

高激发态原子的相干效应*

赵健东[†] 辛洁

(中北大学信息与通信工程学院, 太原 030051)

(2012年2月13日收到; 2012年4月8日收到修改稿)

本文以高激发态原子为研究对象, 由基态、激发态和高激发态能级形成阶梯型三能级系统, 理论上求解阶梯型三能级系统的密度矩阵方程, 研究了高激发态原子的相干效应, 计算获得探测光的吸收和色散曲线, 并研究了高激发态原子间相互作用以及外加电场对相干效应的影响. 结果表明, 外加场可以使吸收和色散曲线产生频移.

关键词: 高激发态原子, 阶梯型三能级, 相干效应

PACS: 33.80.Rv, 42.50.Gy

1 引言

高激发态原子特别是主量子数大于 20 的原子, 具有较大的原子半径和电偶极矩, 具有很强的长程相互作用以及对外加场非常敏感的特性. 并且高激发态原子具有较长的辐射寿命和较小的弛豫速率^[1].

由基态、激发态和高激发态能级组成阶梯型三能级, 可用于研究该系统的量子相干效应. 电磁感应透明是量子相干效应的一种形式, Harris 小组^[2]在上世纪 90 年代提出并首次在原子蒸气中实现了 Lambda 形三能级系统的电磁感应透明, 之后很多研究小组在不同类型的三能级系统中研究了量子相干效应^[3,4], 如相干布居俘获. 并观察到由此产生的慢光效应以及光脉冲的存储现象^[5-7]. Wang 小组^[8]在铷原子蒸气中观察到多暗态现象, 以及铷原子四能级系统中的量子相干效应^[9]和单分子三能级系统的光子统计^[10]. 近年来, 由高激发态原子形成的阶梯型三能级原子系统的相干效应受到人们的关注^[11,12], Adams 小组^[13]在铷原子蒸气中观察到高激发态原子组成的阶梯型三能级系统的电磁感应透明现象. 由于高激发态原子对电场很敏感, 与主量子数的七次方成正比^[1], 他们利用这个特点在该系统中获得很大的电光效应^[14].

本文以高激发态原子为研究对象, 由基态、激发态和高激发态能级形成阶梯型三能级系统, 理论上求解阶梯型三能级系统的密度矩阵方程, 研究了高激发态原子的相干效应, 获得探测光的吸收和色散曲线. 研究了高激发态原子间相互作用以及外加电场对相干效应的影响.

2 阶梯型三能级系统的 Hamiltonian 量和密度矩阵

阶梯型三能级系统由基态 $|g\rangle$, 激发态 $|e\rangle$ 和高激发态 $|r\rangle$ 组成, 以铯原子为例: 基态为 $6S_{1/2}$ ($F = 4$), 激发态为 $6P_{3/2}$ ($F' = 5$), 高激发态为 nS (n 为主量子数 = 35—40). 如图 1(a) 所示.

其 Hamiltonian 量表示为

$$H = H_0 + H_I + V, \quad (1)$$

H_0 , H_I 和 V 分别为原子的 Hamiltonian 量, 光与原子相互作用 Hamiltonian 量, 以及高激发态原子间的相互作用或电场对高激发态能级的作用.

$$H_0 = \hbar\omega_1 |1\rangle \langle 1| + \hbar\omega_2 |2\rangle \langle 2| + \hbar\omega_3 |3\rangle \langle 3|, \quad (2)$$

$$H_I = -\frac{\hbar}{2} \left(\Omega_p e^{-i\phi_1} e^{-i\omega_p t} |1\rangle \langle 2| + \Omega_c e^{-i\phi_2} e^{-i\omega_c t} |2\rangle \langle 3| \right) + \text{c.c.}, \quad (3)$$

* 中北大学 2010 年校基金资助的课题.

