

自发辐射诱导相干对开放的 Ladder 型系统 无反转激光增益瞬态演化的影响^{*}

杨艳玲¹⁾ 王 蕾¹⁾ 刘中波¹⁾ 卢洪武²⁾ 樊锡君^{1)†}

1) 山东大学物理与电子科学学院, 济南 250014)

2) 山东大学传播学院, 济南 250014)

(2008 年 3 月 23 日收到, 2008 年 4 月 26 日收到修改稿)

利用开放的 Ladder 型三能级原子系统密度矩阵运动方程的数值解, 研究了在探测场和驱动场双共振条件下, 自发辐射诱导相干 (SGC) 对系统无反转激光 (LWI) 增益瞬态演化的影响以及注入速率比和退出速率比与 SGC 相关的增益的调制作用. 研究表明 SGC 强度的变化将使瞬态增益和最终的稳定增益发生显著的改变, 存在非相干抽运时, LWI 增益随注入速率比和退出速率的减小而增大, 而不存在非相干抽运时的情况与此正好相反. 通过选取适当的 SGC 强度、注入速率比和退出速率可得到最大的 LWI 增益的瞬态值和最终的稳定值.

关键词: 开放系统, 自发辐射诱导相干, 瞬态演化, 无反转增益

PACC: 4250

1. 引 言

上世纪 80 年代末 Kocharovskaya, Harris 和 Scully 等相继独立地提出了无反转激光 (lasing without inversion, LWI) 的理论模型. 理论分析表明: LWI 的产生是原子相干和量子干涉效应的结果, 不需要实现粒子数反转, 所以可通过无粒子数反转的工作介质把一个相干的低频输入转变成放大的相干高频输出, 即实现频率上的转换, 从而可以在应用传统激光理论和方法很难甚至不可能产生激光的高频光谱区产生激光. LWI 的研究不仅具有重要的理论价值而且具有广阔的应用前景, 因而一直引起人们的高度重视和极大兴趣^[1-7]. 产生原子相干和量子干涉的方法很多, 一般情况下可以通过相干驱动场或初始相干性注入实现. 不同通道的自发辐射相互干涉也可以导致相干叠加态的产生, 这种由自发辐射引起的干涉效应称为自发辐射诱导相干 (SGC). 近年来人们对于 SGC 对吸收、色散和粒子数差等的影响已经做了广泛和深入的研究^[8-21]. 但这些研究基本上都是针对封闭原子系统及稳态情况进行的. 对 LWI 系统来说, 研究原子响应的瞬态演化以了解产生

LWI 的动力学过程、找到提高 LWI 增益的途径是十分必要的. 最近, Xu 等^[22]研究了 SGC 对封闭的 Λ 型三能级系统原子响应特别是 LWI 增益的瞬态演化的影响. Fan 等^[23]已研究了 SGC 对开放的 Ladder 型三能级 LWI 系统稳态情况下增益和吸收性质的影响. 本文将在探测场和驱动场双共振的条件下, 研究 SGC 对开放 Ladder 型三能级系统中 LWI 增益瞬态演化的影响以及注入速率比和退出速率比与 SGC 相关的增益的调制作用. 研究表明: SGC 强度的改变对瞬态增益和最终的稳定增益有显著影响, 存在非相干抽运时, LWI 增益随注入速率比和退出速率的减小而增大, 而不存在非相干抽运时的情况恰好与此相反.

2. 系统模型和运动方程

考虑开放的 Ladder 型三能级原子系统 (图 1), 能级 |1> 是基态, |2> 和 |3> 分别是中间态和激发态. 能级 |1> 和 |2> 之间施加频率为 ω_1 , Rabi 频率为 $g = \mu_{12} \cdot \epsilon_1 / \hbar$ 的弱探测场, 而能级 |2> 和 |3> 之间施加频率为 ω_2 , Rabi 频率为 $G = \mu_{23} \cdot \epsilon_2 / \hbar$ 的强驱动场. 能

^{*} 国家自然科学基金 (批准号: 10675076) 和山东省自然科学基金 (批准号: 2006A21) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xjfan108@yahoo.com.cn

