

非相干泵浦过程对光学双稳的影响

李 源 龚尚庆 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 研究了低能级偶极子的非相干泵浦过程对环形腔中双稳行为的影响。结果表明, 耦合系统的双稳机制为非相干泵浦过程的干涉性。双稳迟滞环与非相干泵浦场有严格的对应关系, 在一定条件下, 甚至出现多稳态。可以利用非相干泵浦的干涉性控制光学双稳。

关键词 光学双稳, 非相干泵浦, 量子干涉。

1 引 言

量子干涉引起了许多新的光学现象, 如: 无反转激光、折射率增高、电磁感生透明及自发辐射相消等等^[1-4]。Harsharwardhan 和 Agarwal 等研究了量子干涉效应引起的双稳行为。他们探讨了双稳特征量随控制场的变化规律, 发现双稳迟滞环随控制场拉比(Rabi)频率的升高而降低^[5]。

众所周知, 多能级系统与相干场的相互作用能建立原子相干。研究表明, 在一定条件下, 非相干过程也能够产生原子相干, 例如, 具有相同 J 量子数的两个邻近能级同时向另一能级跃迁时, 辐射衰减会引起原子相干^[6]。与自发辐射类似, 非相干泵浦的干涉性也能导致原子相干^[7]。

本文研究了非相干泵浦过程产生的原子相干对环形腔中双稳行为的影响。研究发现, 利用非相干泵浦过程的干涉性可以实现光学双稳; 通过观察双稳行为随非相干泵浦场的变化规律, 发现双稳滞后环对泵浦场的依赖性很强。认为非相干泵浦过程也是产生光学双稳的机制之一, 选择适当的非相干泵浦区域, 能够实现对光学双稳态的控制。

2 模型及方程

考虑如图 1 所示的低能级偶极子原子模型。相邻能级 b 、 b' 的磁量子数分别为 $m = 1$ 与 $m = -1$, 它们被线性极化非相干场泵浦至具有磁量子数为 $m = 0$ 的能级 c 。这样, 相同的受激泵浦模与两个跃迁同时作用, 在 b 、 b' 建立相干。考虑包含到高能级 a 的间接泵浦过程及衰减过程, 可得到旋波近似下的麦克斯韦-布洛赫(Maxwell-Bloch)方程

$$\dot{\rho}_{aa} = -(\gamma + \gamma')\rho_{aa} + R\rho_{bb} + R'\rho_{b'b'} + i\mu(E^*\rho_{ab} - E\rho_{ba}) + i\mu'(E^*\rho_{ab'} - E\rho_{b'a}) \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_{cc} = -(R_c + R'_c + \gamma_c + \gamma'_c)\rho_{cc} + R_c\rho_{bb} + R'_c\rho_{b'b'} + (R_cR'_c)^{1/2}(\rho_{bb} + \rho_{b'b'}) \quad (2)$$

$$\rho_{bb} = - (R + R_c) \rho_{bb} + \gamma \rho_{aa} + R_c \rho_{cc} - \frac{1}{2} (R_c R_c')^{1/2} (\rho_{b'b} + \rho_{bb'}) - i\mu (E^* \rho_{ab} - E \rho_{ba}) \quad (3)$$

$$\rho_{b'b'} = - (R' + R_c' + \gamma_c) \rho_{b'b'} + \gamma' \rho_{aa} + \gamma_c' \rho_{cc} - \frac{1}{2} (R_c R_c')^{1/2} (\rho_{b'b} + \rho_{bb'}) - i\mu (E^* \rho_{ab'} - E \rho_{b'a}) \quad (4)$$

$$\rho_{ab} = - [i\Delta_{ab} + \frac{1}{2} (R + R_c + \gamma + \gamma')] \rho_{ab} - \frac{1}{2} (R_c R_c')^{1/2} \rho_{ab'} - i\mu E (\rho_{bb} - \rho_{aa}) - i\mu' E \rho_{b'b} \quad (5)$$

$$\rho_{ab'} = - [i\Delta_{ab'} + \frac{1}{2} (R' + R_c' + \gamma + \gamma')] \rho_{ab'} - \frac{1}{2} (R_c R_c')^{1/2} \rho_{ab} - i\mu' E (\rho_{b'b'} - \rho_{aa}) - i\mu E \rho_{bb'} \quad (6)$$

$$\rho_{bb'} = - [i\omega_{bb'} + \frac{1}{2} (R + R' + R_c + R_c')] \rho_{bb'} - \frac{1}{2} (R_c R_c')^{1/2} (\rho_{bb} + \rho_{bb'} - 2\rho_{cc}) - i(\mu E^* \rho_{a'b'} - \mu' E \rho_{ba'}) \quad (7)$$

