

虚光场对双模压缩真空场与原子相互作用系统中光子统计性质的影响

黄春佳 厉江帆 周 明 方家元

(长沙电力学院物理与信息工程系,长沙 410077)
(2001 年 4 月 13 日收到,2001 年 5 月 24 日收到修改稿)

研究了非旋波近似下双模压缩真空场与二能级原子相互作用系统中光子的统计性质,着重讨论了虚光场效应对光子统计性质的影响.数值计算结果表明,虚光场对光子统计性质的影响主要表现为量子噪声,量子噪声的大小依赖于光场的初始压缩因子和原子的初始状态,且与原子-光场耦合强度有关.

关键词:非旋波近似,双模压缩真空场,二能级原子,光子统计性质

PACC:4250

1 引 言

近年来大量的研究表明,虚光子过程是存在于光场与原子相互作用系统中的实实在在的物理过程,它可以导致相互作用系统中光场和原子量子性质的改变以及在物理过程中引起量子噪声^[1-8].因此,有关光场与原子相互作用过程中虚光场效应的研究是一个既有理论价值又有实际意义的课题,已越来越受到人们的广泛关注.另一方面,压缩态光场在光信息领域有着诱人的潜在应用价值,有关压缩态光场与原子相互作用的研究是人们关注的又一热点课题^[7-20].如众所周知,压缩真空场与原子相互作用系统在本质上反映压缩态光场与原子相互作用系统中的基本特征.我们在文献^[7,8]中研究了非旋波近似下双模压缩真空场中二能级原子的偶极压缩与相干俘获以及光场的压缩特性,本文进一步采用非旋波近似下的双光子 J-C 模型,研究了双模压缩真空场与二能级原子相互作用系统中光子的统计性质,分析了光子统计性质与系统初始状态及系统本身性质的关系以及虚光子过程对光子统计性质的影响.

2 理论模型与状态矢量

在非旋波近似下,二能级原子与双模光场相互作用系统的哈密顿量为

$$H = \omega_0 S_3 + \omega_1 a_1^+ a_1 + \omega_2 a_2^+ a_2 + \epsilon (a_1^+ a_2^+ S_- + a_1 a_2 S_+ + a_1^+ a_2^+ S_+ + a_1 a_2 S_-), \quad (1)$$

其中 a_i 和 a_i^+ 分别为频率为 ω_i ($i = 1, 2$) 的光场的湮没算符和产生算符, S_3 和 S_{\pm} 为原子的赝自旋算符, ω_0 为原子的本征跃迁频率, ϵ 为原子与光场的耦合系数.

为简便起见,只考虑共振情形,即光场频率 ω_i ($i = 1, 2$) 和原子本征跃迁频率 ω_0 之间满足 $\omega_1 + \omega_2 = \omega_0$ 的条件.将系统的哈密顿量改写为

$$H = H_0 + H_1, \quad (2)$$

其中

$$H_0 = \omega_0 S_3 + \omega_1 a_1^+ a_1 + \omega_2 a_2^+ a_2, \quad (3)$$

$$H_1 = \epsilon (a_1^+ a_2^+ S_- + a_1 a_2 S_+) + \epsilon (a_1^+ a_2^+ S_+ + a_1 a_2 S_-). \quad (4)$$

(4) 式中第二项为非旋波项.在相互作用表象中, H_1 可表示为

$$H_1'(t) = \epsilon (a_1^+ a_2^+ S_- + a_1 a_2 S_+) + \epsilon (a_1^+ a_2^+ S_+ e^{2i\omega_0 t} + a_1 a_2 S_- e^{-2i\omega_0 t}). \quad (5)$$

设初始时刻 ($t = 0$) 原子处于相干叠加态,而光场处于双模压缩真空态,原子-光场耦合系统初始态矢可表示为

$$|\psi(0)\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} f_n \cos(\theta/2) |e, n, n\rangle + \sin(\theta/2) e^{-i\varphi} |g, n, n\rangle, \quad (6)$$

其中

$$f_n = (-e^{i\varphi} \tanh r)^n / \cosh r. \quad (7)$$

在任意 t 时刻,系统的状态演化为

$$|\psi(t)\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} [a_n(t)|e, n, n\rangle + b_n(t)|g, n, n\rangle]. \quad (8)$$

