

文章编号: 1000-0364(2002)04-0407-04

基于 Rb 原子电磁诱导透明的量子干涉实验研究*

涂鲜花^{1,2}, 王 谨¹, 何 明¹, 汪 毅¹, 江开军¹, 詹明生¹

(1. 中科院武汉物理与数学研究所波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071;

2. 中科院安徽光学精密机械研究所激光光谱学实验室, 合肥 230031)

摘要: 报道了基于⁸⁵Rb D_2 线电磁诱导透明(EIT)的量子干涉现象,发现当一耦合光和探测光之间满足拉曼共振条件时出现电磁诱导透明现象,在某些条件下也观察到电磁诱导吸收(EIA)。而当用一束耦合光和一束泵浦光共同作用于 $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F=3$ 和 $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F=4$ 能级上时,探测光的吸收谱表现出三峰结构,并且峰强弱与两耦合光之间的相对强度有关。

关键词: 量子干涉;电磁诱导透明

中图分类号: O413.1 **文献标识码:** A

1 引言

自 1991 年 Harris^[1]小组成功实现 Sr 原子的电磁诱导透明(EIT)实验以来,基于此现象的光与原子之间相互作用的研究已经成为新的研究热点,例如在非线性光学^[2]、无反转激光^[3]、光存储^[4]、光速减慢^[5]、量子噪声抑制以及量子信息^[6,7]诸方面都取得了重要进展。同时光子作为量子信息的一种可靠的载体,以其速度快、保密性能高等特点,具有其它信息载体无法比拟的优势,从而使电磁诱导透明在量子信息存储与传输中潜在的应用引起人们广泛的兴趣。这些现象的物理实质是原子的相干布局囚禁,即在光场的作用下,原子被诱导到相干布局囚禁态,从而表现出对光的吸收的不敏感性,Lukin^[8]首次从理论上提出了暗态(dark states)的概念,认为电磁诱导透明是源于电磁场诱导的原子相干与量子干涉现象,是交流 Stark 效应和量子干涉共同作用的结果;M. O. Scully^[9]等认为电磁诱导透明现象是由于耦合光与探测光之间强的相互作用对基态到激发态之间的跃迁产生了相消干涉,原子被激发到暗态,不再与探测光作用,从而表现为探测光的透明。近年来,人们也在探索 EIT 现象在弱光非线性光学例如光开关^[10,11]等方面的应用。电磁诱导透明与超冷原子相结合,在光速减慢及信息存储方面的研究

取得了突出结果,Chien Liu 等^[3]成功地把光信息存储在原子介质中长达 800 μ s。1999 年,L. V. Hall 等^[5]在超冷原子中成功地将光速减小到 17 m/s。关于电磁诱导透明的研究主要集中在碱金属原子 D_1 线上,理论方面多是基于三能级系统基础上的量子干涉和非线性过程,最近出现了基于四能级系统的双缀饰态之间的量子干涉的实验和理论报道^[12,13]。本文首次对⁸⁵Rb 的 D_2 线多能级 EIT 基础上的量子干涉进行了研究,观察到了电磁诱导透明(EIT)和电磁诱导吸收(EIA)同时出现,发现当三束光(一耦合光、一泵浦光和一探测光)作用在原子介质时,探测光的吸收呈现三峰结构,该结构的出现与耦合光与泵浦光相对强度之比有关。

2 实验与讨论

图 1 给出了⁸⁵Rb 原子能级图和实验光路图。外腔反馈式半导体激光器 DL1 和 DL2 分别作为耦合光和探测光光源,其中 DL1 经一声光调制器 AOM(121 MHz)分成 0 级和 -1 级光,两者与探测光同向进入 Rb 样品吸收池,用一半波片调节探测光的偏振方向,使耦合光和探测光的偏振方向相互垂直,同时,在吸收池前面加一小孔光阑使三束光能很好地重合。极化分束片 PBS 用以将探测光和耦