其中, Δ_{ab} 与 $\Delta_{ab'}$ 是相干场 E 对偶极跃迁 $a \sim b$ 和 $a \sim b'$ 的失谐量, 且 $\Delta_{ab} - \omega_{b'b}/2 = \Delta_{ab'} + \omega_{b'b}/2$; μ 与 μ' 为跃迁 $|a\rangle \rightarrow |b\rangle$ 和 $|a\rangle \rightarrow |b'\rangle$ 的偶极矩阵元; 如图 1 所示, $\gamma, \gamma', \gamma_c, \gamma_c'$ 为衰减速率, R, R', R_c, R_c' 为非相干泵浦速率。为简单起见, 假定原子系统是对称的, 即 $\gamma = \gamma', \gamma_c = \gamma_c', R = R', R_c = R_c', \mu = \mu'$ 。(2) 式 ~ (7) 式中, $(R_c R_c')^{1/2}$ 项是由非相干泵浦过程的干涉性引起的, 其推导过程见文献[7]。(7) 式中低能级的相干与低能级粒子数之和减去两倍附加能级 c 的粒子数成正比, 即它与 $(\rho_{bb} + \rho_{bb'} - 2\rho_{cc})$ 成正比。而且, 从(5) 式、(6) 式可以发现, 驱动光场 E 产生的极化率 ρ_{ab} 和 $\rho_{ab'}$ 是相关的。低能级的相干和极化率的相关会导致新的光学现象, 如无反转激光、吸收相消等。本文将讨论它们对光学双稳态的影响。

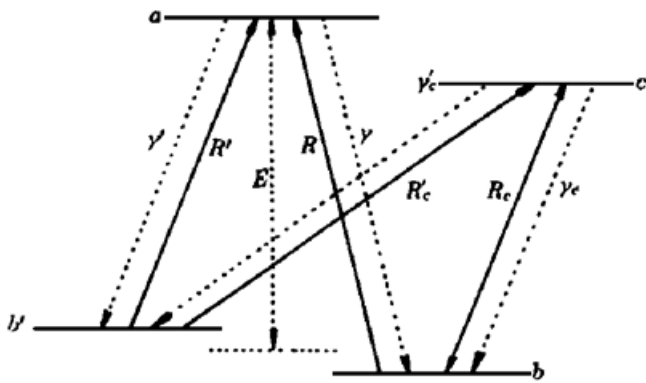


Fig. 1 Level scheme for the lower-level doublet case. Incoherent pump processes can cause interferences and hence may create coherence between a lower-level double b and b'

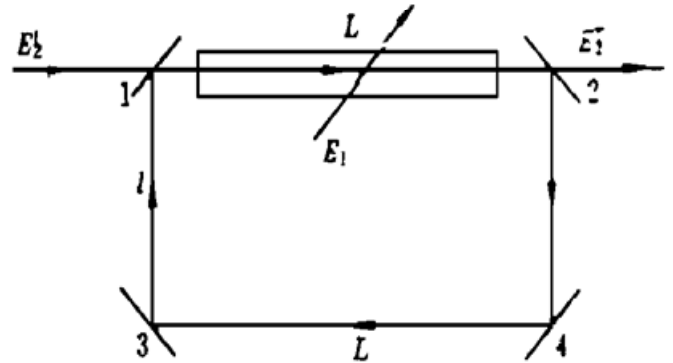


Fig. 2 Unidirectional ring cavity with an atomic sample of length L . E_1^I and E_1^T are the incident and transmitted fields, respectively. E_1 is the control field. Mirrors 1 and 2 have $R_l + T = 1$, and mirrors 3 and 4 $R_l = 1$

