

文章编号: 1007-6654(2007)01-0030-05

## 冷原子 EIT介质的原子数目和温度的测量\*

韩燕旭, 王波, 马杰, 校金涛, 王海<sup>†</sup>

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

**摘要:** 简要介绍了我们实验组冷却、俘获<sup>87</sup>Rb原子的磁光阱装置及冷却俘获过程。采用收集荧光法测得了俘获的冷原子数目, 并根据冷原子团尺寸推算出了冷原子团密度。通过在冷原子团下方 4 mm, 7 mm, 10 mm 三处设置圆柱形探测光束, 在原子自由下落过程中获得了短程飞行时间 (TOF) 吸收信号, 通过数值拟合得到了冷原子的温度。结果表明: 俘获的冷原子数目大约为  $10^9$  个, 密度大约为  $10^{11}$  个/cm<sup>3</sup>, 冷却温度约为 200  $\mu$ K, 该冷原子团能作为很好的 EIT 介质。

**关键词:** 冷原子; 磁光阱 (MOT); 短程飞行时间法; EIT

**中图分类号:** O431 **文献标识码:** A

### 0 引言

原子冷却的历史要追溯到 20 世纪 70 年代, 1975 年, T. Hansch 和 A. Schawlow 首次提出了激光冷却中性原子的基本思想<sup>[1]</sup>。1985 年在 Bell 实验室工作的 Steven Chu 首次在实验上实现了中性原子的激光冷却俘获, 并通过“释放和再俘获”(Release and Re-capture) 方法测得冷原子温度约为 240  $\mu$ K<sup>[2]</sup>。1988 年, P. Lett 等人发展了一种现在较普遍采用的温度测量方法 - 飞行时间法 (time-of-flight, TOF)<sup>[3]</sup>。飞行时间法是在冷原子团正下方一定距离处入射一束弱探测光, 关闭 MOT 后, 原子团膨胀并且自由下落经过该探测光束, 向周围发出荧光, 通过测量该荧光信号获得冷原子团温度信息。传统的 TOF 方法适用于冷原子团下落距离比较大的情况, 但随着冷原子技术的不断发展, 现已可在比较小的真空气室中 (40 mm  $\times$  40 mm  $\times$  100 mm) 实现原子冷却<sup>[4]</sup>。2002 年, Brzozowski 提出了短程飞行时间法 (TOF) 测量冷原子温度的方案<sup>[5]</sup>。由于该方法可以在较小的腔体内方便地测量出冷原子温度, 目前已成为较常用的测量冷原子温度的方法。

国内几个研究组先后在 10 年间实现了原子的冷却与俘获<sup>[4, 6-12]</sup>。近年来, 进行了冷原子基本参数的测量工作。北京大学对俘获和冷却的 Cs 原子

基本参数进行了测量, 测得冷原子的数目为  $10^8$  个, 密度为  $10^{11}$  个/cm<sup>3</sup>, 温度约为 150  $\mu$ K<sup>[8, 9]</sup>。山西大学光电所使用短程飞行时间法 (TOF) 对俘获和冷却的 Cs 原子温度进行了测量, 测得的温度约为 68  $\mu$ K<sup>[12]</sup>。中国科学院武汉物理与数学研究所对 Rb 原子磁光阱中的原子数目与冷却光光强、失谐量等因素的依赖关系进行了研究<sup>[10]</sup>。

本文简要介绍了我们实验室冷却、俘获<sup>87</sup>Rb原子的磁光阱装置 (MOT) 及原子冷却俘获过程。MOT 系统由冷却光, 再泵浦光和一对同轴反向线圈构成。在离开冷原子团一定距离处对冷原子团荧光功率进行测定, 测得俘获的冷原子数目为  $10^9$  个。通过观察冷原子的 CCD 成像, 估算冷原子团的直径约 2 mm, 推算出冷原子团的密度为  $10^{11}$  个/cm<sup>3</sup>。由于真空气室较小, 内部截面为 30 mm  $\times$  30 mm, 我们采用了短程飞行时间法测量探测光的 TOF 吸收信号, 通过数据拟合, 得出冷原子样品的温度约为 200  $\mu$ K。该冷原子团能很好地作为我们的 EIT 介质, 用于量子纠缠和量子相位门的研究。

