

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0119-03

Cs 原子选择反射光谱暗共振的实验研究

赵延霆, 赵建明, 黄涛, 肖连团, 贾锁堂

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

摘要 近年来热原子电磁感应透明(EIT)和相干布局俘获(CPT)已有相当多的报道,在三能级 Λ 型系统中,双光场能够诱导原子基态相干并且导致吸收减小。从实验上研究了 Λ 型Cs原子气固界面反射光谱中的暗共振现象。实验中将Cs原子蒸气加热到150℃左右,抽运光调谐到 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3)$ 附近,探测光在 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}$ 并以近垂直入射到Cs炉表面,实验中观察并讨论了抽运光在不同强度和失谐情况下探测光选择反射光谱中的暗共振。结果可知在大的抽运光强的作用下,亚多普勒结构的反射光谱在共振位置出现了明显的感应透明现象。实验结果对研究无多普勒效应的原子相干,以及原子-器壁碰撞,长程原子-器壁相互作用,器壁表面原子速度分布有一定的意义。

关键词 量子光学; 选择反射光谱; 暗共振; 原子相干

中图分类号 O434.14

文献标识码 A

Experimental Investigation of Dark Resonances in Selective Reflection Spectroscopy of Cs Atoms

ZHAO Yan-ting, ZHAO Jian-ming, HUANG Tao, XIAO Lian-tuan, JIA Suo-tang

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

Abstract Electromagnetically induced transparency (EIT) and coherent population trapping (CPT) have received considerable attention in recent years. In this paper, dark resonances in selective reflection spectroscopy of Λ -type Cs atoms are reported. The temperature of Cs was heated about 150 °C and the coupling beam was tuned to the resonant frequency of the transition $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3)$ and the probe beam frequency was scanned over the transition $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}$. The frequency detuning and intensity effect of coupling laser were demonstrated in dark resonances spectrum. The obvious induced transparency was observed in the selective reflection spectrum with sub-Doppler structure. The result was important to study the atomic coherent, atom-wall collision, long-range interactions between excited atoms and solid-state surfaces.

Key words quantum optics; selective reflection spectroscopy; dark resonance; atomic coherent

1 引言

二能级系统气固界面的选择反射(SR)光谱近年来已有大量的理论和实验研究^[1],其中包括监测气固界面的反射系数与气体介质的依赖关系。光在气固界面的反射光谱发生在气体原子距离界面波长量级的范围内,在正入射条件下,原子与表面的碰撞导致了SR信号的亚多普勒结构,这是由于原子在离开表面时已经与界面相互作用导致去激发,这种效应已经被用来探测介质表面原子与气体原子的范德瓦尔斯相互作用力^[2],或用来估算吸收线的压力展宽及频移。三能级原子系统在监测近表面原子的动力学行为给予了新的方法和新的可能。A.Amy-klein等通过探测

反射光谱研究了阶梯型三能级Cs原子系统折射系数的变化^[3]。S.Le Boiteux等从实验和理论上研究了不同入射角度时的三能级原子的选择反射光谱。B. Gross等研究了Rb原子中SR光谱中的速度选择光抽运^[4]。本文从实验上研究了三能级 Λ 型原子的反射光谱的暗共振现象。

2 实验装置

实验装置如图1所示,抽运激光器为钛宝石(Coherent MBR 100),产生的线偏振光耦合到Cs原子 $6S_{1/2}(F=4) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3)$ 跃迁附近。探测光由外腔式二极管激光器(New Forcus 6000)输出,自由运转

基金项目: 国家自然科学基金(60078009, 10104047)和山西省自然科学基金资助课题。

作者简介: 赵延霆(1975—),男,山西大学物理电子工程学院博士研究生,主要从事激光光谱及非线性光学方面的研究。E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn

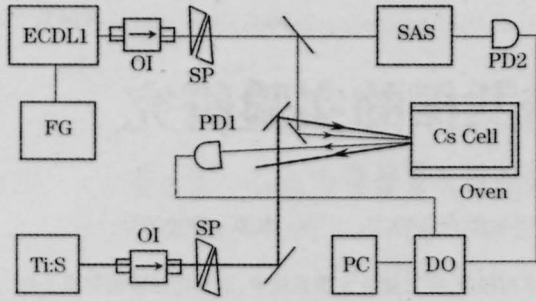


图 1 实验装置图

ECDL:外腔二极管激光器; FG:函数发生器; OI:光隔离器; SP:整形棱镜; SAS:饱和吸收光谱装置; DO:数字示波器; PC:计算机

Fig.1 Experimental setup

ECDL:external cavity diode laser; FG-function generator; OI:optical isolator; SP:shaping prism; SAS:saturated absorption spectrometer; DO:digital oscillograph; PC:personal computer

