

文章编号: 0258-7025(2005)01-0016-05

# 铯原子 $\Lambda$ 型塞曼子能级结构中的 电磁诱导透明

王彦华, 王军民\*, 闫树斌, 刘 涛, 张天才

(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, 山西 太原 030006)

**摘要** 采用左旋和右旋圆偏振光分别作为探测光和耦合光, 作用于铯原子  $6^2S_{1/2}F = 3-6^2P_{3/2}F' = 2$  简并二能级系统, 借助探测光的吸收光谱观察到了由简并二能级中  $\Lambda$  型塞曼子能级结构导致的电磁诱导透明(EIT)现象。同时研究了不同耦合光的强度和失谐对电磁诱导透明的影响。由于在多普勒展宽背景下圆偏振光对塞曼子能级间的光抽运, 从而不同塞曼子能级上布居出现明显的差异, 电磁诱导透明的作用程度有所不同。而且对于在扫描探测光频率时由于存在速度选择机制使探测光通过铯气室后的吸收谱线发生的畸变作了定性分析。

**关键词** 量子光学; 电磁诱导透明; 铯原子; 简并二能级系统;  $\Lambda$  型塞曼子能级

**中图分类号** O 431.2 **文献标识码** A

## Electromagnetically Induced Transparency in $\Lambda$ -Type Zeeman Sublevels of Cesium Atoms

WANG Yan-hua, WANG Jun-min, YAN Shu-bin, LIU Tao, ZHANG Tian-cai

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

**Abstract** Employing two lasers as the coupling and probe fields which have opposite circular polarization ( $\sigma^+$  and  $\sigma^-$ ), electromagnetically induced transparency (EIT) in  $\Lambda$ -type Zeeman sublevels of cesium  $6^2S_{1/2}F = 3-6^2P_{3/2}F' = 2$  degenerate two-level system has been demonstrated via probe absorption spectra. The effect of the intensity and detuning of different coupling laser on EIT was also investigated in experiments. Within the Doppler background, optical pumping among Zeeman sub-levels and the population of different Zeeman sub-levels can dominate the intensity of EIT effect. And the physical reason of the rugged spectra are presented qualitatively.

**Key words** quantum optics; electromagnetically induced transparency; cesium atom; degenerate two-level system;  $\Lambda$ -type Zeeman sublevels

## 1 引 言

相干布居俘获(CPT)<sup>[1]</sup>的提出与实验实现, 为相干光场与原子相互作用的研究开辟了一个新的领域。同相干布居俘获相关的电磁诱导透明(EIT)<sup>[2,3]</sup>、无反转光放大(AWI)<sup>[4]</sup>、电磁诱导吸收

(EIA)<sup>[5,6]</sup>等效应成为量子光学近年来研究的热点。电磁诱导透明从理论和实验上已进行了广泛的研究, 形成的群速度小于光速的介质还可以实现光存储<sup>[7,8]</sup>, 将会有广阔的应用前景。而电磁诱导吸收相对于电磁诱导透明则表现出相反的属性, 具有超光速的群速度和长寿命的相干效应<sup>[9]</sup>, 也逐步得到