[†] E-mail: zhaojiandong@nuc.edu.cn

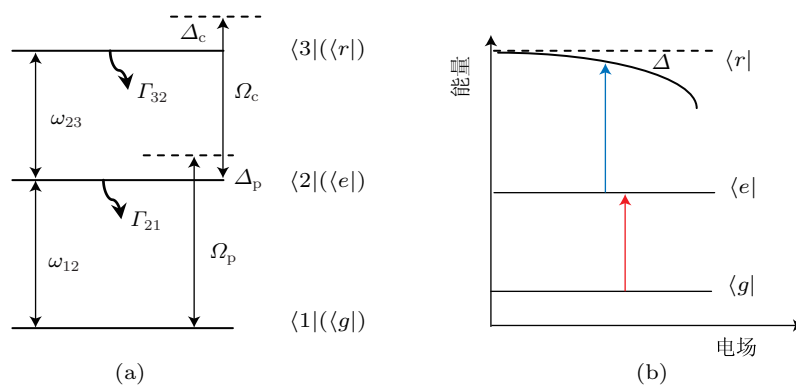


图1 (a) 阶梯型三能级示意图, $|g\rangle$, $|e\rangle$ 和 $|r\rangle$ 分别为基态、激发态和高激发态; (b) 高激发态的 Stark 能级, Δ 表示由于电场作用产生的高激发态的能级频移

其中, $\Omega_p = \frac{\mu_{12}\varepsilon}{\hbar}$ 为探测光的 Rabi 频率, ε 为弱探测场的振幅, μ_{12} 为对应的跃迁偶极距, Ω_c 为强抽运光的 Rabi 频率, ω_c 和 ω_p 表示 $|2\rangle \rightarrow |3\rangle$ (抽运光作用) 和 $|1\rangle \rightarrow |2\rangle$ (探测光作用) 能级跃迁的频率. 根据密度矩阵的运动方程,

$$i\hbar \frac{d}{dt} \hat{\rho} = [\hat{H}, \hat{\rho}] = \hat{H} \hat{\rho} - \hat{\rho} \hat{H}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{d}{dt} \hat{\rho} = & \left\{ \hbar\omega_1 |1\rangle \langle 1| + \hbar\omega_2 |2\rangle \langle 2| + \hbar\omega_3 |3\rangle \langle 3| \right. \\ & + \left[-\frac{\hbar}{2} \left(\frac{\mu_{12}\varepsilon}{\hbar} e^{-i\omega_p t} |1\rangle \langle 2| \right. \right. \\ & + \left. \left. \Omega_c e^{-i\phi} e^{-i\omega_c t} |2\rangle \langle 3| \right) + \text{c.c.} + V \right] \hat{\rho} \\ & - \hat{\rho} \left\{ \hbar\omega_1 |1\rangle \langle 1| + \hbar\omega_2 |2\rangle \langle 2| + \hbar\omega_3 |3\rangle \langle 3| \right. \\ & + \left[-\frac{\hbar}{2} \left(\frac{\mu_{12}\varepsilon}{\hbar} e^{-i\omega_p t} |1\rangle \langle 2| \right. \right. \\ & + \left. \left. \Omega_c e^{-i\phi} e^{-i\omega_c t} |2\rangle \langle 3| \right) \right. \\ & \left. \left. + \text{c.c.} + V \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

将 (5) 式写成矩阵的形式, 并考虑上能态由于自发辐射所产生的辐射衰减 Γ , 在不考虑高激发态原子间相互作用的条件下将矩阵元化简后的非对角矩阵元为 [3,4]

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{31} = & -[\gamma_{31} - i(\Delta_p + \Delta_c)]\rho_{13} - \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{21} \\ & + \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{32}, \\ \dot{\rho}_{21} = & -(\gamma_{21} - i\Delta_p)\rho_{21} + \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{11}) \\ & - \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{31}, \\ \dot{\rho}_{32} = & -(\gamma_{32} - i\Delta_c)\rho_{32} + \frac{i}{2}\Omega_c(\rho_{33} - \rho_{22}) \\ & + \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{31}, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 $\gamma_{ij} = (\Gamma_i + \Gamma_j)/2$ 表示能级 i 向 j 跃迁的衰减

速率, Γ_i 为能级 $|i\rangle$ 的自发辐射衰减率. 由于 $|1\rangle$ 为基态, 所以 $\Gamma_1 = 0$. $\Delta_p = \omega_p - \omega_{21}$, $\Delta_c = \omega_c - \omega_{32}$ 为探测光和抽运光的失谐量. 方程 (6) 为阶梯型三能级系统的密度矩阵方程. 解方程组求出 ρ_{12} , 可知探测光通过阶梯型三能级系统而不考虑高激发态原子间或外场作用时系统的行为.