* 收稿日期:2002-03-18

作者简介:涂鲜花(1973-),女,河南沈丘人,博士,主要从事原子分子物理研究。

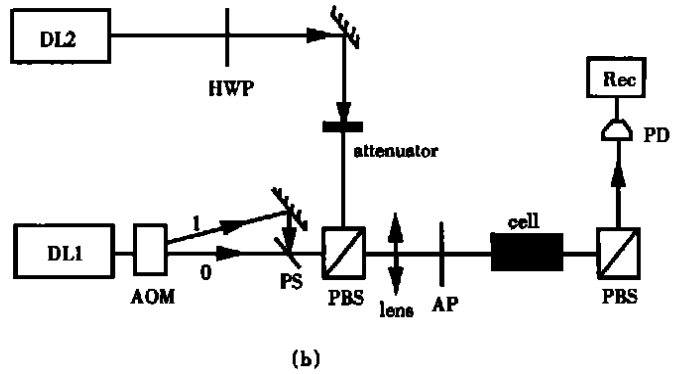
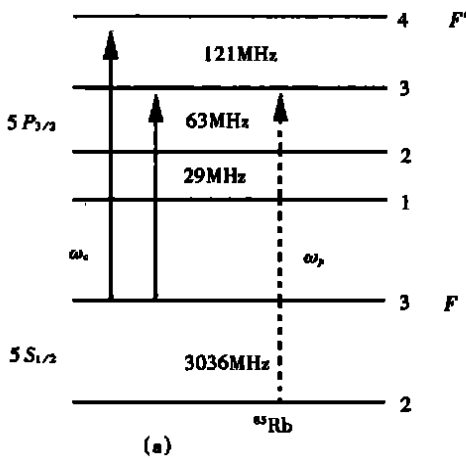


图1 Rb 原子相关能级图(a)与电磁诱导透明实验光路图(b)

HWP: 半波片, AOM: 声光调制器, PS: 分束片, PBS: 极化分束片, PD: 探测器

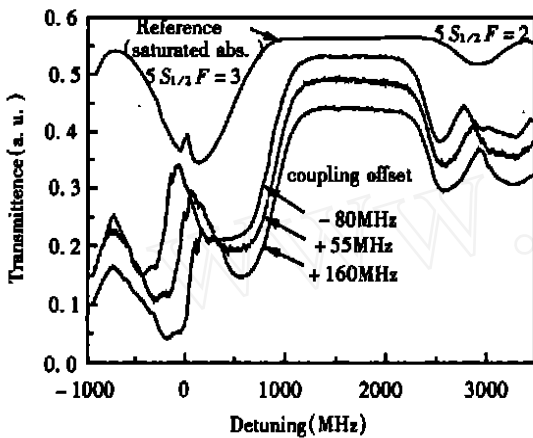


图2 电磁诱导透明信号随耦合光频率的变化

耦合光与 $5S_{1/2} F=3 \rightarrow 5P_{3/2} F'=3$ 的跃迁共振频率为零失谐谱

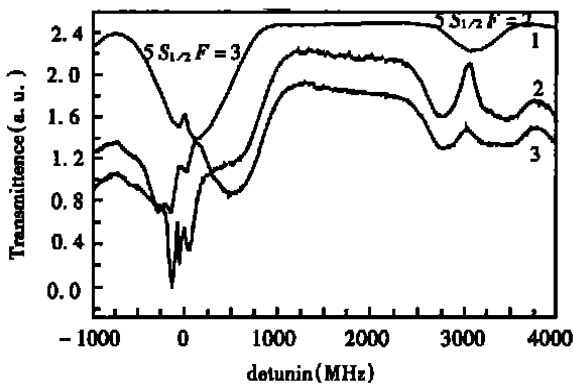


图3 ^{85}Rb 原子电磁感应透明中量子干涉现象

1—Ref; 2—only $F=3 \rightarrow F'=3$;
3— $F=3 \rightarrow F'=3$ and $F=3 \rightarrow F'=4$

合光(泵浦光)分离。外加光路通过饱和吸收分别对两激光器进行稳频和移频, Doppler 加宽线型内的饱和和吸收谱作为光谱定标的参考。

不加声光调制器(载波驱动功率为零)时, DL1 仅输出 0 级光(作为耦合光), 固定耦合光的波长于不同的值, 扫描探测光时得到如图 2 所示的吸收谱。

图中可见, 随着耦合光的不断兰移, 在 $5S_{1/2} F=2$ $5P_{3/2} F$ 吸收包络处出现的吸收减小(透明)的峰的位置也作相应右移, 使得透明峰的位置与耦合光的频率始终满足 Raman 共振条件。这正是电磁诱导透明的典型特征。在 $5S_{1/2} F=3$ 处的吸收同样也因耦合光的存在而减少, 此处的耦合光与探测光频率相同, 因而应归为耦合光的光泵漂白效应所引起的。在适当的条件下(如图 3 曲线 B) 该处的吸收反被增强(倒吸收尖峰), 应归为电磁诱导吸收(EIA)现象。

