

包含三能级原子环形腔的动态非稳与混沌过渡*

YANG Wenge^{1,†} Amitabh Joshi¹ 王海² 肖敏^{1,2,††}

(1 Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701, USA)

(2 山西大学光电研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室 太原 030006)

摘要 在包含三能级原子的环形腔的输出光场中,观察到了由电磁感应透明(EIT)效应导致的动态非稳及混沌.该动态非稳及向混沌的过渡可以通过耦合光场而加以很好地控制.同时,由三能级EIT导致的原子相干改变了系统的吸收、色散及非线性效应,从而极大地增强了系统的动态非稳和混沌过渡特性.建立了一个理论模型来定量地解释观察到的现象.

关键词 非稳,混沌,电磁感应透明

Controlled dynamic instability and route to chaos with three-level atoms inside an optical ring cavity

YANG Wenge^{1,†} Amitabh Joshi¹ WANG Hai² XIAO Min^{1,2,††}

(1 Department of Physics, University of Arkansas, Fayetteville, AR 72701, USA)

(2 The state Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices Institute of Optoelectronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract Dynamic instability and chaos are experimentally observed in the output field of an optical cavity consisting of three-level atoms near the condition of electromagnetically induced transparency (EIT). The observed dynamic instability and route to chaos can be well controlled by the coupling laser field, and are greatly enhanced by the modified absorption, dispersion, and nonlinearity due to induced atomic coherence in the three-level atomic EIT system. A theoretical model is developed to quantitatively explain the observed results.

Keywords instability, chaos, electromagnetically induced transparency

置于光学腔内的二能级原子介质能引发很多有趣的物理现象.现象之一是在20多年前即被广泛研究的,在稳态条件下产生的光学双稳(OB),即对于一个给定的输入强度,腔输出强度有两个可能的稳态值^[1,2].这一双稳现象是由原子系统的非线性特性以及光学腔的反馈引起的,并可被应用于光学开关和光学二极管器件上.理论上,动态非稳及混沌(chaos)均被预言存在于这一原子双稳系统中^[3].然而,尽管很久以前就在二能级双稳系统中观察到了动态非稳^[4],以及在主动激光系统和混合系统中观察到了混沌现象^[3],在被动原子介质中,混沌现象一直没有在实验中被观察到.其主要原因是在二能级双稳系统中,可获得的非线性和色散效

应非常小,原子与腔之间的耦合强度也很低.

如果用三能级原子替换二能级原子,则我们可以利用三能级原子的电磁感应透明(EIT)效应来极大地改变系统的吸收^[5,6]、色散^[7]、及非线性特性^[8,9].由于探针光场穿越三能级EIT介质的群速度变慢,原子介质与光场之间的耦合也得到增强^[10].

* 美国国家自然科学基金(PHY-0354657)资助项目

Reprinted figures(W. Yang *et al* Phys. Rev. Lett., 2005, 95: 093902; W. Yang *et al* Phys. Rev. A, 2004, 70: 033807) with permission from American Physical Society.

2005-10-09 收到

† 现地址为 Department of Electrical Engineering, University of California, Santa Cruz, CA 95064, USA

†† 通讯联系人. Email: mxiao@uark.edu

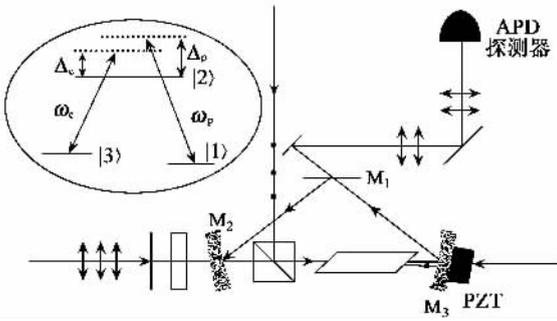


图1 实验装置

通过改变耦合光的频率或强度,我们已用实验证实了双稳曲线的阈值^[11]、形状^[12]以及磁滞回线旋转方向^[13]的可控制性。当输入光场被调制时,输出光场显示出令人感兴趣的形状、转动方向及面积均可变的动态磁滞回线^[14]。除了这些定态或准定态特性外,由三能级原子和光学腔组成的复合系统还具有其他感兴趣的动态特性,比如非稳和向混沌的过渡。与二能级原子系统相比,通过由三能级原子系统中原子能级与光场相互作用所导致的原子相干对系统吸收、色散及非线性特性的控制,三能级原子系统能极大地增强这些动态特性^[5-9]。从实践的角度,利用双光子 Doppler-free 配置(探针光和耦合光同方向穿越 Λ 型三能级原子介质)^[5,6],我们可以利用原子泡代替真空腔中的原子束或冷原子来研究这些动态特性,从而大大简化了实验装置。

