

文章编号: 0258-7025(2004)10-1188-05

# 准二维磁光阱中俘获长条形冷原子团

魏荣, 王育竹

(中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 介绍了在准二维磁光阱(2D<sup>+</sup>-MOT)中获得超冷原子的实验装置及结果。利用四个矩形线圈、四束椭圆形光斑光束加两束圆形光斑激光束,得到准二维磁光阱,它的特点是势阱为长条形,轴向束缚较小,势阱整体体积比较大,因而可以俘获到数目较多的超冷原子。实验中心附近的磁场梯度为  $1.3 \times 10^{-3}$  T/cm,椭圆型光斑的长/短轴为 24 mm/7 mm,圆形光斑直径为 7 mm,光斑功率分别为 18 mW, 6 mW。在该势阱中俘获长条形冷原子团的长度为 12 mm,直径为 1.5 mm,原子数为  $1.1 \times 10^7$ ,温度为 400  $\mu$ K。

**关键词** 量子光学;磁光阱;冷原子团;激光冷却

**中图分类号** O 431.2 **文献标识码** A

## Trapping Cold Atoms in a Quasi-Two Dimension Magnetic-Optical-Trap

WEI Rong, WANG Yu-zhu

(Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics  
and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** The setup and the experiment of a quasi-two dimension magnetic-optical-trap (MOT) are introduced in the paper. Four rectangular coils combining four elliptical spot beams and two orbicular spot beams are used to obtain a MOT and trap cold atoms. The characteristic of the trap is a pole shape and a bulk trap capacity, so the trap can capture more atoms, atomic cloud. The data of experiment are as following: magnetic gradient of  $1.3 \times 10^{-3}$  T/cm, elliptical spot beam of 24 mm/7 mm, orbicular spot beam of 7 mm, and spot power of 18 W, 6 W, respectively. Cold atomic cloud with a 12 mm length, 1.5 mm diameter is obtained in MOT, the atom number is  $1.1 \times 10^7$ , and the temperature is about 400  $\mu$ K.

**Key words** quantum optics; magnetic-optical trap; cold atomic cloud; laser cooling

## 1 引言

磁光阱(MOT)<sup>[1~3]</sup>既可以冷却原子,又可以束缚原子,且对设备(如激光的功率、准直、磁场梯度、真空等)要求非常低,实现起来非常方便,是最普遍使用的冷原子实验装置。绝大多数磁光阱都是由一对反亥姆霍兹线圈形成磁四极场再加六束激光正交对射的激光形成的,除此之外还有许多变形,其中之一就是准二维磁光阱或者叫 2D<sup>+</sup>-MOT<sup>[4,5]</sup>。它是由两对长方形反亥姆霍兹线圈形成四极场,再加六

束激光束形成的。与标准的圆形反亥姆霍兹线圈相比,它具有下列一些特点:势阱的轴向较长,从而体积比标准磁光阱的体积大;俘获的冷原子团形状为长条形,是许多冷原子实验的理想介质;俘获冷原子的数目比较多。

利用磁光阱俘获冷原子团的目的是为小型原子喷泉制备冷原子样品。原子喷泉是目前世界上最精密的时间频率标准,有巨大的国防应用价值和社会经济效益<sup>[6,7]</sup>。原子喷泉在做自由上抛运动的时候,很大程度上受限于微波谐振腔小孔,长条型的原

收稿日期:2003-04-21;收到修改稿日期:2003-07-04

基金项目:国家自然科学基金(6008002)、中国科学院重大方向性项目(KGCX<sub>2</sub>-SW-110)和上海市光科技专项发展基金(01DJGK015)资助项目。

作者简介:魏荣(1976—),男,山西太原人,中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学实验室助理研究员,主要从事量子光学、冷原子物理、时间频率标准和原子钟方面的研究。E-mail: weirong@siom.ac.cn

