

文章编号: 0253-2239(2010)11-3124-04

# 铯原子磁光阱中冷原子的缀饰态光谱

杨保东 梁强兵 杨建峰 张天才 王军民

(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** 在磁光阱中的铯原子由于冷却光的存在将被缀饰化。借助于波长为 852.3 nm(对应于铯原子  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=3$  和  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=4$  超精细跃迁)和 794.6 nm(对应于铯原子  $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$  超精细跃迁)的探测光的透射光谱分别对磁光阱中冷原子基态  $6S_{1/2} F=4$  和激发态  $6P_{3/2} F'=5$  在冷却光作用下形成的缀饰态分裂进行了实验研究,并分析了其光谱特性。结果表明,在冷却光强度、失谐量相同的实验条件下,基态、激发态的缀饰态分裂间距相同,与缀饰态理论预言一致。

**关键词** 原子与分子物理学; 缀饰态; 冷原子; 磁光阱

中图分类号 O433 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103011.3124

## Dressed-Atom Spectra of Cold Cesium Atoms Trapped in a Magneto-Optical trap

Yang Baodong Liang Qiangbing Yang Jianfeng Zhang Tiancai Wang Junmin

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** Due to the strong cooling laser, the cesium cold atoms trapped in a magneto-optical trap are dressed. The dressed splitting was observed arising from cooling laser for the ground state  $6S_{1/2} F=4$  and excited state  $6P_{3/2} F'=5$  using the probe laser with the wavelengths of 852.3 nm (corresponding to the transitions of  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=3$  and  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=4$  of cesium atom) and 794.6 nm (corresponding to the transition of  $6P_{3/2} F'=5$  and  $8S_{1/2} F''=4$  of cesium atom), respectively, and their spectral properties were analysed. The results show that the dressed splitting for the ground state  $6S_{1/2} F=4$  is the same with that for the excited state  $6P_{3/2} F'=5$  for the same intensity and detuning of cooling laser, which is consistent with the prediction based on the dressed state theory.

**Key words** atomic and molecular physics; dressed state; cold atom; magneto-optical trap

## 1 引 言

光与原子相互作用,一直是量子光学和激光光谱学中一个重要的研究课题。特别是高分辨率的激光光谱,由于其在基础理论研究和实践中具有广泛的应用,如原子超精细结构的研究、激光冷却与俘获原子以及精密测量等,因此不断追求高分辨率的光

谱,是光谱学中一个永恒的主题<sup>[1~3]</sup>。对于室温下气室中的原子,由于存在多普勒展宽而限制了原子谱线的精度,有时淹没了原子光谱中的超精细谱线,而且由于气室中各种运动速率的原子存在,使得光谱的结构较为复杂<sup>[4,5]</sup>。自从实现了用磁光阱(MOT)冷却与俘获中性原子以来,冷原子样品成为

收稿日期: 2009-10-26 收到修改稿日期: 2010-04-26

基金项目: 国家自然科学基金(60978017, 610178051, 10974125, 60821004)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0524)、国家重大科学研究计划(2006CB921102)和高等学校博士点专项科研经费(20070108003)资助课题。

作者简介: 杨保东(1980—),男,博士研究生,主要从事量子光学与冷原子物理实验等方面的研究。

E-mail: ybd@sxu.edu.cn

导师简介: 王军民(1967—),男,博士,教授,主要从事量子光学与冷原子物理等方面的研究。

E-mail: wwjjm@sxu.edu.cn (通信联系人)

光谱研究中一种非常理想的介质。它可很好地避免多普勒效应的影响,极大地提高了光谱的精度,所以一直以来,许多小组对冷原子中的光谱作了大量的研究<sup>[6-11]</sup>。然而由于磁光阱中冷却光的存在,使得这些光谱受到了很大的影响,甚至使得光谱结构比较复杂,缀饰态原子模型对此给予了很好的解释<sup>[12-15]</sup>。

本文用波长为  $852.3\text{ nm}$  的探测光对铯原子磁光阱中冷原子基态  $6S_{1/2}, F=4$  到激发态  $6P_{3/2}, F'=3, 4$  跃迁的谱线进行了观察,并用缀饰态理论分析了其光谱特性。用波长为  $794.6\text{ nm}$  的探测光观察了冷原子激发态之间  $6P_{3/2}, F'=5$  到  $8S_{1/2}, F''=4$  跃迁的缀饰态光谱,并与其在室温下气室原子中的缀饰态光谱作了比较,同时对波长为  $794.6\text{ nm}$  的探测光抑制磁光阱中冷原子装载机理作了合理的分析。

