

# 利用腔内四能级原子相干效应实现全光学信号存储<sup>\*</sup>

王海<sup>†</sup> 常宏 武海斌 谢常德

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

**摘要** 在光学腔与四能级原子组成的非线性光学双稳系统中,利用调谐于不同能级附近的控制信号光脉冲可以使光学腔模产生“正”或“负”的非线性相移,从而实现了光学双稳迟滞曲线的受控移动及双稳“高态”与“低态”之间的可控跃变.基于上述效应,完成了光学信号的全光存储与腔输出状态的低功率控制开关.这一结果为全光及量子信息处理提供了新的可供利用的物理机制.

**关键词** 原子相干性 相干布居俘获 光学双稳 全光存储

## All-optical information memory based on coherent population trapping of four-level atoms in an optical cavity

WANG Hai<sup>†</sup> CHANG Hong WU Hai-Bin XIE Chang-De

(The State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract** In an optical bistability system consisting of an optical cavity and four-level atoms positive and negative phase shifts of an intracavity optical mode can be observed under the action of control signal pulses tuned close to certain energy levels of the atoms. The bistability hysteresis curve can thus be shifted and switching between the "low" and "high" transmission states obtained in a controlled manner. Based on the above effects we have realized all-optical storage and optical switching controlled with low light power. This mechanism may be of potential use for all-optical quantum information processing.

**Key words** atomic coherence, coherent population trapping, optical bistability, all-optical storage

近年来,由原子相干导致的电磁感应透明 (electromagnetically induced transparency, EIT)<sup>[1,2]</sup>和相干布居俘获 (coherent population trapping, CPT)<sup>[3]</sup>效应受到了人们广泛关注.当探针光和耦合光同时与一个  $\Lambda$  型三能级原子系统作用时,两原子跃迁通道之间会发生量子干涉效应,使得原子被相干俘获在两个基态上,而难以向高能级跃迁<sup>[4]</sup>,由此导致介质的光学特性发生极大的变化.在强耦合光条件下,表现为电磁感应透明 (EIT) 现象,即原子介质在共振处对探针光变得透明了(吸收减小乃至为零).在弱耦合光条件下,即当探针光和耦合光强度近似相等时,表现为相干布居俘获效应 (CPT),此时原子介质在共振处对探针光和耦合光都会产生一个小的透明窗口.在 EIT 或 CPT 条件下,不仅介质的线性折射率发生很大变化,而且非线性折射率

也被极大的增强<sup>[5-10]</sup>.将这种具有强非线性效应的 EIT 或 CPT 介质放入光学腔内,就能形成一个可用弱光信号控制的非线性光学振荡器.

在过去 20 多年中,人们偏重于光学腔场与二能级原子相互作用的研究.研究表明,由于原子的非线性响应(介质的吸收和折射率依赖于光强的效应),光学腔输出的光强呈现出非线性双稳特性<sup>[11-13]</sup>,即一个输入态对应两个稳定的输出态.这种二能级原子加光学腔组成的非线性系统不仅提供了一个验证经典光学双稳理论的实验范例<sup>[12]</sup>,而且将二能级原

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号 60325414, 60238010),山西省高等学校拔尖创新人才基金,山西省归国留学基金,山西省自然科学基金(批准号 20011030, 20031007)资助项目

2004-12-09 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人. Email: wanghai@sxu.edu.cn

子放入超高精细度腔内,当光与原子的作用进入强耦合区即腔量子电动力学(cavity-QED,在强耦合区内<sup>[13]</sup>)时,与光学双稳有关的量子现象,例如,真空拉比振荡<sup>[14]</sup>,非经典统计光场的产生<sup>[13,15]</sup>等相继出现,这极大地丰富了二能级原子系统的研究内容。但是,二能级原子系统也具有一些局限性,例如,腔内原子非线性响应低,需要用原子束或冷原子作介质<sup>[12]</sup>,消除多普勒效应,增加原子密度。此外,由于可供耦合的能级只有两个,难以实现用光信号对原子量子态和腔内光场振荡状态的人为控制<sup>[16]</sup>。