三能级 EIT 介质的能级结构如图 1 所示。其动态非稳特性的物理机理可以用两个非线性过程之间的竞争来解释。其中一个非线性过程是光抽运,即耦合光把原子由能级 |3> 抽运到能级 |1>。另一个非线性过程是探针光使原子由能级 |1> 跃迁到能级 |2> 时产生饱和^[15,16]。这两个非线性过程的相对强度由探针光和耦合光的强度以及频率失谐来决定。在所有的外界实验参数固定而对光学腔的长度进行扫描的条件下,如果两个非线性过程的强度相当,则光学腔内的场能够在两个稳态之间自发来回跳跃。而当其中一个非线性过程占据主导地位时,动态振荡则会停止。实验是在如图 1 所示的装置上利用⁸⁷Rb 原子的 D1 线来实现的。光学腔是由三个反射镜组成的环形腔。其中两个(M₁及 M₂)是部分反射镜,而另一个(M₃)是置于 PZT 上的高反射镜。探针光由 M₂ 进入光腔,在腔内环绕时作用于原子的能级 |1> 到 |2> 的跃迁上,最后由 M₁ 离开光腔。耦合光(作用于能级 |3> 到 |2> 的跃迁上)从侧面进入光腔。它与光轴形成一个很小的角度,

以保证它不会在腔内环绕。光学腔的输出由一个雪崩光电二极管(APD)来探测。当实验参数为耦合光功率 $P_c = 11 \text{ mW}$, 探针光输入功率 $P_p^{\text{in}} = 2.8 \text{ mW}$, 耦合光失谐 $\Delta_c = 0$, 探针光失谐分别为 $\Delta_p = 25 \text{ MHz}$, 35 MHz , 45 MHz 时,光学腔的输出从单一的透射峰[图 2(a)]转变为不同频率的多个透射峰[图 2(b)和 2(c)],表明系统已进入动态非稳状态^[16]。输出光场对时间的非对称性是由腔的非线性相移引起的^[8]。我们建立了一个理论模型来描述这个系统。在光学腔内探针光场可由以下方程来确定:

$$\tau \frac{d\alpha_p}{dt} = t_2 \alpha_p^{\text{in}} - \gamma_{\text{cav}} \alpha_p + i\phi_{\text{cav}} \alpha_p, \quad (1)$$

其中 τ 是腔往返时间; t_2 是反射镜 M₂ 的透射系数; γ_{cav} 是光学腔的衰减率。 α_p^{in} 是探针光场输入幅度(关于光场变量的详细定义请参阅文献[16])。(1)式右边第一项是光学腔的输入,第二项是光学腔的衰减,而第三项,即腔内光场往返相移,是所有物理现象的根源。腔内光场往返相移由 4 部分组成。除了在自由空间中传播所产生的相移外,还有由三能级原子介质所引起的线性和非线性相移。它们与 $\chi^{(1)}$ 及 $\chi^{(3)}$ 相关联,并可通过密度矩阵方程来确定[请参阅文献[16],方程(1)]。另一个重要的往返相移源自于由于原子与腔内光场相互作用而引起的激发态能级中原子数的改变。输出光场中的动态非稳是这些相移联合作用的结果。用与实验中相同的参数值,进行输出光场的理论计算,其结果显示于相应的实验测量结果的后面[图 2(d),(e)(f)]。我们可以看到,理论计算与实验结果符合得相当好。在振荡周期随探针光及耦合光失谐而变化的函数曲线中,理论与实验的相符几近完美^[16]。二十多年前,在一个包含二能级原子的光学腔中观察到了位于双稳曲线上分支中的非稳现象^[4]。然而在现行三能级原子系统中,非稳现象出现在一个完全不同的参数范围内。另外,非稳现象可以被探针光及耦合光的参数很好地控制。这一非稳现象可以在非线性光学过程中起到非常重要的作用,尤其是在现在的系统中,EIT 所导致的原子相干可以使系统在很低的光功率下即可产生这一非线性效应。

