

外加磁场对简并二能级原子系统相干特性的影响^{*}

赵建明[†] 汪丽蓉 赵延霆 马 杰 肖连团 贾锁堂

(量子光学和光量子器件国家重点实验室, 山西大学物理电子工程学院, 太原 030006)

(2004 年 12 月 20 日收到, 2005 年 5 月 12 日收到修改稿)

在铯原子简并二能级系统中 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 的循环跃迁上获得了电磁感应吸收(EIA)峰, 并研究了轴向均匀磁场对二能级系统相干效应的影响, 即存在轴向均匀磁场时, 观测到在铯原子 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 跃迁频率处 EIA 和电磁诱导透明(EIT)的混合结构, 在合适的实验条件下, 其结果与 Ye 等(2002)的理论分析相一致.

关键词: 电磁感应吸收(EIA), 铯原子, 简并二能级系统

PACC: 3280, 3510W

1. 引 言

量子相干特性在光与原子的相互作用中有重要的作用. 例如, 由于光与原子作用的相消干涉导致了电磁感应透明(EIT)^[1]和相长干涉导致的电磁感应吸收(EIA)^[2]. 由于电磁感应透明和吸收在量子光学和非线性光学如超慢和超快光群速度^[3,4]、光脉冲的存储^[5]和量子开关等领域具有广泛的应用前景, 所以关于光与原子的相互作用的实验和理论成为近年来人们研究的热点.

Kazantsev^[6]提出了在简并二能级系统中实现电磁感应吸收的理论, Akulshin 小组^[7]利用两束相干光分别作为抽运光和探测光在铷原子蒸气中实现了电磁感应吸收, 之后关于电磁感应吸收对抽运光强度、磁场以及相干光束偏振特性的依赖关系在铷原子蒸气中作了详细的研究^[8]. 对于碱金属原子的 $F_g \leftrightarrow F_e = F_g + 1$ 跃迁, 形成简并的封闭二能级系统, 正是在这个简并二能级系统中观察到了电磁感应吸收信号. 然而 $F_g \leftrightarrow F_e = F_g + 1$ 跃迁对应的基态和激发态具有许多简并的 Zeeman 子能级, 特别是存在轴向磁场时, 磁场的作用使简并的 Zeeman 能级分裂, 从而对电磁感应吸收信号产生一定的影响. Ye^[9]从理论上利用密度矩阵方程分析了轴向磁场对简并二能级系统电磁感应吸收的影响, 得出了由于外磁

场的作用使原子相干特性发生变化, 导致了探测光电磁感应吸收信号和透明相混合的结果.

本文从实验上研究轴向磁场对简并二能级系统电磁感应吸收的影响. 当抽运和探测激光作用于铯原子的 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 的跃迁, 在补偿地磁场的条件下获得了电磁感应吸收信号. 在铯原子蒸气池中增加一轴向磁场, 铯原子基态 $6S_{1/2} F = 4$ 和激发态 $6P_{3/2} F' = 5$ 发生 Zeeman 分裂, 使得电磁感应吸收信号发生变化, 形成了吸收和透明相混合的实验结果, 选择合适的实验条件, 其结果与文献[9]的理论分析相符合.

2. 实验原理和装置

实验中涉及到的跃迁是铯原子 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 的跃迁. 当没有外加磁场并补偿地磁场的条件下, 铯原子基态 $6S_{1/2} F = 4$ 和激发态 $6P_{3/2} F' = 5$ 的超精细能级的 Zeeman 子能级各自是简并的, 如图 1(a)所示. 在 σ^+ 圆偏振的抽运光作用下, Zeeman 子能级间的光抽运效应使绝大多数铯原子处于 $m_F = +4$ 和 $m_F = +5$ 两个 Zeeman 态. 可用简化的 $|a\rangle - |b\rangle - |c\rangle - |d\rangle$ 四能级 Λ 型系统与 σ^+ 圆偏振抽运光及 σ^- 圆偏振的弱探测光作用的模型来描述. 当存在均匀的外加轴向磁场时, $6S_{1/2} F = 4$ 和激发态 $6P_{3/2} F' = 5$ 的超精细能级的 Zeeman 子能级发生分

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10174047)和山西省青年科学基金(批准号:20031004, 20041013)资助的课题.