### 1 冷原子俘获的实验装置

冷却光由德国 Toptica 公司生产的 DL100 半导

\* 收稿日期: 2006-07-28

基金项目: 国家自然科学基金 (60325414 60578059)

作者简介: 韩燕旭 (1981-), 男, 山西长治人, 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在读博士, 研究方向: 量子光学。† 王海, E-mail: wanghai@sxu.edu.cn

体激光器提供,该半导体激光器采用 Littrow 结构光栅反馈方式调谐频率,原激光二极管输出功率在 30 mW 左右。由于需要较大功率的冷却光,原激光二极管远不能达到,我们用德国 Topica 公司生产的型号为 #LD-0785-P250 的激光二极管代替原激光二极管,在温度为 25.0 时,其中心波长为 783.0 nm,典型输出功率是 120 mW。激光器发出的冷却光先通过一个 40 dB 的隔离器,以防止反馈光对激光器频率稳定性的影响。然后,冷却光经过一个  $\lambda/2$  波片和偏振分束棱镜,被分为两部分。一小部分光被入射到饱和吸收装置用于激光频率锁定。我们将冷却光频率锁定在铷原子 D<sub>2</sub> 线的  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 2, 3$  的交叉线上,该交叉线位于  $5P_{3/2} F = 3$  能级以下 133 MHz 处。另一部分光通过一个声光调制器,保偏光纤和望远镜系统入射到 MOT 系统中。声光调制器将冷却光的频率偏移 +120 MHz,故通过声光调制器的冷却光频率被调至低于  $5P_{3/2} F = 3$  能级 13 MHz 处。通过声光调制器的冷却光由单模保偏光纤整形,输出的光经过焦距为 100 mm 和 400 mm 的两个透镜构成的望远镜系统,被扩至 10 mm。然后,利用波片和偏振分束棱镜,将其分为三束,每束功率约为 8 mW。这三束光通过三个  $\lambda/4$  波片后成为圆偏振光,从三个相互垂直的方向入射到 MOT 系统中。并通过另外三个  $\lambda/4$  波片和高反镜沿原方向返回,交汇于磁阱中心(如图 1 所示)。

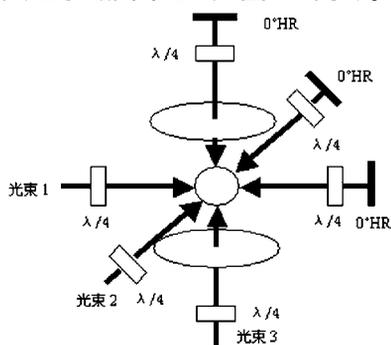


图 1 磁光阱示意图

Fig 1 Scheme of magneto-optical trap

<sup>87</sup>Rb 原子能级结构如图 2 所示,冷却光作用于原子的  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 3$  跃迁线上。冷却过程中,原子被激发到激发态  $5P_{3/2} F = 3$  能级后通过自发辐射返回到基态  $5S_{1/2} F = 1$  或  $F = 2$  上,返回到  $5S_{1/2} F = 1$  上的原子不再参加冷却过程,导致无法循环冷却,因此需要再泵浦光作用于 Rb 原子的  $5S_{1/2} F = 1 \rightarrow 5P_{3/2} F = 1$  跃迁线上,使处于  $5S_{1/2} F = 1$  的原子