级|2 和|3 分别以 γ_1 和 γ_2 向能级|1 和|2 自发衰变,能级|1 和|2 粒子注入速率分别是 J_1 和 J_2 ,原子与场的退出速率为 r_0 ,能级|1 和|3 之间施加一抽运速率为 R 的非相干抽运场.在旋波近似和电偶极近似下,系统半经典的密度矩阵方程组可写为

$$\dot{\rho}_{11} = -(2R + r_0)\rho_{11} + 2\gamma_1\rho_{22} + ig(\rho_{21} - \rho_{12}) + J_1, \quad (1a)$$

$$\dot{\rho}_{22} = 2\gamma_2\rho_{33} - (2\gamma_1 + r_0)\rho_{22} - ig(\rho_{21} - \rho_{12}) - i\mathcal{A}(\rho_{23} - \rho_{32}) + J_2, \quad (1b)$$

$$\dot{\rho}_{33} = 2R\rho_{11} - (2\gamma_2 + r_0)\rho_{33} + i\mathcal{A}(\rho_{23} - \rho_{32}), \quad (1c)$$

$$\dot{\rho}_{23} = -(\gamma_1 + \gamma_2 + i\Delta_2)\rho_{23} + i\mathcal{A}(\rho_{33} - \rho_{22}) + ig\rho_{13}, \quad (1d)$$

$$\dot{\rho}_{12} = -(R + \gamma_1 + i\Delta_1)\rho_{12} + ig(\rho_{22} - \rho_{11}) - iG\rho_{13} + 2P\sqrt{\gamma_1\gamma_2}\rho_{23}, \quad (1e)$$

$$\dot{\rho}_{13} = -[\gamma_2 + R + i(\Delta_1 + \Delta_2)]\rho_{13} - iG\rho_{12} + ig\rho_{23}. \quad (1f)$$

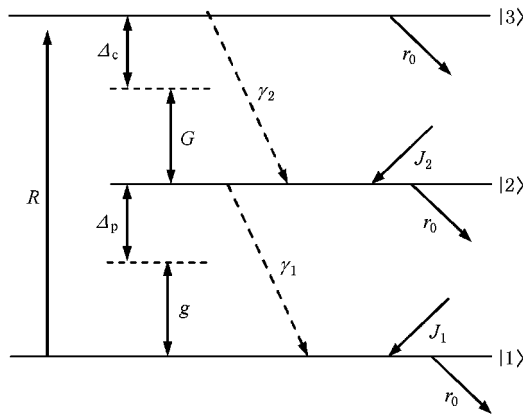


图1 开放的 Ladder 型三能级原子系统

以上方程还满足条件 $\rho_{ij}^* = \rho_{ji}$ 和 $\rho_{11} + \rho_{22} + \rho_{33} = 1$ 其中 $i, j = 1, 2, 3$.为保证粒子数守恒,在以下的讨论中,我们令 $J_1 + J_2 = r_0$.在上述方程组中, ρ_{ii} 为能级| i 上的粒子数分布, ρ_{ij} 为能级| i 和| j 间的原子极化率, Δ_p 和 Δ_c 分别是探测场和驱动场的失谐, $P\sqrt{\gamma_1\gamma_2}$ 是两个激发态自发辐射之间量子干涉的结果,其中 $P = \mu_{12} \cdot \mu_{23} / |\mu_{12}| |\mu_{23}| = \cos\theta$ 表征了 SGC 的影响, P 取不同值时,探测场的吸收(或增益)和色散将表现出不同的性质,式中 θ 表示电偶极矩 μ_{12} 和 μ_{23} 之间的夹角.如果考虑线性的极化场($\mu_{12} \cdot \mathbf{e}_2 = 0, \mu_{23} \cdot \mathbf{e}_1 = 0$),可以得到参数 P 与 Rabi 频率之间的关系为 $G = G_0 \sqrt{1 - P^2} = G_0 \sin\theta, g = g_0 \sqrt{1 - P^2}$

$= g_0 \sin\theta$ 其中 $g_0 = |\mu_{12}| |\mathbf{e}_1| / \hbar, G_0 = |\mu_{23}| |\mathbf{e}_2| / \hbar$.如果 μ_{12} 和 μ_{23} 正交即 $\theta = \pi/2$ 则 $P = 0$,上述方程组变为不考虑 SGC 时开放的 Ladder 型三能级原子系统的密度矩阵运动方程组. ρ_{12} 的实部和虚部分别与介质的色散和吸收(或增益)成正比,探测场的增益正比于 ρ_{12} 的虚部,当 $\text{Im}\rho_{12} > 0$ 时为增益,探测场被放大;当 $\text{Im}\rho_{12} < 0$ 时为吸收,探测场被削弱;若同时满足 $\rho_{22} - \rho_{11} < 0$ 和 $\text{Im}\rho_{12} > 0$,将实现 LWI 输出,另外在数值计算中,各参量 $R, G_0, g_0, \Delta_p, \Delta_c, r_0, J_1, J_2$ 和 γ_1 都是以 γ_2 为单位.