[†] Email: zhaojm@sxu.edu.cn

裂,形成如图 1(b)所示的四能级 n 型系统. 图中的两条水平虚线表示没有外场时的基态和激发态,实线表示由于轴向磁场的作用使相应的 $|a\rangle - |b\rangle - |c\rangle - |d\rangle$ 四个 Zeeman 态发生了相应的频移.

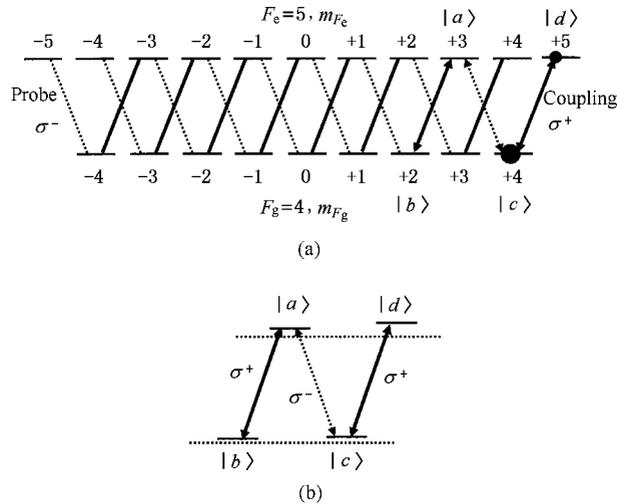


图 1 相关的能级结构 (a) 没有外加磁场时铯原子基态 $6S_{1/2} F = 4$ 和激发态 $6P_{3/2} F' = 5$ 超精细能级的 Zeeman 子能级是简并的.(b) 存在均匀外磁场时的四能级 n 型系统模型. 两条水平虚线表示零场时的基态和激发态, Zeeman 效应使 $|a\rangle - |b\rangle - |c\rangle - |d\rangle$ 四个 Zeeman 态均发生了频移

实验装置如图 2 所示, 钛宝石激光器 (MBR-110) 输出 852nm 的激光作为抽运光源, 并将激光器的输出频率稳定在铯原子 $6S_{1/2} F = 4$ 到 $6P_{3/2} F' = 5$ 能级跃迁上. 外腔式半导体激光器 (NewFocus 6017) 输出的 852nm 的激光作为探测光. 将探测激光器的输出激光经隔离器 (New Focus 5568) 和整形棱镜 (New Focus 5414) 后分成两部分, 一束约 1mW 用作饱和吸收光谱用于探测信号的频率标定, 另一部分经 $\lambda/2$ 波片和偏振棱镜后 (图中细实线), 通过仔细调节与抽运光 (图中较粗实线) 沿同一方向入射到铯原子样品池中, 在原子样品池前加一个 $\lambda/4$ 波片, 调节 $\lambda/4$ 波片晶轴的方向, 使抽运光和探测光分别成为 σ^+ 圆偏振和 σ^- 圆偏振, 以满足图 1 对光束偏振特性的要求. 经样品池出射的激光束再经过一个 $\lambda/4$ 波片后经偏振棱镜分光, 由雪崩二极管 (APD) 接收探测光信号, 并将信号送到示波器进行观测和计算机记录. 轴向磁场由绕在样品池上的线圈产生, 同时为了减小地磁场和其他杂散磁场对实验结果的影响, 在样品池的线圈外面裹五层坡莫合金薄膜 (磁屏蔽材料), 每两层屏蔽材料间加一层聚酯薄膜, 当线圈不加电流时, 估计样品池所在区域的剩余磁场约

为 $2\mu\text{T}$, 这样在没有外加磁场时, 相关的 Zeeman 子能级处于简并的状态.