子返回到  $5S_{1/2} F = 2$  能级上。我们的再泵浦光采用了自制的半导体激光器,其频率由电流调谐。再泵浦光经过隔离器后,被  $\lambda/2$  波片和偏振分束棱镜分为两部分,较弱部分的光通过饱和吸收装置,用于激光器频率锁定。我们将再泵浦光锁定在  $5S_{1/2} F = 1 \rightarrow 5P_{3/2} F = 1, 2$  的交叉线上,注入到 MOT 系统的再泵浦光经过声光调制器实现开关控制。声光调制器频率偏移 -80 MHz,然后通过单模保偏光纤整形,整形后的再泵浦光由偏振分束棱镜起偏。再经过两个焦距为 100 mm 和 600 mm 的透镜构成的望远镜系统,扩束至 15 mm,沿竖直方向入射到冷原子 MOT 系统中。

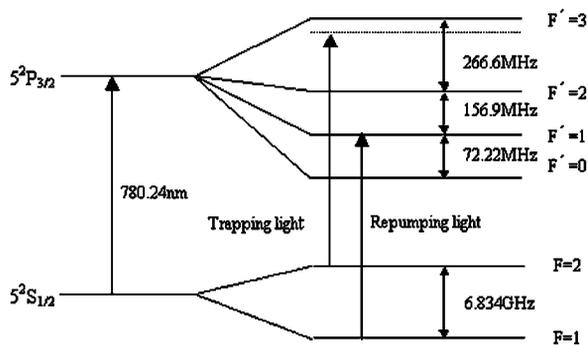


图 2 <sup>87</sup>Rb 原子 D<sub>2</sub> 线的超精细结构图

Fig 2 Hyperfine Structure of the D<sub>2</sub> Line of <sup>87</sup>Rb

磁光阱的磁场由沿竖直方向对称放置在真空气室两端的一对同轴反向线圈提供,磁场线圈由直径为 1.3 mm 的漆包线绕制而成,整个线圈的直径为 120 mm,绕制 100 圈左右,通过电流为 3 安培,产生的磁场梯度大约为 10 Gauss/cm,实验中气室真空度维持在大约  $10^{-7}$  Pa。

为方便准确的控制光场和磁场,我们利用计算机控制 Thorlabs 公司的 DG100N 系统产生时序控制 TTL 信号,通过声光调制器和自制的磁场开关对磁光阱进行开关时序控制。我们在 MOT 系统的两个正交方向安置了两个 CCD 摄像机,用于监视冷原子团的形状和运动趋势。其中一个 CCD 摄像机,经过视频采集卡接入到电脑中,用于对原子图像进行记录,另一个直接连接监视屏,分别从不同的方向观察其二维图像。

冷却原子时,将冷却光与再泵浦光打开,同时接通磁阱线圈电流,获得冷原子团(如图 3 所示)。获得冷原子团后,入射一束探测光,其频率在 <sup>87</sup>Rb 原子  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2}$  的跃迁线附近扫描,探测光穿过冷原子团的中心,测得 <sup>87</sup>Rb 原子无多普勒的吸收谱线

(如图 4 所示)。

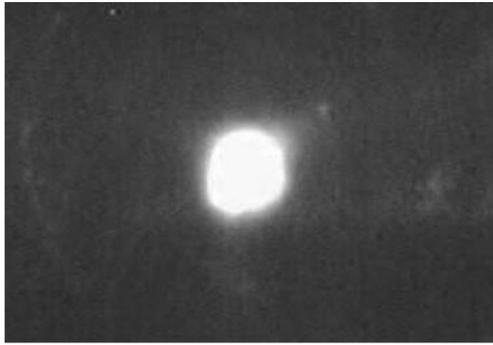


图 3 CCD 记录到冷原子团图像

Fig 3 CCD view of the trapped cold atoms

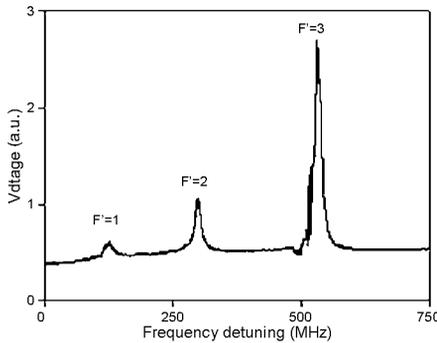


图 4 <sup>87</sup>Rb 冷原子  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 1, 2, 3$  吸收谱线