另一个非常有趣的动态特性是混沌,尤其是通过周期加倍向混沌过渡。尽管很久以前理论上就预言混沌存在于二能级双稳态原子系统中,并且确实在一个简单的激光系统中被实验观察到,直到最近,在二能级或三能级被动原子介质中混沌行为一

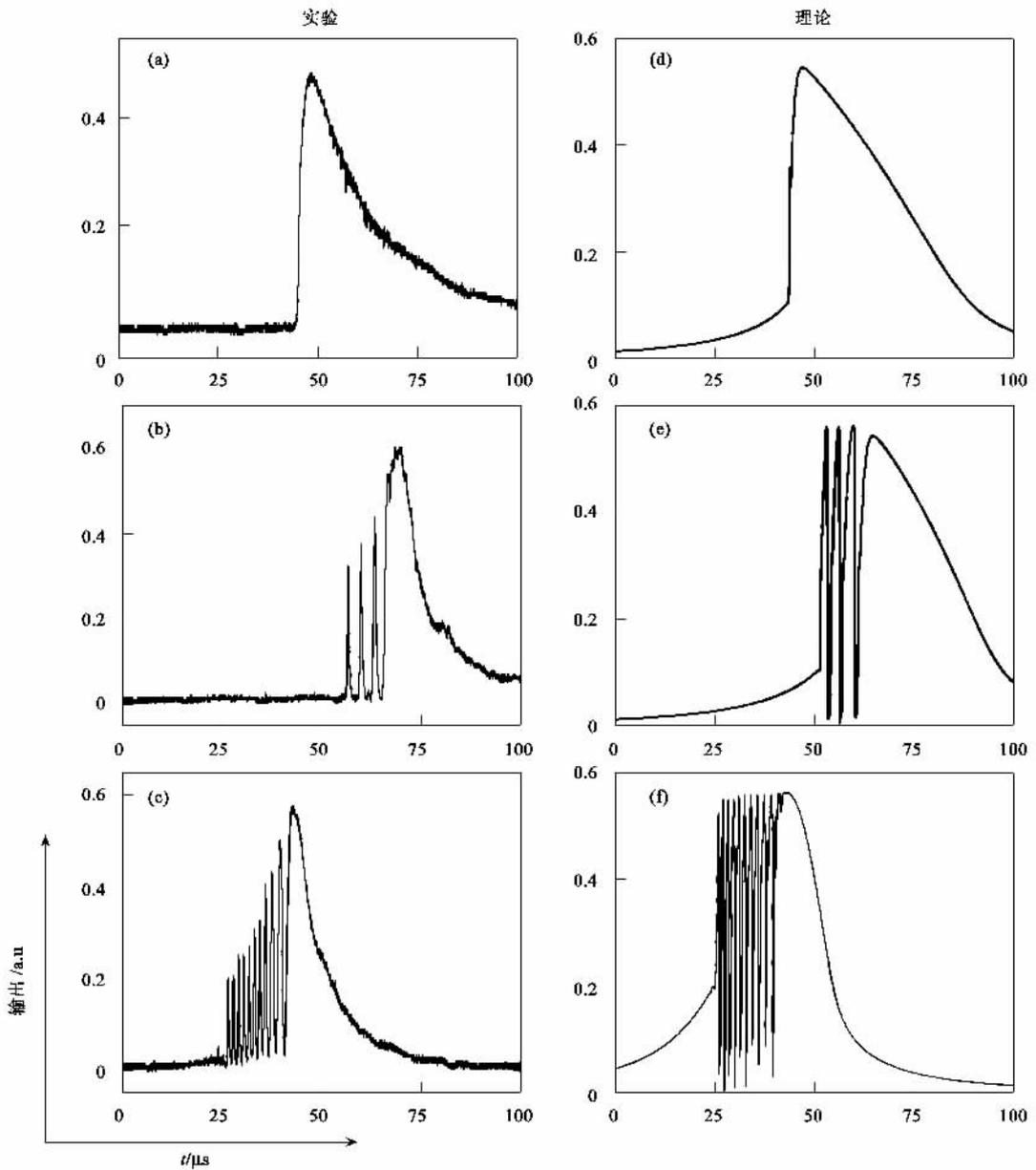


图2 包含 Λ 型三能级原子环形腔的输出光场的实验观察与理论模拟的比较. 左栏为实验观察结果, 右栏为理论模拟结果. 实验与理论所用的参数值为 $P_c = 11$ mW, $P_p^{\text{in}} = 2.8$ mW, $\Delta_c = 0$, 以及 (a), (d) $\Delta_p = 25$ MHz; (b), (e) $\Delta_p = 35$ MHz; (c), (f) $\Delta_p = 45$ MHz