采用 Bonifacio 和 Lugiato 提出的标准双稳模型^[8] (如图 2)。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_l 与传输率 T 满足 $R_l + T = 1$ 。驱动场 E_1 从左端进入环形腔, 对于理想情形, 入射场 E_1 、传输场 E_T 及场 $E(0)$ 、 $E(L)$ 满足以下边界条件

$$E(L) = E_T / \sqrt{T} \quad (8)$$

$$E(0) = \sqrt{T} E_1 + R_l E(L) \quad (9)$$

其中, L 为原子样品的长度。(9) 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。这意味着, 若 $R_l = 0$, 则不会产生双稳态。场方程为

$$\frac{\partial E}{\partial t} + c \frac{\partial E}{\partial z} = 2\pi i \omega N (\mu^2 \rho_{ab} + \mu'^2 \rho_{ab'}) \quad (10)$$

c 是光速。

为了研究环形腔的双稳行为, 定义低能级偶极子原子介质的吸收系数为

$$\alpha = \frac{2\pi N \omega \mu^2}{h \gamma_{ab}} \tag{11}$$

定义合作参数 $C \equiv \alpha L / 2T$, 其中 γ_{ab} 为感生极化率 ρ_{ab} 的衰减速率。

令(1)式~(8)式左边为零, 求稳态解, 得到场强 E 满足

$$c \frac{\partial E}{\partial Z} = i2\pi\omega N \mu^2 (\rho_{ab} + \rho_{ab'}) \tag{12}$$

$\rho_{ab} + \rho_{ab'}$ 可以利用下列矩阵法求出。

$$MX = C_0 \tag{13}$$

其中

$$X = \begin{pmatrix} \rho_{aa} \\ \rho_{bb} \\ \rho_{cc} \\ \text{Re}\rho_{bb'} \\ \text{Im}\rho_{bb'} \\ \text{Re}\rho_{ab} \\ \text{Im}\rho_{ab} \\ \text{Re}\rho_{ab'} \\ \text{Im}\rho_{ab'} \end{pmatrix} \tag{14} \quad C_0 = \begin{pmatrix} R_c \\ R \\ 0 \\ \frac{1}{2}R_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ |E|^2 \end{pmatrix} \tag{15}$$

$$M = \begin{pmatrix} R_c & 0 & R_1 & -2R_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ R_2 & 0 & R & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ \gamma & -R_3 & R_c & -R_c & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}R_c & 0 & \frac{3}{2}R_c & -R_3 & \omega_{bb'} & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_{bb'} & R_3 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & |E|^2 & R_4 & -\Delta_{ab} & \frac{1}{2}R_c & 0 \\ |E|^2 & -|E|^2 & 0 & |E|^2 & 0 & -\Delta_{ab} & -R_4 & 0 & -\frac{1}{2}R_c \\ 0 & 0 & 0 & 0 & |E|^2 & -\frac{1}{2}R_c & 0 & -R_4 & -\Delta_{ab'} \\ 2|E|^2 & |E|^2 & |E|^2 & -|E|^2 & 0 & 0 & -\frac{1}{2}R_c & -\Delta_{ab'} & -R_4 \end{pmatrix} \tag{16}$$

式中, 采用如下简化参量: $R_1 = 3R_c + 2\gamma_c$, $R_2 = R + 2\gamma$, $R_3 = R + R_c$, $R_4 = \frac{1}{2}(R + R_c + 2\gamma)$ 。为方便起见, 定义修正极化率

$$P_{ab} = \text{Re}P_{ab} + i\text{Im}P_{ab} \equiv E^* \rho_{ab} \tag{17}$$

$$P_{ab'} = \text{Re}P_{ab'} + i\text{Im}P_{ab'} \equiv E^* \rho_{ab'} \tag{18}$$

在平均场近似下, 利用边界条件(8)式、(9)式, 可得到如下状态方程

$$|Y|^2 = |X|^2 \left[1 + 2CY_{ab} \frac{\text{Im}P_{ab} + \text{Im}P_{ab'}}{|X|^2} \right]^2 + \left[2CY_{ab} \frac{\text{Re}P_{ab} + \text{Re}P_{ab'}}{|X|^2} \right]^2 \quad (19)$$

其中, $Y = E_I / \sqrt{T}$, $X = E_T / \sqrt{T}$ 。从(13)式~(16)式和(19)式可见, 耦合系统的光学双稳与原子衰减速率、相干场的拉比频率以及非相干泵浦场的频率失谐量有关。下一节, 将重点考察非相干泵浦场 R_c 对光学双稳态的影响。在数值计算中采取无量纲参量。

