

# 双抽运光作用电磁感应透明的实验研究\*

赵建明† 赵延霆 黄 涛 肖连团 贾锁堂

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

(2003 年 5 月 30 日收到 2003 年 7 月 4 日收到修改稿)

主要研究抽运光的强度对 V 型铯原子三能级系统电磁感应透明的影响, 同时研究了双抽运光作用对电磁感应透明的影响, 并利用光与原子作用的密度矩阵加以解释. 实验结果与理论计算相符.

关键词: 电磁感应透明, 双抽运, 铯原子

PACC: 3280, 3510W

## 1. 引 言

自 20 世纪 90 年代 Harris 等<sup>[1]</sup>首次提出电磁感应透明(EIT)的概念以来, 多个研究小组对 EIT 理论和实验以及 EIT 的应用作了研究, 分别在不同的介质中研究了原子相干 EIT 效应, 包括固态介质<sup>[2]</sup>、原子蒸气<sup>[3]</sup>、冷原子<sup>[4]</sup>以及玻色-爱因斯坦凝聚等.

碱金属原子由于具有较简单的能级结构, 在碱金属原子蒸气阶梯型<sup>[5]</sup>、Lambda 型<sup>[6]</sup>和 V 型<sup>[7,8]</sup>三能级系统中的 EIT 作了系统的研究. 对于铯原子而言, 铯原子基态  $6S$  具有两个超精细能级  $F=3, 4$ , 如文献 [7] 中的 V 型三能级系统中, 基态  $6S$  的另一个超精细能级  $6S_{1/2}(F=3)$  必然对 V 型三能级系统产生

影响. 在实验中抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=5)$  的跃迁, 由于抽运光有一定的线宽, 铯原子总是有一定的概率由基态跃迁到激发态  $F'=4$  或  $F'=3$ , 所以会在  $F=3$  态上聚集, 从而影响了  $F=4$  上的原子参与 EIT. 为此, 我们在  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}$  的跃迁上作用另一再抽运光(repumping), 从而研究双抽运光作用 EIT 的特性. 本文主要在文献 [7] 实验的基础上, 进一步研究抽运光的强度对 EIT 的影响, 进而研究双抽运光作用下 EIT 的特性.

## 2. 实验原理和装置

实验中具体的能级结构如图 1 所示, 抽运光

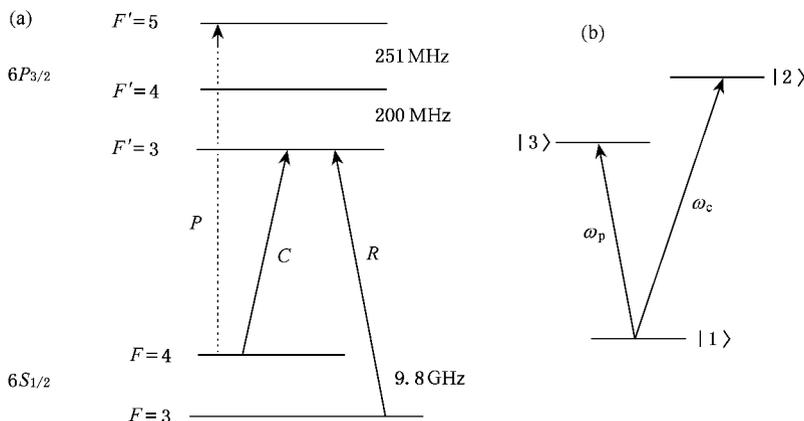


图 1 铯原子的相关能级 (a) 和 V 型三能级系统 (b)  $C$  和  $R$  分别表示抽运光和再抽运光,  $P$  表示探测光

\* 国家自然科学基金(批准号:10174047)、山西省自然科学基金(批准号:20021032)和山西省青年科学基金(批准号:20031004)资助的课题.

† Tel: 0351-7018489, E-mail: zhaojm@sxu.edu.cn

(C)耦合于铯原子  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁,探测光(P)则在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}$  的跃迁附近扫描,因而抽运光和探测光形成双V型三能级系统,再抽运光(R)作用于  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  或  $(F'=4)$  的跃迁上,使基态  $F=3$  上的布居原子抽运到  $F=4$ ,另一方面又和探测光构成了Lambda三能级系统.