**收稿日期**: 2004-03-18; **收到修改稿日期**: 2004-06-28

**基金项目**: 国家自然科学基金(60178006, 10374062), 山西省自然科学基金(20021030)和山西省回国留学人员科研经费资助项目。

**作者简介**: 王彦华(1976—), 男, 山西临汾人, 山西大学光电研究所博士研究生, 主要从事半导体激光技术、相干光谱及冷原子物理等方面的实验研究工作。

\* 通信联系人。E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

重视。对电磁诱导吸收的实验研究主要是针对碱金属原子  $D_2$  线  $F_g$  到  $F_e = F_g + 1$  的简并二能级循环跃迁<sup>[5,6,9,10]</sup>。随着耦合光的光强增大,在电磁诱导吸收增强峰的内部还出现了吸收减弱的凹陷<sup>[11]</sup>,其深层的物理机制尚不是很清楚。事实上光场同原子的相互作用首先是在二能级原子模型上讨论的,但是现实世界几乎不存在这种理想的原子系统,针对由属于两个超精细能级的多个塞曼子能级形成的简并二能级系统的研究正逐步为人们所关注。文献[12,13]对耦合光作用下简并二能级系统的吸收光谱作了理论探讨。文献[14]研究了光场作用下铯原子简并二能级系统的汉勒(Hanle)效应。但是对于电磁诱导透明理论和实验研究则大多集中在由原子精细能级及/或超精细能级构成的三能级系统,在简并二能级系统中的电磁诱导透明研究则较少<sup>[15,16]</sup>。

本文基于铯原子  $6^2S_{1/2} F = 3$  和  $6^2P_{3/2} F' = 2$  超精细能级构成的简并二能级系统,采用  $\sigma^+$  和  $\sigma^-$  圆偏振光分别作为耦合光和探测光,在铯原子气室中观察到了由简并二能级中  $\Lambda$  型塞曼子能级结构导致的电磁诱导透明现象。对于由原子的超精细能级组成的简并二能级系统,在考虑超精细能级的光抽运和基于塞曼子能级间的相干性、圆偏振光造成的塞曼子能级光抽运效应后进行了简单的讨论。实验中还研究了随着耦合光的强度变化和频率失谐量的不同对电磁诱导透明吸收光谱的影响。

## 2 实验方案及装置

铯原子基态  $6^2S_{1/2}$  有两个超精细能级  $F = 3$  和  $F = 4$ ,而激发态  $6^2P_{3/2}$  有四个超精细能级  $F' = 2, 3, 4, 5$ 。偶极跃迁选择定则要求超精细能级间的跃迁满足  $\Delta F = 0, \pm 1$ ,其中  $F = 4-6^2P_{3/2} F' = 2$  是禁戒跃迁,且一般情况下  $6^2P_{3/2}$  态的超精细分裂远大于激光线宽,所以  $F = 3-F' = 2$  超精细跃迁可看作封闭的循环跃迁。在零磁场情况下,超精细能级中还包含有简并的  $2F + 1$  个塞曼子能级,因此就构成了简并的二能级系统;塞曼子能级间的跃迁遵循选择定则  $\Delta m_F = 0, \pm 1$ 。 $\Delta m_F = 0$  对应线偏振光, $\Delta m_F = +1$  对应  $\sigma^+$  圆偏振光, $\Delta m_F = -1$  对应  $\sigma^-$  圆偏振光。在这个系统同光场相互作用过程中,同一个超精细能级的塞曼子能级间的光抽运会影响到探测光的吸收,不少有关电磁诱导透明的实验中探测光功率都在几十微瓦左右,探测光本身已经完全可以影响到基态布居的分布。所以耦合光以及探测光的光强是

很关键的一个因素,应尽量减小探测光光强,以使探测光对于原子布居的影响可忽略。

实验中采用耦合光和探测光同方向传输的方案,从而使两束光可以作用于同一速度群的原子。如图 1 所示,选用两束具有相反偏振方向的圆偏振光 ( $\sigma^+$  和  $\sigma^-$ ) 分别作为耦合光和探测光。

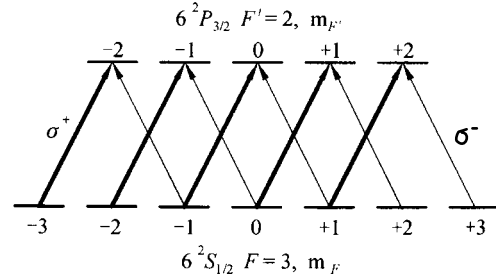


图 1 与实验相关的铯原子  $6^2S_{1/2} F = 3-6^2P_{3/2} F' = 2$

简并二能级系统中的塞曼子能级简图

$\sigma^+$  和  $\sigma^-$  分别代表圆偏振的耦合光和探测光

Fig. 1 Diagram of relevant Zeeman sublevels of cesium

$6^2S_{1/2} F = 3-6^2P_{3/2} F' = 2$  degenerate two-level system

$\sigma^+$  and  $\sigma^-$  indicate the circularly-polarized coupling field and probe field, respectively