3 密度矩阵方程的解和结果分析

首先考察原子在初始状态的情形, 由于初始时没有光与原子作用, 所以假设原子在初始状态处于基态, 而且只考虑介质的一阶极化, 即

$$\rho_{11}(0) \approx 1, \quad \rho_{22}(0) = \rho_{33}(0) \approx 0. \quad (7)$$

高激发态原子的寿命很长 [15], 达几十微秒的量级, 与激发态原子的寿命相比大三个数量级, 其自发辐射很小, 因此 Γ_3 的影响近似忽略. 另外矩阵元 ρ_{31} 表示能级 $|1\rangle$ 和 $|3\rangle$ 之间的相干, 在弱探测光的情况下, 可以进一步忽略 ρ_{23} 的作用, 在这些条件下, 方程 (6) 进一步表示为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{31} = & -[-i(\Delta_p + \Delta_c)]\rho_{13} - \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{21}, \\ \dot{\rho}_{21} = & -(\Gamma_2 - i\Delta_p)\rho_{21} + \frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{11}) \\ & - \frac{i}{2}\Omega_c\rho_{31}, \\ \dot{\rho}_{32} = & -(\Gamma_2 - i\Delta_c)\rho_{32} + \frac{i}{2}\Omega_c(\rho_{33} - \rho_{22}) \\ & + \frac{i}{2}\Omega_p\rho_{31}. \end{aligned} \quad (8)$$

矩阵元 ρ_{21} 表示为

$$\rho_{21} = \frac{\frac{i}{2}\Omega_p(\rho_{22} - \rho_{11})}{\gamma_{21} - i\Delta_p + \frac{\Omega_c^2/4}{\gamma_{31} - i(\Delta_p + \Delta_c)}}$$

$$\approx -\frac{\frac{i}{2}\Omega_p}{\gamma_{21} - i\Delta_p + \frac{\Omega_c^2/4}{-i(\Delta_p + \Delta_c)}}. \quad (9)$$

由探测场的极化率方程

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}\varepsilon_0 E_p [\chi(\omega_p) e^{-i\omega_p t} + \text{c.c.}] \\ &= -\mu_{21} N \rho_{21} e^{-i\omega_p t} + \text{c.c.}, \end{aligned} \quad (10)$$

其中 N 为原子数密度, 可知, 极化率表示为

$$\chi = \chi_1 + i\chi_2 = \frac{2\mu_{21}N}{\varepsilon_0 E_p} \rho_{21}. \quad (11)$$

极化率的实部和虚部表示原子介质的色散系数和吸收系数. 对于铯原子, T_2 约为 5.2 MHz, 不考虑相互作用时抽运光的失谐量 $\Delta_c = 0$, 探测光的 Rabi 频率为 $\Omega_p = 0.01$ MHz. 理论计算的阶梯型三能级系统在不考虑激发态原子间相互作用条件下的吸收和色散曲线如图 2 所示.

图 2 为只有探测场与原子作用时, 即抽运光的 Rabi 频率为 $\Omega_c = 0$ MHz 的吸收和色散曲线. 吸收曲线, χ 的虚部, 表示出探测光跃迁的均匀线型 (图 2(a)); 图 2(b) 为色散曲线, χ 的实部.

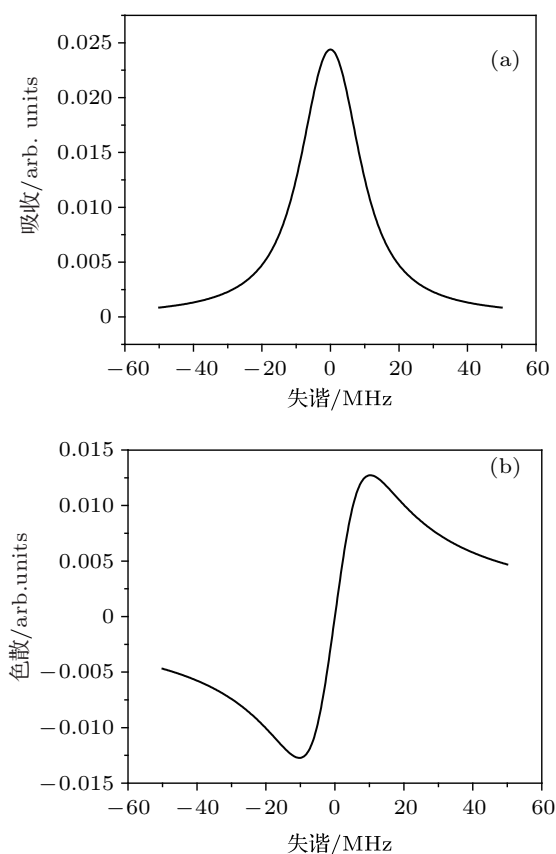


图 2 抽运光 $\Omega_c = 0$ MHz 时, 探测光的正常吸收线 (a) 和色散曲线 (b)

