

# 铯原子气室中简并二能级系统的电磁诱导吸收

王彦华, 闫树斌, 王军民\*, 刘涛, 张天才, 李刚

(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** 对于铯原子  $6^2S_{1/2}(F=4)-6^2P_{3/2}(F'=5)$  简并二能级系统, 在一束较强的耦合光作用下, 借助于弱探测光的吸收光谱观察到了电磁诱导吸收现象 (EIA); 同时在  $F=4-F'=3$  及  $F=4-F'=4$  跃迁频率附近观测到了 V 型三能级结构中的电磁诱导透明 (EIT) 实验中还研究了耦合光场的强度和失谐对电磁诱导吸收的影响。对该系统中 Zeeman 子能级间的光抽运作用以及多个简并的二能级系统间相干作用的分析表明: 由于光抽运作用的强度影响, Zeeman 子能级上的布居数以及参与耦合的二能级的原子数, Zeeman 子能级间的相干时间发生了变化, 从而影响了电磁诱导吸收的增强峰的线宽以及吸收的强度。

**关键词** 量子光学; 电磁诱导吸收; 电磁诱导透明; 铯原子; 简并二能级系统; V 型三能级结构

中图分类号 O 431.2 文献标识码 A

## Electromagnetically Induced Absorption of Degenerate Two-Level System in a Cesium Vapor Cell

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

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** Employing an intense laser field coupling to the degenerate two-level system of cesium  $6^2S_{1/2}(F=4)-6^2P_{3/2}(F'=5)$  transition in a cesium vapor cell, electromagnetically induced absorption (EIA) has been demonstrated via probe absorption spectra, at the same time, electromagnetically induced transparency (EIT) of V-type three-level scheme has been demonstrated on the  $F=4-F'=3$  and  $F=4-F'=4$  transition frequency. The EIA is affected by the intensity and detuning of the coupling laser. By analyzing the effect of optical pumping between Zeeman sub-levels on the EIA and the coherent interactions between multiple degenerate two-level atoms, it is shown that the optical pumping affects the population of different Zeeman sub-levels and the number of the involved two-level atoms, the coherent time between the sub-levels is then changed and the linewidth and intensity of the EIA are affected accordingly.

**Key words** quantum optics; electromagnetically induced absorption (EIA); electromagnetically induced transparency (EIT); cesium atom; degenerate two-level system; V-type three-level scheme

## 1 引言

近年来相干光场同原子相互作用的研究, 主要

集中在量子干涉产生的许多新的物理现象方面, 包括相干布居俘获 (Coherent population trapping, 简

收稿日期: 2003-12-26; 收到修改稿日期: 2004-02-26

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 60178006, 10374062), 山西省自然科学基金 (编号: 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在读硕士研究生, 主要从事半导体激光技术、冷原子物理及相干光谱等方面的实验研究工作。

\* 通信联系人 E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

称 CPT)<sup>[1]</sup>、无反转光放大 (Amplification without inversion,简称 AWI)<sup>[2]</sup>、电磁诱导透明 (EIT)<sup>[3]</sup>、电磁诱导吸收 (EIA)<sup>[4,5]</sup>等。由于在光脉冲存储<sup>[6]</sup>和在磁场计方面<sup>[7]</sup>巨大的应用潜力, EIT的实验和理论方面已经有了较深入的研究,而与 EIT相反的 EIA效应尚需给予更多的关注。

Akulshin等<sup>[4]</sup>首先在铷原子气室中观察到了 EIA现象,同时进行了相应的理论研究,并提出了实现 EIA必须满足的三个基本条件<sup>[5]</sup>: 1)  $F_e = F_g + 1$ ,其中  $F_g$  和  $F_e$  分别为基态和激发态的总角动量; 2) 基态  $F_g$ 到激发态  $F_e$ 的跃迁是封闭的循环跃迁; 3) 基态必须是简并的,即  $F_g \geq 1$ ,在零磁场情况下有  $2F_g + 1$ 个简并的 Zeeman子能级。随后 EIA也在铯原子气室中得到了证实<sup>[8,9]</sup>。文献[10]通过简并二能级中的简化 N型四态模型给出了 EIA的物理图像: EIA是由耦合光场导致的激发态 Zeeman子能级的相干自发转移到基态 Zeeman子能级所引起的。EIA吸收谱线的线宽,还可以反映出基态 Zeeman子能级间相干时间的长短,这种相干是在同一个基态超精细能级中的 Zeeman子能级相互作用的结果<sup>[9]</sup>。

