

文章编号: 0253-2239(2001)04-414-03

一种测量磁光阱中冷原子密度和温度的新方法*

付军贤 李义民 陈徐宗 杨东海 王义遒
(北京大学电子学系, 北京 100871)

摘要: 报道了对磁光阱中冷铯原子吸收谱的实验观察, 由于冷原子的多普勒增宽远小于激发态超精细分裂, 实验观察到三个孤立的吸收峰($Cs, 6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F = 3, 4, 5$), 其吸收系数比为 3: 7: 12, 这与相应跃迁振子强度一致。利用吸收信号测量了冷原子云的密度, 结果与荧光探测法在 10% 的精度内符合; 用吸收信号测量了冷原子的温度, 测量结果与用荧光飞行时间法和释放捕捉法的结果吻合。

关键词: 磁光阱; 吸收谱; 冷原子; 飞行时间

中图分类号: O562.3 文献标识码: A

1 引 言

磁光阱(MOT)自问世以来^[1], 日益成为一种有力的研究工具。磁光阱中的冷原子是一种理想的原子光谱实验样品, 它的温度极冷(约为 100 μ K), 囚禁时间长, 可以有效地减小多普勒频移和增宽、碰撞频移以及渡越增宽等因素对原子光谱的影响。

磁光阱中冷原子的密度和温度是磁光阱的两个重要参量。目前采用的密度测量手段一般是荧光强度探测法测量总的原子数目, 再根据 CCD 摄像机测量的原子云尺寸算得原子云体积, 从而得到冷原子密度; 温度测量的方法很多, 其中最为准确的一种方法是飞行时间(TOF)法, 即测量冷原子团下落扩散过程中经过探测光束所发出的荧光谱, 通过测量原子飞行过程中的速度分布变化推得下落前的速度分布, 然后拟合速度分布曲线可以得到冷原子的温度。

随着磁光阱性能的提高, 囚禁的原子数和原子密度越来越高。在较高的原子密度情况下, 冷原子云不再是好的光学薄样品, 由于荧光自陷效应的影响, 荧光探测法已不是一种测量原子数目的准确方法。由于荧光收集效率直接影响用荧光飞行时间法测量温度的信噪比和准确度, 因此如何克服系统荧光收集角度太小的问题成为能否准确测量磁光阱密度和温度的关键。本文采用了一种新的方法对磁光阱中冷原子的密度和温度进行了较为准确的测量, 并与普通采用的荧光探测法进行了比较, 得到了一

些有益的结论。

2 实验方案与结果

磁光阱系统在文献[2]和[3]中已有较详尽的描述, 在磁光阱中得到较好的冷原子云共振荧光信号后(图 1), 从荧光光强的空间分布可以知道^[4], 此时磁光阱中的原子云处于一种均匀分布的状态, 用一束很细的、调谐于铯 D_2 线的微弱激光束穿过冷原子云, 用低噪声的光电管(UDT-125DPL 型)接收, 并用低噪声的电流放大器(EG&G PARC 公司的 181 型精密电流放大器)对信号放大, 观察到了磁光阱中冷原子的三个孤立的吸收峰(作为对照, 也记录了汽室中铯原子的饱和吸收谱, 并消去了饱和吸收谱的多普勒本底, 因为是直接调制激光器电流, 因而冷原子吸收谱存在剩余的强度调制, 两个信号用存储示波器同时记录, 见图 2), 图 2(b)中从左到右对应于跃迁 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F = 5, 4, 3$ 。由于原子温度很低, 与室温相比降低了约 6 个数量级, 因此

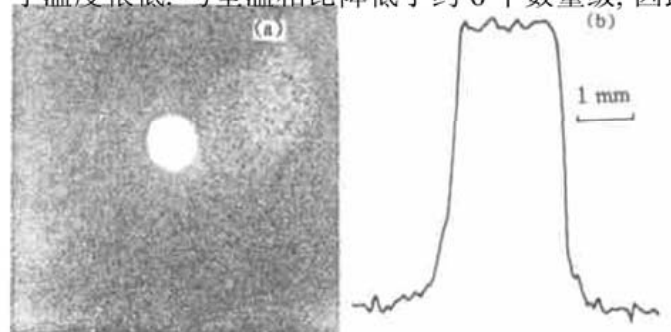


Fig. 1 (a) Resonant fluorescence signal of cold atoms in MOT recorded by CCD; (b) The distribution of fluorescence of the cold atoms in the MOT.