直没有在被观察到^[17]. 利用图1所示的实验装置, 在一个接近EIT谐振条件(小的探针光及耦合光失谐)的全新的参数范围内, 我们观察到了混沌以及通过周期加倍的混沌过渡^[17]. 在这一参数范围内, EIT导致的原子相干极大地改变了系统的吸收、色散及非线性特性, 使系统显示出强烈的线性及非线性色散^[5-9]. 设置实验参数为 $P_c = 20$ mW, $P_p^{\text{in}} = 15$ mW, $\Delta_p = 0$, 然后我们逐渐改变控制参数 Δ_c , 可以发现系统输出从简单的动态振荡(非

稳)通过周期加倍的路径过渡到混沌. 首先, 我们调节探针光失谐 Δ_c 至大约 60 MHz. 当系统输出为如前所述之动态非稳时, 我们停止对腔长度的扫描, 并利用另一台激光器锁住光学腔的频率(长度). 用一个光学探测器对输出光场进行探测并显示于示波器上, 我们可以看到输出光场是一个周期固定的简谐振荡(如图3(a)所示). 然后, 我们改变 Δ_c 至 20 MHz, 振荡周期变成双倍, 如图3(b)所示. 进一步减小 Δ_c 至 10 MHz, 振荡周期再次加倍,

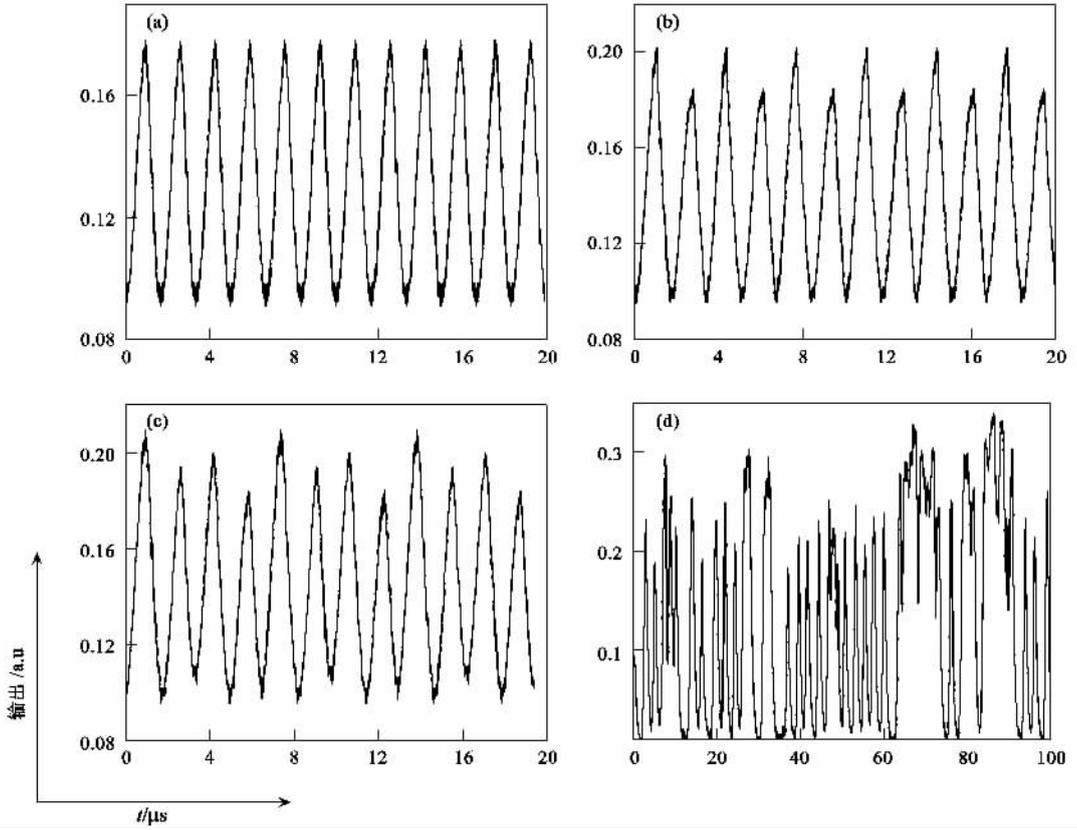


图3 四个不同耦合光失谐条件下,实验记录的光学腔输出光场时间序列. Δ_c 为:(a) 60 MHz;(b) 20 MHz;(c) 10 MHz;(d) 7 MHz