Fig 4 Absorption spectrum of  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 1, 2, 3$  transitions for <sup>87</sup>Rb cold atoms

### 2 冷原子数目和密度的测定原理和结果

收集荧光法测量冷原子数目的探测装置如图 5 所示。设探测器有效面积为  $s$ ，探测器所张立体角是  $\phi$ ，距离冷原子团的长度为  $L$ （探测半径），探测器探测到的功率为冷原子团发出的部分荧光功率  $P_s$ ，冷原子团发出的荧光总功率是  $P$ 。由于冷原子团发射的荧光在  $4\pi$  立体角内均匀分布，故  $P_s$  可表示为：

$$P_s = \frac{\phi}{4\pi} P = \frac{s}{4L^2} P \quad (1)$$

由于所有的冷原子对荧光功率都有贡献，冷原子团发出的荧光是所有冷原子发出荧光的总和，故冷原子团发出的荧光总功率可表示为：

$$P = N h \nu_0 \quad (2)$$

其中  $\nu_0$  表示原子的跃迁频率， $N$  表示冷原子的数目， $f$  表示原子的跃迁几率<sup>[13]</sup>，

$$P = \frac{N h \nu_0}{1 + \frac{I}{I_0} + 4 \cdot \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Gamma^2}} \quad (3)$$

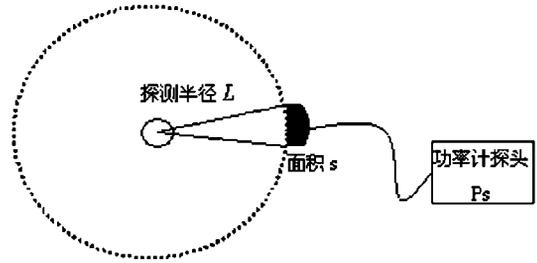


图 5 收集荧光法测量冷原子数目的示意图

Fig 5 Scheme of measuring the number of cold atoms by detecting the fluorescence

式中  $\nu_0$  是原子激发态的自发辐射速率， $\nu_0 = 2 \cdot 6$  MHz， $\nu - \nu_0$  表示冷却光的频率失谐， $\Gamma = 13$  MHz， $I_0$  为原子超精细能级  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 3$  的饱和光强， $I$  为冷却光的光强。由 (1) (2) (3) 四式，可得

$$N = \frac{P_s}{h \nu_0} \cdot \frac{1}{f} = \frac{P_s \cdot \frac{4\pi L^2}{s} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I}{I_0} + 4 \cdot \frac{(\nu - \nu_0)^2}{\Gamma^2}}}{h \nu_0} \quad (4)$$

通过 CCD 监视屏可测得到冷原子团尺寸，我们实际测量得到的冷原子团直径  $d = 2$  mm，功率计探头距离冷原子  $L = 220$  mm，饱和光强  $I_0 = 3.576$  mW/cm<sup>2</sup><sup>[14]</sup>，冷却光强  $I = 10.19$  mW/cm<sup>2</sup>。探测到的荧光功率是  $P_s = 63$  nW，由 (4) 式可计算出冷原子的数目约为  $10^9$  个，密度约为  $10^{11}$  个/cm<sup>3</sup>。

