

# 激发态上钠原子的相干囚禁\*

徐 谷 王育竹 叶 超 周善钰 赵家铭 刘亚淑

(中国科学院上海光机所量子光学开放实验室, 上海 201800)

**摘要** 对 V 型三能级原子系统与双激光场同时共振产生的能级相干效应进行了研究。计算了各能级上的粒子数分布, 实验观测到在相干驻波场中的钠原子被囚禁在激发态上的现象。对比和分析有无干涉效应存在时  $^3S_{1/2}, F = 2$  态上布居数的变化情况。

**关键词** 能级相干, 原子囚禁, 激发态

## 1 引 言

一些原子系统特别是三能级原子系统的能级相干导致了一些新的物理现象。例如无反转激光、介质透明、光在无吸收介质中折射率增强等。这些现象的物理机制依赖于原子系统与外场(电磁场、微波场)相互作用时不同能态之间诱发的一种量子干涉效应<sup>[1~5]</sup>。我们对 V 型三能级原子系统与双激光场作用时产生的原子能级相干效应进行了研究。计算结果表明, 原子系统同时与双光场共振时产生的双光子干涉使一半的粒子保留在基态, 另一半处于两个上能级的相干迭加态。实验中利用一个相干驻波场建立起原子能级相干, 观测到钠原子被囚禁在激发能级上而不通过自发辐射或者受激辐射衰减到低能级上的现象。对比和分析了有无干涉效应存在时  $^3S_{1/2}, F = 2$  态上布居数的变化情况。

## 2 理论模型

V 型三能级原子系统与双激光场作用的能级如图 1 所示。整个系统的密度矩阵运动方程为

$$\dot{\rho}_{11} = i\Omega_1(\rho_{21} - \rho_{12}) + i\Omega_2(\rho_{31} - \rho_{13}) + (\rho_{11} - \rho_{11'})\gamma_1 \quad (1)$$

$$\dot{\rho}_{22} = -i\Omega_1(\rho_{21} - \rho_{12}) + (\rho_{22} - \rho_{22'})\gamma_2 \quad (2)$$

$$\dot{\rho}_{33} = -i\Omega_2(\rho_{31} - \rho_{13}) + (\rho_{33} - \rho_{33'})\gamma_3 \quad (3)$$

$$\dot{\rho}_{21} = -i\Omega_1(\rho_{22} - \rho_{11}) - i\Omega_2\rho_{23} - (\Gamma_{21} + i\Delta_1)\rho_{21} \quad (4)$$

$$\dot{\rho}_{31} = -i\Omega_2(\rho_{33} - \rho_{11}) - i\Omega_1\rho_{32} - (\Gamma_{31} + i\Delta_2)\rho_{31} \quad (5)$$

$$\dot{\rho}_{32} = i\Omega_2\rho_{21} - i\Omega_1\rho_{31} - (\Gamma_{32} - i\Delta)\rho_{32} \quad (6)$$

式中  $\Omega_1 = \mu_{12}E_1/2\hbar$ ,  $\Omega_2 = \mu_{13}E_2/2\hbar$ , 为 Rabi 频率;  $E_i, \omega_i (i = 1, 2)$  分别为激光场振幅和频率;

\* 本工作得到国家自然科学基金资助。

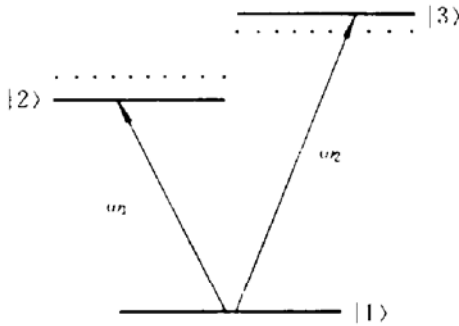


Fig. 1 Energy-level diagram for the analysis.  $\omega_1$  and  $\omega_2$  are resonant frequencies

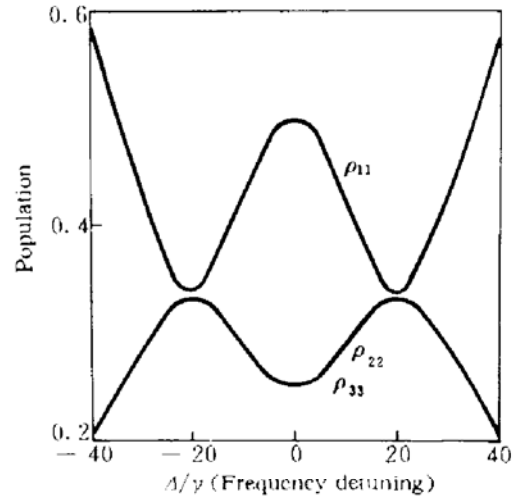


Fig. 2 Population distribution of levels  $|1\rangle$ ,  $|2\rangle$  and  $|3\rangle$  for  $\Omega_1 = \Omega_2$  and  $\gamma_1 = \gamma_2$ . Here  $\rho_{11}$ ,  $\rho_{22}$  and  $\rho_{33}$  are probabilities for the three levels occupancies respectively

