

压缩真空注入对光学双稳的影响

陈朝阳 杜春光 张敬涛 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

摘 要 研究了注入压缩真空对介质为 Λ -型三能级原子的环形腔的双稳行为的影响。结果表明, 压缩真空的注入明显增大了双稳迟滞环。可以注入适当的压缩真空来控制双稳。

关键词 压缩真空注入, 输入-输出关系, 光学双稳。

1 引 言

自实验室中成功制备出压缩态光场以来^[1], 对压缩态光场的制备、检测以及它与物质相互作用的研究一直是量子光学研究中的一个重要方面^[2]。目前对处在宽带及窄带压缩真空库场中的二能级、三能级原子的稳态布居、共振荧光光谱等问题已有了较系统的研究^[3-8]。Gardiner^[3]从理论上研究了在宽带压缩真空库场中的二能级原子系统, 指出库场导致原子极化矢量的两个分量以不同的速率衰变, 并影响原子的稳态布居。Bergou 等人^[9]研究了有 N 个二能级原子的环形腔在有压缩真空场注入时的光学双稳, 发现压缩真空注入可以改变光学双稳的范围。Galatola 等人^[10]讨论了压缩真空相位对光学双稳的影响。但是他们都只考虑了二能级原子的情形, 并不能完全揭示出多能级原子介质受压缩真空注入的影响。

本文研究了压缩真空注入对环形腔中介质为 Λ -型三能级原子的双稳行为的影响, 发现压缩真空场的注入可以增大光学双稳的区域, 可以通过压缩真空注入在一定范围内控制腔的双稳特性。

2 模型及方程

考虑如图1所示的环形腔模型^[9]。为了分析的方便, 假定环形腔的镜面3、4的反射率为100%, 镜面1、2的反射率 R 与透过率 T 满足 $R + T = 1$ 。在本模型中, 相干驱动场与压缩真空场通过不同的入口注入腔中, 这种安排在实验上易于操作。腔内为 N 个均匀增宽的 Λ -型三能级原子, 原子的高能级为 $|3\rangle$, 两个低能级分别为 $|1\rangle$ 和 $|2\rangle$ 。 $|3\rangle$ 到 $|1\rangle$ ($|2\rangle$) 的自发辐射速率为 γ_1 (γ_2), 对应的跃迁频率为 ω_1 (ω_2), $|1\rangle$ 与 $|2\rangle$ 之间的单光子跃迁是电偶极禁戒的。本文只考虑原子的两个跃迁 $|3\rangle - |1\rangle$ 与 $|3\rangle - |2\rangle$ 之间量子干涉效应最强时的情形, 即取相干跃迁速率 γ_{12} 为 $(\gamma_1\gamma_2)^{1/2}$ 。

为了分析的方便, 假定压缩真空的中心频率 ω_s 与相干光的频率 ν 相等, 即 $\omega_s = \nu$ 。在实验上, 压缩真空场可由许多方法得到, 例如简并参量放大。压缩真空场算符 b 和 b^\dagger 满足^[2]

$$\langle \hat{k}^+(t)b(t') \rangle = n\delta(t-t'), \quad (1)$$

$$\langle \hat{k}(t)b(t') \rangle = m\delta(t-t'),$$

其中 n 为压缩真空场的平均光子数, m 是与场压缩性质有关的复参数, $m = |m| \exp(i\phi)$, ϕ 为压缩真空场的相位。 m 和 n 满足

$$|m| = \beta \sqrt{n(n+1)}, \quad (0 \leq \beta \leq 1). \quad (2)$$

当 $\beta = 1$ 时, 压缩真空为理想的压缩真空态, 此时压缩真空中的双光子关联最强。当 $\beta = 0$ 时, 压缩真空场退化为普通白噪声场。

利用电偶极近似和玻恩-马尔可夫近似, 可得到旋波近似下的麦克斯韦-布洛赫方程

$$\partial \rho_{11} / \partial t = (n+1)\gamma_1 \rho_{33} - n\gamma_1 \rho_{11} - (n/2)\gamma_{12}(\rho_{12} + \rho_{21}) - (i/\hbar)(\mu \rho_{31} E^* - \text{C. C.}),$$

$$\partial \rho_{22} / \partial t = (n+1)\gamma_2 \rho_{33} - n\gamma_2 \rho_{22} - (n/2)\gamma_{12}(\rho_{12} + \rho_{21}) - (i/\hbar)(\mu' \rho_{32} E^* - \text{C. C.}),$$

