翔. 相位损耗腔中 Tavis-Cummings 模型的熵特性[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7): 993~999
- 9 A. Einstein, B. Podolsky, N. C Rosen. An quantum-mechanical description of physical reality be considered complete[J]. *Phys. Rev.*, 1935, **47**(10): 777~780
- 10 E. Schrödinger. Die gegenwertige situation in der quantenmechanik [J]. *Naturwissenschaften*, 1935, **23**(50): 807~812, 823~828, 844~849
- 11 Dong Chuanhua. Dynamic behavior of a system of three-level atoms interaction with light field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(2): 142~149 (in Chinese)
董传华. 耦合三能级原子与光场相互作用系统的动力学行为[J]. *光学学报*, 2003, **23**(2): 142~149
- 12 Shan Chuanjia, Xia Yunjie. The entanglement character of two entangled atoms in Tavis-Cummings model [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4): 1585~1590 (in Chinese)
单传家, 夏云杰. Tavis-Cummings 模型中两纠缠原子纠缠的演化特性[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4): 1585~1590
- 13 Li Yongping, Xia Yunjie, He Jinyu. Influence of a virtual photon field on the entangle properties in a system of two mode squeezed vacuum field interacting with atoms[J]. *J. Atomic Molecular Physics*, 2005, **22**(3): 551~555 (in Chinese)
李永平, 夏云杰, 贺金玉. 虚光场对双模压缩真空场与原子相互作用系统纠缠特性的影响[J]. *原子与分子物理学报*, 2005, **22**(3): 551~555
- 14 Zheng Xiaohu, Cao Zhuoliang. Dipole squeezing of the system of the two-mode entangled coherent state interacting with a V-type three-level atom [J]. *J. Atomic Molecular Physics*, 2004, **21**(4): 570~574 (in Chinese)
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
- 15 Zheng Xiaohu, Cao Zhuoliang. The statistics of photon of entangled fields interacting with a three-level atom in Kerr medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(3): 419~425 (in Chinese)
郑小虎, 曹卓良. 克尔介质中纠缠光与三能级原子作用的光子统计[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 419~425
- 16 Liu Tangkun, Wang Jisuo, Zhan Mingsheng. Squeezing properties in a system of entangled atoms interacting with optical field[J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(3): 396~401 (in Chinese)
刘堂昆, 王继锁, 詹明生. 纠缠原子与光场作用体系的压缩特性[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(3): 396~401
- 17 Lai Yunzhong, Zhou Wei. Dynamics of two-mode SU(1,1) coherent state interacting with a three-level cascade atom [J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(10): 1323~1326 (in Chinese)
赖云忠, 周 伟. 双模 SU(1,1) 相干态场与级联三能级原子相互作用的动力学[J]. *光学学报*, 1997, **17**(10): 1323~1326
- 18 Fang Shudong, Cao Zhuoliang. Light squeezing of the system of the two-mode odd-even entangled coherent states field interacting with a three-level atom[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1697~2001 (in Chinese)
方曙东, 曹卓良. 三能级原子与奇偶纠缠相干光作用的光场压缩[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1697~2001
- 19 Fang Jiayuan, Huang Chunjia, Huang Zuhong *et al.*. Statistic properties of photon in the system of two coupling atoms interacting with two-mode squeezed vacuum field in Kerr medium [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(4): 1081~1087 (in Chinese)
方家元, 黄春佳, 黄祖洪 等. Kerr 介质中耦合双原子与双模压缩真空场相互作用系统的光子统计性质[J]. *物理学报*, 2004, **53**(4): 1081~1087
- 20 Liu Tangkun, Peng Jinsheng. Time evolution of population number and dipole squeezing of atom in Kerr-like medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(8): 991~996 (in Chinese)
刘堂昆, 彭金生. 类克尔介质中原子布居数的演化和偶极压缩效应[J]. *光学学报*, 1997, **17**(8): 991~996
- 21 Huang Chunjia, Wen Li. Influences of Kerr medium on the quantum properties of field of the system of two-mode squeezed vacuum field interacting with four-level atom [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, **51**(9): 1978~1983 (in Chinese)
黄春佳, 文 立. Kerr 介质对双模压缩真空场与四能级原子相互作用系统中光场量子特性的影响[J]. *物理学报*, 2002, **51**(9): 1978~1983
- 22 Peng Jinsheng, Li Gaoxiang. *Introduction of Modern Quantum Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1996. 156~162 (in Chinese)
彭金生, 李高翔. 近代量子光学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 156~162