$\Delta_{ij}(i, j = 1, 2, 3)$  是频率失谐量,  $\Delta_1 = \omega_{21} - \omega_1$ ,  $\Delta_2 = \omega_{31} - \omega_2$ ,  $\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ ,  $\omega_j$  为原子跃迁频率;  $\gamma$ ,  $\Gamma$  分别是各能级纵向和横向弛豫因子。设原子在  $T = 0$  时刻处于基态, 即  $\rho_{11}(0) = 1$ ,  $\rho_{22}(0) = 0$ ,  $\rho_{33}(0) = 0$ , 由初始条件和运动方程可解出稳定条件下各能级上的粒子数分布。图 2 给出在相同 Rabi 频率和相同自发衰减率条件下 ( $\Omega_1 = \Omega_2, \gamma_1 = \gamma_2$ ) 的粒子数分布。由图可知, 双光场同时与原子系统作用时, 有一半的原子保留在基态 ( $\rho_{11} = 1/2$ ), 另一半原子处于激发态 ( $\rho_{22} = \rho_{33} = 1/4$ )。与此同时的双光子跃迁使钠原子激发态形成一个相干迭加态, 处于相干迭加态的原子不再产生自发辐射或者受激辐射衰减到低能级态, 即原子激发态上的相干囚禁。

### 3 实验与结果

实验中我们利用一个相干驻波场建立起 V 型三能级系统激发态上原子相干。由于驻波场是由相反传播的两个行波  $E^+$  和  $E^-$  构成, 以速度  $V_z$  沿驻波场传播方向运动原子的多普勒频移分别为  $\pm kV_z$ 。当激光频率调到钠原子的  $^3P_{1/2}, F = 1$  和  $^3P_{1/2}, F = 2$  两能级中间时, 即  $\omega_l = (\omega_{31} - \omega_{21})/2$  (如图 3 所示), 两个激光场同时与轴向速度分量为  $V_z = c(\omega_{31} - \omega_{21})/2\omega_l$  的一组原子作用。值得注意的是, 不是所有具有  $V_z$  速度分量的原子都与光场作用, 只有原子运动的多普勒频移  $\pm kV_z$  满足发生从基态  $^3S_{1/2}, F = 2$  到两个激发态  $^3P_{1/2}, F = 1$  和  $^3P_{1/2}, F = 2$  的双光子共振跃迁的那组原子, 从而建立起钠原子激发态上原子相干。

为了证实这个现象, 采用的实验装置如图 4 所示。一个钠原子吸收池置于激光场中。由 Pyrex 玻璃制成的圆柱型吸收池长 25 cm, 直径 2.5 cm。吸收池内钠原子蒸气压力由一个温度控制器控制在  $150^\circ\text{C}$ 。三对赫姆霍兹线圈将吸收池屏蔽起来。在垂直吸收池轴线的方向上加一个  $1.7 \times 10^{-4}\text{T}$  的外磁场。美国相干公司 699-21 型稳频染料激光器频率调至与钠  $D_1$  线共振。圆偏振激光束穿过吸收池, 被调制的一束作为作用光, 直径 3 mm, 强度  $5\text{ mW/cm}^2$  未被调制的一束为探测光, 偏离驻波场 6 mm, 由光电二极管接收。利用锁相探测技术观察记录钠原子  $^3S_{1/2}, F = 2$  态上布居数改变的信号。

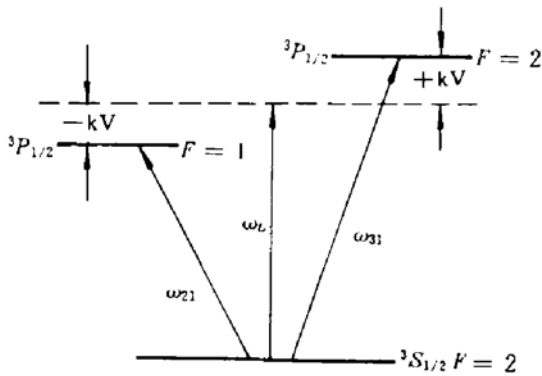


Fig. 3 Partial energy-level diagram of sodium and Doppler shift of atom moving in a standing wave. Here  $\omega_{21}$  and  $\omega_{31}$  are transition frequencies and  $\omega_l$  is the laser frequency