## 2 实验装置

用于磁光阱实验的冷却光与反抽运光由两台自制的光栅外腔反馈半导体激光器 (ECDL) 提供。冷却光 [图 1(a)] 可通过无调制偏振光谱方法将其频率锁于铯原子  $6S_{1/2}, F=4 \rightarrow 6P_{3/2}, F'=5$  循环跃迁

线上<sup>[16-17]</sup>,并通过声光频移器 (ACM) 实现冷却光相对于循环跃迁线负失谐  $\Delta$  处,如图 1(a) 所示。与之前用饱和吸收光谱 (SAS) 稳频比较,这种锁频率方法大大提高了激光频率的稳定性,进而提高了磁光阱中冷原子的稳定性。反抽运光  $R$  通过饱和吸收光谱将其频率锁于  $6S_{1/2}, F=3 \rightarrow 6P_{3/2}, F'=4$  跃迁线,有效地避免了原子在基态  $6S_{1/2}, F=3$  上堆积,确保冷却过程持续进行。磁光阱系统中的磁场通过一对反向亥姆霍兹线圈提供,当线圈电流为  $1.6\text{ A}$  时,在线圈磁场零点处的磁场梯度约为  $1\text{ mT/cm}$  另外通过 3 对同向的亥姆霍兹线圈补偿地磁场。系统的背景真空度通过离子泵长期维持在约  $10^{-8}\text{ Pa}$ , 满足对原子冷却俘获的实验要求。

实验中三组圆偏振的冷却光相互垂直,如图 2 所示。冷却光总光强约为  $30\text{ mW}$ , 再抽运光总光强为  $4\text{ mW}$ , 两光束直径均为  $1.7\text{ cm}$ 。冷却光失谐量  $\Delta$  在  $-4 \sim -20\text{ MHz}$  的范围内变化时, 均可获得稳定的冷原子云。稳态磁光阱中可俘获约  $1 \times 10^7$  个铯原子, 短程飞行时间法测量得到的冷原子的典型温度约为  $70\text{ }\mu\text{K}$ 。

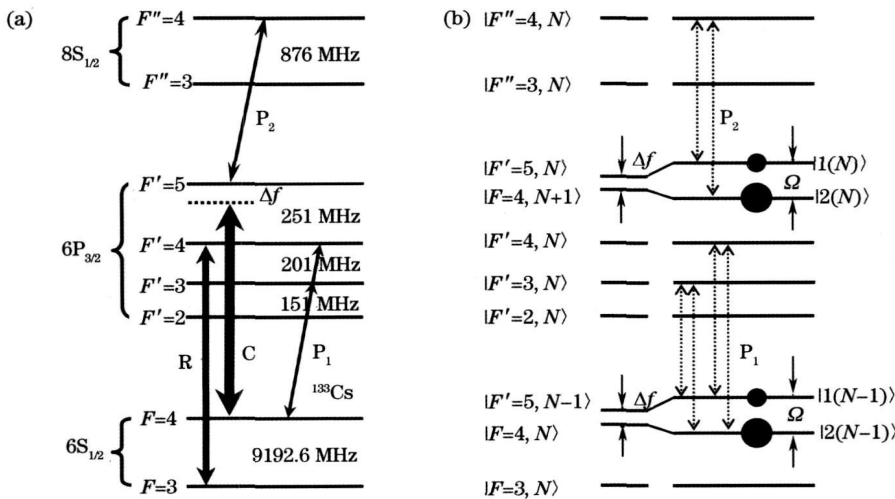


图 1 相关的铯原子超精细能级。(a) 裸态; (b) 缀饰态

Fig 1 Diagram of relevant hyperfine energy levels of cesium atoms (a) bare states; (b) dressed states

由于磁光阱中冷却光的存在,而且其光强较大,它将原子缀饰化,如图 1(b) 所示。用探测光  $P_1$  和  $P_2$  分别测量了  $6S_{1/2}, F=4 \rightarrow 6P_{3/2}, F'=3, 4$  和  $6P_{3/2}, F'=5 \rightarrow 8S_{1/2}, F''=4$  的缀饰态光谱。两探测光波长分别为  $852.3\text{ nm}$  和  $794.6\text{ nm}$ , 均为线偏振光,光强均为  $40\text{ }\mu\text{W}$  左右,光束与轴成约  $12^\circ$  角穿过冷原子云后到达探测器,如图 2 所示。

## 3 实验结果及讨论

在较强冷却光的作用下,被捕获冷原子的基态  $6S_{1/2}, F=4$  和激发态  $6P_{3/2}, F'=5$  都发生了缀饰分裂,如图 1(b) 所示。冷却光与原子未耦合时,光场状态  $|N\rangle$  和原子能态  $|F\rangle$  以直积的形式表示为  $|F, N\rangle$ , 由于在冷原子实验中,冷却光相对于跃迁线  $6S_{1/2}, F=$