### 3 冷原子温度测量的原理和实验结果

在冷原子温度的测量中，需要观察冷原子自由下落的情况。在冷原子区域中，由于杂散磁场的存在，使得中心区域处磁场不均匀，导致冷原子团的受力不均匀，在释放过程中冷原子将会向四周扩散而不会做自由下落运动。这样不利于冷原子温度的测量。为了消除冷原子团区域杂散磁场对温度测量的影响，我们在真空气室的周围对称放置 3 对矩形亥姆霍兹线圈 (800 mm × 750 mm)。实验中，仔细调节补偿地磁场的线圈电流，使冷原子团中心区域的磁场补偿到趋于 0。采用时序控制系统，将磁场迅速关闭 (50 μs 内)，观察冷原子团在重力作用下的运动情况。如果冷原子团向四处扩散，应仔细调节 3 对补偿线圈的电流，抵消冷原子团中心区域的杂散磁场，直到观察到冷原子团在关闭磁阱后做自由下落运动为止。

图 6是短程 TOF方法进行冷原子温度测量的示意图。短程飞行时间法适合于测量真空气室较小,冷原子团下落距离较短的情况。利用短程飞行时间法测量冷原子温度时,需同时关闭冷却光,再泵浦光和磁场,这时磁光阱中冷原子团由于受到重力作用而自由下落,在下落过程中会发生膨胀,经过一段时间  $t$ 后,冷原子团下降到  $x$ 位置处,穿过探测光,由探测器探测冷原子团穿过探测光过程中产生的 TOF吸收信号并通过拟合就可以推断出冷原子团的平均运动速度。

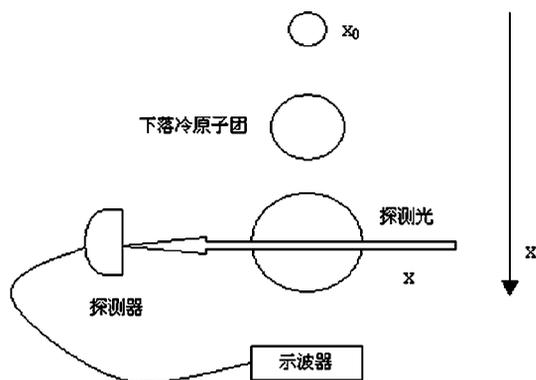


图 6 利用短程 TOF法测量冷原子温度的示意图

Fig 6 Scheme for measuring the temperature of cold atoms with short-distance time-of-flight (TOF) method

再由冷原子团的平均运动速度和等效温度的关系:

$$\frac{1}{2} k_B T = \frac{1}{2} m v^2 \quad (5)$$

推算出冷原子团的等效温度。式中  $k_B$  为波尔兹曼常数,  $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。 $m$  为  $^{87}\text{Rb}$ 的原子质量,  $m = 1.44 \times 10^{-25} \text{ Kg}^{[14]}$ 。在冷原子团下落过程中,在下方入射一束探测光,冷原子团穿过探测光时得到的吸收信号,可表示为<sup>[15]</sup>:

$$N(t) = \frac{a}{\frac{r_0^2}{2} + \frac{r_0^2}{2} \frac{t^2}{l^2} + \frac{r_0^2}{2} \frac{t^2}{l^2}} \exp \left[ - \left( \frac{g(t_0^2 - t^2)}{2\sqrt{2} \sqrt{\frac{r_0^2}{2} + \frac{r_0^2}{2} \frac{t^2}{l^2}}} \right)^2 \right] \quad (6)$$

其中  $a$ 是一个拟合常数,同冷原子的数目和探测光的几何尺寸,功率有关<sup>[15]</sup>。 $r_0$ 是冷原子团初始时刻的半径。 $t_0$ 表示冷原子团自由下落的时间  $t_0 = \left( \frac{2l}{g} \right)^{1/2}$ ,  $t$ 表示实际下落的时间(从 TOF信号读出)。

在实际测量中,入射的探测光是圆柱形的光束,其满足  $l = l_x = l_y$  ( $l_x, l_y$ 表示探测光沿着  $x$ 轴和  $y$ 轴的半径,其远小于冷原子团的半径)。