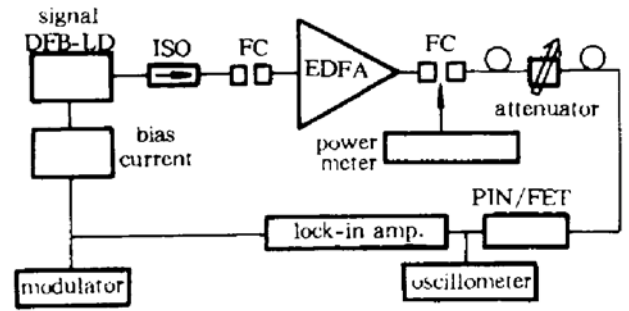


Fig. 4 Experiment setup

实验中首先关闭反射镜 Pr, 光束 1 和光束 3 为相对传播的行波。当激光频率调至能级  $^3P_{1/2}, F=1$  和  $^3P_{1/2}, F=2$  中间时, 由于光抽运, 光束 1 在基态粒子数分布线型上烧两个洞。根据饱和光谱技术原理, 接收器 PD 相应地接收到光束 3 所探测到的变化信号, 如图 5(1)所示的行波情形下峰值 c。这个交叉共振峰值比相邻峰值高两倍。峰值 a, b 分别对应  $^3S_{1/2}, F=2$  到  $^3P_{1/2}, F=1$  和  $^3S_{1/2}, F=2$  到  $^3P_{1/2}, F=2$  的单光子跃迁。然后, 让光路中的反射镜 Pr 工作。光束 1 被反射而形成驻波场, 当激光频率再次调到激发态  $^3P_{1/2}, F=1$  和  $^3P_{1/2}, F=2$  的中间时, 原子同时与两个激光场作用。由光束 3 所探测到的信号谱线型如图 5 曲线 (2) 所示。比较可知, 驻波场的中心峰值比行波场低。

驻波场与原子作用的有效场强比行波场大一倍。而烧孔深度却低于行波场烧孔深度。这是因为在驻波场中存在相干效应, 原子被囚禁在上能级相干叠加态, 自发辐射或者受激辐射受到抑制, 造成基态原子数减少, 因而出现驻波场烧孔比行波场小。我们也注意到驻波场的信噪比不是很好, 这是由于驻波场的噪声比行波场大 4 倍。尽管如此, 中间峰值的减少仍然是明显的。

## 4 结 论

本文研究了 V 型三能级原子系统与双激光场作用诱发激发态上能级相干效应。理论计算结果表明, 干涉效应导致原子系统一半的粒子囚禁在激发态上。实验中利用运动原子在驻波场中的多普勒频移建立起钠原子激发态  $^3P_{1/2}, F=1$  和  $^3P_{1/2}, F=2$  的相干叠加态。在此条件下, 原子被囚禁在激发态上。原子的自发辐射和受激辐射受到抑制, 作用光在基态原子分布线型上的烧孔明显低于无相干效应存在的行波场的烧孔。除此之外, 利用原子运动的多普勒效应来研究原子系统的新的物理现象, 也是一种值得注意的方法。

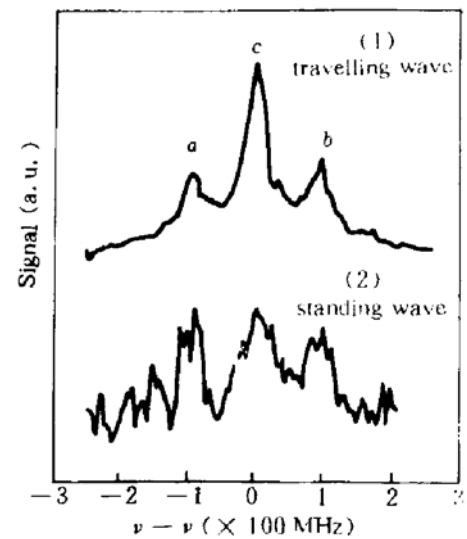


Fig. 5 Change of population distribution of the state  $^3S_{1/2}, F=2$  in the travelling and standing waves respectively

## 参 考 文 献

- 1 S. E. Harris. Laser without inversion; interference of lifetime-broadened resonances. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62** : 1033
- 2 G. S. Agarwal. Origin of gain in systems without inversion in bare or dressed states. *Phys. Rev. A*, 1991, **44** : 128
- 3 K. G. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66** : 2593
- 4 A. Nottelmann, C. Peters, W. Lange. Inversionless amplification of picosecond pulses due to Zeeman coherence. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70** : 1783
- 5 W. E. van der Veer, R. J. J. van Diest, A. Donszelmann. Experimental demonstration of light amplification without population inversion. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70** : 3243
- 6 Xu Gu, Wang Yuzhu *et al.*. Transparency induced by two-photon coherence in the V-shaped three-level system. *Chinese Physics Letter*, 1994, **11** : 420

## Population Trapping of Sodium in Excited States

Xu Gu Wang Yuzhu Ye Chao Zhou Shanyu Zhao Jiaming Liu Yashu

(*Joint Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Academia Sinica, Shanghai 201800*)

**Abstract** The atomic coherence induced by simultaneous bilaser resonance in a V-type three-level system has been studied. The distributions of atomic populations are obtained by solving motion equations, and the atom trapping of sodium in two upper levels has been observed experimentally. A comparison of the change of populations in the state  $^3S_{1/2}$ ,  $F = 2$  is performed under conditions of coherence and no coherence.

**Key words** atomic coherence, population trapping, excited states