子云径向短,轴向长,正好满足原子喷泉的要求。同时它也是冷原子的自感应透明、光速减慢等实验的理想介质。

## 2 实验装置

准二维磁光阱的结构如图 1,四个磁场线圈在  $x-y$  截面形成磁场梯度,在  $z$  方向,在俘获原子的范围基本可以看作均匀磁场,中心处为 0(有点类似 Iaffe 阱);从六个方向加入激光束,激光束的偏振满足磁光阱对偏振的要求,即沿  $x$  正方向, $y$  负方向传播的为  $\sigma^+$  圆偏振光,沿  $x$  负方向, $y$  正方向传播的为  $\sigma^-$  圆偏振光, $z$  方向没有磁场梯度故没有偏振要求。

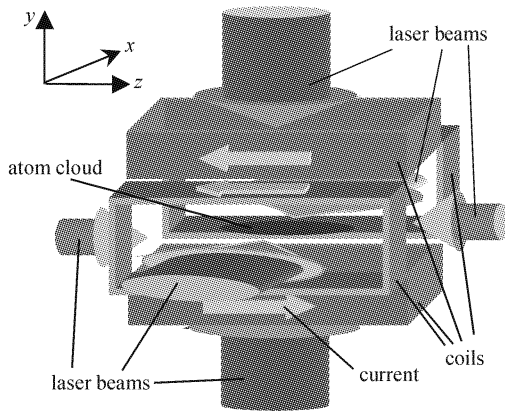


图 1 准二维磁光阱装置图  
Fig. 1 Schematic diagram of 2D<sup>+</sup>-MOT

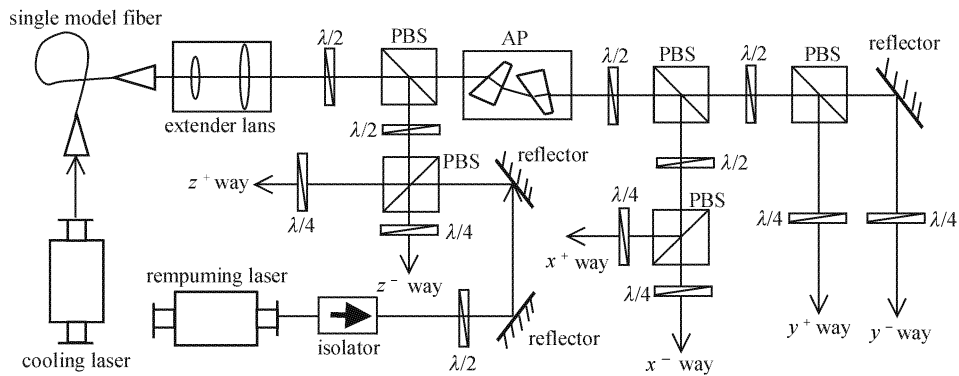


图 2 准二维磁光阱光路  
Fig. 2 Beam path of 2D<sup>+</sup>-MOT

磁场线圈是由四个方形线圈串联组成的,其在纵向的长度为 130 mm,远大于横向长度的 40 mm,在线圈的中间区域(约 20~30 mm)轴向的磁场梯度近似为 0,径向(沿  $x, y$  轴)的磁场梯度在电流  $I = 3$  A 时  $|\nabla B|_{r=0} \approx 1.3 \times 10^{-3}$  T/cm。磁光阱中的磁场梯度一般在这个量级。实际装置中,抽真空