当引入一个确定的抽运场时, 探测场的吸收轮廓有明显的变化, 如图 3(a) 中黑色实线所示为抽运场 Rabi 频率为 $\Omega_c = 10$ MHz 时的吸收. 由图可见, 探测场吸收线被分为两部分, 在探测光共振位置其吸收减小, 产生了一个透明窗口, (即所谓的电磁感应透明效应), 对应的色散曲线的中心有一斜率很大的色散效应 (图 3(b) 黑色实线), 这是光与原子相干相互作用的结果.

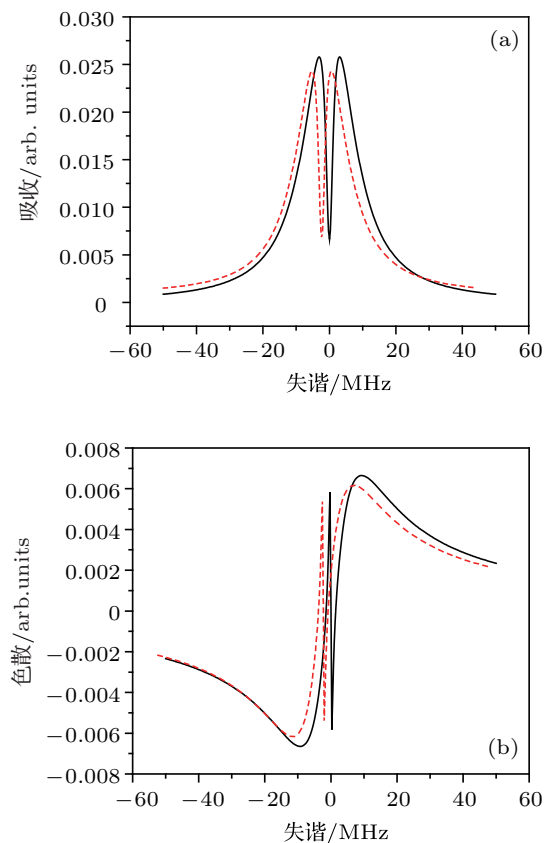


图 3 抽运光为 $\Omega_c = 10$ MHz 时, 探测光的吸收 (a) 和色散曲线 (b) (在探测光共振位置出现了一个透明窗口和对应的很陡的色散, 黑色的实线表示 $\Omega_c = 0$ 的结果, 红色的虚线表示 $\Omega_c = -3$ MHz 的结果)

对于阶梯型三能级系统中的上能级是高激发态能级的情况, 我们需要考虑高激发态原子间的相互作用. 对于高激发态原子, 特别是主量子数大于 20 的激发态, 原子半径大, 偶极距很大具有很强的偶极相互作用, 同时高激发态原子具有很大的极化率, 很容易受到外界如外电场的影响. 例如, 外电场可以使高激发态产生分裂和能级频移 [16], 如图 1(b) 所示.

在外电场较小的条件下, 电场对基态和激发态能级产生的频移很小可以忽略不计, 但是高激发态能级 $|r\rangle$ 则会产生较大的 Stark 频移. 对应于

上面提到的阶梯型三能级系统的密度矩阵, 这时抽运光的频率相对于原子能级具有了一定的失谐. 取 $\Delta_c = -3$ MHz, 即由于电场产生的 Stark 频移为 3 MHz 时计算的吸收和色散曲线如图 3 中的虚线所示. 与没有电场或相互作用的情况相比较, 电磁感应透明峰和色散曲线有一个位移. 色散曲线的变化表示探测光经过介质时折射率的变化. 这种现象也是一种电光效应, 文献 [14] 中利用高激发态原子的电磁感应透明现象测量了铷原子蒸气池中由于电场的作用产生的折射率的变化, 获得了铷原子的电光系数可达 10^{-6} m/V².