3 数值计算

令双稳合作参数 $C = 20.0$, $\gamma_c = 1.0$, $\Delta = \frac{1}{2}(\Delta_{ab} + \Delta_{ab'}) = 1.0$, $R = 0.0$, 及 $\omega_{bb'} = 3.0$, 从而得到不同非相干泵浦场 R_c 下, 入射场与输出场的关系。图 3 中, 曲线 1~3 对应 $R_c = 0.00$ 、 0.02 和 0.05 。从图 3 可以看出, 非相干泵浦过程可以引起光学双稳。在这一区域, 双稳环大小不稳定, 振荡出现。随着 R_c 的增加, 出现如图 4 所示有趣的现象。曲线 1~5 对应 R_c 为 0.06 、 0.07 、 0.08 、 0.09 和 0.10 。 $R_c = 0.06$ 时, 开始出现多稳态, 多稳迟滞环随 R_c 的增加而增大; $R_c = 0.10$ 时, 系统又进入双稳态(曲线 5)。图 5 中, 曲线 1~5 对应 R_c 为 1.00 、 1.50 、 2.00 、 2.50 和 8.00 。在 $R_c > 0.10$ 的区域, 双稳迟滞环随非相干泵浦场的增加而逐渐减小, 直至最后, 双稳消失。

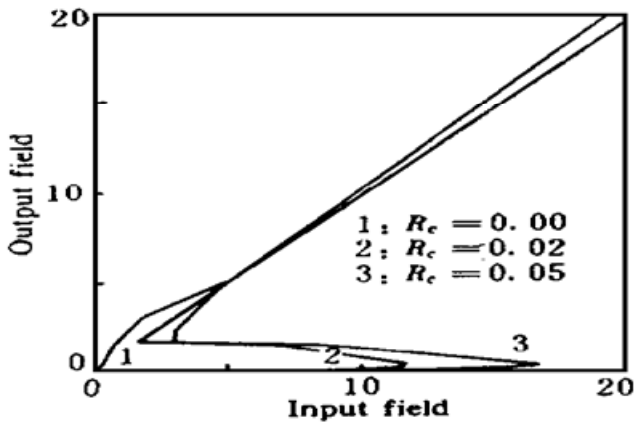


Fig. 3 The relationship between output and input field with $R = 0.0$, $C = 20.0$

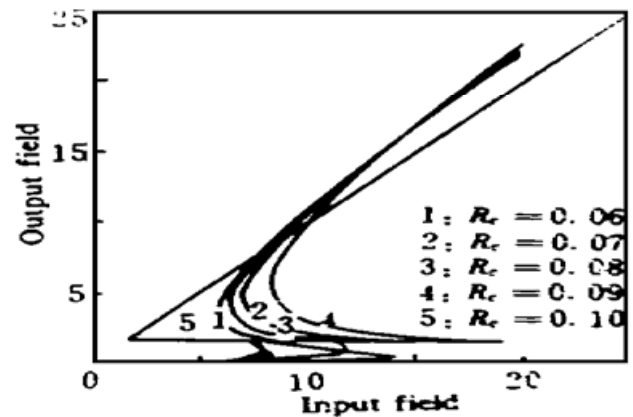


Fig. 4 The relationship between the input and output field with $R = 0.0$, $C = 20.0$

从图 3、图 4 和图 5 可以清楚地看出, 光学双稳态对非相干泵浦场依赖性很强。 R_c 为零时, 不存在光学双稳; R_c 较小时, 在某一区域($0.06 \leq R_c \leq 0.09$), 甚至会出现光学多稳态。作者认为, 有效地控制光学双稳, 宜选择 $R_c > 1.00$ 的区域。

为了进一步考察非相干泵浦场对双稳态的作用及探测场的影响, 取 $R = 1.0$, $C = 50.0$, 其余参数同图 3, 所得结果如图 6 所示(曲线 1~5 分别对应 $R_c = 0.00$ 、 0.05 、 0.20 、 0.50 和 2.50)。图 6 表明, $R_c = 0.00$ 时, 耦合系统不会产生双稳态; 然而, $R_c > 0.00$ 时, 双稳出现, 此后, 变化规律大致与 $R = 0.0$ 时类似。由此可见, 在一定条件下, 当且仅当非相干泵浦过程的干涉性存在时, 可以实现光学双稳, 耦合系统的双稳机制为非相干泵浦过程的干涉性。

引言中已提到, Harsharwardhan 和 Agarwal 指出, 可以通过相干控制场控制光学双稳态, 且双稳迟滞环随相干控制场拉比频率的增加而变小。在本文讨论的模型中, 双稳迟滞环对非相干泵浦的依赖性很强, 通过选择适当的非相干泵浦场范围, 可以合理地控制双稳态。

总 结 本文考虑低能级偶极子的非相干泵浦过程, 研究了环形腔中的双稳行为。结果表明, 耦合系统的双稳机制为非相干泵浦过程的干涉性。双稳迟滞环与非相干泵浦场有严格的