* 国家自然科学基金(9704001)以及教育部高等学校博士点专项科研基金资助项目。

收稿日期: 1999-06-25; 收到修改稿日期: 1999-12-10

多普勒增宽比室温下减小了 3 个数量级, 远小于 Cs 原子激发态的超精细分裂, 这种吸收谱线与室温下的吸收谱线有很大的不同。通过计算, 3 个峰的吸

收系数比约为 3: 7: 12, 与激发态超精细能级的振子强度相一致。

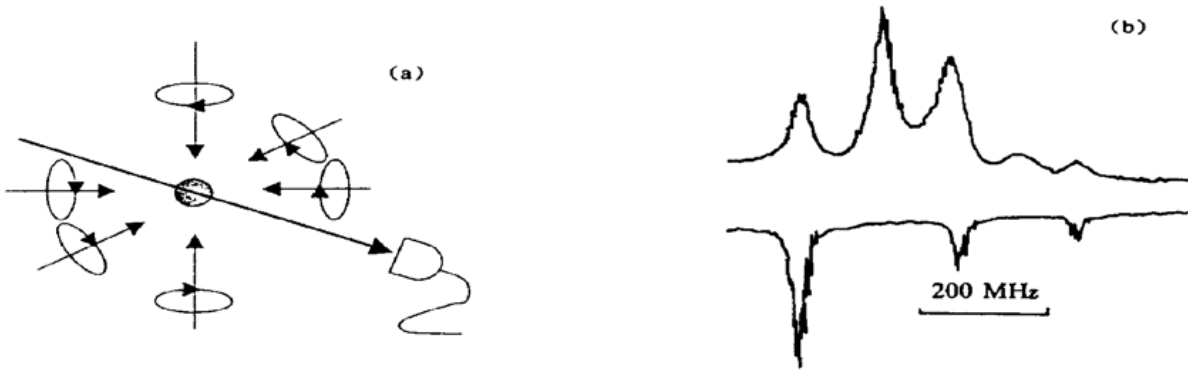


Fig. 2 (a) Experimental setup of absorption spectrum of cold atoms; (b) the upper line is saturated absorption spectrum of cesium atoms in room temperature; the lower line is the absorption spectrum of cold atoms in MOT.

2.1 冷原子的密度测量

利用吸收谱对冷原子的密度和数目进行测量的实验条件为: 背景真空度为 1.0×10^{-7} Pa; 反向亥姆霍兹线圈轴向(垂直方向)磁场梯度为 10^{-3} T/cm; 囚禁激光频率相对于跃迁 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F = 5$ 负失谐 18 MHz; 囚禁光束直径为 1.2 cm, 光强在光束截面上为高斯分布, 每束水平光的功率为 6 mW, 垂直方向每束光功率为 16 mW。冷原子云的直径为 $d = 0.33$ cm, 体积为 $V = 19.2$ mm³, 通过测量冷原子云散射的荧光强度^[2], 确定此时总的原子数目为 $N = 4.0 \times 10^8$ 个, 原子云密度为 $n = 2.1 \times 10^{10}$ /cm³。

探测光由分布布拉格反射激光器提供, 用饱和吸收稳频的办法将激光频率锁定在铯原子的 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F = 5$ 共振跃迁频率上, 激光器的线宽用铯原子和吸收谱估计约为 30 MHz, 探测光束直径为 0.8 mm, 光强为 $70 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。仔细调节探测激光的方向使其穿过原子云的中心, 然后测量冷原子云对探测光的吸收, 测量表明有 16.4% 的探测光功率被吸收, 由此得冷原子云的光学厚度 $d = 0.184$, 则 $\alpha = 0.54 \text{ cm}^{-1}$ 。在前述实验条件下, 并考虑到所用探测激光的线宽。按照文献[4]给出的计算方法, 可得此磁光阱中每个冷原子对调谐于循环跃迁的共振光的吸收截面为 $2.82 \times 10^{-11} \text{ cm}^2$, 则原子云的密度为 $1.9 \times 10^{10}/\text{cm}^3$, 总的原子数目为 3.7×10^8 , 与用荧光探测法获得的结果在 10% 以内符合。

2.2 冷原子的温度测量

将这一束光调低至冷原子云下方 2 mm 处[参见图 2(a)], 在 10 μs 内用电光晶体关闭冷却光(剩余光强小于 5%), 用机械斩光器完全关闭冷却光,

同时小于 1 ms 的时间内关闭梯度磁场(剩余磁场强度小于 1%), 此时冷原子团将在重力场的作用下自由下落。为了精确控制使六束冷却光同时关闭, 采用了新的磁光阱系统: 用 150 mW 激光束经过电光晶体光强控制和光纤滤波后分为 6 束冷却光, 每束光功率为 2 mW, 直径 1.2 cm, 光强在光束截面上为高斯分布。背景真空度为 1.3×10^{-7} Pa; 垂直方向磁场梯度为 10^{-3} T/cm; 囚禁激光频率相对于跃迁 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}, F = 5$ 负失谐 18 MHz, 此时冷原子云的直径约为 2 mm。实验测量得到的吸收信号的飞行时间谱如图 3 所示, 它与蒙特卡罗法模拟得到的数据拟合, 估计温度为 $(150 \pm 50) \mu\text{K}$, 估计的误差主要来自飞行距离的测量误差和冷原子云直径的测量误差。

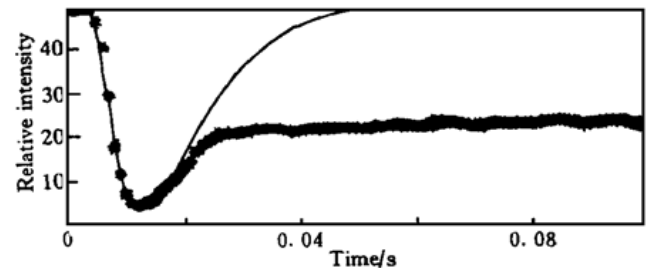


Fig. 3 The TOF signal of the absorption spectrum with the background of fluorescence, the temperature is estimated to be $(150 \pm 50) \mu\text{K}$, the solid line is fitting curve for the temperature, which is subject to the front part and the peak of TOF signal.