然后加上声光调制器, 把 0 级光的频率调谐在 $5S_{1/2} F=3$ $5P_{3/2} F=4$ 附近, 此时 -1 级光的频率在 $5S_{1/2} F=3$ $5P_{3/2} F=3$ 附近, 当探测光的频率与 -1 级光的频率满足 Raman 共振时, 发现在 $5S_{1/2} F=2$ $5P_{3/2} F$ 处出现电磁诱导透明现象的同时, 在 $5S_{1/2} F=3$ $5P_{3/2} F$ 处的吸收峰也比只有一个耦合光(图 2) 的情形发生了变化, 吸收信号表现为三个小峰, 并且三个峰的性质和强度随两耦合光的相对强度发生变化, 如图 3 曲线 C 所示。

对于上述出现的较多的谱峰结构, 一个肯定的事实是由多波长激光与多能级原子的相互作用, 就如 EIT 一样, 这里存在丰富的量子相干与干涉效应。例如对于三峰结构, 一个可能的解释来自于双暗态相互作用理论^[12]。对于如图 4 所示的四能级系统, $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 为激发态, $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 为系统基态(在我们所用的原子能级中, $|1\rangle$ 、 $|2\rangle$ 、 $|3\rangle$ 、 $|4\rangle$ 分别对应能级 $5S_{1/2} F=2$ 、 $5S_{1/2} F=3$ 、 $5P_{3/2} F=3$ 、 $5P_{3/2} F=4$), 一弱的探测光和一强耦合光(Rabi 频率分别为 $2g$ 和 2Ω) 分别与 $|1\rangle$ $|3\rangle$ 、 $|2\rangle$ $|3\rangle$ 之间发生耦合, 另一泵浦光(Rabi 频率分别为 2Ω) 与 $|2\rangle$ $|4\rangle$

发生耦合, $c = c - 32$, $= a - 42$, $= p - 31$ 分别为耦合光、泵浦光和探测光的频率失谐量, $3(4)$ 是激发态 $|3(4)$ 的自发衰减率, 认为 $|2$,

$|3, |4$ 以及耦合光和泵浦光为一耦合系统, 然后用探测光进行探测。用半经典理论给出两耦合光作用的三个半经典的缀饰态可以表示为:

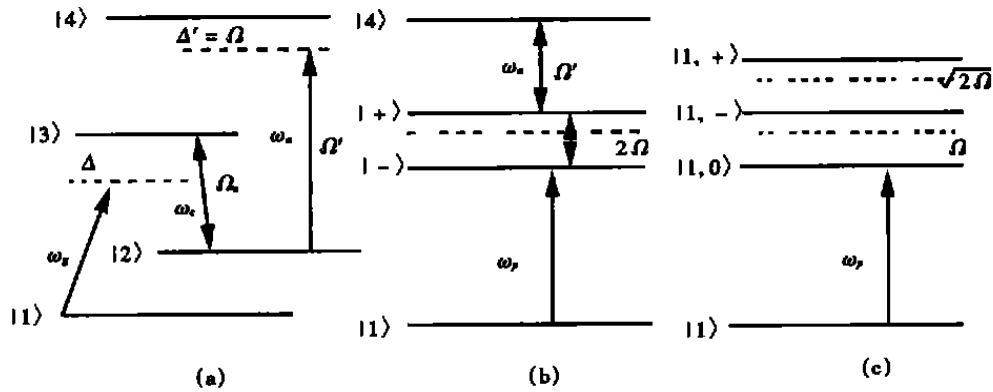


图 4 双缀饰态量子干涉示意图

(a) 四能级原子系统和激光耦合; (b) 耦合光作用的三能系统的暗态; (c) 在四能级暗态基础上耦合的三暗态

$$|1, + \rangle = a_+ / 2 + b_+ / 3 + c_+ / 4$$

$$|2, 0 \rangle = a_0 / 2 + b_0 / 3 + c_0 / 4$$

$$|3, 0 \rangle = a_- / 2 + b_- / 3 + c_- / 4$$

当耦合光和泵浦光分别与跃迁能级发生共振时

($c = 0$, $= 0$), 三个缀饰态表示为:

$$|1, + \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[|2 \rangle + \frac{\sqrt{2} + 2}{\sqrt{2 + 2}} |3 \rangle + \frac{\sqrt{2 + 2}}{\sqrt{2 + 2}} |4 \rangle \right]$$

$$|1, 0 \rangle = \frac{\sqrt{2 + 2}}{\sqrt{2 + 2}} |4 \rangle - \frac{\sqrt{2 + 2}}{\sqrt{2 + 2}} |3 \rangle$$

$$|1, - \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[|2 \rangle - \frac{\sqrt{2} + 2}{\sqrt{2 + 2}} |3 \rangle - \frac{\sqrt{2 + 2}}{\sqrt{2 + 2}} |4 \rangle \right]$$