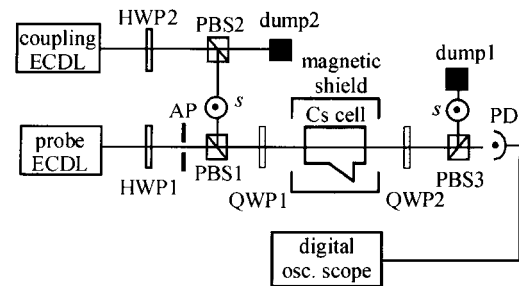


图 2 实验装置示意图

ECCL: 外腔半导体激光器; AP: 光阑; HWP: 半波片;

QWP: 1/4 波片; PBS: 偏振分光棱镜; PD: 光电探测器

Fig. 2 Experimental setup

ECCL: external-cavity diode lasers; AP: aperture; HWP: half-wave plate; QWP: quarter-wave plate; PBS: polarization beam splitter cubes; PD: photodiode

实验装置如图 2 所示,同文献[17]类似。为了获得近简并的二能级系统,在铯泡的周围使用了三层高磁导率的材料包覆,估计剩余磁场在  $1 \sim 2 \mu\text{T}$  左右。实验中未对铯泡采取主动控温,但屏蔽装置使铯泡同外界环境相对隔离,可减小室温波动对铯泡温度的影响。光栅外腔半导体激光器(ECCL)的线宽均在约  $2 \text{ MHz}$  左右( $\sim 1 \text{ s}$ )。两台光栅外腔半导体激光器均可以通过扫描光栅外腔的压电陶瓷(PZT)上的电压对输出光的频率进行扫描。用作耦合光的光栅外腔半导体激光器(Toptica DL-100)工

作在  $6^2S_{1/2}F=3$  到  $6^2P_{3/2}$  的跃迁频率附近,并可通  
过改变加在光栅上的直流电压微调激光器的工作频  
率.用作探测光的光栅外腔半导体激光器则周期性  
地扫过  $F=3-F'=2,3,4$  超精细跃迁,输出光经过  
一个分束器分出一束光进行饱和和吸收光谱监测(未  
在图 2 中画出),作为参考频率来标定探测光的吸收  
光谱.经过整形后耦合光的光斑接近圆形,其直径  
约 3.5 mm 左右.通过转动 PBS2 前的  $\lambda/2$  波片改  
变耦合光偏振方向,由于 PBS2 的选偏作用,耦合光  
到达铯气室处功率可在 0~20 mW 范围内调节.探  
测光则通过调节 PBS1 前的  $\lambda/2$  波片并调整可变光  
阑 AP 使通过铯气室的探测光光斑直径约 1.5 mm  
左右,功率约  $6 \mu\text{W}$ .当两束光通过 PBS 选偏后,相  
互垂直的线偏振光经过偏振棱镜 PBS1 很好地重合  
后,通过  $\lambda/4$  波片 QWP1,当线偏振光的偏振方向和  
 $\lambda/4$  的光轴方向成  $45^\circ$  时就可以转换成圆偏振光.  
这样可以把两个相互垂直的线偏振光转换成  $\sigma^+$  和  
 $\sigma^-$  两个相反偏振方向的圆偏振光,通过一个 4 cm  
长的铯气室后,用另一个  $\lambda/4$  波片 QWP2 使  $\sigma^+$  和  
 $\sigma^-$  圆偏振光又转换为相互垂直的线偏振光.随后  
使用一个消光比大于 40 dB 的格兰-泰勒棱镜 PBS3  
把两束光分开,用探测器 PD 接收探测光,并连接数  
字存储示波器和计算机,用来观察、记录获得的信  
号.由于铯原子  $D_2$  线在对应波长为 852 nm 附近  
时有较明显的吸收,而且随着探测激光频率的变化  
吸收强度有差别,当对探测光的频率进行扫描时,就  
可以得到探测光的吸收光谱.