由于它在  $z$  方向只有光场没有磁场,所以它不是一个严格的三维磁光阱,应该称之为准二维磁光阱或者叫 2D<sup>+</sup>-MOT。

实验是在 Rb 的真空器室中进行的,器室真空度为  $10^{-6}$  Pa。实验中用到两台半导体激光器,分别为 500 mW 大功率半导体激光器 TA-100,50 mW 半导体激光器 DL-100(均为德国 TuiOptica 公司制造),通过自带的锁相调节器(LIR)和 120 MHz 声光调制器,TA-100 输出的激光频率锁定在负失谐  $F = 2-F' = 3$  谱线 13.2 MHz 处(约 2 倍自然线宽)。TA-100 的激光输出作俘获、冷却光。DL-100 的激光输出通过一个比例积分微分(PID)电路锁定在  $^{87}\text{Rb}$  的  $5^2S_{1/2}-5^2P_{3/2}$  饱和吸收谱线的  $F = 1-F' = 2$  的谱线范围内,做再抽运(Repumping)光<sup>[8]</sup>。实验光路如图 2 所示。俘获光经过单模光纤耦合,以标准高斯光束输出进入光路以保证光斑的均匀性。为了有效利用激光功率, $x, y$  方向入射的都是椭圆形光斑,它是让圆形光斑通过由两块楔形棱镜组成的光束调整器获得的。进入吸收池前各束激光的光斑和功率分别为: $x, y$  方向俘获光为长短轴直径分别为 24 mm,7 mm 的椭圆光斑,激光功率为  $18 \pm 0.5$  mW, $z$  方向俘获光为直径为 7 mm 的圆形光斑,激光功率为  $6 \pm 0.5$  mW,再抽运光为直径为 10 mm 的圆形光斑,激光功率约为 22.5 mW,通过  $z$  方向的偏振分束棱镜(PBS)耦合到光路中。

的钛泵离吸收池比较近,钛泵中的磁性材料影响了线圈磁场的分布,造成磁光阱中冷原子团位置的挪动、原子团变形及分布不均。我们利用卜莫合金(79#,厚度为 0.5 mm)将钛泵屏蔽起来。屏蔽以后测得磁场线圈附近场强为  $0.4 \times 10^{-4}$  T,与地磁场大小相当。

冷原子实验中时序控制电路是由两台计算机及其他一系列电路组成的。主计算机利用 PCI 插槽与一块内置的 LabVIEW 模拟输出板(型号为 PCI-6713)连接,6713 板有 16 个输出信号,其中 8 个模拟信号,8 个数字信号。这些信号分别控制 CCD 拍照、磁场开关、光开关。用 LabVIEW 自带的软件编程,锁定各个信号的同步或延时关系,就可以实现冷原子实验中的时序控制。磁场线圈为感性负载,其电感为 4.62 mH,通过专门的电路控制,磁场开断时间分别为 2.5 ms,10  $\mu$ s。光开关是用一些速度响应非常快(毫秒量级)的小型继电器自制,实验中光开关的时间小于 1 ms,但有延迟,需要预先对其标定。

实验中用 CCD 和光电二极管对冷原子团进行测量,用于拍照的 CCD 为 Apogee 公司的 KX1E,其可拍照范围为 6.9 mm  $\times$  4.6 mm,像素为 768  $\times$  512,单像素尺寸为 9  $\mu$ m  $\times$  9  $\mu$ m。光电二极管为 S2386-18L(滨松 Hamamatsu 公司)。经过标定的 CCD 用于探测冷原子团绝对值的大小,光电二极管用于探测冷原子团荧光随时间的相对变化。

### 3 实验结果

利用上述实验装置在磁光阱中俘获的冷原子团如图 3 所示。我们测量了该原子团的尺度、原子数、原子数密度和温度。原子团尺度的测量方法是成像法,就是较精确地知道 CCD 成像的物像关系,求解 CCD 得到的最大值  $1/e$  范围内像的大小,根据物像

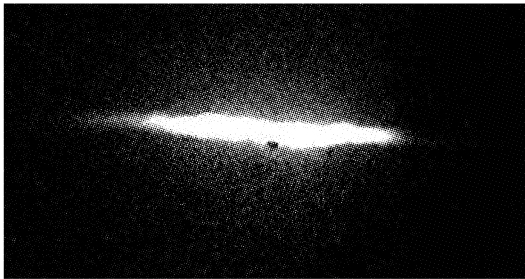


图 3 CCD 相机拍摄的冷原子团图像

Fig. 3 Picture of cold atomic cloud taken by CCD camera

关系得到物的大小。利用该方法得到的长条形冷原子团轴向长度约为 12 mm,直径约为 1.5 mm。实验中 CCD 水平放置,得到的是  $x-z$  平面的结果,通过比较水平方向的监视器和垂直方向的监视器得到的像,发现它们具有相等的长宽比,所以对冷原子团做的轴对称近似是合理的。