将三能级或四能级CPT介质放入光学腔内,组成的非线性光学系统在弱光条件下不仅具有强的非线性效应,而且增加了控制因素,还可以通过改变耦合光参量(强度,频率等)使光学双稳态阈值发生变化。强的非线性与光腔输出可控制特性相结合,使得该系统在全光学通讯和光量子信息处理中具有应用潜力。虽然人们对三能级或四能级CPT介质加光学腔系统作了不少理论和实验研究<sup>[16,17]</sup>,但是,对于多能级原子系统中耦合光参量改变光学双稳态阈值的物理机制尚未深入理解。最近,我们对腔内四能级原子系统中双稳迟滞曲线的可控移动特性与非线性相移的关系进行了实验和理论研究<sup>[18]</sup>。结果表明,由于原子相干导致的强克尔非线性效应,可以在弱信号光( $50\mu\text{W}$ )作用下使探针光产生显著的非线性相移。当信号光产生的非线性相移为正时,双稳迟滞曲线向后移。反之,则向前移。基于这一现象,我们实现了利用两个不同频率的信号光脉冲操控光学腔双稳输出在“高”和“低”态之间的跃变。与一般光开关系统不同的是,在“上”触发(控制)光脉冲过去之后,该系统将并不自动恢复到低输出态,而仍然保持在“高”输出态,直到受到另一个“下”触发(控制)脉冲光的作用为止,反之亦然。这一结果显示该四能级原子加腔组成的光学双稳系统具有信息存储能力,从而可作为光学双稳触发器应用于全光学计算与通讯。下面我们详细介绍实验原理与过程。

原子能级结构和实验装置如图1所示。铷原子蒸汽室与光学谐振腔构成非线性光学系统。铷原子样品池是一个5cm长的玻璃泡,外面包裹多层金属壁以防止杂散磁场的干扰。铷玻璃泡被加热到 $62^\circ\text{C}$ ,以获得较大的原子蒸汽密度( $10^{11}\text{--}10^{12}/\text{cm}^3$ )。铷原子介质被放入一个较高精细常数的环型光学腔中,腔长近似为34.5cm,对应的自由光谱间隔为870MHz。腔镜M2和M3为凹面镜,曲率半径为10cm,M3是高反镜,M2对探针光的反射率为

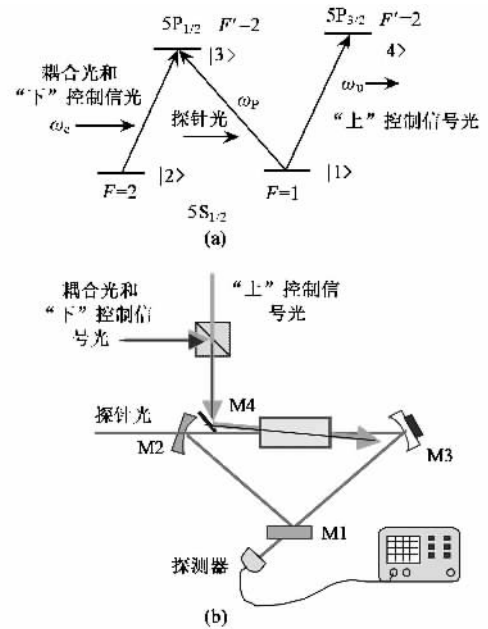


图1 原子能级结构与实验装置图

95%,M1为平面镜,对探针光反射率为99.5%,兼作输出耦合镜。探针光通过输入镜M1耦合到环型腔中,耦合光和“上”“下”控制信号光通过一个高反射镜直接进入铷原子汽室中,与探针光近共线传输(夹角约为 $1^\circ$ )。以最大限度消除多普勒效应的影响<sup>[2]</sup>。铷原子能级结构如图1(a)所示。频率为 $\omega_u$ 的“上”控制光信号作用于 $|1\rangle\rightarrow|4\rangle$ 跃迁能级,频率为 $\omega_c$ 的耦合光和“下”控制光信号作用于 $|2\rangle\rightarrow|3\rangle$ 跃迁能级。我们让二者具有不同的偏振态,以便分控制。频率为 $\omega_p$ 的探针光作用于 $|1\rangle\rightarrow|3\rangle$ 跃迁能级。研究指出,由于光与多能级原子相互作用过程中的量子干涉现象,导致强的交叉和自克尔非线性光学相移。并且,通过改变耦合光或控制光的功率和频率,可以使非线性光学相移的大小和符号发生变化,由此而可能形成双稳迟滞曲线的可控移动<sup>[16]</sup>。我们首次通过实验研究了双稳迟滞曲线移动方向与非线性相移大小和符号的关系。实验中,将探针光调谐到偏离 $|1\rangle\rightarrow|4\rangle$ 跃迁频率70MHz处,将耦合光和“下”控制光信号调谐到 $|2\rangle\rightarrow|3\rangle$ 跃迁共振频率处,并将“上”控制光信号调谐到偏离 $|1\rangle\rightarrow|4\rangle$ 跃迁频率-16MHz处。随后,采用腔扫描技术准确地测量了相干原子介质中的非线性折射率。将腔前探针光与耦合光功率分别设置为1mW和 $130\mu\text{W}$ 。用固定在腔镜M2上的PZT扫描光学腔腔长,在同时关闭“上”“下”控制光或仅打开其中之一的三种不同情况下测定了探针光透射峰在腔长随时间扫描过程中