3. LWI 增益的瞬态演化分析

在下面的讨论中, $\rho_{22} - \rho_{11} < 0$ 始终被满足,所以出现的增益都是 LWI 增益.由于 SGC 的强度变化可以用参量 P 的大小变化来表征,而 $P = \cos\theta$,所以我们直接用 θ 取值的变化来表示 SGC 的强度变化.以下我们将在探测场和驱动场双共振的条件下,分别研究存在和不存在非相干抽运时,SGC 对系统增益的影响以及注入速率比和退出速率对与 SGC 相关的增益的调制作用.我们引入参量 c 表示注入速率比, $c = J_2/J_1$.

3.1. 存在非相干抽运情况

图 2 为 θ 取不同值时, Ladder 型三能级原子系统中增益随时间的演化图像,所取的参数值为 $\gamma_1 = 3.5, \gamma_2 = 1, R = 1.9, \Delta_p = \Delta_c = 0, g = 8 \sin(\theta), G = 0.1 \sin(\theta), J_1 = 0.1, J_2 = 0.5, r_0 = 0.6, J_1 + J_2 = r_0, c = J_2/J_1 = 5, \rho_{11}(0) = \rho_{22}(0) = 0.5, \rho_{33}(0) = 0$,其余 $\rho_{ij}(0) = 0$,其中 c 为粒子注入速率比.从图中可以看出,不存在 SGC 即 $\theta = \pi/2$ 时,系统增益随时间的演化曲线有一定的振荡,但并没有增益产生;当 $\theta = 0$ 时系统没有增益和吸收; $\theta < \pi/2$ 时,在 t 值约大于 0.3 的范围内系统产生增益,随着 θ 角的减小,增益的瞬态值及最终的稳定值随着增加,在 $\theta = \pi/8$ 时,达到最大值,探测场被放大;对于 $\theta > \pi/2$ 的情况,我们看到曲线有一定的振荡,在 t 值约小于 0.25 的范围内瞬态表现为增益,但随着时间的增加,系统最终均表现为吸收,探测场被削弱.可见 SGC 对系统增益的瞬态演化有明显的影响.

我们再来讨论在 SGC 一定时,退出速率和注入速率比的不同对系统增益瞬态演化的影响.

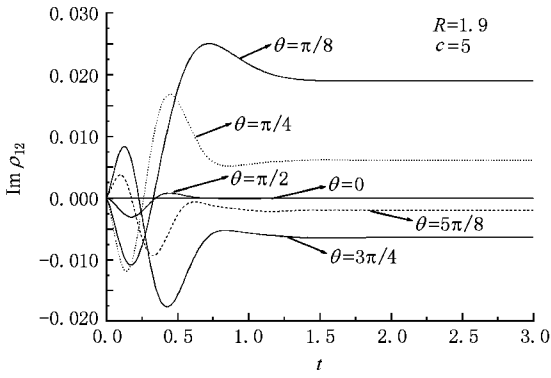


图 2 SGC 不同时 LWI 增益的瞬态演化

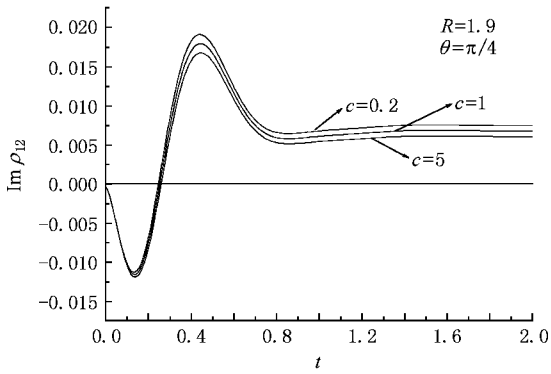


图 3 注入速率比不同时增益的瞬态演化(其中 $\theta = \pi/4$, 除 c 外其他参数与图 2 相同)