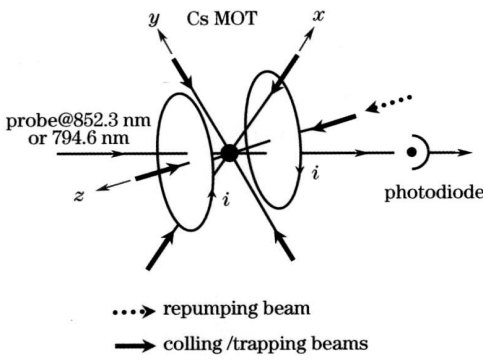


图 2 实验装置示意图

Fig 2 Schematic diagram of experimental setup

$4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=5$  负失谐  $\Delta$ , 所以对于基态  $6S_{1/2} F=4$  能级  $|F=4, N\rangle$  位于  $|F'=5, N-1\rangle$  之下  $\Delta, fN$  为冷却光光子数目。冷却光与原子耦合后新的能级  $|1(N-1)\rangle$  和  $|2(N-1)\rangle$  被称为缀饰态, 是能级  $|F=4, N\rangle$  和  $|F'=5, N-1\rangle$  的叠加态<sup>[13]</sup>:

$$|1(N-1)\rangle = \cos\theta |F'=5, N-1\rangle - \sin\theta |F=4, N\rangle \quad (1)$$

$$|2(N-1)\rangle = \cos\theta |F=4, N\rangle + \sin\theta |F'=5, N-1\rangle \quad (2)$$

这里  $\theta = \arctan(-\Omega_c / \Delta f / 2)$ ,  $\Omega_c$  为冷却光的拉比 (Rabi) 频率。能级  $|1(N-1)\rangle$  和  $|2(N-1)\rangle$  上的实心圆表示原子布居数的相对大小, 这两能级之间的间距为

$$\Omega = [\Omega_c^2 + (\Delta f)^2]^{1/2} \quad (3)$$

类似地, 对于激发态  $6P_{3/2} F'=5$  也是如此, 其缀饰态分裂间距与基态  $6S_{1/2} F=4$  相同。

### 3.1 基态 $6S_{1/2} F=4$ 缀饰分裂的实验结果

当波长为 852.3 nm 的探测光穿过冷原子, 在跃迁线  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=3, 4$  的范围附近扫描时, 便获得如图 3 所示的缀饰态光谱。由于基态  $6S_{1/2} F=4$  缀饰分裂, 所以其到激发态  $6P_{3/2} F'=3$  的跃迁对应于两个吸收峰, 这两峰之间的间距便是基态  $6S_{1/2} F=4$  缀饰分裂的间距, 用 SAS 作为频率参考标准测得其分裂间距约为 21 MHz 与 (3) 式计算结果基本相符 (实验中冷却光  $\Omega_c = 13.37 \text{ MHz}$ ,  $\Delta f = -14 \text{ MHz}$ )。图中这两峰大小及位置都与冷却光的失谐  $\Delta$  有关。在耦合光 (冷却光) 强度一定时, 随着耦合光失谐  $\Delta$  的增加, 缀饰分裂的双峰中的大峰总是靠近共振位置 (没有耦合光缀饰原子时, 波长为 852.3 nm 探测光在原子中共振吸收的位置), 小峰远离共振位置。随着耦合光失谐  $\Delta$  的进一步增大, 小峰的幅度将变得更小, 甚至不可见; 大

峰将更加靠近共振位置。此时, 耦合光与原子之间的相互作用可以忽略不计<sup>[13]</sup>。实验中在参数允许的范围内, 冷却光的失谐  $\Delta$  在  $-4 \sim -20 \text{ MHz}$  的范围内变化时, 测得两峰之间的距离基本上满足 (3) 式。同样, 对于  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=4$  跃迁的光谱也是如此。

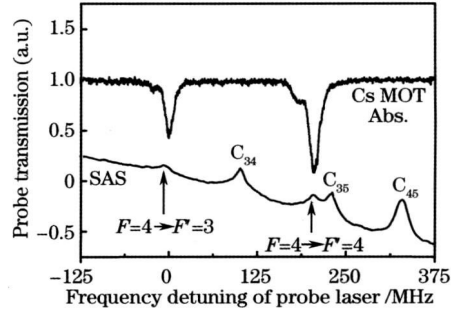


图 3 冷原子中基态  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=3, 4$  的缀饰态光谱

Fig 3 Dressed-atom spectra for the transitions of  $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=3, 4$  for cold atoms