线宽小于 500 kHz(=50 ms)。两激光束近垂直入射到 Cs 炉表面, Cs 炉温度保持在 150 °C 左右, 其原子密度约为 $2 \times 10^{14}/\text{cm}^3$, 以保证高的信噪比。饱和吸收光谱作为频率参考, 弱探测光的吸收信号由雪崩二极管(Hamamatus Si APD,s3884)接收, 输出电信号由数字示波器采集。探测光的直径约为 1.5 mm, 远小于抽运光直径(约为 4 mm), 这样有利于抽运光和探测光的有效重合。探测光功率约为 1 mW。

3 实验结果及分析

实验涉及的原子能级如图 2 所示, 态 $|a\rangle$ 与 $|c\rangle$ 为基态, $|b\rangle$ 为激发态, $\gamma/2$ 为跃迁弛豫率, $\Gamma/2$ 为基态间的非辐射弛豫率, ω_1 为 $|a\rangle$ 与 $|b\rangle$ 间的跃迁频率, ω_2 为 $|b\rangle$ 与 $|c\rangle$ 间的跃迁频率。典型的反射光谱及暗共振, 如图 3 所示, 探测光扫描于跃迁线 ($6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}$) 附近, 抽运光共振于 $F=4 \rightarrow F'=3$ 上, 图 3(a) 为无抽运光时的反射光谱, 呈现近色散型的光谱结构, 图 3(b) 为暗共振光谱, 在跃迁 $F=3 \rightarrow F'=3$ 的位置上探测光出现明显的吸收减小, 透明峰半宽约为 7 MHz, 在 $F=3 \rightarrow F'=2$ 和 $F=3 \rightarrow F'=4$ 光谱线宽出现明显的展宽。图 4 为抽运光功率改变时的暗共振光

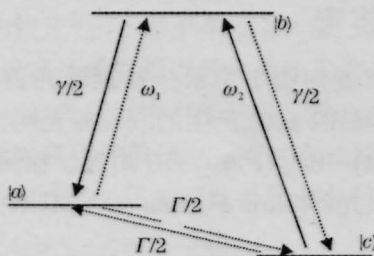


图 2 三能级 Λ 型原子系统

Fig.2 Three-level Λ atomic system

谱。当抽运功率增加时, 透明峰明显加深, 这是由于光抽运效应导致的交流斯塔克分裂增宽的结果, 这与室温下观察到的碱金属电磁感应透明 (EIT) 效果相似。图 5 为改变抽运光失谐时的结果, 抽运光功率为 570 mW, 吸收减小的位置随抽运光失谐的位置在相应地改变。实验现象可由如下理论解释^[4], 气体原子的原子态可由密度矩阵 $\rho(v_z, z, t)$ 给出, 解 Liouville 方程 $\left[\frac{\partial}{\partial t} + v_z \frac{\partial}{\partial z} \right] \rho = -\frac{i}{\eta} [H, \rho] - \Gamma \rho$ 可得

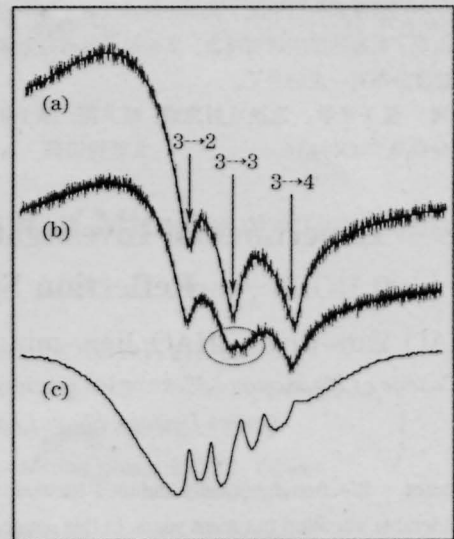


图 3 典型的反射光谱。(a)及暗共振光谱(b),饱和吸收光谱(c)作为频率参考

Fig.3 Typical SR spectrum. (a) and its dark resonance line (b) the curve (c) is the saturated absorption spectrum

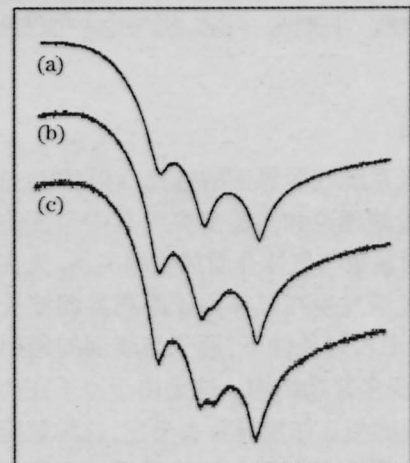


图 4 抽运光功率改变时的反射暗共振光谱。抽运光功率 (a) 0 mW, (b) 90 mW, (c) 480 mW, Cs 泡温度约 150 °C
Fig.4 Dark resonance lines in selective reflection spectrum with different coupling laser intensity. The coupling laser intensity is: (a) 0 mW, (b) 90 mW, (c) 480 mW, respectively. The temperature of Cs vapor cell is about 150 °C