应用逐级迭代理论,求解薛定谔方程,精确到 ε/ω_0 的一次幂项,得到

$$a_n(t) = a_n^{(0)}(t) + a_n^{(1)}(t), \quad (9)$$

其中

$$a_n^{(0)}(t) = f_n \cos(\theta/2) \cos[(n+1)\varepsilon t] - if_{n+1} \sin(\theta/2) e^{-i\varphi} \sin[(n+1)\varepsilon t], \quad (9a)$$

$$a_n^{(1)}(t) = \frac{2n\varepsilon\omega_0}{(n-1)^2\varepsilon^2 - 4\omega_0^2} \{f_{n-1} \sin(\theta/2) e^{-i\varphi} \cdot [e^{2i\omega_0 t} \cos[(n-1)\varepsilon t] - 1] - if_{n-2} \cos(\theta/2) e^{2i\omega_0 t} \sin[(n-1)\varepsilon t]\} \quad (9b)$$

$$b_n(t) = b_n^{(0)}(t) + b_n^{(1)}(t), \quad (10)$$

其中

$$b_n^{(0)}(t) = f_n \sin(\theta/2) e^{-i\varphi} \cos(n\varepsilon t) - if_{n-1} \cos(\theta/2) \sin(n\varepsilon t), \quad (10a)$$

$$b_n^{(1)}(t) = -\frac{\chi(n+1)\varepsilon\omega_0}{(n+2)^2\varepsilon^2 - 4\omega_0^2} \{f_{n+1} \cos(\theta/2) \cdot [e^{-2i\omega_0 t} \cos[(n+2)\varepsilon t] - 1] - if_{n+2} \sin(\theta/2) e^{-(2\omega_0 t + \varphi)} \cdot \sin[(n+2)\varepsilon t]\}. \quad (10b)$$

在(9)式和(10)式中, $a_n^{(0)}(t)$ 和 $b_n^{(0)}(t)$ 反映旋波近似下的实光子过程对概率幅的贡献,而 $a_n^{(1)}(t)$ 和 $b_n^{(1)}(t)$ 则表征由非旋波项所引起的虚光子过程对概率幅的影响.

3 光子的统计性质

为讨论光子的统计性质,分别引入函数

$$G_i(t) = \frac{a_i^{+2} a_i^2}{a_i^+ a_i} - 1 \quad (i = 1, 2), \quad (11)$$

$$G_{12}(t) = \frac{a_1^+ a_2^+ a_1 a_2}{a_1^+ a_1 a_2^+ a_2} - 1, \quad (12)$$

$$K(t) = \frac{(a_1^{+2} a_1^2 a_2^{+2} a_2^2)^{1/2}}{a_1^+ a_2^+ a_1 a_2} - 1, \quad (13)$$

显然, $G_i(t)$ ($i = 1, 2$), $G_{12}(t)$ 和 $K(t)$ 分别表征光场第 i ($i = 1, 2$) 模的二阶相干性质,双模光场模间相关性和模间相关的非经典特性即对 Cauchy-Schwartz 不等式的违背.在给定状态下,若 $G_i(t) > 0$,则光场呈现聚束效应,反之,若 $G_i(t) < 0$,则光场呈现反聚

束效应;若 $G_{12}(t) > 0$,则表明光场两模间呈正相关,反之,若 $G_{12}(t) < 0$,则光场两模间呈负相关;若 $K(t) > 0$,则光场两模间的相关为经典相关;反之,若 $K(t) < 0$,则光场两模间的相关为非经典相关.在由(8)式所描述的状态下(取 $\zeta = 0, \varphi = 0$),对(11)–(13)式作数值计算所得结果如图1所示.