实验装置如图2所示,钛宝石激光器(MBR-110型)输出852.1 nm的激光作为抽运光源,并将激光器的输出频率利用饱和吸收光谱稳定在铯原子  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  能级跃迁上.两个半导体激光器(New Focus 6017型)输出的852.1 nm的激光分别作为再抽运光和探测光.将作为探测光的激光器的输出激光经隔离器(New Focus 5568型)和整形棱镜(New Focus 5414型)后分成两部分.一束约1 mW作为饱和吸收光谱用于激光频率的稳定或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,通过仔细调节与抽运光沿同一方向入射到铯原子样品池中,出射光经偏振棱镜分光后,由雪崩二极管(APD)接收并将信号送到示波器进行观测和计算机记录.将作为再抽运光的半导体激光器的频率稳定在  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁上.

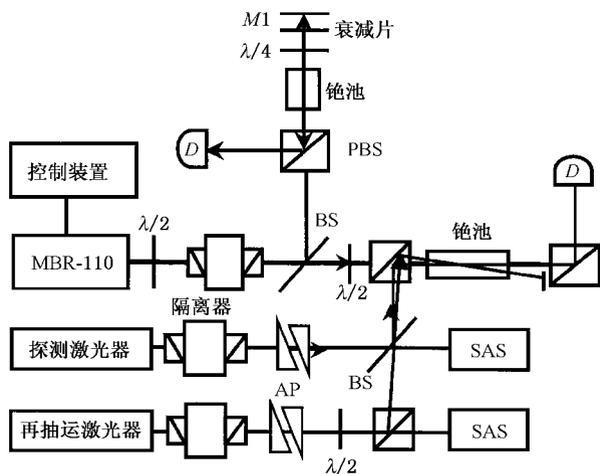


图2 实验装置示意图 图中 M1 为全反镜, D 为探测器, PBS 为偏振棱镜, AP 为整形棱镜, SAS 为饱和吸收光谱装置, BS 为分光镜

### 3. 实验结果和理论分析

实验中,首先将再抽运光挡掉,研究抽运光的功率对 EIT 探测光的吸收影响.如上所述,抽运光的频

率稳定在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁上,将探测光的扫描停止,使其频率稳定在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=5)$  的跃迁上,示波器直接观察并记录由电磁感应产生的透明现象.图3所示为抽运光功率为18 mW(直径为2 mm),探测光为0.5 mW(直径为1.5 mm)时在某时刻挡掉抽运光时所记录的探测光透射率的变化.由图3可见,抽运光的作用使介质对探测光的透射率增大了  $\frac{\Delta T}{T_0} = \frac{T_c - T_0}{T_0} = 6$  倍,其中  $\Delta T$  表示有无抽运光作用时探测光的透射系数之差,  $T_c, T_0$  分别表示有和没有抽运光时探测光通过原子介质时的透射系数.

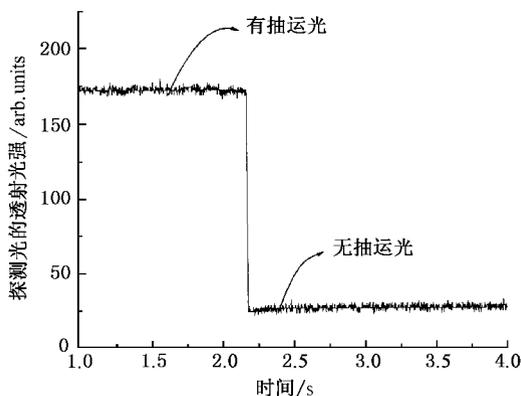


图3 探测光在有抽运光作用和无抽运光作用下的透射光谱 抽运光与铯原子  $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3)$  跃迁共振,探测光与  $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=5)$  的跃迁共振

由中性衰减片改变抽运光的功率,测量不同抽运光功率下探测光的吸收,测量结果如图4中的点表示.由图4可知,随着抽运光功率的增大,探测光

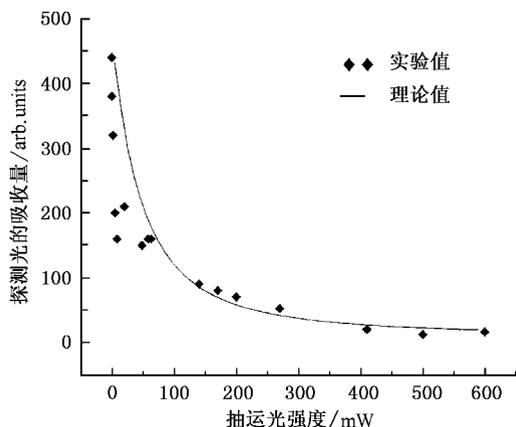


图4 探测光的吸收峰值随抽运光功率的变化曲线 图中的点表示实验结果,曲线表示在  $\Delta c = \Delta p = 0$  条件下的理论计算结果

在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=5)$  的吸收减小。

结果可以由光与物质相互作用的密度矩阵理论加以解释。对于 V 型三能级系统(如图 1(b)所示), 抽运光耦合于 |1 和 |2 的跃迁之间, 探测光耦合于 |1 和 |3 的跃迁之间。密度矩阵运动方程的非对角元写为