### 3.2 激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 缀饰分裂的实验结果

同样地, 当波长为 794.6 nm 的探测光通过冷原子, 在跃迁线  $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$  的范围附近扫描时, 就获得如图 4 所示的缀饰态光谱。图中两个吸收峰就是由于激发态  $6P_{3/2} F'=5$  缀饰分裂造成的, 它们之间的距离便是激发态  $6P_{3/2} F'=5$  缀饰分裂大小, 与基态  $6S_{1/2} F=4$  缀饰分裂间距相同。实验中用一个校准之后的共焦法布里-珀罗 (Fabry-Pérot) 腔 (CFP 腔, 自由光谱区 503 MHz, 精细度约 100) 测得两吸收峰之间的距离约为 21 MHz 与图 3 中的缀饰分裂间距相同。

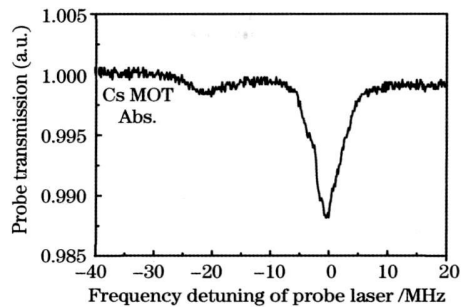


图 4 冷原子中激发态  $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$  的缀饰态光谱

Fig 4 Dressed-atom spectra for the transition of  $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$  for cold atoms

虽然, 冷原子的获得为高精度光谱的观察提供了一种非常理想的介质。但就激发态  $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow$

$8S_{1/2} F''=4$ 之间的缀饰态光谱而言,同样也在室温下的气室原子中观察到,其光谱与图4相似。这主要得益于波长为 $852.3\text{ nm}$ 激光共振或近共振于跃迁线 $6P_{3/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=5$ 时,只能把室温下气室中在 $852.3\text{ nm}$ 激光传播方向上特定速度分量的原子布居到中间态 $6P_{3/2} F'=5$ 上,因此当探测光在跃迁线 $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$ 之间扫描,就可观察到由于 $852.3\text{ nm}$ 激光造成的 $6P_{3/2} F'=5$ 的缀饰分裂情况,同样免于多普勒效应的影响。从这个意义上讲,对于激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 缀饰分裂的观察,冷原子与室温下的气室原子是等价的。

另外,当增大波长为 $794.6\text{ nm}$ 探测光的功率,可以抑制磁光阱中冷原子的装载。一方面,探测光破坏了磁光阱中原子的受力平衡;另一方面,这是由于冷却光与探测光构成一个阶梯型的电磁感应透明(EIT)能级系统( $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$ )。当探测光共振于能级 $6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$ 冷却光在一定程度上得以透明,从而使冷却光的有效功率减少,导致磁光阱中所俘获冷原子的数目减少。实验中,随着探测光功率的增加,用CCD监视的冷原子的荧光强度、大小都在减少,直至冷原子云不可见<sup>[18]</sup>。

## 4 结 论

基于缀饰态理论研究了铯原子磁光阱中冷原子的光谱特性。对于冷原子中基态 $6S_{1/2} F=4$ 到激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 跃迁的光谱特性,缀饰态理论可给出很好的解释和非常直观的物理图象。对于激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 到 $8S_{1/2} F''=4$ 跃迁的光谱特性,其在冷原子与室温下气室原子中的缀饰态光谱完全相同。这是因为:冷原子可以很好地避免多普勒效应的影响;对于室温下气室中的原子,虽然存在多普勒效应的影响,但由于基态 $6S_{1/2} F=4$ 到激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 跃迁时的速度选择机制,使得激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 到 $8S_{1/2} F''=4$ 之间的光谱同样免于多普勒效应的影响。对于冷原子中基态 $6S_{1/2} F=4$ 和激发态 $6P_{3/2} F'=5$ 的缀饰分裂间距,在冷却光强度、失谐量相同的实验条件下,它们是相同的,与理论相符。最后,分析了 $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=5 \rightarrow 8S_{1/2} F''=4$ 阶梯型能级系统中的EIT效应使得 $794.6\text{ nm}$ 的探测光抑制了磁光阱中冷原子的装载,这一点在实验也得到了证实。