图1(a)–(c)给出了原子处于激发态($\theta = 0$),光场初始压缩因子较小($r = 0.5$)并取 $\varepsilon/\omega_0 = 0.1$ 的情况下, $G_1(t)$, $G_{12}(t)$ 和 $K(t)$ 的时间演化规律.可以看出,当 r 较小时,光子的聚束效应和反聚束效应交替出现,光场两模之间呈现正相关,且这种相关为非经典相关.进一步的计算表明,系统的初始状态(r, θ)对光子的统计性质具有明显的影响.图1(d)–(f)给出了 $G_1(t)$, $G_{12}(t)$ 和 $K(t)$ 对光场的初始压缩因子(r)和原子的初始状态(θ)及(ε/ω_0)值的依赖关系(取 $\varepsilon t = 5$).随着 r 的增大,光子的聚束效应增强而反聚束效应减弱,光场两模之间的相关逐渐加强,当 r 较大时,光子主要呈现聚束效应,但模间相关性质没有明显改变,如图1(d)所示.当原子处于基态($\theta = \pi$)时,光子的聚束效应和模间的相关均为最强,如图1(e)所示.图1(f)表明, (ε/ω_0) 值变化时, G_1 和 G_{12} 均随 (ε/ω_0) 值的增大而呈现准周期性的振荡.从图1(a)–(f)不难看出,系统的初始状态(r, θ)和 (ε/ω_0) 值的变化均不明显改变光场模间相关的非经典特性.

4 虚光场效应对光子统计性质的影响

仔细观察图1(a),并与旋波近似下 $G_i(t)$ 的计算结果^[20]比较,不难发现,图1中 $G_{1-\varepsilon t}$ 曲线上附加有一微小的快速振荡,这就是光场-原子相互作用系统中虚光子过程产生的量子噪声.为了清楚地展示虚光场效应对光子统计性质的影响,分别令

$$\Delta G_i(t) = G_i(t)_{\text{非旋波}} - G_i(t)_{\text{旋波}} \quad (i = 1, 2), \quad (14)$$

$$\Delta G_{12}(t) = G_{12}(t)_{\text{非旋波}} - G_{12}(t)_{\text{旋波}}, \quad (15)$$

$$\Delta K(t) = K(t)_{\text{非旋波}} - K(t)_{\text{旋波}}, \quad (16)$$

显然 ΔG_i ($i = 1, 2$), ΔG_{12} 和 ΔK 分别代表了虚光子过程对第 i 模光场二阶相干性质,双模光场的模间相关性质和模间相关的非经典特性的净的贡献.在由(8)式所描述的状态下(取 $\zeta = 0, \varphi = 0$),对(14)–(16)式作数值计算所得结果如图2所示.