本文采用两个独立的半导体激光器分别作为耦合光和探测光,在  $6^2S_{1/2}(F=4)$ 和  $6^2P_{3/2}(F'=5)$ 超精细能级构成的简并二能级系统中,观察到了铯原子气室中的 EIA现象。较系统地研究了耦合光场的失谐和强度变化对吸收光谱的影响,并作了一些初步的讨论。

## 2 实验装置

与本实验相关的铯原子的超精细能级如图 1所示。  $6^2S_{1/2}$ 态是铯原子的基态,包含有  $F=3$ 和  $F=4$ 两个超精细能级,频率间隔为 9193 MHz。激发态  $6^2P_{3/2}$ 则包含有  $F'=2, 3, 4, 5$ 四个超精细能级,其间的频率间隔均小于室温下铯原子的多普勒 (Doppler)展宽 (约 500 MHz)。耦合光以失谐量  $\Delta_c$ 作用于  $F=4 \rightarrow F'=5$ 超精细跃迁,而探测光则周期性地扫描  $F=4 \rightarrow F'=3, 4, 5$ 超精细跃迁。

实验装置如图 2所示,与我们在文献[11]中使用的装置基本相同。使用两台独立的光栅外腔半导体激光器,其中光栅外腔半导体激光器 ECDL1 (Toptica DL-100)作为耦合光源, ECDL2是自制的利特罗 (Littrow)型光栅外腔反馈激光器 (使用 SDL-5411-G1型激光二极管),作为探测光源,二者

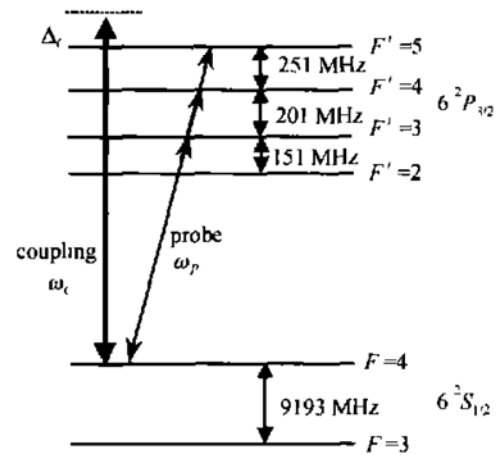


图 1 相关的铯原子超精细能级结构简图  
 $k_c, k_p$ 分别为耦合光和探测光的频率,  $\Delta_c$ 为耦合光的失谐量,探测光的频率在  $6^2S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}$ 跃迁附近扫描

Fig. 1 Diagram of relevant hyperfine levels of cesium atom

$k_c, k_p$  are the coupling frequency and the probe frequency, respectively.  $\Delta_c$  is the coupling detuning. The probe laser frequency is scanned over  $6^2S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6^2P_{3/2}$  transition

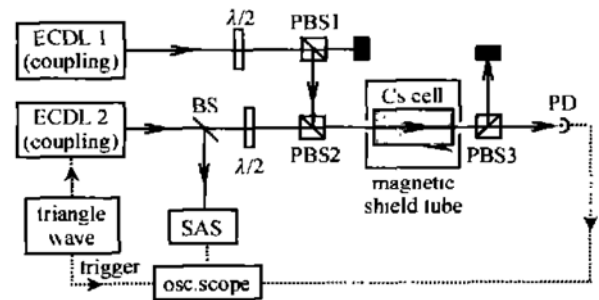


图 2 实验装置示意图

ECDLs 外腔半导体激光器;  $\lambda/2$  半波片;  
PBS 偏振分光棱镜; PD 光电探测器

Fig. 2 Schematics of experimental setup

ECDLs external-cavity diode lasers;  $\lambda/2$  half-wave plate;  
PBS polarization beam splitters; PD photodiode

的线宽均在约 2 MHz左右 (1 s)。这两台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调谐。40 dB的隔离器用于避免光反馈对半导体激光系统的影响。由于半导体激光器的输出光束在两个垂直方向的发散角不同,通常为近椭圆形光斑。使输出光通过整形棱镜对就可以获得近圆形的光斑 (隔离器和整形棱镜对在图 2中均未画出)。ECDL2的输出经分束片 BS分成两束,较弱的一束作为探测光,用来探测耦合光场同原子的相互作用;另一束则用于饱和吸收光谱监测,作为频率标准。实验中可利用饱和吸收谱线对每个吸收峰进行频率标定。