测量冷原子团数目的方法是荧光法。根据简化的两能级模型, $N$  个原子在单位时间、单位立体角发出的荧光能量为

$$\frac{\Delta E}{t(\Delta\Omega/4\pi)} = \hbar\omega \cdot NR \quad (1)$$

其中  $t$  为曝光时间, $\Delta\Omega$  为立体角, $R$  为光散射率

$$R = \Gamma \cdot \frac{S_0/2}{1 + S_0 + (2\delta/\Gamma)^2} \quad (2)$$

其中  $S_0$  为饱和参数。实验中,通过一个口径为  $\phi$  30 mm,焦距  $f = 50$  mm 的透镜,将冷原子团成像于 CCD 相机的感光板上,冷原子团与透镜的距离(物距)为 276 mm,像距为 61 mm,该成像系统光轴与激光  $x$  方向光轴夹角约为  $75^\circ$ 。在这样的参数下,冷原子团的不同部位的像距和空间立体角相差非常小,所以在计算中假设冷原子团中各个原子的像距和空间立体角相同。经过测量和计算,得到俘获的冷原子数目约为  $1 \times 10^7$ 。

知道了原子团的形状和数目,很容易得到密度。由于长条形冷原子团体积较大,各部分又不是特别均匀,所以我们用两个参数来衡量,一个是有效范围内冷原子团的平均密度,一个是它的最大密度。根据公式(1),单位面积 CCD 感受到的荧光能量正比于原子的面密度,所以 CCD 像素的最大值与平均值之比等于原子团最大面密度与平均面密度之比,对原子团作轴对称近似,令 CCD 像素的最大值与平均值之比等于原子团最大密度与平均密度之比,就可以根据平均密度得到最大密度。获得的结果如下:冷原子团的平均密度为  $8 \times 10^8/\text{cm}^3$ ,最大密度为  $7 \times 10^9/\text{cm}^3$ 。

测量冷原子团的温度最常用的方法是飞行时间法,其原理是将待测冷原子团的势阱快速关断,使冷原子团在空间自由膨胀,过一定的时间后加探测光,并用 CCD 拍照,就可以得到冷原子团随时间变化的图像,假设原子团开始时在坐标空间和动量空间都满足高斯分布,理论推导得<sup>[7]</sup>

$$T = \frac{M(\sigma_{x_2}^2 - \sigma_{x_1}^2)}{k_B(t_2^2 - t_1^2)} \quad (3)$$

其中  $\sigma_x$  为冷原子团的有效半径。在我们的实验中没有办法直接用该方法探测,因为首先原子团的形状是长条形,轴向不满足高斯分布,其次磁光阱中心有杂散磁场,但远小于四极场,所以对原子团影响较小,关闭四极场后,杂散磁场形成的磁场梯度影响原子的自由扩散,使原子团随时间的变化不再满足公式(3)。从我们拍摄的冷原子团荧光辐射看,原子团

的轴向的均匀性比较差,如图 3。此时严格测量温度意义不大并且比较困难。我们对温度做粗略测量。其原理是将冷原子团成像于一个光电二极管的

接收面上,光电二极管接收冷原子发出的荧光,用存储示波器记录势阱关断后光电流的变化,从而推导出冷原子团的温度。

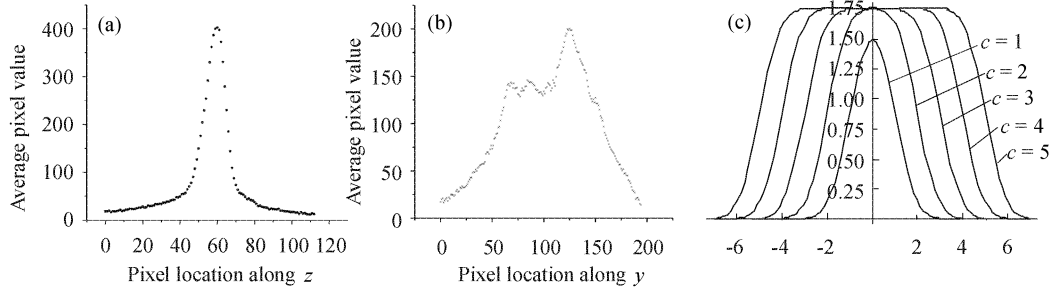


图 4 各像素沿(a)  $z$  轴, (b)  $y$  轴的读数, 及(c) 函数  $f(x) = \int_{-c}^c \exp[-(x-y)^2] dy$  在  $c = 1, 2, 3, 4, 5$  时的曲线