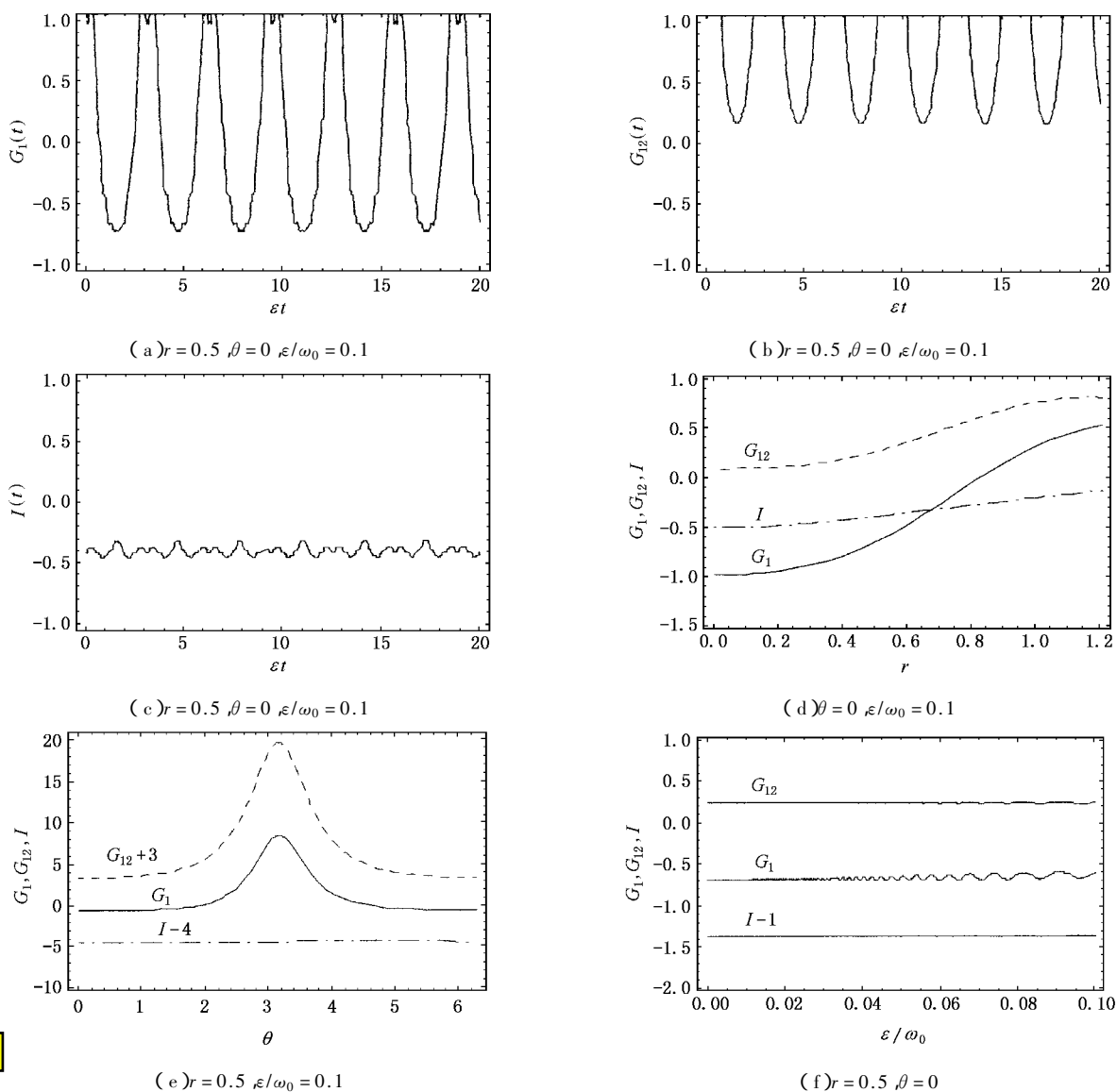


图 1 G_1, G_{12}, I 的时间演化规律及其与系统初态性质的关系

图 1(a)–(c) 给出了原子处于激发态 ($\theta = 0$), 光场初始压缩因子较小 ($r = 0.5$) 并取 $\epsilon/\omega_0 = 0.1$ 的情况下 $\Delta G_1(t)$, $\Delta G_{12}(t)$ 和 $\Delta I(t)$ 的时间演化规律. 可以看出, 虚光子过程不仅对光子聚束和反聚束效应产生明显的影响, 而且也影响光场的模间相关性质, 但对光场模间相关的非经典特性没有实质性的影响. 从图 1(a)–(b) 还可以看出, 虚光子过程所引起的量子噪声呈现出拉比 (Rabi) 振荡型的周期崩塌和回复现象. 进一步的计算表明, 这种量子噪声 Rabi 振荡频率与 (ϵ/ω_0) 成反比, 而崩塌-回复周期与 ϵ 成正比, 但与 ω_0 无关; 量子噪声的大小与光场的初始压缩因子和原子的初始状态密切相关且与 (ϵ/ω_0) 成正比. 图 2(d)–(f) 给出了 $\Delta G_1, \Delta G_{12}$ 和

ΔI 对光场的初始压缩因子 (r) 和原子的初始状态 (θ) 及 (ϵ/ω_0) 值的依赖关系 (取 $\epsilon t = 3$).

5 结 论

本文研究了双模压缩真空场与二能级原子相互作用系统中光子的统计性质以及虚光子过程对光子统计性质的影响. 数值计算结果表明:

1. 初始光场的压缩因子和原子的初始状态及 (ϵ/ω_0) 值对光子的统计性质具有明显的影响. 当原子处于激发态及 r 较小时, 光子的聚束效应和反聚束效应交替出现, 光场两模之间呈现正相关, 且这种相关为非经典相关. 随着 r 的增大, 光子的聚束效应增强而反聚束效应减弱, 光场两模之间的相关