耦合光和探测光为偏振方向相互垂直的线偏振光,经偏振分束棱镜 PBS2合束,以相同的方向通过一个室温下的 4 cm长的铯气室,并采用光电二极管 (PD)对探测光的吸收光谱进行测量。探测信号送入示波器 (Tek TDS-210)进行观察,并与计算机连接对数据进行存储和分析。实验中为了避免地磁场或其他杂散磁场的影响,在铯泡外部使用了磁屏蔽材料。估计剩余磁场在  $(10\sim 20)\times 10^{-7}$  T量级,屏蔽效果还不是非常理想。在铯气室所在区域,探测光光斑直径约 2.3 mm,典型功率约  $9\mu\text{W}$ ;耦合光光斑直径约 3.3mm,典型功率范围约  $1\sim 40$  mW。耦合光的频率调谐到铯原子超精细能级  $F=4-F'=5$ 的循环跃迁附近,失谐量为  $\Delta_c$ ;探测光频率在  $F=4$ 到  $F'=3, 4, 5$ 跃迁频率附近扫描。通过转动 PBS1前的  $\lambda/2$ 波片,可以方便地调节耦合光的强度;通过调整加在 ECDL1光栅外腔的压电陶瓷上的直流偏置电压,可以改变耦合光相对于  $F=4$ 到  $F'=5$ 的循环跃迁频率的失谐量  $\Delta_c$ ,从而可以较系统地研究耦合光的强度以及频率正、负失谐对电磁诱导吸收的影响。

### 3 实验结果及讨论

实验中探测光和耦合光采取同向传播的方式,对于具有一定运动速度的原子,多普勒频移对探测光和耦合光的效果是相同的。因此在光的传播方向上不同速度的原子都将对吸收光谱有贡献。图 3是耦合光的频率调谐到  $F=4$ 到  $F'=5$ 循环跃迁时,得到的带有多普勒背景的吸收光谱。EIT导致的吸收减弱和 EIA导致的吸收增强均显示在吸收光谱中。图 3中随着探测光频率的逐步增大,首先在多普勒背景上出现两个吸收减弱的凹陷。通过饱和吸收光谱标定,它们分别对应于  $F=4-F'=3$ 和  $F=4-F'=4$ 的跃迁。这是由铯原子能级结构中形成的两个 V型三能级的 EIT效应造成的。通常对 EIT的实验和相关理论分析所涉及到的有三种三能级结构:  $\Delta$ 型, V型和阶梯型。其中 V型三能级系统中不易观察到纯的 EIT效应<sup>[12, 13]</sup>。因为在超精细结构的 V型三能级中,除 EIT外还存在另外三种效应,即耦合光场作用下的饱和效应、超精细能级之间的光抽运以及 Zeeman子能级之间的光抽运,可能使 EIT淹没在其他效应中<sup>[13]</sup>。在实际的铯原子系统中,选取合适的相关能级耦合可以抑制光抽运过程,从而在实验中也可以观测到 V型三能级结构 EIT的吸收

和色散特性<sup>[8, 12, 13]</sup>。实验中耦合光与  $F=4-F'=5$ 循环跃迁共振,探测光的频率处于  $F=4-F'=3$ 和  $F=4-F'=4$ 超精细跃迁时,就构成相应的两个 V型三能级系统。由于耦合光工作在循环跃迁处,抑制了光抽运对原子布居的影响,从而也观察到两个吸收减弱的 EIT凹陷。

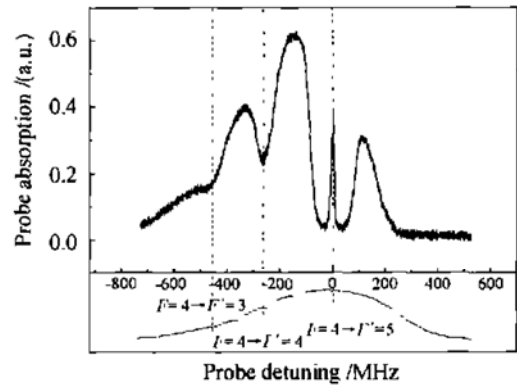


图 3 耦合光与  $F=4-F'=5$ 跃迁共振时典型的吸收光谱

左边的两个吸收凹陷是 V型三能级系统 EIT的结果,在简并二能级饱和效应的凹陷中的吸收增强峰即所谓的 EIA现象。图中的饱和吸收光谱用作频率标准

Fig. 3 Typical absorption spectrum with resonant coupling field

At the left side there are two absorption reduction dips due to EIT effect in V-type three-level system. The enhanced absorption peak in a saturation dip is due to EIA effect in degenerate two-level system. Saturation absorption spectrum provides a frequency standard