Fig. 4 Curve of pixel value along (a)  $z$  and (b)  $y$ , and (c) the curve of  $f(x) = \int_{-c}^c \exp[-(x-y)^2] dy$ , where  $c = 1, 2, 3, 4, 5$

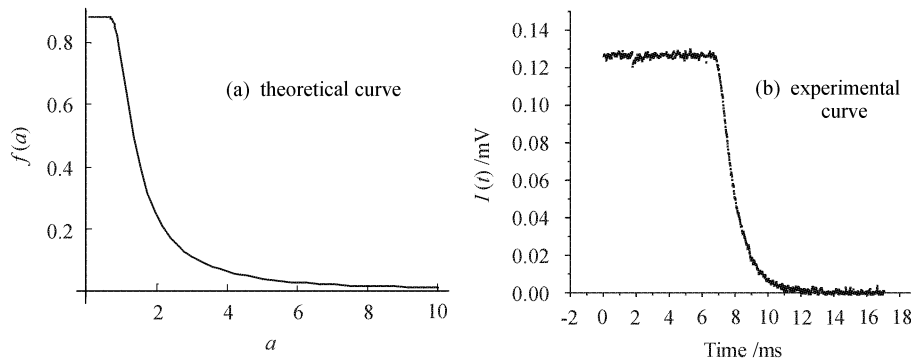


图 5 荧光衰减曲线

Fig. 5 Curve of fluorescence-declining

首先用解析表达式近似原子团的分布。采用直角坐标系,假设冷原子团初始时刻的动量分布满足高斯分布,  $x$  方向坐标分布也满足高斯分布,而在  $y$  方向是等幅度高斯分布的积分,经过简单推导,可以得到  $t$  时刻冷原子团的空间分布

$$W(x, t) = \frac{N}{2\pi\sigma_x(t)} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_x^2(t)}\right]$$

$$W(y, t) = \frac{C}{2\pi\sigma_y(t)} \int_{-ML/2}^{ML/2} \exp\left[-\frac{(x-a)^2}{2\sigma_y^2(t)}\right] da$$
(4)

其中  $L$  为长条形冷原子团的有效长度

$$\sigma_i^2(t) = \sigma_i^2(0) + t^2 \sigma_p^2/m^2 = \sigma_i^2(0) + k_B T t^2 / m$$

$$i = x, y$$
(5)

图 4 为 CCD 各个像素沿轴向/径向的平均值在 (a) 径向/(b) 轴向的分布, 及 (c) 等高高斯分布积分函数拟合的曲线。从图 4 可以看出, 这样的拟合与原来的结果还是有比较大的误差。求拟合解的原则

是根据函数上升沿、平台、下降沿的三部分在整个线形中的关系找到合适的  $c$  值, 得到  $c = L/[2\sqrt{2}\sigma_y(0)] = 3$ , 从而得到  $\sigma_y(0) = ML/6\sqrt{2}$ 。

假设光电二极管有效接收面为  $2a \times 2a$  正方形, 冷原子团成像于正方形中心, 放大倍率为  $M$ , 则磁光阱关断后, 冷原子团的荧光变化满足

$$\frac{I(t)}{I_0} = \frac{I_x(t)}{I_{x0}} \frac{I_y(t)}{I_{y0}} = \frac{\int_0^{aM} W(y, t) dy}{\int_0^{aM} W(y, 0) dy} \frac{\int_0^{aM} W(x, t) dx}{\int_0^{aM} W(x, 0) dx}$$
(6)

公式(6)最终可以化简为只有  $t$  和  $T$  函数。再定义一个使  $I(t)/I_0 = 1/e$  的特征时间, 这样只要知道荧光衰减的特征时间, 就可以得到温度  $T$ 。利用该方法, 用计算机求数值解得冷原子团的温度为  $T = 373 \mu\text{K}$ 。将此结果再代回公式(6)可以看出, 冷原子团荧光的变化主要来自径向冷原子团的扩散。而轴向冷原子团在  $t_0$  时刻内变化不大。图 5 为理论计