### 3 实验结果及讨论

相干光场与原子的相互作用受很多因素的影  
响,包括光场的模式、线宽、偏振态和强度,原子的能  
级结构、基态和激发态的衰减率,还有磁场等因素.  
一个角动量量子数为  $F$  的超精细能级包含  $2F+1$   
个简并的塞曼子能级.在简并二能级系统中,对于  
 $\Delta m_F = +1$  和  $\Delta m_F = -1$  的跃迁几率分布是对称的,  
所以光场是  $\sigma^+$  圆偏振还是  $\sigma^-$  圆偏振,仅是相关的跃  
迁能级不同,其相反的设置物理过程是完全类似的.  
因此,在实验中并没有对耦合光和探测光场具体的  
圆偏振方向进行确认,就图 1 所示的能级和耦合状  
态进行分析讨论.当耦合光工作在  $F=3-F'=2$  跃  
迁频率附近,且探测光在整个  $F=3-6^2P_{3/2}$  的跃  
迁频率范围内周期性扫描时,可得到在不同的耦合光  
强下简并二能级系统的吸收光谱(如图 3 所示).其

中  $T_2, T_3, T_4$  分别代表  $F=3-F'=2, F=3-F'=3, F=3-F'=4$  的超精细跃迁.

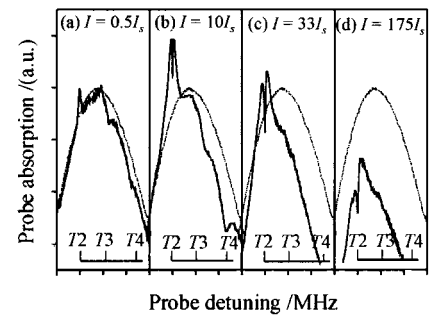


图 3 不同耦合光光强情况下的探测光吸收谱  
饱和光强  $I_s = 1.1 \text{ mW/cm}^2$

虚线表示在没有耦合光作用时铯气室对探测光的吸收

Fig. 3 Absorption spectra with different  
coupling intensity

saturation intensity  $I_s = 1.1 \text{ mW/cm}^2$

The dash curves present probe absorption in  
the absence of the coupling laser

在  $\sigma^+$  圆偏振耦合光场作用下,如果耦合光强度  
 $I$  不是很大(实验中采用的最大的耦合功率为 16.8  
mW),原子几乎都被抽运到基态的两个塞曼子能级  
 $m_F = +2$  和  $m_F = +3$  上.同没有耦合光时对  $\sigma^-$  圆偏  
振探测光的吸收相比,参与吸收的原子增加,从而吸  
收具有增强的趋势,如图 3(a).随着耦合光功率的  
增大,处于  $m_F = +2, +3$  态的原子增多,对于探测  
光的吸收相应增强,即如图 3(b).考虑到  $F'=2$  和  
 $F'=3$  之间的超精细分裂仅有 150 MHz 左右,由于  
多普勒频移,对一些具有特定速度运动的原子,光  
场将激发  $F=3-F'=3$  的跃迁,此时从上能级  $F'=3$   
到基态  $6^2S_{1/2}F=4$  的跃迁是超精细光抽运的一个  
主要通道,随着耦合功率的加大光抽运作用逐渐明  
显,有一部分原子就被光场从基态的  $F=3$  抽运到  
 $F=4$  的能态,再加上饱和效应的影响,使得探测光  
的吸收随耦合光强的进一步增大而减小了(图 3  
(c),(d)).