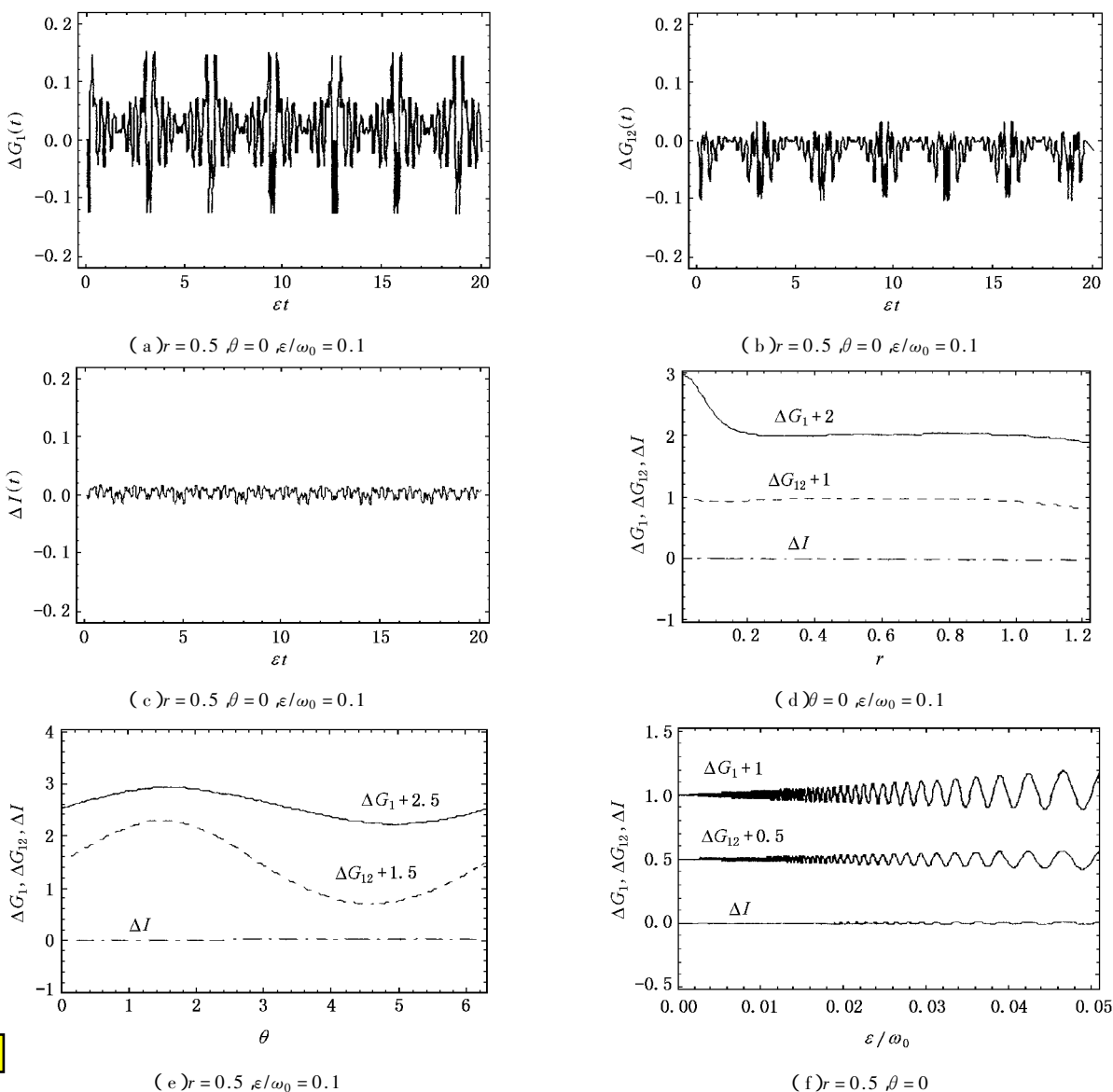


图2 $\Delta G_1, \Delta G_{12}, \Delta I$ 的时间演化规律及其与系统初态性质的关系

逐渐加强,当 r 较大时,光子主要呈现聚束效应,但模间相关性质没有明显改变.当原子处于基态时,光子的聚束效应和模间的相关均为最强.系统的初始状态和 (ϵ/ω_0) 值的变化均不明显改变光场模间相关的非经典特性.

2. 虚光子过程不仅对光子聚束和反聚束效应产生明显的影响,而且也影响光场的模间相关性

质,但对光场模间相关的非经典特性没有实质性的影响.虚光子过程所引起的量子噪声呈现出 Rabi 振荡型的周期崩塌和回复现象,Rabi 振荡的频率与 (ϵ/ω_0) 成反比,而崩塌-回复周期与 ϵ 成正比,但与 ω_0 无关;量子噪声的大小与光场的初始压缩因子和原子的初始状态密切相关且与 (ϵ/ω_0) 成正比.

[1] P. W. Milon, J. R. Ackerhalt, H. W. Galbraith, *Phys. Rev. Lett.*, **50**(1983), 966.
 [2] R. F. Fox, J. Edison, *Phys. Rev.*, **A34**(1986), 482.