图 3中的第三个吸收峰是在吸收减弱凹陷内又出现的吸收增强,即所谓的 EIA 出现的吸收增强峰的位置对应的探测光的频率和耦合光相等。这时对于光传播方向没有速度分量的原子,两束光均共振于  $F=4-F'=5$ 跃迁。根据偶极跃迁选择定则 ( $\Delta_F = 0, \pm 1$ ),  $F'=5$ 到基态  $F=3$ 的跃迁是偶极禁戒的,且激光线宽远小于超精细跃迁之间的频率间隔,所以超精细光抽运较弱,此时可以认为是简并二能级系统。从图 3可以看到,由于耦合光引起二能级的饱和效应,减少了对探测光的吸收,造成了吸收减弱凹陷;在吸收减弱的凹陷中出现了吸收增强峰(即 EIA)。

此时在耦合光的作用下还必须考虑简并二能级系统中不同 Zeeman子能级间跃迁的差异。图 4是铯原子  $F=4$ 和  $F'=5$ 的 Zeeman子能级间的跃迁几率(引自文献[14]的图 4,图中①,⑨等数字表示 Zeeman子能级间的相对跃迁几率)。实验中耦合光

为线偏振光, Zeeman子能级中只有  $\Delta m_F = 0$  的跃迁,由图 4可知共有九个  $\Delta m_F = 0$  的 Zeeman二能级结构。通过  $F' = 5$  的一个 Zeeman子能级到基态  $F = 4$  的自发辐射,使原子可跃迁到 3个不同的基态 Zeeman子能级 ( $\Delta m_F = 0, \pm 1$ )。这样就使这些 Zeeman二能级结构耦合在一起,导致多个简并 Zeeman子能级之间的光抽运,从而影响到基态和激发态 Zeeman子能级的布居数相对分布。在线偏振耦合光作用下, Zeeman子能级间的光抽运使得布居数向  $|m_F|$  小的能级集中。随着耦合光强度的增强,布居数分布的范围还会逐步向  $|m_F|$  大的 Zeeman子能级扩展,即耦合光的强度影响着布居数分布的 Zeeman子能级的多少,也就影响了 Zeeman子能级相干时间的长短。相干时间越长,可得到的谱线的线宽越窄。文献 [9]报道了获得约 400 kHz左右的 EIA吸收峰。但在我们的实验中,所获得的 EIA峰的典型线宽约 8~10 MHz,仍大于自然线宽 (5.3 MHz)。实验中为了获得较大的失谐范围,使用了两台独立的激光器分别提供探测光和耦合光,与从同一台激光器分出的探测光和耦合光(二者之间的位相差较稳定)的情形<sup>[9]</sup>相比,我们的探测光和耦合光之间的相对相位不太稳定,内在相干性较差,这是导致我们的 EIA线宽较宽的主要原因。此外,探测光及耦合光的线宽和铯原子气室中磁屏蔽后的剩余磁场对 Zeeman子能级的频移,也是影响 EIA线宽的重要因素。

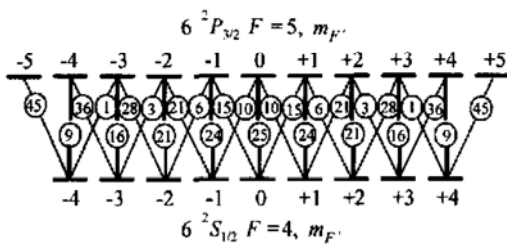


图 4 铯原子超精细跃迁  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  中有关 Zeeman 子能级间的相对跃迁几率

Fig. 4 Normalized transition probabilities between Zeeman sublevels of cesium  $F = 4$  and  $F' = 5$  hyperfine levels

图 5是保持耦合光失谐量在零失谐附近,在不同的耦合光强情形下的结果。曲线 a, b, c, d对应的耦合光强度分别为  $13I_s$ ,  $38I_s$ ,  $99I_s$ ,  $380I_s$  ( $I_s = 1.1 \text{ mW/cm}^2$ , 为饱和光强),依次增强。在耦合光光强较弱时,在  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  跃迁处,仅有饱和效应导致的吸收减弱凹陷。随着耦合光强的增大, EIA峰出现