相应的本征值分别为 $E_+ = \sqrt{2 + 2}$, $E_0 = 0$ 和 $E_- = -\sqrt{2 + 2}$, 因此探测光的吸收谱上的三个吸收峰, 可分别对应缀饰态 $|1, + \rangle$, $|1, 0 \rangle$ 和 $|1, - \rangle$ 的跃迁, 三个峰之间的间隔为 $= E_+, E_0, E_-$, 且与耦合光及泵浦光的光强有关。

同时本实验中由于各超精细结构能级之间的间隔小于 Doppler 加宽, 观察到的谱是原子本身的谱线与热原子系综非均匀 Doppler 加宽线型的卷积。关于本实验涉及的定量分析有待于进一步研究。

3 结论

对于碱金属原子具有复杂超精细结构的 D_2 , 在

热原子系综中也能观察到电磁诱导透明现象。在双激光耦合的多能级体系中, 存在有丰富的量子相干现象, 由此可望在弱光非线性光学、光速减慢、量子信息相干存储等进一步的研究中得到应用。

参考文献

- [1] J. E. Field, K. H. Hahn, and S. E. Harris. Observation of electromagnetically induced transparency in collisionally broadened lead vapor [J]. Phys. Rev. Lett., 1991, 67 (22): 3 062.
- [2] S. E. Harris, J. E. Field and A. Imamoglu. Nonlinear optical processed using electromagnetically induced transparency [J]. Phys. Rev. Lett., 1990, 64 (10): 1 107.
- [3] Chien Liu, Z. Dutton, C. H. Behroozi and L. V. Hau. Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses [J]. Nature 2001, 409: 490.
- [4] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair and R. L. Walsworth, M. D. Lukin. Storage of light in atomic vapor [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 86(5): 783.
- [5] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi. Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas [J]. Nature, 1999, 397: 594.
- [6] M. D. Lukin and A. Imamoglu. Controlling photons using electromagnetically induced transparency [J]. Nature, 2001, 413: 273.
- [7] A. M. Akulshin, S. Barreiro, and A. Lezama. Electromagnetically induced absorption and transparency due to resonant two-field excitation of quasidegenerate levels in Rb vapor [J]. Phys. Rev., 1998, A57 (4): 2

- 996.
- [8] M. Fleischhauer and M. D. Lukin, Dark-state polaritons in electromagnetically induced transparency [J]. Phys. Rev. Lett., 2000, 84(22): 5 094.
- [9] M. O. Scully, M. Zubairy. "Quantum optics"[M]. Chap. 7, Cambridge university press, 1997.
- [10] M. Yan, E. G. Riskey, and Y. F. Zhu. Observation of absorptive photon switching by quantum interference [J]. Phys. Rev., 2001, A64: 041 801.
- [11] S. E. Harris and Y. Yamamoto. Photon switching by quantum interference [J]. Phys. Rev. Lett., 1998, 81 (17): 3 611.
- [12] M. D. Lukin, S. F. Yelin, M. Fleischhauer, and M. O. Scully. Quantum interference effects induced by interacting dark resonances [J]. Phys. Rev., 1999, A60 (4): 3 225.
- [13] M. Yan, E. G. Riskey, and Y. F. Zhu. Observation of doubly dressed states in cold atoms [J]. Phys. Rev., 2001, A64: 013 412.

Quantum interference effects studied experimentally in the D_2 line of ^{85}Rb vapour

TU Xian-hua^{1,2}, WANG Jin¹, HE Ming¹, WANG Yi¹, JIANG Kai-jun¹, ZHAN Ming-sheng¹

(1. State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071; 2. Laser Spectroscopy Laboratory, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

Abstract: The paper report an experimental observation of the electromagnetically induced transparency (EIT) in the D_2 line of ^{85}Rb atoms. When a coupling laser for $5S_{1/2}, F=3 \rightarrow 5P_{3/2}, F$ is Raman resonant to the probe laser in $5S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5P_{3/2}, F$, EIT peaks apparently appear. Under certain conditions, absorption enhancement due to the electromagnetically induced absorption (EIA) was also recorded together with the EIT. A lambda coupling scheme with two strong lasers (a coupling laser and a pumping laser) was realized, the spectrum of the probe laser exhibits more complex structure, revealing rich quantum coherence interactions.

key words: Quantum interference; Electromagnetically induced transparency