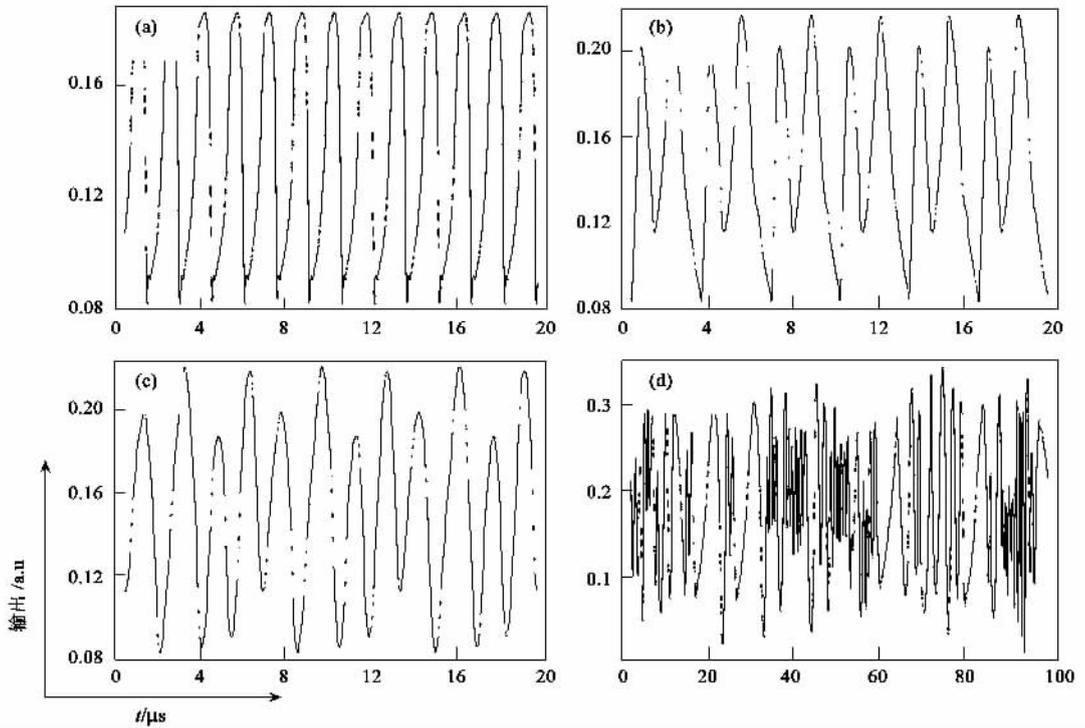


图4 四个不同耦合光失谐条件下,理论模拟的光学腔输出光场时间序列. Δ_c 为:(a) 60 MHz;(b) 20 MHz;(c) 10 MHz;(d) 7 MHz

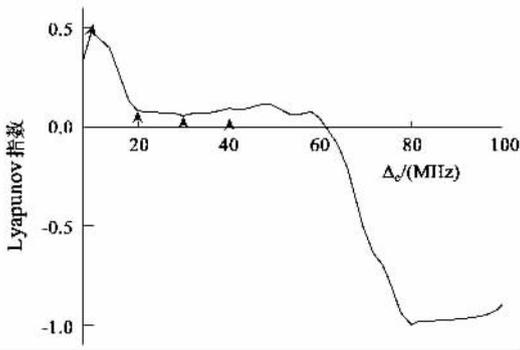


图5 Lyapunov 指数(实线代表理论计算值,实三角代表从实验数据计算所得的值与失谐量 Δ_c 关系)

如图 3(c) 所示. 当 Δ_c 减小到低于 7 MHz 时, 在光学腔的输出光场中不再有周期性的振荡存在, 系统进入了混沌状态, 如图 3(d) 所示. 这个通过周期加倍向混沌的过渡是许多非线性动态系统向混沌过渡的主要方式. 这里, 我们通过实验证明, 通过周期加倍的向混沌的过渡也存在于包含三能级 EIT 介质的光学环形腔内^[17]. 利用与研究动态非稳时所建立的同样的理论模型^[16]及与实验观察相同的参数值, 我们进行了数值模拟计算. 在 Δ_c 分别为 60 MHz, 20 MHz, 10 MHz, 和 7 MHz 时, 其模拟结果如图 4 所示(其他参数值同图 3). 我们可以清楚地看到, 模拟结果与实验观察符合得相当好.