$$\partial \rho_{31} / \partial t = - \{ [(2n+1)\gamma_1 + (n+1)\gamma_2] / 2 + i\delta \} \rho_{31} - (n/2)\gamma_{12} \rho_{32} - \gamma_{1m} \rho_{13} -$$

$$(i/\hbar)\mu(\rho_{11} - \rho_{33})E - (i/\hbar)\mu' \rho_{21} E - \gamma_{12m} \rho_{23},$$

$$\partial \rho_{32} / \partial t = - \{ [(2n+1)\gamma_2 + (n+1)\gamma_1] / 2 + i(\delta - \omega_{21}) \} \rho_{32} - (n/2)\gamma_{12} \rho_{31} - \gamma_{2m} \rho_{23} -$$

$$(i/\hbar)\mu'(\rho_{22} - \rho_{33})E - (i/\hbar)\mu \rho_{12} E - \gamma_{12m} \rho_{13},$$

$$\partial \rho_{12} / \partial t = - [(n/2)(\gamma_1 + \gamma_2) - i\omega_{21}] \rho_{12} + (n+1)\gamma_{12} \rho_{33} - (n/2)\gamma_{12}(\rho_{11} + \rho_{22}) -$$

$$(i/\hbar)(\mu \rho_{32} E^* - \mu' \rho_{13} E), \quad (3)$$

其中 $\delta = \omega_1 - \nu$, 是相干场对原子跃迁 $|3\rangle - |1\rangle$ 的失谐量; $\omega_{21} = \omega_2 - \omega_1$ 代表两个低能级的间距; μ 与 μ' 为跃迁 $|3\rangle - |1\rangle$ 和 $|3\rangle - |2\rangle$ 的偶极矩阵元; E 为腔内电场, $E = |E| \exp(i\phi)$ 。对于理想情形, 考虑到 $\langle \hat{k} \rangle = 0$, 入射场 E_1 、传输场 E_T 及场 $E(0)$ 、 $E(L)$ 满足以下边界条件

$$E(L) = E_T / \sqrt{T}, \quad (4)$$

$$E(0) = \sqrt{T} E_1 + R E(L), \quad (5)$$

其中, L 为原子样品的长度。(5) 式右边第二项表征镜面产生的反馈, 它是双稳产生的基本要素, 也就是说, 若 $R = 0$, 则不会产生双稳态。场方程为

$$\partial E / \partial t + c(\partial E / \partial z) = 2\pi i \nu N (\mu^2 \rho_{31} + \mu'^2 \rho_{32}), \quad (6)$$

其中 c 为光速。为了研究环形腔的双稳行为, 定义原子介质的吸收系数为^[11]

$$\alpha = 4\pi N \nu \mu^2 / \hbar c \gamma. \quad (7)$$

其中 $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ 。令(6) 式中的 $\partial E / \partial t$ 等于零, 并考虑 $\mu' = \mu$ 的情形, 得到场方程为

$$\partial E / \partial z = 2\pi i \nu N \mu^2 (\rho_{31} + \rho_{32}) / c. \quad (8)$$

量 $\rho_{31} + \rho_{32}$ 的值可以从(3) 式由矩阵法求出, 令方程组(3) 中所有式子的左边为零, 即可得到稳态解。从(3) 式可看出, $\rho_{31} + \rho_{32}$ 的值与原子的自发辐射速率、相干入射场的拉比频率、压缩真空的参数以及频率失谐量有关。

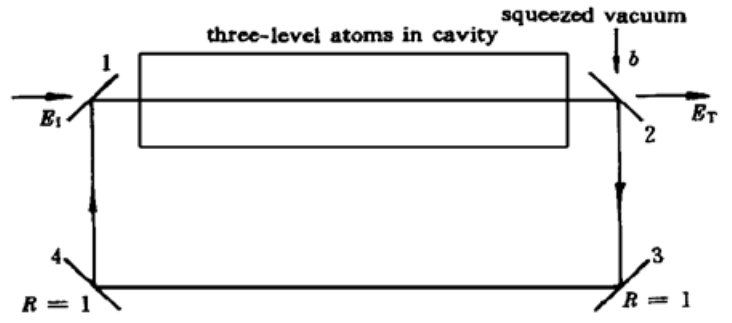


Fig. 1 Scheme representation of the system of the cavity containing N three-level atoms with coherent and squeezed vacuum input and the boundary condition for travelling-wave cavity

在平均场近似下, 利用边界条件[(4)式、(5)式], 可得到如下的输入-输出关系

$$y = x + C\mathcal{Y}(\rho_{31} + \rho_{32}). \quad (9)$$

其中, C 是合作参数, $C \equiv \alpha L/2T$, $y = \mu E_1/\mathcal{Y} \sqrt{T}$, $x = \mu E_T/\mathcal{Y} \sqrt{T}$. 可以看出, 通过这样的定义, 在数值计算时各量均已无量纲化. 下一节, 将重点考察压缩真空注入对光学双稳态的影响.