[3] J. S. Peng, G. X. Li, *Phys. Rev.*, **A47**(1993), 3167.
 [4] J. S. Peng, G. X. Li, *Acta Physica Sinica*, **42**(1993), 568 (in Chinese)[彭生、李高翔,物理学报, **42**(1993), 568].

- [5] X. M. Fang, M. Feng, L. Shi *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **46** (1997), 2160 (in Chinese) [方细明、冯芒、施磊等, 物理学报, **46**(1997), 2160].
- [6] S. Q. Liu, Q. Guo, X. Y. Tao, C. H. Fu, *Acta Physica Sinica*, **47**(1998), 1481 (in Chinese) [刘三秋、郭琴、陶向阳、付传鸿, 物理学报, **47**(1998), 1481].
- [7] C. J. Huang, M. Zhou *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **49**(2000), 1490 (in Chinese) [黄春佳、周明等, 物理学报, **49**(2000), 1490].
- [8] C. J. Huang, M. Zhou, J. F. Li., *Acta Optica Sinica*, **21**(8) (2001) (in Chinese) [黄春佳、周明、厉江帆, 光学学报, **21**(8) (2001) 待发表].
- [9] H. P. Yuen, *Phys. Rev.*, **A13**(1976), 2226.
- [10] M. L. Hongek, *Phys. Rev.*, **A32**(1985), 974.
- [11] R. London, P. L. Knight, *J. Mod. Opt.*, **34**(1987), 709.
- [12] M. Hillery, *Phys. Rev.*, **A36**(1987), 3796.
- [13] X. P. Yang, X. P. Zheng, *Phys. Lett.*, **A138**(1989), 409.
- [14] M. O. Scully, K. Wodkiewicz, M. S. Zubairy, *Phys. Rev. Lett.*, **60**(1988), 1832.
- [15] L. S. He, X. L. Feng *et al.*, *Acta Physica Sinica*, **47**(1998), 219 (in Chinese) [何林生、冯勋立、吴世雄等, 物理学报, **47**(1998), 219].
- [16] Y. H. Tian, J. S. Peng, *Acta Physica Sinica*, **48**(1999), 2060 (in Chinese) [田永红、彭金生, 物理学报, **48**(1999), 2060].
- [17] X. L. Feng, Z. Z. Xu, Y. X. Xia, *Acta Physica Sinica*, **49**(2000), 235 (in Chinese) [冯勋立、徐至展、夏宇兴, 物理学报, **49**(2000), 235].
- [18] C. J. Huang, J. F. Li, H. Y. He, *Acta Physica Sinica*, **50**(2001), 473 (in Chinese) [黄春佳、厉江帆、贺慧勇, 物理学报, **50**(2001), 473].
- [19] C. J. Huang, M. Zhou, A. L. Liu, *Acta Physica Sinica*, **50**(2001), 1064 (in Chinese) [黄春佳、周明、刘安玲, 物理学报, **50**(2001), 1064].
- [20] Y. H. Tian, J. S. Peng, *Acta Quantum Electronica Sinica*, **17**(2000), 126 (in Chinese) [田永红、彭金生, 量子电子学报, **17**(2000), 126].

INFLUENCE OF A VIRTUAL PHOTON FIELD ON THE STATISTIC PROPERTIES OF PHOTONS IN A SYSTEM OF TWO-MODE SQUEEZED VACUUM FIELD INTERACTING WITH ATOMS

HUANG CHUN-JIA LI JIANG-FAN ZHOU MING FANG JIA-YUAN

(Department of Physics and Information Engineering, Changsha University of Electric Power, Changsha 410077, China)

(Received 13 April 2001 ; revised manuscript received 24 May 2001)

ABSTRACT

The statistic properties of photons in a system of two-mode squeezed vacuum field interacting with a two-level atom are studied without the rotating-wave approximation by means of quantum theory, and the influence of the virtual-photon process on the statistic properties of photons is discussed emphatically. The results obtained using a numerical method indicate that the influence of the virtual-photon process on the statistic properties of photons gives rise to quantum chaos, that is related to the initial state parameters of the system.

Keywords : without the rotating-wave approximation, two-mode squeezed vacuum field, two-level atom, statistic properties of photon

PACC : 4250