如果单就二能级模型来分析,当耦合光完全共  
振时电磁诱导透明的透明峰应该是左右对称的,但  
图 3 中却非如此.而且在耦合光增强,电磁诱导透  
明峰变宽后更加明显.在此不能不考虑多普勒展  
宽背景.由于耦合光和探测光同向传输,对同一速  
度群的原子,它们的频移是相同的.对于铯原子  $F=3-F'=2,3,4$  的跃迁来说,其能级间隔小于多普勒  
展宽(室温下约 500 MHz),当探测光处于某一个频  
率时的吸收实际是在多普勒频移下同三个速度群的

原子分别对应三个能级跃迁时共同作用的结果。因此耦合光场共振在  $F = 3 - F' = 2$  跃迁时,除相对光传播方向没有速度分量的原子形成简并二能级系统中  $\Lambda$  型塞曼子能级结构外,还有不同速度的原子作用于  $F = 3 - F' = 3$  和  $F = 3 - F' = 4$  跃迁的吸收,即速度选择机制。再加上原子速度分布的不同,各自对探测光的吸收程度也有所不同。于是就造成电磁诱导透明的吸收谱的两个峰强度有所差别。

图 4 是在耦合光强约为 10 倍饱和光强时,对于不同的耦合光失谐得到的探测光吸收谱。失谐量  $\Delta_c$  从 -250 MHz 变化至 +142 MHz,负失谐表示耦合光频率低于  $F = 3 - F' = 2$  循环跃迁频率,正失谐反之。文献[18]在考虑光场对简并二能级系统基态的频移后,对于铷原子  $F = 2 - F' = 1$  的能级结构作了理论计算,得到失谐条件下的类色散吸收。而图 4 中负失谐时吸收峰的形状几乎没有什么明显的变化。这是由于失谐时同共振相比吸收峰是光与速度完全不同的另外一些原子的作用结果,所以速度分布的不同其吸收的程度也有所差别。当耦合光正失谐时,其他参与跃迁的能级影响增强,情况比较复杂。事实上失谐量较大时已不能认为是二能级的情况了。如失谐 142 MHz 主要就有这两种吸收过程: 1) 耦合光、探测光作用于不同速度的原子,因多普勒频移不同就可以对应  $F = 3 - F' = 2, 3, 4$  三个不同的跃迁从而引起吸收; 2) 对光传播方向没有速度分量的原子,耦合、探测光对于原  $F = 3 - F' = 2$  简并二能级系统的跃迁失谐 142 MHz,从而对  $F = 3$  基

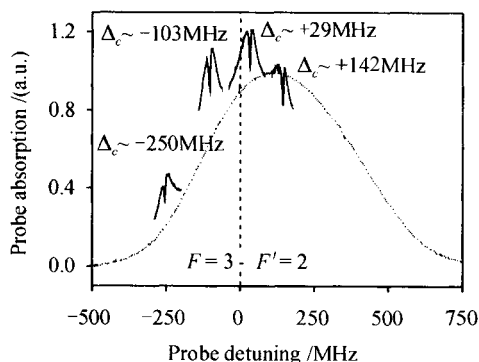


图 4 对应于不同失谐量耦合光情况下的探测光吸收谱

耦合光强保持在约 10 倍饱和光强,虚线表示在没有耦合光作用时铯气室对探测光的吸收

Fig. 4 Absorption spectra with different coupling detuning

The coupling intensity is fixed at  $10I_s$ . The dash curve indicates probe absorption in the absence of the coupling laser

态的塞曼子能级产生因  $m_F$  量子数不同而不同的光频移,并且在不同的塞曼子能级上布居分布不同,引起类色散的吸收。

根据文献[9]报道,通过双扫描技术使用两个声光频移器(AOM)从同一个激光器中分出的耦合光和探测光,得到线宽约 400 kHz 的电磁诱导吸收和电磁诱导透明。而我们实验中所获得的电磁诱导透明的线宽约在 8~10 MHz 左右,仍大于  $6^2 P_{3/2}$  态的自然线宽(约 5.2 MHz),其中主要原因是耦合光和探测光分别来自两台独立的激光器,其内在相干性较差,而且两台激光器工作过程中相对的相位和频率都有一定的跳动。同时铯气室中剩余磁场对基态塞曼子能级的微弱分裂,也会影响到能级的简并,最终导致线宽仍较宽。