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_{13} &= -(i\Delta_{13} + \gamma_{13})\rho_{13} - i\frac{\mu_{13}\epsilon}{2\hbar} + \frac{i}{2}\Omega_c e^{-i\phi_c}\rho_{23}, \\ \dot{\rho}_{12} &= -(i\Delta_{12} + \gamma_{12})\rho_{12} + i\frac{\Omega_c}{2\hbar} e^{-i(\gamma-\gamma_c)t}\rho_{23} - \frac{i}{2}\Omega_c e^{-i\phi_c}, \\ \dot{\rho}_{23} &= -(i\Delta_{23} + \gamma_{23})\rho_{23} + i\frac{\mu_{13}\epsilon}{2\hbar}\rho_{21} + \frac{i}{2}\Omega_c e^{-i\phi_c}\rho_{13} \quad (1) \end{aligned}$$

式中  $\Delta_{12}$ 、 $\Omega_c$  和  $\Delta_{13}$ 、 $\mu_{13}$  分别表示抽运光、探测光的失谐和 Rabi 频率,  $\gamma_{12}$  和  $\gamma_{13}$  为激发态的自发辐射衰减率,  $\gamma_{23}$  为两激发态的非辐射衰减率。假设初始状态原子处于状态 |1, 即  $\rho_{11}(0)=1$ 。利用旋波近似, 并考虑抽运光与原子能级跃迁共振, 即  $\Delta_{12}=0$  的情形, 解上述微分方程,

$$\rho_{13} = \frac{\frac{i}{2}\mu_{13}\epsilon(i\Delta_{13} + \gamma_{23})}{(i\Delta_{13} + \gamma_{13})(i\Delta_{13} + \gamma_{23}) + \frac{1}{4}\Omega_c^2}, \quad (2)$$

则原子的极化率表示为

$$\chi = \frac{2\hbar\mu_{13}N}{\epsilon E}\rho_{13} = \frac{2\mu_{13}N}{\Omega_c}\rho_{13}, \quad (3)$$

式中  $N$  为原子数密度, 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, 利用数值计算可以求出抽运光共振时探测光的吸收轮廓。令探测光的失谐量等于零, 从而可以算出探测光在共振时吸收值随抽运光 Rabi 频率的变化, 如图 4 中的实线所示。由图 4 可以看出, 实验结果与理论计算符合得较好。

将再抽运光打开, 并将其频率利用饱和和吸收光谱稳定在铯原子  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$ , 所加探测光的功率为 5.2 mW, 研究再抽运光对三能级系统的作用。再抽运光对系统有两方面的作用。第一, 抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}$  的超精细能级, 原子处于  $F=4$  态上的布居数由于光抽运效应被抽运到了  $F=3$  的态上, 使  $F=4$  态上的布居数减小, 当作用再抽运光时, 将处于  $F=3$  上的布居原子输运回基态  $F=4$ , 从而进一步参与 V 型三能级系统的 EIT 的研究。第二, 再抽运光和探测光形成 Lambda 三能级, 在探测光的  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁上由于 EIT 而使吸收减小。

为此, 我们将抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=5)$ , 再抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$ , 分别记录有和没有再抽运光时探测光通过铯原子蒸气池后的吸收系数。实验表明, 由于再抽运光的作用, 使探测光的吸收比没有再抽运光时的吸收增加了 4 倍。

将抽运光的频率稳定在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁上, 观察双抽运光作用下的电磁感应效应, 结果如图 5 所示。实验中抽运光功率为 10 mW(直径 2 mm), 再抽运光功率为 5.2 mW(直径 1.6 mm), 探测光为 0.5 mW(直径 1.6 mm), 图 5(a) 为双抽运光作用下形成的 EIT, 图 5(b) 为没有再抽运光时由抽运光和探测光所形成的多 V 型三能级系统的 EIT(与文献 [7] 的结果相同)。