的移动. 实验结果如图 2 所示, 曲线 *a* 是在“上”“下”控制光被关断的情况下, 腔模的透射峰曲线. 当“上”控制光被打开后, 腔模透射峰由曲线 *a* 向左移动到曲线 *c*, 由前移时间  $\Delta t$  可以计算出对应的腔模发生位相移动  $2\pi/40$ <sup>[9]</sup>. 关断“上”控制光并打开“下”控制光后, 腔模透射峰由曲线 *a* 向右移动到曲线 *b*, 对应于腔模发生位相移动  $-2\pi/30$ . 然后, 将环型腔锁定在共振峰附近(偏离共振  $0.1\text{rad}$ ), 则探针光在腔内近共振而耦合光一次穿过铷原子介质, 二者共同作用于  $\Lambda$  型三能级原子系统中, 导致了原子相干效应的发生, 使系统的非线性效应极大的增强, 从而在普通热原子气室中就可以观察到双稳<sup>[16]</sup>. 用电光调制器扫描输入探针光强度, 并探测腔输出信号, 获得了如图 3 所示的双稳迟滞曲线. 其中, 双稳曲线 *a* 是在所有控制信号光关断, 仅有耦合光存在情况下测得的双稳迟滞曲线. 当输入  $70\mu\text{W}$  的“上”控制光信号时, 由于探针光场产生了  $2\pi/40$  的非线性相移, 双稳迟滞曲线由 *a* 移动到 *c*. 如果去掉“上”控制光而输入  $130\mu\text{W}$  的“下”控制光信号, 则由于产生了  $-2\pi/30$  的非线性相移, 双稳迟滞曲线由 *a* 移动到 *b*. 图 3 中的 *a*, *b* 和 *c* 三条双稳曲线分别与图 2 中 *a*, *b* 和 *c* 三个透射峰相对应. 导致曲线移动的物理机制是控制光感应的非线性相移. 双稳曲线移动与非线性相移的依赖关系, 与我们用腔模输入输出方程数值计算的结果定性一致<sup>[18]</sup>.

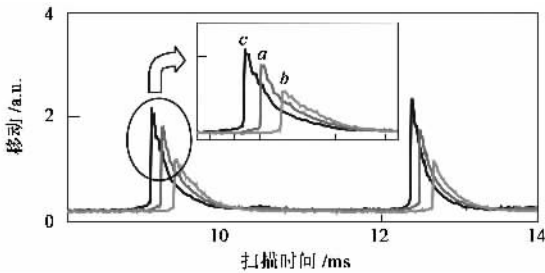


图 2 腔模场透射峰

利用双稳迟滞曲线移动, 我们实现了光学双稳“高态”和“低态”之间的可控跃变. 实验中先关断控制光信号, 将探针光设置在  $1.1\text{mW}$ , 并使腔输出处于双稳迟滞曲线 *a* 中  $A_1$  点(见图 3). 然后打开“上”控制光信号, 由于双稳迟滞曲线由 *a* 移动到 *c*, 从而使系统从“低态” $A_1$  点跃至“高态” $A_2$  点. 当“上”控制光信号被关断后, 系统并不从  $A_2$  点跳回到  $A_1$  点, 而是自动移到曲线 *a* 的“高态” $A_3$  点. 原因是由于  $A_2$  点向  $A_3$  点的变化是一个连续演化过程, 而向  $A_1$  点的变化是一个间断的跳跃过程, 必须有外