## 4 结 论

鉴于有关电磁诱导透明在塞曼子能级中的实验研究未广泛开展,本文完成了在室温下多普勒展宽背景中铯原子的  $F = 3 - F' = 2$  简并二能级系统中  $\Lambda$  型塞曼子能级结构的电磁诱导透明实验观测,分析了在圆偏振的耦合光和探测光场作用下简并二能级系统中塞曼子能级间的光抽运,用不同光强和失谐的耦合光作用于原子研究了电磁诱导透明在简并二能级系统中的产生过程。其中对于同简并二能级系统共振作用同时存在的其他光与原子的作用的分析,定性地解释了在多普勒背景上部分吸收谱线的畸变。

## 参 考 文 献

- 1 E. Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy [J]. *Progress in Optics*, 1996, **35**:257~354
- 2 K.-J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20):2593~2596
- 3 S. E. Harris. Electromagnetically induced transparency [J]. *Physics Today*, 1997, **50**:36~42
- 4 A. S. Zibrov, M. D. Lukin, D. E. Nikonov *et al.* Experimental demonstration of laser oscillation without population inversion via quantum interference in Rb [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(8):1499~1502
- 5 A. M. Akulshin, S. Barreiro, A. Lezama. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **57**(4): 2996~3002
- 6 A. Lezama, S. Barreiro, A. M. Akulshin. Electromagnetically induced absorption [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(6): 4732~4735
- 7 C. Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi *et al.* Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. *Nature*, 2001, **409**(6819):490~493

- 8 D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair *et al.* Storage of light in atomic vapor [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(5):783~786
- 9 A. M. Akulshin, A. Cimmino, A. I. Sidorov *et al.* Highly nonlinear atomic medium with steep and sign-reversible dispersion [J]. *J. Opt. B: Quantum and Semiclassical Optics*, 2003, **5**(4):S479~S485
- 10 Wang Yanhua, Yan Shubin, Wang Junmin *et al.* Electromagnetically induced absorption of degenerate two-level system in a cesium vapor cell [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9):1065~1069  
王彦华, 闫树斌, 王军民 等. 铯原子气室中简并二能级系统的电磁诱导吸收[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1065~1069
- 11 K. Kim, M. Kwon, H. D. Park *et al.* Electromagnetically induced absorption spectra depending on intensities and detunings of the coupling field in Cs vapour [J]. *J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2001, **34**(23):4801~4808
- 12 A. Lezama, S. Barreiro, A. Lipsich *et al.* Coherent two-field spectroscopy of degenerate two-level systems [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **61**(1):013801-1~013801-11
- 13 A. Lipsich, S. Barreiro, A. M. Akulshin *et al.* Absorption spectra of driven degenerate two-level atomic systems [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(5):053803-1~053803-10
- 14 C. Andreeva, S. Cartaleva, Y. Dancheva *et al.* Coherent spectroscopy of degenerate two-level systems in Cs [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **66**(1):012502-1~012502-12
- 15 A. Mair, J. Hager, D. F. Phillips *et al.* Phase coherence and control of stored photonic information [J]. *Phys. Rev. A*, 2002, **65**(3):031802-1~031802-4
- 16 Xiao Feng, Guo Ruimin, Chen Shuai *et al.* Observation of electromagnetically induced transparency in a Zeeman-sublevel system in rubidium atomic vapour [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(8):1257~1260
- 17 J. Wang, Y. Wang, S. Yan *et al.* Observation of sub-Doppler absorption in the  $\Lambda$ -type three-level Doppler-broadened cesium system [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(2):217~220
- 18 Y. Chen, Y. W. Chen, J. J. Su *et al.* Pump-probe spectroscopy of cold  $^{87}\text{Rb}$  atoms in various polarization configurations [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, **63**(4):043808-1~043808-11

\*\*\*\*\*