为进一步确认实验结果确实是混沌, 我们对实验中所记录的时间序列(见图 3)及理论模拟结果(见图 4)分别计算了 Lyapunov 指数. 计算结果如图 5 所示^[17]. 当 $\Delta_c < 20$ MHz 时, Lyapunov 指数变成正数, 表明系统开始进入混沌状态. 当 $\Delta_c = 7$ MHz 时, 系统的非线性 Kerr 系数 $\chi^{(3)}$ 达到最大^[8], Lyapunov 指数相应地也达到最大值. 由于我们可以很好地控制实验参数, 以及对线性及非线性特性的深入了解, 这一系统可被用来研究混沌及相关的特性.

结论: 在一个包含三能级原子的环形腔系统中,

我们对光学腔输出光场的动态非稳及混沌作了实验观察和理论研究. EIT 介质中的原子相干及量子干涉效应能够减小系统的线性吸收, 同时增强系统的色散和非线性特性. 三能级原子的这些 EIT 特性开启了研究其他非线性动态特性的大门, 比如可用这一系统来研究在二能级原子系统中不可能实现的其他动态效应, 包括混沌控制和双稳系统中两个稳态之间的隧穿.

参 考 文 献

- [1] Gibbs H M. Optical Bistability : Controlling Light with Light. New York : Academic , 1985 , and references therein
- [2] Lugiato L A. Theory of Optical Bistability , in Progress in Optics. Ed. Wolf E. Amsterdam : North - Holland , 1984 , Vol. 21 , p. 71
- [3] Instabilities and Chaos in Quantum Optics , Springer Ser. Synergetics , Vol. 34. Ed. Arrecchi F T , Harrison R G. Berlin : Springer - Verlag , 1987 , and references therein
- [4] Orozco L A , Rosenberger A T , Kimble H J. Phys. Rev. Lett. , 1984 , 53 : 2547
- [5] Gea - Banacloche J , Li Y , Jin S *et al.* Phys. Rev. A , 1995 , 51 : 576
- [6] Li Y , Xiao M. Phys. Rev. A , 1995 , 51 : R2703
- [7] Xiao M , Li Y , Jin S *et al.* Phys. Rev. Lett. , 1995 , 74 : 666
- [8] Wang H , Goorskey D , Xiao M. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 87 : 073601
- [9] Wang H , Goorskey D , Xiao M. Opt. Lett. , 2002 , 27 : 258
- [10] Wang H , Goorskey D J , Burkett W H *et al.* Opt. Lett. , 2000 , 25 : 1732
- [11] Joshi A , Brown A , Wang H *et al.* Phys. Rev. A , 2003 , 67 : 041801(R)
- [12] Joshi A , Xiao M. Phys. Rev. Lett. , 2003 , 91 : 143904
- [13] Joshi A , Yang W , Xiao M. Phys. Rev. A , 2004 , 70 : 041802 (R)
- [14] Joshi A , Yang W , Xiao M. Opt. Lett. , 2005 , 30 : 905
- [15] Wang H , Goorskey D J , Xiao M. Phys. Rev. A , 2001 , 65 : 011801 (R)
- [16] Yang W , Joshi A , Xiao M. Phys. Rev. A , 2004 , 70 : 033807
- [17] Yang W , Joshi A , Xiao M. Phys. Rev. Lett. , 2005 , 95 : 093902

封面说明

封面人物为 2005 年诺贝尔物理学奖获得者 : Roy. J. Glauber , John L. Hall 和 Theodor W. Hänsch. 关于获奖理论的详细介绍请看本期正文第 207、213 页. 封面所有素材均来自瑞典皇家科学院(The Royal Swedish Academy of Sciences).

(首都师范大学物理系 刘战存)