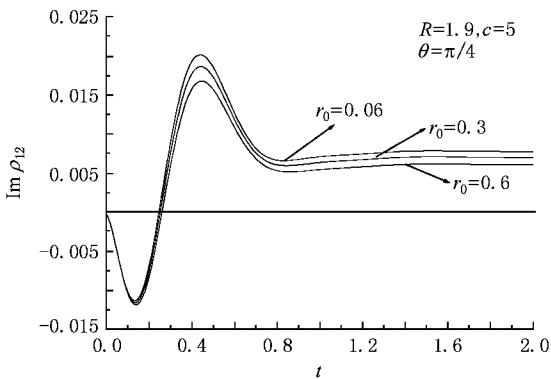


图 4 退出速率不同时增益的瞬态演化(除 $c = 5$ 和 r_0 外,其余参数同图 3)

图 3 表明,不同注入速率比值对应的 LWI 增益瞬态演化规律类似,即在 t 值约小于 0.3 的范围内,系统表现为吸收,探测场被削弱,其间在 $t \approx 0.15$ 时吸收系数最大,随着时间的增加系统表现为增益,探测场被放大,其间在 $t \approx 0.45$ 时增益系数达到最大

值,最终的稳定增益值远小于这个最大值,增益的瞬态值和最终的稳定值随注入速率比值的减小而增大,当 $c = 0.2$ 时达到最大。

比较图 4 和图 3 可以看出,退出速率改变时 LWI 增益瞬态规律与注入速率比改变时的类似,增益的瞬态值和最终的稳定值随退出注入速率比值的减小而增大,当 $r_0 = 0.06$ 时达到最大。

从以上讨论可知,存在非相干抽运时,在 SGC 强度(即 θ 值)及其他参量值一定的情况下,退出速率和注入速率比较小时可以产生大的瞬态增益和最终的稳定增益。

3.2. 不存在非相干抽运情况

因为在无非相干抽运时,对于较小的退出速率,系统并不产生增益,所以在下面的讨论中,我们将选取较大的退出速率和注入速率比。

图 5 为无非相干抽运时 LWI 增益的瞬态演化,所取参数值为 $\gamma_1 = 3.5, \gamma_2 = 1, R = 0, \Delta_p = \Delta_c = 0, g = 8 \sin(\theta), G = 0.1 \sin(\theta), r_0 = 6, J_1 + J_2 = r_0, c = J_2/J_1 = 49, \rho_{11}(0) = \rho_{22}(0) = 0.5, \rho_{33}(0) = 0$,其余 $\rho_{ij}(0) = 0$ 。从图 5 可知,不存在 SGC 即 $\theta = \pi/2$ 时,系统增益随时间的演化曲线有一定的振荡,但最终表现为吸收,当 $\theta = 0$ 时系统也没有增益和吸收,与存在非相干抽运时相同(见图 2); $\theta \leq \pi/2$ 时,系统均表现为吸收,吸收系数随角度的减小而增大,在 $\theta = \pi/8$ 时瞬态吸收和最终的稳定吸收都达到最大,探测场被削弱; $\theta \geq \pi/2$ 时,系统开始出现增益,增益的瞬态值和最终的稳定值随 θ 的增大而增加,当 $\theta = 4\pi/5$ 时可得到最大的 LWI 增益的瞬态值和最终的稳定值。后两种情况与存在非相干抽运时(图 2)的情况恰好相反。

我们再来讨论在 SGC 一定时,不同的退出速率

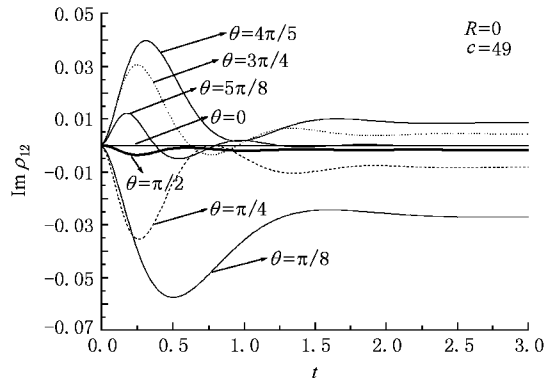


图 5 SGC 不同时 LWI 增益的瞬态演化

和注入速率比对系统增益瞬态演化的影响.