算的径向衰减特征曲线  $f(a) = \int_0^{1/a^2} \exp(-x^2) dx$  与实测的荧光衰减波形的比较,可以看出两条曲线衰减的特征基本一致。

需要指出的是上述温度测量只是基于我们特殊的原子团形状和现在有待改进的实验条件下的近似解,它的准确性有待与其他测温实验进行比较。基于这个原因,我们将温度只取一个有效数字,所以冷原子团的温度  $T$  约为  $400 \mu\text{K}$ 。

## 4 结 论

利用两对矩形反亥姆霍兹线圈和 6 束激光形成的准二维磁光阱,获得了长条形冷原子团。原子团长度和直径分别为  $12 \text{ mm}$  和  $1.5 \text{ mm}$ ,原子数为  $1.1 \times 10^7$ ,温度约为  $400 \mu\text{K}$ 。

### 参 考 文 献

1 E. L. Raab, M. Prentiss, A. Cable *et al.*. Trapping of neutral

- sodium atoms with radiation pressure [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **59**(23):2631~2634
- 2 H. Metcalf. Magneto-optical trapping and its application to helium metastables [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1989, **6**(11): 2206~2210
- 3 H. J. Metcalf, P. van der Straten. *Laser Cooling and Trapping* [M]. Springer, 1999
- 4 K. Dieckmann, R. J. C. Spreeuw, M. Weidemuller *et al.*. Two-dimensional magneto-optical trap as a source of slow atoms [J]. *Phys. Rev. A*, 1998, **58**(5):3891~3895
- 5 A. Clairon, C. Salomon, S. Guellati *et al.*. Ramsey resonance in a zacharias fountain [J]. *Euro. Phys. Lett.*, 1991, **16**(2): 165~170
- 6 K. Gibble, S. Chu. Laser-cooled Cs frequency standard and a measurement of the frequency shift due to ultracold collisions [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(12):1771~1774
- 7 P. A. Molenaar, P. van der Straten, H. G. M. Heideman *et al.*. Diagnostic technique for Zeeman-compensated atomic beam slowing: technique and result [J]. *Phys. Rev. A*, 1997, **55**(1): 605~614
- 8 Wei Rong, Wang Yuzhu. Telescope system used to the single mode fiber coupling of the laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(8):687~690
- 魏 荣,王育竹. 望远镜准直系统应用于激光的单模光纤耦合 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(8):687~690



## 第十一届全国量子光学学术会议在四川都江堰召开

由中国物理学会量子光学专业委员会主办,四川大学、山西大学共同承办的第十一届全国量子光学学术会议于 2004 年 8 月 8~10 日在四川省都江堰市翠月湖宾馆举行。首届全国量子光学学术会议始于 1984 年,每两年一届,至今整整 20 年。来自全国各地的 200 多名专家学者参加了本次会议,收到论文 300 余篇,120 人作报告,规模为历届会议之最。

开幕式由山西大学张天才教授主持,量子光学专业委员会主席郭光灿院士致开幕词,他回顾了量子光学发展的历史,并对量子光学界的现状和未来作了分析和展望。四川大学物理学院院长龚敏教授代表四川大学致欢迎词。开幕式后清华大学张卫平教授、香港浸会大学朱诗尧教授、中国科学技术大学韩正甫教授、美国阿肯色州大学肖敏教授以及北京大学陈徐宗教授(学生陈帅代讲)分别作了精彩的大会特邀报告。

本次大会设有 18 个专题分会场,在为期 2 天的报告中,会议代表分别就量子光学领域的各个分支,如玻色-爱因斯坦凝聚、激光冷却、量子信息与通信、原子与相干态光场相互作用等进行了交流与讨论。

这次大会展示了量子光学发展至今我国所取得的重大成果,同时也揭示了与国际水平存在的差距,为专家学者今后的研究工作指明了方向,对量子光学的发展起了积极的推动作用。

(胡艳芳)