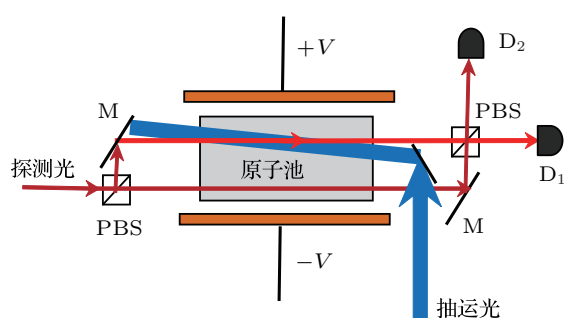


图 4 测量三能级系统电光系数的示意图 (D_1 和 D_2 为探测器, PBS 为偏振分光棱镜, M 为反射镜, V 为外加的直流电源)

根据上面的理论计算, 我们提出如下的实验方案测量原子样品的折射率和电光系数. 如图 4 所示为利用马赫 - 曾德 (Mach-Zehnder) 干涉仪测量原子样品的示意图.

当挡住抽运光的时候可以测量探测光的吸收, 打开抽运光测量阶梯型三能级系统的相干特性. 打开电源增加外电场, 检测电场对阶梯型三能级系统的影响和测量原子蒸气的折射率的变化情况.

4 结论

本文通过求解由高激发态原子组成的阶梯型三能级系统的密度矩阵方程, 获得了阶梯型三能级系统的吸收和色散曲线, 当抽运光等于零时, 弱探测光与对应的原子能级共振时表现出一般的吸收特性, 而当抽运光不等于零且与原子能级共振时, 弱探测光在共振位置产生一个透明窗口, 这是由能级间的相干效应产生的结果. 当存在外电场时, 弱探测光的透明窗口和对应的色散会发生频移, 从而产生折射率的变化, 即产生电光效应, 本文并提出了一种用于测量这种电光系数的方案.

- [1] Gallagher T F 1994 *Rydberg Atoms* (Cambridge University Press)
- [2] Harris S E, Field J E, Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107
- [3] Xiao M, Li Y Q, Jin S, Gea-Banacloche 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 666
- [4] Gea-Banacloche J, Li Y, Jin S, Xiao M 1995 *Phys. Rev. A* **51** 576
- [5] Hau L V, Harris S E, Dutton Z, Behroozi C 1999 *Nature* **397** 594
- [6] Liu C, Dutton Z, Behroozi C, Hau L V 2001 *Nature* **409** 490
- [7] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A, Walsworth R L, Lukin M D 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 783
- [8] Wang B, Li S, Wu H, Chang H, Wang H, Xiao M 2005 *Phys. Rev. A* **72** 043801
- [9] Wang D, Zheng Y 2011 *Phys. Rev. A* **83** 013810
- [10] Peng Y, Zheng Y, Brown F 2007 *J. Chem. Phys.* **126** 104303
- [11] Teo B K, Feldbaum D, Cubel T, Guest J R, Berman P R, Raithel G 2003 *Phys. Rev. A* **68** 053407
- [12] Zhao J, Zhu X, Zhang L, Feng Z, Li C, Jia S 2009 *Optics Express* **17** 15821
- [13] Mohapatra A K, Jackson T R, Adams C S 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 113003
- [14] Mohapatra A K, Bason M G, Butscher B, Weatherill K J, Adams C S 2008 *Nature Phys.* **4** 890
- [15] Feng Z, Zhang L, Zhao J, Li C, Jia S 2009 *J. Phys. B* **42** 145303
- [16] Zimmerman M L, Littman M G, Kash M M, Kleppner D 1979 *Phys. Rev. A* **20** 2251

Coherence effect of high excited state atoms*

Zhao Jian-Dong[†] Xin Jie

(College of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

(Received 13 February 2012; revised manuscript received 8 April 2012)

Abstract

The ladder three-level system including ground state, excited state and high excited state is investigated by using the density matrix equations. The coherence effect of ladder three-level system is analyzed, and absorption and dispersion curves of weak probe laser are obtained. The effects of interaction between high excited atoms and external electric field on the coherence effect are also investigated. The result shows that the interaction between high excited atoms or the external field can make the absorption curve and the dispersion curve shifted.

Keywords: high excited atoms, ladder three-level, coherence effect

PACS: 33.80.Rv, 42.50.Gy

* Project supported by the fund for North University Of China 2010.

[†] E-mail: zhaojiandong@nuc.edu.cn