3 数值结果

图2中, 双稳合作参数 $C = 16.0$, $\mathcal{Y}_1 = 0.2\mathcal{Y}$, $\mathcal{Y}_2 = 0.8\mathcal{Y}$, $\omega_{21} = 3\mathcal{Y}$, $\delta = 0$, $\beta = 1$, $\phi - 2\phi = 0$, 输入-输出关系曲线1~3分别对应 n 为 0.00、0.05 和 0.20. 从图2可看出, 当压缩真空注入时 ($n > 0$), 双稳迟滞环明显比真空注入 ($n = 0$) 时要大, 而且, 双稳迟滞环大小随 n 单调的增大而增大. 这是由于压缩真空中强的双光子关联对原子跃迁速率及稳态布居数影响的结果.

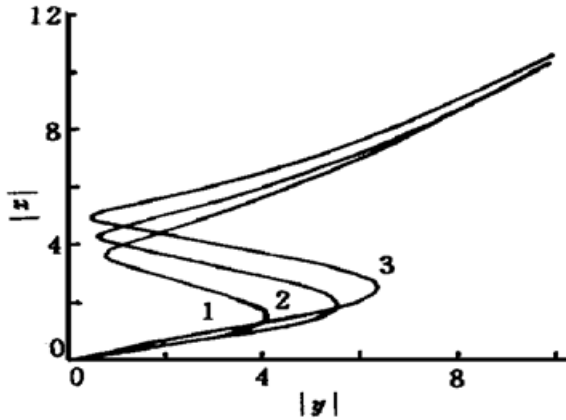


Fig. 2 The input-output relationship with normal vacuum ($n = 0$) and perfect correlation squeezed vacuum input ($n > 0$, $\beta = 1$) for $C = 16$, $\mathcal{Y}_1 = 0.2\mathcal{Y}$, $\mathcal{Y}_2 = 0.8\mathcal{Y}$, $\delta = 0$, $\omega_{21} = 3\mathcal{Y}$. Curve 1 corresponds to $n = 0$, curve 2 to $n = 0.05$, and curve 3 to $n = 0.2$

图3显示了不同的 β 对输入-输出关系的影响, 曲线1~3分别对应于 $\beta = 0.9$ 、 $\beta = 0.7$ 和 $\beta = 0.4$. 这里 $n = 0.2$, 其它各量与图2所取相同. 对比图3和图2中的曲线3可以看出, 双稳迟滞环随着 β 的减小(也就是压缩真空中的双光子关联程度的降低)而逐渐减小. 这说明压缩真空中的双光子关联对腔的输入-输出关系有很大的影响, 理想的压缩真空注入使双稳迟滞环增大最显著.

为了进一步考察压缩真空注入对输入-输出关系的影响, 在图4中给出了不同的频率失谐量时对应的输入-输出关系. 其中 $n = 0.2$, $\beta = 1$, 其余参数同图2. 曲线1~3分别对应 $\delta = 0$ 、 $\delta = -2\mathcal{Y}$ 和 $\delta = 2\mathcal{Y}$. 可以明显看出, 当压缩真空的中心频率与原子的跃迁频率之一相同, 即共振发生时, 双稳迟滞环最大, 即此时压缩真空场对原子的作用最强. 由此可见, 可以通过调节压缩真空场参量来控制双稳.

图2. 曲线1~3分别对应 $\delta = 0$ 、 $\delta = -2\mathcal{Y}$ 和 $\delta = 2\mathcal{Y}$. 可以明显看出, 当压缩真空的中心频率与原子的跃迁频率之一相同, 即共振发生时, 双稳迟滞环最大, 即此时压缩真空场对原子的作用最强. 由此可见, 可以通过调节压缩真空场参量来控制双稳.