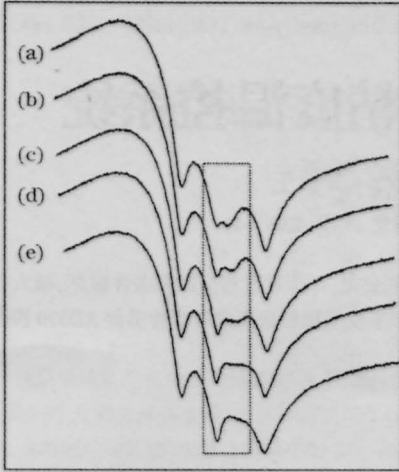


图5 抽运光失谐时的反射暗共振光谱
相对于跃迁 $6S_{1/2}(F=3) \rightarrow 6P_{3/2}(F'=3)$ 失谐量 (a) 0 MHz; (b) 40 MHz;
(c) 80 MHz; (d) 120 MHz; (e) 200 MHz。Cs 泡温度约 140℃

Fig.5 Dark resonance lines in selective reflection spectrum with detuning of the coupling laser. The probe frequency is scanned from the transition $6S_{1/2}(F=3)$ to $6P_{3/2}$, the pumping frequency is tuned from the transition $6S_{1/2}(F=3)$ to $6P_{3/2}(F'=3)$ by: (a) 0 MHz; (b) 40 MHz; (c) 80 MHz; (d) 120 MHz; (e) 200 MHz. The temperature of Cs vapor cell is about 140 °C

$$\rho_{bc} = (\rho_{bb} - \rho_{cc}) \frac{\Omega_2}{\Delta_{bc}} + (\rho_{bb} + \rho_{cc}) \frac{\Omega_2 |\Omega_1|^2}{\Delta_{ab} \Delta_{bc} \Delta_{ac}} + (\rho_{bb} - \rho_{cc}) \frac{\Omega_2 |\Omega_1|^2}{\Delta_{bc}^2 \Delta_{ac}}$$

其中, $\Delta_{ab} = \omega_{ab} + k_1 \cdot v - \omega_1 + i\gamma/2$,

$$\Delta_{bc} = -\omega_{bc} - k_2 \cdot v + \omega_2 + i\gamma/2,$$

$$\Delta_{ac} = (\omega_2 - \omega_{bc}) - (\omega_1 - \omega_{ab}) + (k_1 - k_2) \cdot v + i\Gamma_{coh},$$

ρ_{ii} 为稳态布局密度算符, 在 $\Gamma \ll \gamma$ 时,

$$\rho_{bb} = 0, \quad \rho_{aa} = \frac{1}{2}(1-L), \quad \rho_{cc} = \frac{1}{2}(1+L).$$

实验中的情况态 $|a\rangle$ 和 $|c\rangle$ 描述的是同一个超精细能级, 所以 $k_1 = k_2$ 。SR 信号正比于非对角矩阵元 ρ_{bc} 的实部。

4 结论

在强抽运光作用下, 在 Λ 型气固界面无多普勒效应的选择反射光谱中进行了暗共振的实验研究, 并观察到明显的吸收减小, 当抽运光失谐时其位置亦随之发生改变。实验结果对探测介质表面原子与气体原子的范德瓦尔斯相互作用力, 近表面原子折射率改变, 近表面原子的动力学行为等具有一定的指导意义。

参考文献

- 1 M. Oria, M. Chevrollier, D. Bloch *et al.*. Spectral observation of surface-induced Van der Waals attraction on atomic vapour [J]. *Europhys. Lett.*, 1991, **14**(6):527-532
- 2 H. Failache, S. Saltiel, M. Fichet, *et al.*. Resonant van der Waals repulsion between excited Cs atoms and sapphire surface [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **83**(20):5467-5470
- H. Failache, S. Saltiel, M. Fichet *et al.*. Resonant coupling in the Van der Waals interaction between an excited alkali atom and a dielectric surface: an experimental study via stepwise selective reflection spectroscopy [J]. *Eur. Phys. J. D*, 2003, **23**: 237-255
- 3 A. Amy-klein, S. Saltiel, O. A. Rabi *et al.*. Three-level nonlinear selective reflection at a glass-Cs-vapor interface [J]. *Phys. Rev. A*, 1995, **52**:3101-3109
- 4 B. Gross, N. Papageorgiou, V. Sautenkov *et al.*. Velocity selective optical pumping and dark resonances in selective reflection spectroscopy [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(4):2973-2981