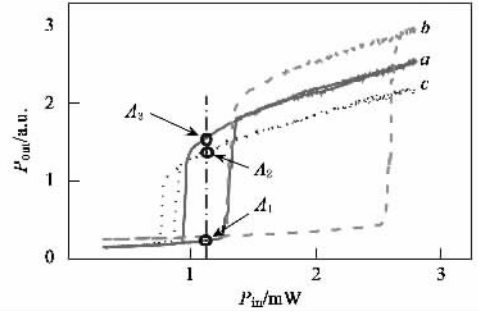


图 3 实验测量的双稳迟滞曲线结果

因诱发. 尤其值得关注的是, 当“上”控制信号光完全穿过原子介质后, 系统将一直保持在  $A_3$  点. 直到另一个“下”控制光信号作用到系统上时, 光场才能从  $A_3$  点跳回到  $A_1$  点.

在此基础上, 我们用一个“上”、“下”控制光信号交替的时序触发脉冲, 演示了光学信号在光学腔内的存储与记忆. 图 4 是记录的实验结果. 其中, 图 4(2)是控制光信号的脉冲时序[ (a)为“上”控制信号光脉冲信号序列 (b)为“下”控制信号光脉冲序列]. 图 4(1)是在交替脉冲触发下的光学腔模透射信号随时间变化的曲线.“上”控制信号光和“下”控制信号光脉冲峰值功率分别是  $70\mu\text{W}$ ,  $270\mu\text{W}$ ; 脉宽分别是  $200\mu\text{s}$ ,  $50\mu\text{s}$ . 在高输出功率处的小台阶对应着当“上”控制信号光脉冲结束时双稳系统从  $A_2$  点移动到  $A_3$  点的变化踪迹. 实验结果显示双稳系统中的“高”、“低”输出态可以在信号光触发下快速的跃变(由于受声光调制器的限制, 我们的实验中最快的跃变速度为  $3\mu\text{s}$ ), 同时光脉冲信息能够被可靠地存储在这个光学双稳系统中.

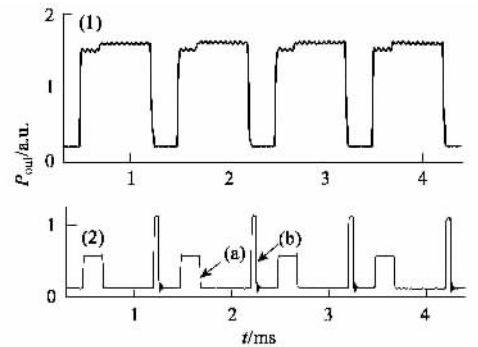


图 4 实验记录的光学信号存储结果 (1)光学腔模信号随时间变化的曲线 (2)控制光信号的脉冲时序

最后, 我们强调, 这里所实现的双稳态跃变与文献 [19] 中的全光开关机制是不同的. 在文献 [19] 中, “开”、“关”两种腔透射状态分别对应着两种不

同的耦合光功率或不同的耦合光频率失谐状态,系统只能作为光开关而没有记忆能力. 在我们的系统中,耦合光保持不变,而用“上”、“下”控制脉冲去“翻转”系统状态,并利用双稳曲线的连续演化实现了信息存储.

综上所述,我们实验研究了在光学腔内的多能级原子系统中,因原子量子相干而增强的非线性光学效应. 由于交叉克尔非线性效应的影响,控制脉冲导致双稳曲线的移动,从而使光腔具备了存储信息的功能. 在 CPT 条件下,介质的非线性极化率很高,而吸收又极低,所以可以在弱光(几十到几百微瓦量级)控制下实现系统的“开”、“关”与信息存储. 这一结果在全光信息处理中有着广泛的应用前景.