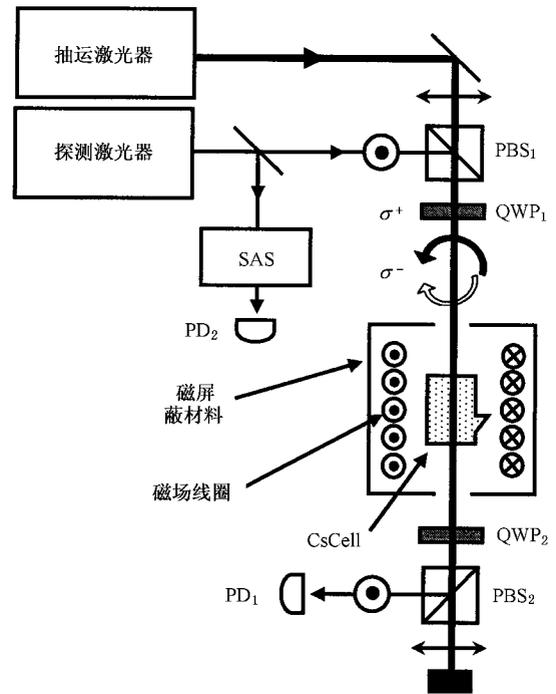


图 2 实验装置图 (粗实线表示抽运光, 细实线表示探测激光. PD 表示探测器, SAS 为用于频率标准的饱和吸收光谱, PBS 为偏振分光棱镜, QWP 为四分之一波片, σ^+ 为左旋圆偏光, σ^- 为右旋圆偏光)

3. 实验结果和分析

首先将抽运光的频率稳定在铯原子 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 的跃迁上, 而探测光的频率在 $6S_{1/2} F = 4$ 到 $6P_{3/2}$ 的跃迁附近扫描, 在样品池前测量的抽运光和探测光的功率分别为 30 和 1mW, 光束近似为圆形光斑, 其光斑直径分别为 3 和 1.5mm. 在补偿地磁场及其他杂散磁场的情况下且没有外加磁场的条件下, 由 APD 探测到的电磁感应吸收信号如图 3 所示. 图中曲线 a 为同时测量的探测激光的饱和吸收光谱, b 为挡掉抽运光时的探测光经过样品时产生的多普勒吸收, c 是由于抽运光作用时的探测光的吸收信号. 由图可知, 由于抽运光的相干作用, 探测光在 $6S_{1/2} F = 4 - 6P_{3/2} F' = 5$ 的跃迁上产生了在吸收饱和背景上的吸收增强峰, 即所谓的电磁感应吸收信号, 而在抽运光负失谐 251MHz 的位置上出现的吸收减小的小峰为 V-形三能级系统中电磁感应透明信号^[10].

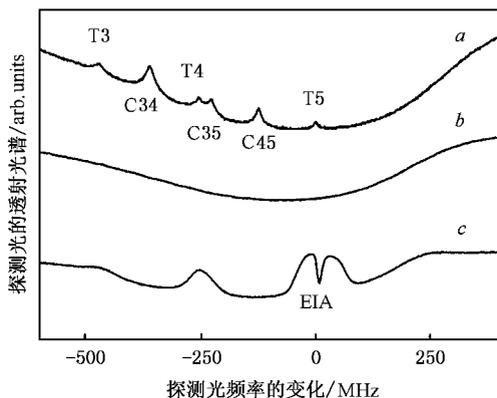


图3 没有外加磁场的实验结果(曲线 a 为饱和吸收光谱, b 为没有抽运光时探测光的多普勒吸收背景, c 为在简并二能级吸收系统中的电磁感应吸收信号, 在 -250MHz 处的小峰为由抽运光和探测光在 Λ 形三能级系统中的电磁感应透明信号)

将控制外加磁场线圈的电流源打开, 缓慢增大加在线圈上的电流, 随着电流的增大, 探测光在 $6S_{1/2} F=4-6P_{3/2} F'=5$ 的跃迁上产生的电磁感应吸收信号发生频移, 说明由于磁场的作用, 相应的能级产生了频移如图 1(b), 同时观测到了在铯原子 $6S_{1/2} F=4-6P_{3/2} F'=5$ 的跃迁频率处在吸收饱和背景上出现的电磁感应吸收和电磁诱导透明的混合结构, 如图 4 所示. 该实验结果可以定性解释为在如图 1 所示的简并或近简并 n 型四能级原子系统中, 原子相干由上能态到下能态的自发辐射转移. 轴向外磁场使得原来简并的各 Zeeman 态发生不同程度的频移, 相当于 $|d\rangle$ 态 ($m_F = +5$ Zeeman 态) 在一定程度上与 σ^+ 抽运光的作用减弱, 导致 $|d\rangle$ 态与 σ^+ 抽运光部分地退耦合, 从而使得 $|a\rangle$ 、 $|b\rangle$ 、 $|c\rangle$ 三个 Zeeman 态构成的 Λ 形三能级系统中由于量子干涉导致的电磁感应透明效应在一定程度上得以体现. 正是由于外磁场的作用使原子系统中原子相干特性发生变化, 导致了电磁感应吸收峰到电磁感应吸收与透明混合结构的变化.