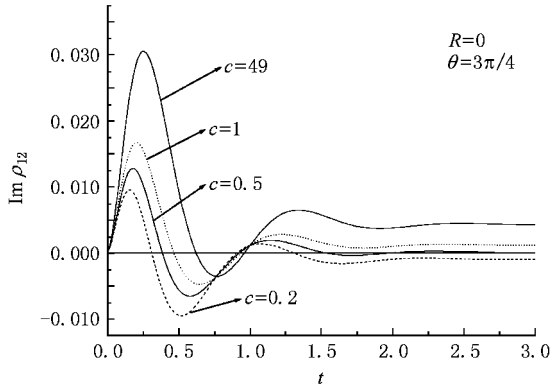


图 6 注入速率比不同时增益的瞬态演化(除 $\theta = 3\pi/4$ 和 c 其他参数与图 5 同)

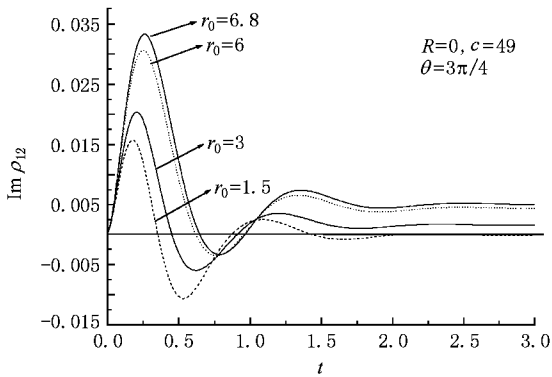


图 7 退出速率不同时增益随时的瞬态演化(除 r_0 和 $\theta = 3\pi/4$, 其他参数与图 5 同)

由图 6 可知,不同注入速率比值对应的 LWI 增益瞬态规律类似,在 $t \approx 0.25$ 时增益系数最大,并且系统增益的瞬态值和最终的稳定值随着注入速率比的增大而增大,在 $c = 49$ 时增益的瞬态值和最终的

稳定值都达到最大.比较图 6 和图 7,可以看到退出速率改变时 LWI 增益瞬态规律与注入速率比变化时类似,系统增益亦随着退出速率的增大而增大,在 $r_0 = 6.8$ 时增益达到最大值.但是从两图中看到 c 和 r_0 不能取值太小,否则系统不产生增益,如图 6 和图 7 中 $c = 0.2$ 和 $r_0 = 1.5$ 时系统就表现为吸收,无增益产生.通过两图的比较,可以得到这样的结论,即无非相干抽运时,在 SGC 强度(即 θ 值)及其他参量值一定的情况下,退出速率和注入速率比较大时可以产生大的瞬态增益和最终的稳定增益.

4. 结 论

本文从开放的 Ladder 型三能级系统密度矩阵运动方程出发,利用数值计算的结果,在探测场和驱动场双共振的条件下,从存在非相干抽运和无非相干抽运两个方面分析了 SGC 对 LWI 增益瞬态演化的影响.结果表明 SGC 强度(用电偶极矩 μ_{12} 和 μ_{23} 之间的夹角 θ 表示)的变化对系统增益瞬态演化有明显影响.存在非相干抽运时,在 $\theta < \pi/2$ 时,系统产生增益,探测场被放大,增益的瞬态值和最终的稳定值随 θ 的减小而增大; $\theta > \pi/2$ 时,系统表现为吸收,探测场被削弱;当 θ 取定值时, LWI 增益随注入速率比和退出速率减小而增大.而对于无非相干抽运的情况, LWI 增益的演化规律恰好相反:当 $\theta > \pi/2$, 系统产生增益,增益随 θ 的增大而增大;当 $\theta < \pi/2$ 时,系统则表现为吸收;当 θ 取定值时, LWI 增益随注入速率比和退出速率的增大而增大.综合分析,我们可以通过选取适当的 SGC 强度(即 θ 值),注入速率比和退出速率来得到最大的 LWI 增益的瞬态值和最终的稳定值.