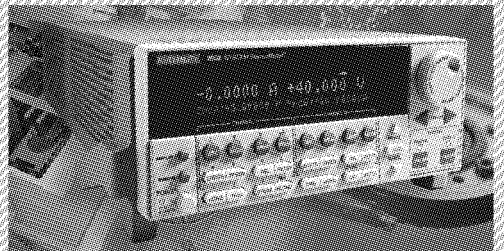
### 参 考 文 献

- [ 1 ] Harris S E, Field J E, Imamoglu A. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64:1107; Harris S E. *Phys. Today*, 1997, 50(7):36
- [ 2 ] Gea-Banacloche J, Li Y Q, Jin S Z *et al.* *Phys. Rev. A*, 1995, 51:576
- [ 3 ] Arimondo E. *Prog. Opt.* 1996, 35:257
- [ 4 ] Lukin M D, Imamoglu A. *Nature*, 2001, 413:273
- [ 5 ] Schmidt H, Imamoglu A. *Opt. Lett.*, 1996, 21:1936
- [ 6 ] Wang H, Goorskey D, Xiao M. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87: 073601
- [ 7 ] Wang H, Goorskey D, Xiao M. *Opt. Lett.*, 2002, 27:1354
- [ 8 ] Kang Hoonsoo, Zhu Yifu. *Phys. Rev. Lett.*, 2003, 91:093601
- [ 9 ] Chang H, Du Y J, Yao J Q *et al.* *Europhys. Lett.*, 2004, 65: 485
- [ 10 ] Xiao M, Wang H, Goorskey D. *Optics & Photonics News*, 2002, 13(9): 44; Xiao M, Wang H, Goorskey D. *Optics & Photonics News*, 2002, 13(12):33
- [ 11 ] Gibbs H M. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, 36:1135
- [ 12 ] Rosenberger A T. *Phys. Rev. A.*, 1991, 43:6284
- [ 13 ] Rempe G, Thompson R J, Brecha R J *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 1991, 67:1727
- [ 14 ] Gripp J, Mielke S L, Orozco L A. *Phys. Rev. A.*, 1997, 56: 3262
- [ 15 ] Mielke S L, Forster G T, Orozco L A. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, 80:3948; Forster G T, Mielke S L, Orozco L A. *Phys. Rev. A*, 2000, 61:053821
- [ 16 ] Joshi A, Brown A, Wang H, Xiao M. *Phys. Rev. A*, 2003, 67:041801 (R); Brown A, Joshi A, Xiao M. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 18:1301
- [ 17 ] Harshawardhan W, Agarwal G S. *Phys. Rev. A*, 1996, 53: 1812; Joshi A, Yang W, Xiao M. *Phys. Rev. A*, 2003, 68: 015806
- [ 18 ] Chang H, Wu H B, Xie C D, Wang H. *Phys. Rev. Lett.*, 2004, 93:213901
- [ 19 ] Wang H, Goorskey D, Xiao M. *Phys. Rev. A*, 2002, 65: 51802(R)

## 美国吉时利 (Keithley) 仪器公司 发布新产品

美国吉时利(Keithley)仪器公司于2005年3月7日在北京国际科技会展中心召开2005年新产品发布会. 几十家专业媒体和公司出席. 该公司副总裁、业务部总经理 Mark A. Hoersten 向专业媒体介绍了该公司最新向市场推出的新一代数字源表 2600 系列和第三代晶圆射频(RF), 并回答了媒体的提问.

2600 系列数字源表(SourceMeter®): 这是一个建立在吉时利公司第三代源测量技术基础之上, 综合了具有本行业最高吞吐量的源测量单元(SMU)和可升级的仪器构成的新的平台, 允许无缝集成 1 至 16 通道, 是构建 ATE 系统的理想选择, 模块化结构并可升级, 用于各种精密的 DC、脉冲以及低频 AC 信号的源-测量应用. 能为包括硅和化合物半导体制造商在内的广阔范围内的电子元器件制造商加快电子元器件测试、提高系统吞吐量, 节省测试系统开发过程的时间和资源, 模块化、灵活且可升级等有效地降低测试成本.



第三代晶圆射频 (RF): 具有能提供连续、自动、实时的测试质量监控, 在提供优等质量结果的同时, 也获得了最高测量产



能、最低运行成本, 以及易于使用的特点. 适合于 200mm 和 300mm 晶圆制造工厂的半导体参数射频(RF)测试系统, 适用于包括高性能逻辑电路生产和高性能模拟集

成电路生产过程中参数测试.

美国吉时利(Keithley)仪器公司在北京、上海、深圳设有办事处.

(本刊)