事实上实验结果可以从理论上利用光与原子相互作用的密度矩阵方程加以解释. 考虑图 1(b) 所示的 n 型四能级系统, $|b\rangle$ 和 $|c\rangle$ 为基态, 其辐射衰减率为 γ_{bc} , $|a\rangle$ 和 $|d\rangle$ 为激发态, 辐射衰减率为 γ , 并且 $\gamma \gg \gamma_{bc}$. 抽运光作用于 $|b\rangle \rightarrow |a\rangle$ 和 $|c\rangle \rightarrow |d\rangle$ 之间, 探测光作用于 $|c\rangle \rightarrow |a\rangle$ 的跃迁以探测吸收信号的变化. 系统的 Hamiltonian 量表示为 $H = H_0 + H_1$, 其中 H_0 为没有相互作用的 Hamiltonian 量, H_1 为光与原子相互作用的 Hamiltonian 量, 分别表示为

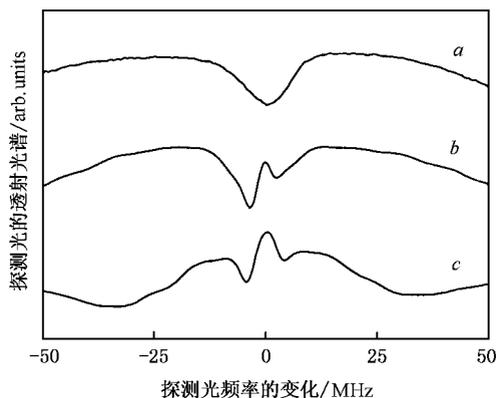


图4 外加轴向磁场时电磁感应吸收信号的变化 (曲线 a 为没有外磁场时的电磁感应吸收信号, b 和 c 为外加磁场分别为 3G 和 5G 时的吸收信号, 由于外加磁场的作用, 使得相关能级发生频移, 导致 $|d\rangle$ 态与抽运光部分地退耦合, 形成了电磁感应吸收与透明的混合结构)

$$H_0 = -\hbar\Delta|b\rangle\langle b| - \hbar\delta|c\rangle\langle c| - \hbar(\delta + \Delta)|d\rangle\langle d| + \text{H.c.},$$

$$H_1 = -\hbar\Omega(|a\rangle\langle b| + |d\rangle\langle c|) - \hbar\epsilon(|a\rangle\langle c| + \text{H.c.}),$$

其中 Ω 和 ϵ 分别表示抽运光和探测光的 Rabi 频率, Δ 和 δ 分别表示抽运光和探测光相对于共振跃迁的失谐量. 文献 [9] 中给出了具体的密度矩阵方程, 由于实验是在原子气室中完成, 考虑原子的多普勒加宽, 利用 n 型四能级系统的密度矩阵方程解出探测光对应的吸收系数为

$$\chi = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha(kv) \eta \frac{\rho_{ac}}{\epsilon} f(kv),$$

其中 $\eta = 3/8\pi N \lambda^3$, $f(kv)$ 是原子速度的高斯分布函数. 图 5 为引自文献 [9] 中探测光吸收系数与探测光失谐的数值模拟的曲线. 图 5(a) 表示没有抽运光作用时二能级系统的多普勒吸收背景, (b) 表示 Λ 形三能级系统的电磁感应透明的信号, (c) 表示 n 形系统的电磁感应吸收信号, (d) 表示由于外加磁场的作用使得原子间的相干性发生变化, 产生了电磁感应吸收和透明相结合的混合线型, 与我们的实验结果相一致.