并逐渐增高。同时 EIT及饱和效应导致的吸收减弱凹陷显著增宽, EIA峰也相对明显。我们也注意到在文献 [8]中 Kim等和赵延霆等都曾提到在逐步加大作用的耦合光强后 EIA增强的吸收峰中出现了吸收减弱的凹陷。文献 [8]中 Kim等是在耦合光会聚到  $20 \mu\text{m}$  左右通过 10 cm长的铯泡,而赵延霆等则是使用了 650 mW的钛宝石激光器作为耦合光。而耦合光有效光强则是表征耦合光场与原子作用强弱的重要指标,气室的长度也直接影响同光场作用的原子数。由于耦合光强度仍较低,且实验中所用铯气室较短的原因,所以在本文的实验中并未观察到类似的现象。这一点在我们后续的实验得到了证实:通过进一步设法减少铯气室前耦合光的损耗,并对耦合光进行适当聚焦从而提高在气室中的耦合光强,同时换用了较长的铯泡,也观察到了这种 EIA增强峰中央的吸收减弱的凹陷。

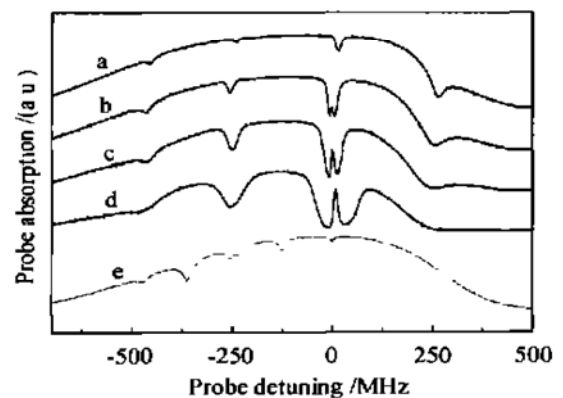


图 5 不同耦合光强作用下的吸收光谱  
耦合光强为: a  $13I_s$ ; b  $38I_s$ ; c  $99I_s$ ; d  $380I_s$ ,  
 $I_s$  为饱和光强,  $I_s = 1.1 \text{ mW/cm}^2$

Fig. 5 Absorption spectra with different coupling intensity  
a  $13I_s$ ; b  $38I_s$ ; c  $99I_s$ ; and d  $380I_s$ .  
 $I_s = 1.1 \text{ mW/cm}^2$ , is the saturation intensity

吸收谱中在 EIA峰的右边正失谐的位置,有一个吸收减弱的凹陷,归因于速度选择机制。通过饱和和吸收谱标定,这个凹陷同 EIA峰间隔等于  $F' = 4$  和  $F' = 5$  的能级间距。对于在光的传播方向上速度分量接近零的那部分原子,耦合光与  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  跃迁完全共振,而对于另一部分原子,在耦合光的传播方向上的速度分量具有特定的值,原子对于耦合光和探测光的多普勒频移正好是  $F' = 4$  和  $F' = 5$  的能级间隔 (约 251 MHz)。在这部分原子的参照系中,耦合光共振于  $F = 4 \rightarrow F' = 4$  的跃迁,当探测光扫描到相对于  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  跃迁正失谐 251 MHz时

(即图中出现凹陷的条件),探测光对应于  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  的跃迁。在这两个光场的作用下,光抽运会使具有这种速度的原子在  $F = 4$  的原子布居数减少,造成吸收的减弱。而且这个特定速度的原子分布几率相对较小,所以虽然吸收有所减弱,但是同 EIT 相比吸收减弱得不很明显。

图 6 是当耦合光强约  $380I_s$  且相对于  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  跃迁有不同的失谐量时相应的吸收光谱。失谐量从  $-226$  MHz 变化至  $+217$  MHz, EIA 及 EIT 峰的形状没有明显的改变,但出现的位置随耦合光的失谐而变化。由于耦合光的失谐,耦合光与原子之间相互作用的强度减弱,再加之铯气室中原子的速度分布,使得 EIT 及 EIA 效应与耦合光完全共振时相比要弱一些。

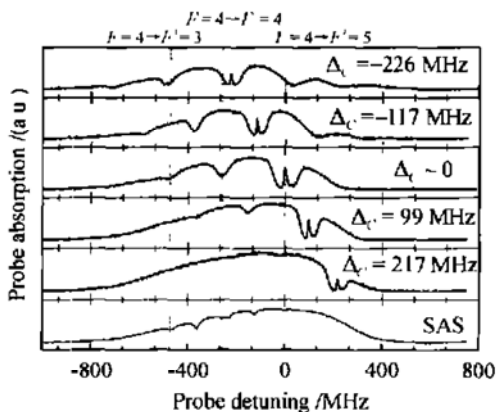


图 6 对应于耦合光不同失谐量的吸收光谱,耦合光强保持在约  $380I_s$  和光强

Fig. 6 Absorption spectra with different coupling detuning, corresponding to coupling intensity of about  $380I_s$ .