实验中,通过时序控制,使磁光阱打开,获得冷

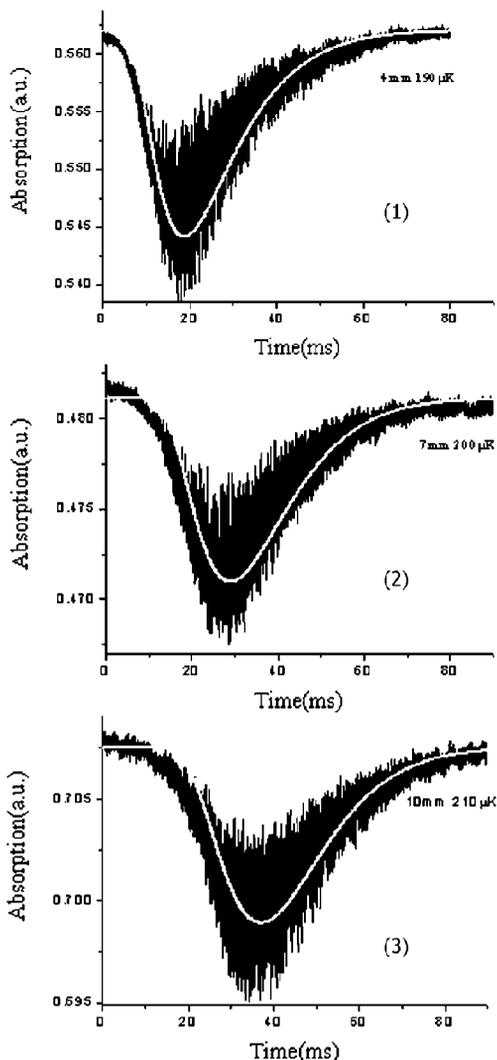


图 7 探测器分别在冷原子团下方  $x = 4 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ 处测量到的 TOF吸收信号(粗黑线),图(1)(2)(3)中的细白线是温度分别取  $T = 190 \mu\text{K}, 200 \mu\text{K}, 210 \mu\text{K}$ 得到的理论拟合曲线。

Fig 7 Measured TOF signals versus the detector position  $x$  below the cold atom cloud, when  $x = 4 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$  (thick black lines). The narrow white lines are the fitting results with parameters:  $T = 190 \mu\text{K}, 200 \mu\text{K}, 210 \mu\text{K}$  respectively

原子,5 s后,关闭磁光阱,冷原子团在重力作用下做自由下落运动。我们分别在冷原子团下方的  $4 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ 处入射一束探测光,其频率被锁定在 $^{87}\text{Rb}$ 原子  $5S_{1/2} F = 2 \rightarrow 5P_{3/2} F = 3$ 的跃迁能级上。下落的冷原子团穿过探测光后的 TOF吸收信号被探测器探测到,用理论公式(6)和该 TOF信号可以拟合得到冷原子的等效温度。图 7中的粗黑线是探测器在冷原子团下方  $4 \text{ mm}, 7 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ 测得的 TOF吸收信号,细白线是平均温度  $T$ 分别取  $190 \mu\text{K}$ ,

200  $\mu\text{K}$ , 210  $\mu\text{K}$ 时,数值拟合获得的曲线。由此得到冷原子团的平均温度为  $T = 200 \mu\text{K}$ 。

#### 4 小结

冷原子团的数目、密度和温度的测量是了解冷原子团信息的重要工具,是进一步提高原子数目、密

度,降低原子温度的重要步骤。本文在俘获冷原子的实验基础上,进行了冷原子基本参数的测定。结果显示:用收集荧光法测得的冷原子数目大约为  $10^9$  个,密度约为  $10^{11}$  个/ $\text{cm}^3$ 。利用短程 TOF法测量出冷原子的温度大约为 200  $\mu\text{K}$ 。将该冷原子团作为 EIT介质进行量子纠缠和量子相位门的研究。