[1] Mompert J, Corbalan R 2000 *J. Opt. B: Quant. Semiclass. Opt.* **2** R4
 [2] Lee C R, Li Y C, Men F K, Pao C H, Tsai Y C, Wang J F 2005 *App. Phys. Lett.* **86** 201112
 [3] Allahverdyan A E, Gracia R S, Nieuwenhuizen T M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046106
 [4] Kozlov V V, Rostovtsev Y, Scully M O 2006 *Phys. Rev. A* **74** 063829
 [5] Fan X J, Cui N, Ma H, Li A Y, Li H 2006 *Eur. Phys. J. D* **37** 129
 [6] Fan X J, Li A Y, Tian S F, Tong D M, Gong S Q, Xu Z Z 2007 *Eur. Phys. J. D* **42** 483

[7] Han D G, Zeng Y G, Guo H, Chen W, Lu H, Huang C 2007 *Eur. Phys. J. D* **42** 489
 [8] Wu J H, Gao J Y 2002 *Phys. Rev. A* **65** 063807
 [9] Ma H M, Gong S Q, Liu C P, Sun Z R, Xu Z Z 2003 *Opt. Commun.* **223** 97
 [10] Li J H, Yang W X, Peng J C 2004 *Chin. Opt. Lett.* **2** 302
 [11] Liu C P, Gong S Q, Fan X J, Xu Z Z 2004 *Opt. Commun.* **231** 289
 [12] Li J H, Luo J M, Yang W X, Peng J C 2005 *Chin. Phys.* **14** 985
 [13] Berman P R 2005 *Phys. Rev. A* **72** 035801
 [14] Antón M A, Calderón O G, Carreño F 2005 *Phys. Rev. A* **72** 023809

- [15] Gonzalo I , Antón M A , Carreño F , Calderón O G 2005 *Phys. Rev. A* **72** 033809
- [16] Ban Y F , Guo H , Han D A , Sun H 2005 *J. Opt. B: Quant. Semiclass. Opt.* **7** 35
- [17] Niu Y P , Gong S Q 2006 *Phys. Rev. A* **73** 053811
- [18] Ma H M , Gong S Q , Sun Z R , Li R X , Xu Z Z 2006 *Chin. Phys. Lett.* **15** 2588
- [19] Ma H , Tan X , Tian S F , Tong D M , Fan X J 2007 *Chin. Phys. Lett.* **16** 2400
- [20] Yan X A , Song J P , Yin B Y , Jiang W J , Zhen H B , Zhang Y P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3538 (in Chinese)[严祥安、宋建平、尹宝银、蒋文娟、郑淮斌、张彦鹏 2008 物理学报 **57** 3538]
- [21] Chang Z G , Liu J C , Yan K Z 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4927 (in Chinese)[常增光、刘建成、闫珂柱 2008 物理学报 **57** 4927]
- [22] Xu W H , Wu J H , Gao J Y 2002 *Phys. Rev. A* **66** 063812
- [23] Li A Y , Fan X J , Bu F G , Qiao H X , Xu Z Z 2006 *Optoelectronics Lett.* **2** 474

Effect of spontaneously generated coherence on transient evolution of LWI gain in an open Ladder type system *

Yang Yan-Ling¹⁾ Wang Lei¹⁾ Liu Zhong-Bo¹⁾ Lu Hong-Wu²⁾ Fan Xi-Jun^{1)†}

¹ *College of Physics and Electronics , Shandong Normal University , Jinan 250014 , China*)

² *Communication College , Shandong Normal University , Jinan 250014 , China*)

(Received 23 March 2008 ; revised manuscript received 26 April 2008)

Abstract

The effect of spontaneously generated coherence (SGC) on transient evolution of gain of lasing without inversion (LWI) and modulation roles of the injection rate ratio and exit rate on SGC-dependent gain in an open Ladder type three level system are studied by using the numerical solution of the density matrix motion equation of the system. It was shown that : variation of SCC strength will make the transient and final stationary gains having a considerable changing ; when incoherent pumping presents , LWI gain increases with the ratio of injection rates and exit rate decreasing , however , when incoherent pumping is absent , the case is just the opposite ; by choosing suitable values of SGC strength , the injection rate ratio and exit rate , we can obtain the largest transient and final stationary gain.

Keywords : open system , spontaneously generated coherence , transient evolution , gain without inversion

PACC : 4250

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10675076) and the Natural Science Foundation of Shandong Province , China (Grant No. 2006A21).

† E-mail : xjfan108@yahoo.com.cn