## 参 考 文 献

1 Pei Shixip, Cui Fenping, Li Chuanqi et al., Cavity-enhanced

- absorption spectroscopy based on diode laser [ J ]. Acta Optica Sinica 2009 29(3): 831~838
- 裴世鑫, 崔芬萍, 李传起等. 基于半导体激光的腔增强吸收光谱技术研究 [ J ]. 光学学报, 2009 29(3): 831~838
- 2 Yang Changhu, Zeng Xiaoying, Liao Jiaxin et al., Application of Raman spectrum in water quality analysis [ J ]. Chinese J Lasers 2008 35(8): 1169~1172
- 杨昌虎, 曾晓英, 廖家欣等. 激光拉曼光谱在水质分析中的应用 [ J ]. 中国激光, 2008 35(8): 1169~1172
- 3 Wu Jizhou, Han Qiang, Jia Suotang et al., Research on the adjustable balance probe for laser polarization spectroscopy [ J ]. Acta Optica Sinica 2009 29(9): 2601~2606
- 武寄洲, 韩强, 贾锁堂等. 可调平衡探测激光偏振光谱研究 [ J ]. 光学学报, 2009 29(9): 2601~2606
- 4 G Moore, H R Noth, Analytic calculation of linear susceptibility in velocity dependent pump-probe spectroscopy [ J ]. Phys Rev A 2008 78(3): 032506
- 5 Yang Baodong, Zhao Jiangyan, Wang Junjin et al., Observation of velocity selective spectra of  $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$  transition with a cesium vapor cell at room temperature [ J ]. Acta Quantum Optica Sinica 2009 15(2): 180~184
- 杨保东, 赵江艳, 王军民等. 室温下铯原子气室中 $6P_{3/2} \rightarrow 8S_{1/2}$ 激发态跃迁的速度选择光谱 [ J ]. 量子光学学报, 2009 15(2): 180~184
- 6 D Grison, B Lounis, C Salmon et al., Raman spectroscopy of cesium atoms in a laser trap [ J ]. EuroPhys Lett, 1991 15(2): 149~154
- 7 J W R Tabosa, G Chen, Z Hu et al., Nonlinear spectroscopy of cold atoms in a spontaneous force optical trap [ J ]. Phys Rev Lett, 1991 66(25): 3245~3248
- 8 R W Fox, S L Gilbert, L Hollber et al., Optical probing of cold trapped atoms [ J ]. Opt Lett, 1993 18(17): 1456~1458
- 9 U D Rapol, A Wasan, V Natarajan, Observation of sub-natural linewidths for cold Rb atoms in a magneto-optical trap [ J ]. EuroPhys Lett, 2003 61(1): 53~59
- 10 T M Buzowski, M Buzowska, J Zachorowski, High resolution spectroscopy of cold trapped atoms [ J ]. Acta Physica Polonica A 2007 112(5): 783~790
- 11 W Z Zhang, H D Cheng, L Xiao et al., Nonlinear spectroscopy of cold atoms in diffuse laser light [ J ]. Opt Express 2009 17(4): 2892~2905
- 12 M Frasca, Theory of dressed states in quantum optics [ J ]. Phys Rev A 1999 60(1): 573~581
- 13 M Mitsunaga, T Mukai, K Watanabe et al., Dressed-atom spectroscopy of cold Cs atoms [ J ]. J Opt Soc Am B 1996 13(12): 2696~2700
- 14 S B Yan, T Liu, T Geng et al., Absorption spectroscopy of cold cesium atoms confined in a magneto-optical trap [ J ]. Chinese Phys, 2004 13(10): 1669~1673
- 15 R Y Chang, W C Fang, Z S He et al., Doubly dressed states in a ladder type system with electromagnetically induced transparency [ J ]. Phys Rev A 2007 76(5): 053420
- 16 Wang Jing, Yang Baodong, Wang Junjin et al., Influence of the bandwidth of feedback loop in frequency stabilization of external cavity diode laser by polarization spectroscopy [ J ]. Acta Optica Sinica 2009 29(2): 425~430
- 王婧, 杨保东, 王军民等. 采用偏振光谱对外腔半导体激光器稳频时反馈环路带宽的影响 [ J ]. 光学学报, 2009 29(2): 425~430
- 17 Ma Jie, Zhao Yanting, Zhao Jianming et al., Frequency stabilization of an external cavity diode laser using polarization spectroscopy without frequency modulation [ J ]. Chinese J Lasers 2005 32(12): 1605~1608
- 马杰, 赵延霆, 赵建明等. 利用偏振光谱对外腔式半导体激光器实现无调制锁频 [ J ]. 中国激光, 2005 32(12): 1605~1608
- 18 R Y Chang, W C Fang, B C Ke et al., Suppression and recovery of the trapping of atoms using a ladder type electromagnetically induced transparency [ J ]. Phys Rev A 2007 76(5): 055404