#### 参考文献:

- [1] HANSCH T, SCHAWLOW A. Cooling of Gases by Laser Radiation [J]. *Opt comm un*, 1975, **13**: 68.
- [2] CHU S, HOLLBERG L, BJORKHOLM J E, *et al* Three-dimensional Viscous Confinement and Cooling of Atoms by Resonance Radiation Pressure [J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **55**: 48.
- [3] LETT P, WATTS R, WESTBROOK C, *et al* Observation of Atoms Laser Cooled Below the Doppler limit [J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **61**: 169.
- [4] 武海斌,姚景芹,常宏,等. 一种简易的激光冷却和俘获 Rb原子的实验系统 [J]. 量子光学学报, 2005, **11**: 79.
- [5] BROZOWSKI T M, MAR I A MACZYNSKA, M ICHAL ZAWADA, *et al* Time-of-flight Measurement of the Temperature of Cold Atoms for Short Type-probe Beam Distances [J]. *J opt B*, 2002, **4**: 62.
- [6] GAN Jian-hua, LI Yim in, CHEN Xu-zong, *et al* Magneto-optical Trap of Cesium Atoms [J]. *Chinese Phys Lett*, 1996, **13**: 821.
- [7] LU Xun-ming, LN Yue-ming, ZHOU Shan-yu, *et al* Laser Cooling and Trapping of Sodium Atoms in Magneto-optical Trap [J]. *Chinese Journal of Laser*, 1996, **B5**: 511.
- [8] 付军贤,李义民,陈徐宗,等. 一种测量磁光阱中冷原子密度和温度的新方法 [J]. 光学学报, 2001, **21**: 414.
- [9] 陈帅,周小计,杨帆,等. 北京大学玻色-爱因斯坦凝聚的实现及研究进展 [J]. 量子光学学报, 2004, **10**: 4.
- [10] 江开军,李可,王谨,等. Rb原子磁光阱中囚禁原子数目与实验参数的依赖关系 [J]. 光学学报, 2006, **55**: 125.
- [11] 王谨,柳晓军,李交美,等. Rb原子的激光冷却 [J]. 光学学报, 2000, **20**: 862.
- [12] 耿涛,闫树斌,王彦华,等. 用短程飞行时间吸收谱对铯磁光阱中冷原子温度的测量 [J]. 物理学报, 2005, **54**: 11.
- [13] FOOT C J. Atomic Physics [M]. Oxford University Press, 2005.
- [14] DAN IEL A STECK For Details in Transition Probabilities of the D2 Line in  $^{87}\text{Rb}$  [EB/OL]. 2001-09-25 <http://steck.us/alkalidata>.

## Measurement of the Number and Temperature of the Cold atoms EIT Medium\*

HAN Yan-xu, WANG Bo, MA Jie, XIAO Jin-tao, WANG Hai

(The state key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

**Abstract:** The experimental setup for cooling and trapping  $^{87}\text{Rb}$  atoms in magneto-optical trap (MOT) and the process of them are briefly introduced in this paper. The number of cold atoms is measured by detecting the fluorescence emitted from  $^{87}\text{Rb}$  atoms. The laser probe beam is set at the positions which are 4mm, 7mm, 10mm below the atoms cloud, the short-distance time-of-flight (TOF) absorption signals are obtained during the falling of atoms. The average temperature of cold atoms is obtained by numerical simulating. The results show that the number of cold atoms is about  $10^9$ , the density is about  $10^{11}$  / $\text{cm}^3$  and the cooling temperature of atomic cloud is about 200  $\mu\text{K}$ , such cold atoms can be used as good EIT medium.

**Key words:** cold atoms; magneto-optical trap; short-distance time-of-flight (TOF); EIT

\* **Foundation:** Project supported by the Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60325414, 60578059)