4. 结 论

本文从实验上系统的研究了利用外加轴向磁场来控制原子相干的变化特性. 实验结果表明, 没有外

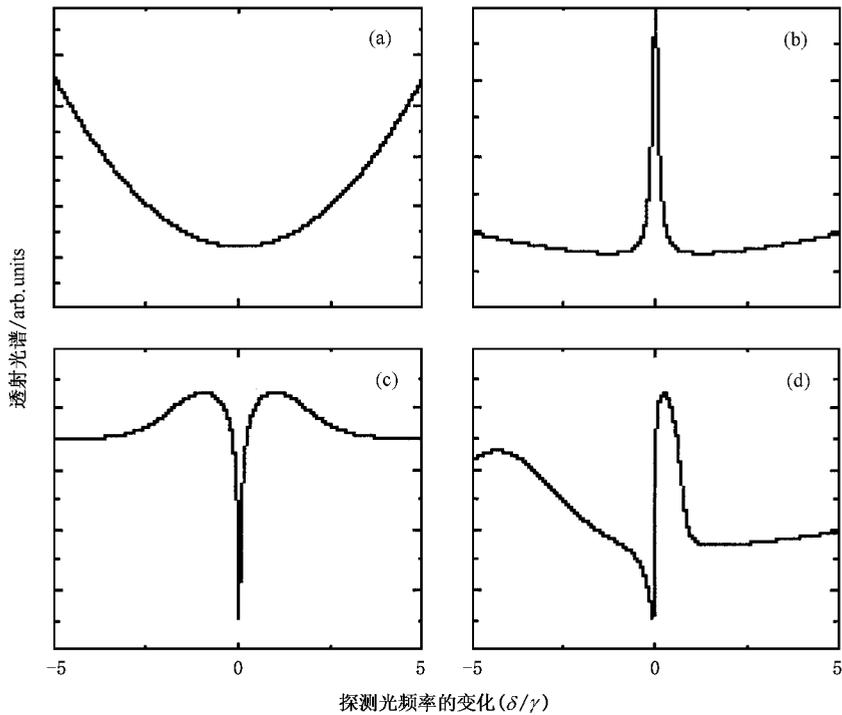


图 5 引自文献 9 的图 2 利用密度矩阵方程数值模拟的理论结果 (a) 二能级原子系统多普勒吸收背景 (b) Λ 形三能级系统的电磁感应透明 (c) n 型系统的电磁感应吸收 (d) 在外加磁场的情况下产生的电磁感应吸收和透明的混合结构

加磁场时,原子的 Zeeman 子能级是完全简并的,而当加一轴向的外磁场时,简并 Zeeman 子能级产生不同程度的频移,使 $|d\rangle$ 态 ($m_F = +5$ Zeeman 态)在一定程度上与 σ^+ 抽运光的作用减弱,导致 $|d\rangle$ 态与

σ^+ 抽运光部分地退耦合,从而形成了电磁感应透明和吸收共存的混合结构.该实验结果提供了一种控制原子相干变化的技术,对我们进一步研究和控制原子间的相互作用具有重要的意义.

- [1] Harris S E, Field J E and Imamoglu A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1107
- [2] Kim J B, Kim K *et al* 2001 *Journal of the Korean Physical Society* **39** 859
- [3] Liu C, Dutton Z, Behroozi C H and Hau L V 2001 *Nature* **409** 490
- [4] Wang L J, Kuzmich A and Dogariu A 2000 *Nature* **406** 277
- [5] Phillips D F, Fleischhauer A, Mair A and *et al* 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 783
- [6] Kazantsev A P, Smirov V S, Turmaikin A M and Yagofarov I A

1984 *Opt. Spectrosc.* **57** 189

Lezama A, Barreiro S, Lipsich A and Akulshin A M 1999 *Phys. Rev. A* **61** 013801

[7] Lipsich A, Barreiro S, Akulshin A M and Lezama A 2000 *Phys. Rev. A* **61** 053803

[8] Kim S K, Moon H S, Kim K and Kim J B 2003 *Phys. Rev. A* **68** 063813

[9] Ye C Y and Rostovtsev Y V *et al* 2002 *Opt. Commun.* **207** 227

[10] Zhao J M, Yin W B *et al* 2002 *Chin. Phys.* **11** 241

Effect of external magnetic field on the coherence properties of degenerated two-level atomic system^{*}

Zhao Jian-Ming Wang Li-Rong Zhao Yan-Ting Ma Jie Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices , and College of Physics and
Electronics Engineering , Shanxi University , Taiyuan 030006 , China)

(Received 20 December 2004 ; revised manuscript received 12 May 2005)

Abstract

The electromagnetically induced absorption (EIA) is obtained in degenerated cycled cesium atomic two-level transition of $6S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5$. The effect of the magnetic field on coherence of the atom is also investigated experimentally. When external magnetic field is applied , the mixed structure of electromagnetically induced absorption and transparency is obtained in the transition of $6S_{1/2} F = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F' = 5$. The experimental results are in agreement with theoretical analysis of C. Y. Ye *et al.* (2002).

Keywords : electromagnetically induced absorption , cesium atom , degenerated two-level system

PACC : 3280 , 3510W

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10174047) , and the Natural Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province , China(Grant Nos. 20031004 , 20041013).