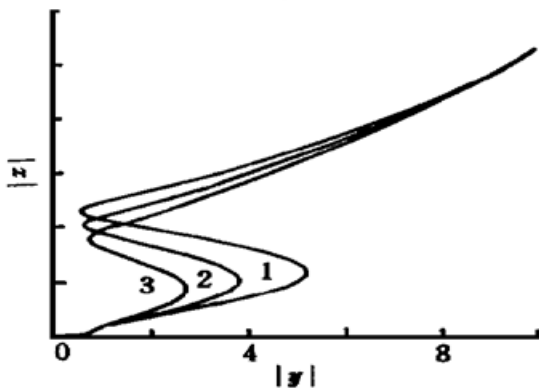


Fig. 3 The input-output relationship with imperfect correlation squeezed vacuum input ($\beta < 1$). Curve 1 corresponds to $\beta = 0.9$, curve 2 to $\beta = 0.7$, and curve 3 to $\beta = 0.4$. In all cases $n = 0.2$ and other parameters are the same as those in figure 2

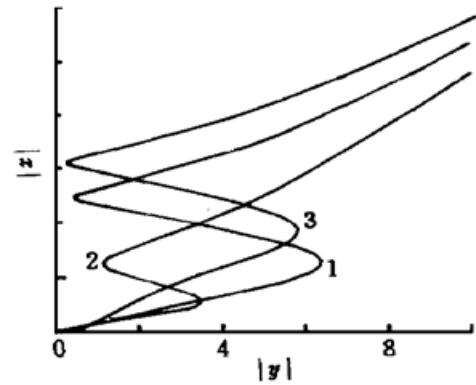


Fig. 4 The input-output relationship with perfect correlation squeezed vacuum input ($\beta = 1$) for different detuning. Curve 1 to $\delta = 0$, curve 2 to $\delta = -2\mathcal{Y}$, and curve 3 to $\delta = 2\mathcal{Y}$. In all cases $n = 0.2$ and other parameters are the same as those in figure 2

小结 本文考虑压缩真空注入对环形腔中均匀增宽的 Λ -型三能级原子的双稳行为的影响。借助于数值计算发现,压缩真空的注入显著增大了双稳的范围。当压缩真空中的平均光子数增大时,双稳迟滞环也变大;同时压缩真空光子关联程度越大,迟滞环越大;而且双稳对频率失谐有依赖性,当压缩真空中心频率与原子跃迁频率一致时,压缩真空的作用最显著。于是可以通过注入压缩真空场来控制该体系的双稳特性。

作者对龚尚庆研究员有益的讨论深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Ou Z Y, Pereira S F, Kimble H J *et al.*. Realization of the Einstein-Podolsky-Rosen paradox for continuous variables. *Phys. Rev. Lett.*, 1992, **68**(25) ·3663~ 3666
- [2] Loudon R, Knight P L. Squeezed light. *J. Mod. Opt.*, 1987, **34**(6/7) ·709~ 759
- [3] Gardiner C W. Inhibition of atomic phase decays by squeezed light: A direct effect of squeezing. *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(18) ·1917~ 1920
- [4] Carmichael H J, Lane A S, Walls D F. Resonance fluorescence from an atom in a squeezed vacuum. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(24) ·2539~ 2542
- [5] 李高翔, 彭金生. 宽带压缩真空腔中 Λ 型三能级原子的稳态行为. *物理学报*, 1995, **44**(5) ·700~ 707
- [6] Swain S. Anomalous resonance fluorescence spectra in a squeezed vacuum. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**(11) ·1493~ 1496
- [7] Ficek Z, Drummond P D. Three-level atom in a broadband squeezed vacuum field. I. General theory. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(11) ·6247~ 6257; II. Applications. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **43**(11) ·6258~ 6271
- [8] Buzek V, Knight P L, Kudryavtsev I K. Three-level atoms in phase-sensitive broadband correlated reservoirs. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **44**(3) ·1931~ 1947
- [9] Bergou J, Zhao D. Effect of a squeezed vacuum input on optical bistability. *Phys. Rev. (A)*, 1995, **52**(2) ·1550~ 1560
- [10] Galatola P, Lugiato L A, Porreca M G *et al.*. Optical switching by variation of the squeezing phase. *Opt. Commun.*, 1991, **81**(3/4) ·175~ 178
- [11] Gong Shangqing, Du Side, Xu Zhizhan. Optical bistability via atomic coherence. *Phys. Lett. (A)*, 1997, **226**(5) ·293~ 297

Effect of a Squeezed Vacuum Input on Optical Bistability

Chen Zhaoyang Du Chunguang Zhang Jingtao Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 28 December 1998; revised 21 January 1999)

Abstract The effect of a squeezed vacuum input on the bistable behavior of a ring cavity with three-level atoms in Λ configuration is investigated. It is shown that the squeezed vacuum input significantly increases the range of the optical bistability. The optical bistability can be controlled by the appropriate squeezed vacuum input.

Key words squeezed vacuum input, input-output relationship, optical bistability.