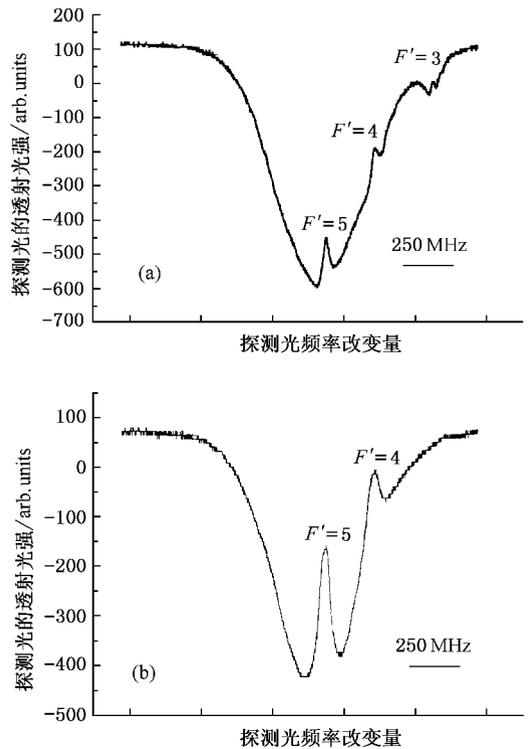


图 5 实验测量的探测光的透射图 (a) 表示抽运光和再抽运光同时作用的结果 (b) 表示只有抽运光的实验结果。抽运光: 10 mW, 再抽运光: 5.2 mW, 探测光: 0.5 mW

上述实验结果可解释为, 抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃迁上, 探测光则在  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}$  的跃迁上扫描,  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=4, 5)$  与抽运光形成两个三能级系统, 所以探测光的  $F'=4$  和 5 上分别产生了两个透明的峰。当再抽运光作用于  $6S_{1/2}(F=3)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  的跃

迁上,与探测光的  $6S_{1/2}(F=4)$  到  $6P_{3/2}(F'=3)$  形成  $\Lambda$  型三能级系统,探测光在  $F'=3$  上由于再抽运光的作用产生了透明峰.所以双抽运作用时则形成了图 5(a)所示的实验结果.

## 4. 结 论

本文主要研究抽运光的强度对 V 型铯原子三

能级系统 EIT 的影响,得到了随着抽运光功率的增大探测光的吸收减小透明效应增强的结果.理论上利用光与原子作用的密度矩阵加以解释,实验结果与理论计算相符合.同时还研究了再抽运光的作用对铯原子三能级系统的影响.再抽运光的作用使探测光的吸收比没有再抽运光增加了 4 倍.并观察到了由再抽运光和探测光形成的  $\Lambda$  系统的 EIT 效应.

- |  |   |
|--|---|
| [ 1 ] Harris S E , Field J E , Imamoglu A 1990 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>64</b> 1107                | [ 4 ] Jin S Z , Li Y Q , Xiao M 1995 <i>Opt. Commun.</i> <b>119</b> 90            |
| [ 2 ] Hau L V , Harris S E , Dutton Z <i>et al</i> 1999 <i>Nature</i> <b>397</b> 594                 | [ 5 ] Li Y , Xiao M 1995 <i>Phys. Rev. A</i> <b>51</b> R2703                      |
| [ 3 ] Phillips D F , Fleischhauer A , Mair A <i>et al</i> 2001 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>86</b> 783 | [ 6 ] Xiao M , Li Y Q <i>et al</i> 1995 <i>Phys. Rev. Lett.</i> <b>74</b> 666     |
|  | [ 7 ] Zhao J M , Yin W B <i>et al</i> 2002 <i>Chin. Phys.</i> <b>11</b> 241       |
|  | [ 8 ] Wang Y Z , Xu G , Ye C <i>et al</i> 1996 <i>Phys. Rev. A</i> <b>53</b> 1160 |

# Experimental investigation of electromagnetically induced transparency with double-pumping lasers \*

Zhao Jian-Ming Zhao Yan-Ting Huang Tao Xiao Lian-Tuan Jia Suo-Tang

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

( Received 30 May 2003 ; revised manuscript received 4 July 2003 )

## Abstract

The effect of pumping laser intensity on electromagnetically induced transparency ( EIT ) in the cesium atomic three-level system was investigated , and the EIT against double-pumping laser was obtained . The theoretical explanation was put forward using density matrix , and the experimental results is in agreement with theoretical calculation .

**Keywords :** EIT , double-pumping , cesium atom

**PACC :** 3280 , 3510W

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10174047 ) , the Natural Science Foundation of Shanxi Province ( Grant No. 20021032 ) , and the Science Foundation for Young Scientists of Shanxi Province , China ( Grant No. 20031004 ) .