在没有另外的探测光的情况下, 关闭冷却光和梯度磁场后, 每间隔 5 ms 用电光晶体控制产生 1 ms 的冷却光脉冲照亮冷原子云, 得到的信号如图 4 所示, 与拟合计算^[5]的值(约 200 μK)吻合。

在冷原子下方 10 cm 处置一直径为 1 cm 左右的光束, 频率调到 Cs 原子的 $6S_{1/2}, F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}$,

$F = 5$ 的共振跃迁线作为探测光, 关闭冷却光和梯度磁场后, 测量荧光的飞行时间谱, 得到的信号经数据拟合约为 $150 \mu\text{K}$ 。

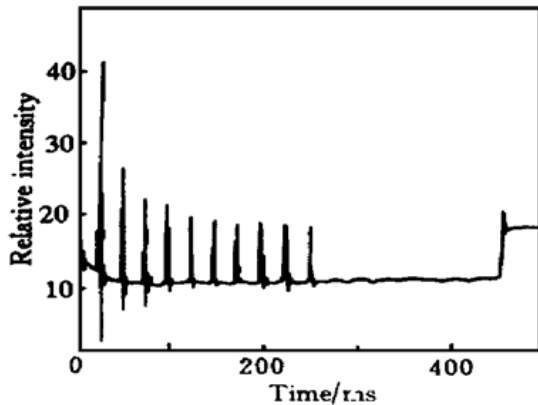


Fig. 4 Decay of fluorescence of cold atoms in MOT to measure the temperature of atoms using R&R method, with which the temperature is estimated approximately $200 \mu\text{K}$.

以上三种测量方法测量得到的温度比较吻合, 说明利用细光束的吸收信号进行温度测量是可行的, 而且利用吸收信号的测量克服了收集效率低的系统缺点, 是比较直接有效的测量手段。

小结 在冷原子云的光学厚度不是光学薄的情况

下, 荧光探测法仍然是一种测量冷原子云中的原子总数的简便、有效的准确测量手段。荧光探测法和本文介绍的新方法的测量结果存在一些差别, 主要来源于各种参数的测量误差。对于磁光阱中冷原子温度的测量, 受限于系统荧光收集角很小。采用了一种测量吸收信号的方法, 所得的结果与普遍采用的荧光飞行时间方法和释放捕捉方法得到的结果吻合。

参 考 文 献

- [1] Rabb E L, Prentiss M, Cable A *et al.*. Trapping of neutral sodium atoms with radiation pressure. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(23): 2631~ 2634
- [2] Gan Jianhua, Li Yimin, Chan Xuzong *et al.*. Magneto-optical trap for cesium atoms. *Chin. Phys. Lett.*, 1996, **13**(11): 821~ 823
- [3] Hou Jidong, Li Yimin, Yang Donghai *et al.*. An improved magneto-optical trap for cesium atoms. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(5): 335~ 337
- [4] Lindquist K, Stephens M, Wieman C. Experimental and theoretical study of the vapor-cell Zeeman optical trap. *Phys. Rev. (A)*, 1992, **46**(7): 4082~ 4090
- [5] Lett P D, Watts R N, Westbrook C I *et al.*. Observation of atoms laser cooled below the Doppler Limit. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **61**(2): 169~ 172

A New Method for Measuring Density and Temperature of Cold Atoms in Magneto-Optical Trap

Fu Junxian Li Yimin Chen Xuzong Yang Donghai Wang Yiqiu

(Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871)

(Received 25 June 1999; revised 10 December 1999)

Abstract The experimental observation of the absorption spectrum of cold atoms in magneto-optical trap (MOT) was reported. Because the Doppler broadening of cold atoms in MOT is far less than the hyperfine structure splitting, three absorption peaks (Cs, $6S_{1/2}$, $F = 4 \rightarrow 6P_{3/2}$, $F = 3, 4, 5$) with a ratio of absorption coefficient of 3: 7: 12 were observed. The density of cold atoms was also measured by using absorption signal and the result agreed with fluorescence detecting method within 10% tolerance. The temperature of cold atoms measured using absorption method agreed well with that by fluorescence TOF method and release and recapture method.

Key words magneto-optical trap; absorption spectrum; cold atoms; time of flight (TOF)