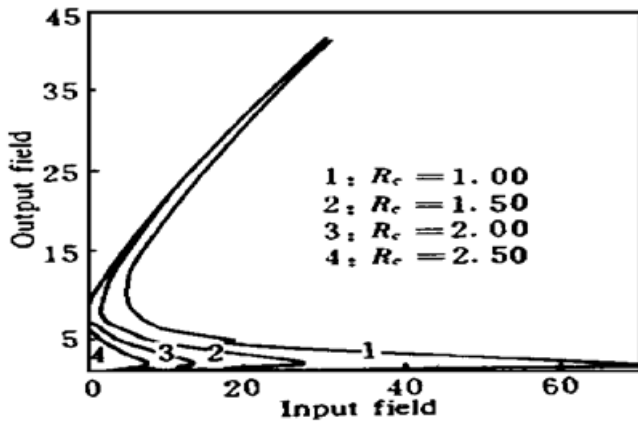


Fig. 5 The relationship between the input and output field with $R = 0.0$, $C = 20.0$

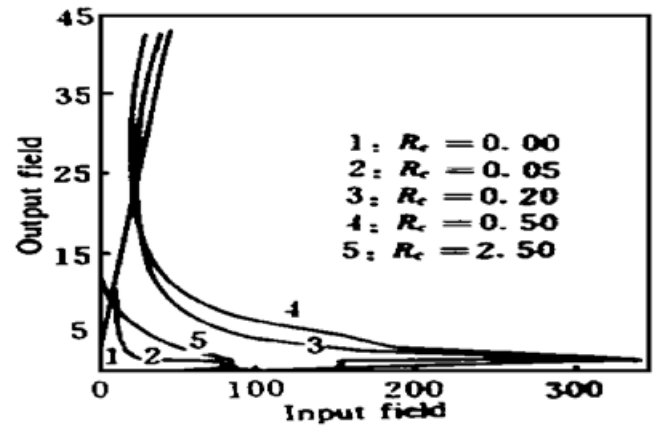


Fig. 6 The relationship between output field and input field with $R = 1.0$, $C = 50.0$

对应关系, 在一定条件下, 甚至出现多稳态。可以通过选择非相干泵浦场的相关参量, 合理控制光学双稳。

参 考 文 献

- [1] M. O. Scully, S. Y. Zhu, H. Fearn, Lasing without inversion, *Z. Phys. (D)*, 1992, **22**: 471~ 481
- [2] Marlan O. Scully, Enhancement of the index of refraction via quantum coherence. *Phys. Rev. (A)*, 1991, **67**(14): 1855~ 1858
- [3] J. C. Petch, C. H. Keitel, P. L. Knight *et al.*, Role of electromagnetically induced transparency in resonant four-wave-mixing schemes. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **53**(1): 543~ 561
- [4] Shi-Yao Zhu, Marlan O. Scully, Spectral line elimination and spontaneous emission cancellation via quantum interference. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **76**(3): 388~ 391
- [5] W. Harshawardhen, G. S. Agarwal, Controlling optical bistability using electromagnetic-field-induced transparency and quantum interference. *Phys. Rev. (A)*, 1996, **53**(3): 1812~ 1817
- [6] M. Fleischhauer, C. H. Keitel, M. O. Scully *et al.*, Resonantly enhanced refractive index without absorption via atomic coherence. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **46**(3): 1468~ 1487
- [7] M. Fleischhauer, C. H. Keitel, M. O. Scully *et al.*, Lasing without inversion and enhancement of the index of refraction via interference of incoherent pump process. *Opt. Commun.*, 1992, **87**(3): 109~ 114
- [8] L. A. Lugiato, Theory of optical bistability. In: E. Wolf ed. *The Progress in Optics*, Vol. xxi, Amsterdam: North Holland, 1984, 69~ 80

Influence of Interference of Incoherent Pump Processes on Optical Bistability

Li Yuan Gong Shangqing Xu Zhizhan

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

(Received 14 October 1997; revised 27 November 1997)

Abstract The coherence between the two lower-levels via incoherent pumping of these two levels to a fourth auxiliary level is considered to investigate the optical bistability in unidirection ring cavity with a lower-level doublet atomic sample. It is shown that the optical bistability can be controlled via the interference of incoherent pump processes. It is discovered that the incoherent pump field can even lead to multistability. The optical bistability can be controlled by choosing the appropriate parameters.

Key words optical bistability, incoherent pump, quantum interference.