## 4 结 论

报道了室温下多普勒展宽背景中铯原子的  $F = 4 \rightarrow F' = 5$  循环跃迁时简并二能级系统中的 EIA 现象,以及耦合光的失谐量和强度变化对 EIA 的影响。分析了简并二能级系统中 Zeeman 子能级间的光抽运的作用,对 EIA 效应的机制及 Zeeman 子能级在耦合、探测光场作用下由自发跃迁引起的多个简并二能级系统间相干作用有了进一步认识。EIA 效应伴随的反常色散以及负群速现象也已在实验中被实现<sup>[9, 15, 16]</sup>,与 EIT 及群速减慢、光存储等研究热点一道将使得原子相干领域的研究变得更加丰富多彩。

**致谢** 感谢彭 堃院士的鼓励与支持。感谢冷原子与腔量子电动力学组其他成员对本工作的贡献。感谢与张俊香博士、常宏、赵延霆等所作的讨论。

## 参 考 文 献

- 1 E. Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy [J]. *Progress in Optics*, 1996, **35**: 257~ 354
- 2 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
- 3 K. J. Boller, A. Imamoglu, S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1991, **66**(20): 2593~ 2596
- 4 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
- 5 A. Lezama, S. Barreiro, A. M. Akulshin. Electromagnetically induced absorption [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(6): 4732~ 4735
- 6 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; D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair *et al.*. Storage of light in atomic vapor [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2001, **86**(5): 783~ 786
- 7 H. Lee, M. Fleischhauer, M. O. Scully. Sensitive detection of magnetic field including their orientation with a magnetometer based on atomic phase coherence [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(3): 2587~ 2595
- 8 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: At. Mol. Opt. Phys.*, 2001, **34**(23): 4801~ 4808; H. Chang, J. X. Zhang. Private communication; Y. Zhao, J. Zhao, L. Xiao *et al.*. Electromagnetically induced absorption and transparency spectra of degenerate two-level systems with a strong coupling field in Cs vapour [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, **21**(1): 76~ 78
- 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 Semiclass. Opt.*, 2003, **5**(4): S479~ S485
- 10 A. V. Taichenachev, A. M. Tumaikin, V. I. Yudin. Electromagnetically induced absorption in a four-state system [J]. *Phys. Rev. A*, 2000, **61**(1): 011802-1~ 011802-4; C. Y. Ye, Y. V. Rostovtsev, A. S. Zibrov *et al.*. Quantum interference in atomic vapor controlled by a magnetic field [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **207**: 227~ 231
- 11 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
- 12 D. J. Fulton, S. Shepherd, R. R. Moseley *et al.*. Continuous-wave electromagnetically induced transparency: A comparison of V,  $\Lambda$  and cascade systems [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**(3): 2302~ 2311; R. Boon, E. Zekou, D. McGloin *et al.*. Comparison of wavelength dependence in cascade-,  $\Lambda$ - and Vee-type schemes for electromagnetically induced transparency [J]. *Phys. Rev. A*, 1999, **59**(6): 4675~ 4685
- 13 J. Zhao, L. Wang, L. Xiao *et al.*. Experimental measurement of absorption and dispersion in V-type cesium atom [J]. *Opt. Commun.*, 2002, **206**(4-6): 341~ 345
- 14 O. Schmidt, K.-M. Knaak, R. Wynands *et al.*. Cesium saturation spectroscopy revisited: how to reverse peaks and observe narrow resonances [J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **59**(2): 167~ 178
- 15 A. M. Akulshin, A. Cimmino, G. I. Opat. Negative group velocity of a light pulse in cesium vapour [J]. *Quantum Electron.*, 2002, **32**(7): 567~ 569; A. M. Akulshin, A. Cimmino, A. I. Sidorov *et al.*. Light propagation in an atomic medium with steep and sign-reversible dispersion [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **67**(1): 011801-1~ 011801-4
- 16 K. Kim, H. S. Moon, C. Lee *et al.*. Observation of arbitrary group velocities of light from superluminal to subluminal on a single atomic transition line [J]. *Phys. Rev. A*, 2003, **68**(1): 013810-1~ 013810-4