

# 用于原子干涉仪实验的锂原子的塞曼 减速与磁光囚禁\*

杨威<sup>1)2)</sup> 孙大立<sup>1)2)</sup> 周林<sup>1)3)</sup> 王谨<sup>1)3)</sup> 詹明生<sup>1)3)†</sup>

1)(中国科学院武汉物理与数学研究所, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071)

2)(中国科学院大学, 北京 100049)

3)(中国科学院冷原子物理中心, 武汉 430071)

(2014年2月27日收到; 2014年4月6日收到修改稿)

为了制备适于原子干涉仪实验的低温锂原子样品, 开展了锂原子的塞曼减速及与磁光囚禁相关的实验研究. 设计并实现了一种结构紧凑的腔体内冷式多级线圈叠加的塞曼减速器, 将速度小于 600 m/s 的  ${}^7\text{Li}$  原子减速到 60 m/s, 磁光阱装载速率为  $5 \times 10^8$  /s, 囚禁原子数目  $1 \times 10^9$  个, 原子团的最低温度约为  $220 \pm 30$   $\mu\text{K}$ . 研究了光学黏胶中  ${}^7\text{Li}$  原子的寿命与囚禁光频率失谐量的关系. 这些结果为进一步开展  ${}^7\text{Li}$  原子亚多普勒冷却、光势阱蒸发冷却以及原子干涉仪实验奠定了基础.

**关键词:** 激光冷却与囚禁, 塞曼减速器, 磁光阱, 原子干涉仪

**PACS:** 37.10.Gh, 37.10.De, 37.10.Vz, 37.25.+k

**DOI:** 10.7498/aps.63.153701

## 1 引言

锂(Li)原子具有质量小、单光子反冲能量大等诸多特点, 是开展量子简并气体<sup>[1,2]</sup>、玻色-爱因斯坦凝聚<sup>[3]</sup>、自旋波碰撞<sup>[4]</sup>以及高精度原子干涉仪<sup>[5]</sup>等基础原子物理实验的理想体系. 随着原子干涉仪在精密测量领域<sup>[6]</sup>的广泛应用, Li原子干涉仪也受到人们的关注. 2002年, Vigué等利用热原子束实现了Mach-Zehnder(M-Z)型高精度Li原子干涉仪<sup>[7]</sup>, 并测量了Li原子的电极化率<sup>[8]</sup>和Li原子物质波在不同气体中的折射率<sup>[9]</sup>. 2011年, Müller等提出利用 ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ 双组份冷原子干涉仪能大大提高弱等效原理的实验检验精度<sup>[10]</sup>, 并于2012年开始研制Li原子干涉仪<sup>[11]</sup>. 为开展基于原子干涉仪的弱等效原理的检验实验, 我们于2011年完成了用于弱等效原理检验的喷泉式高精度原子干涉仪的研制和测试<sup>[12]</sup>, 并准备利用磁光阱中同步囚禁的

${}^7\text{Li}$ - ${}^{85}\text{Rb}$ 原子在自由落体状态形成原子干涉仪, 精确测量并比较这两种原子的重力加速度, 从而在微观原子尺度上进行弱等效原理的实验检验. 然而, 制备装载速度快、数目多、温度低的冷原子样品是基于冷原子干涉仪的精密测量实验的基础. 由于Li原子的熔点高(180.54 °C)、原子质量小、热运动速度大, 直接像Rb和Cs那样在背景气体中将其俘获并囚禁到磁光阱(magneto-optical trap, MOT)中的效率很低, 因此冷Li原子样品的制备难度要高于其他碱金属原子.

对于轻而快的原子, 一般先用塞曼减速<sup>[13]</sup>、激光频率啁啾<sup>[14]</sup>及二维磁光阱<sup>[15]</sup>等方法来进行预减速, 再装载入磁光阱. 塞曼减速器(Zeeman slower)的技术成熟, 装载效率较高, 是冷却Li<sup>[16]</sup>, Yb<sup>[17,18]</sup>, Sr<sup>[19-21]</sup>等熔点高、初始速度大的原子的首选. 1991年, Li原子的激光冷却和囚禁首先在日本电气通信大学实现<sup>[16]</sup>, 他们用大尺寸的塞曼减速器将初始速度小于1220 m/s的Li原子减速, 再

\* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2010CB832805)和国家自然科学基金(批准号: 11074281, 11227803)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: mszhan@wipm.ac.cn

用染料激光器组成的磁光阱囚禁 $^6\text{Li}$ 和 $^7\text{Li}$ 原子,得到了原子数密度为 $3 \times 10^9/\text{cm}^3$ 的 $^7\text{Li}$ 和近半密度的 $^6\text{Li}$ ,及温度约为 $350 \pm 40 \mu\text{K}$ 的 $^7\text{Li}$ 原子. 随后的数十年中, Li原子的激光冷却与囚禁技术迅猛发展,各种改进的装置相继出现,例如,用半导体激光器实现了 $^7\text{Li}$ 原子的磁光阱,得到温度约为 $300 \pm 50 \mu\text{K}$ 的冷原子样品<sup>[22]</sup>,在磁光阱中同时囚禁 $^6\text{Li}$ 和 $^7\text{Li}$ 同位素原子,两种原子的温度分别为 $0.7 \text{ mK}$ 和 $1 \text{ mK}$ <sup>[23]</sup>. 近年来, Li原子亚多普勒冷却技术也取得了重要发展. 2013年, Grier等利用 $^7\text{Li}$ 的 $D_1$ 线跃迁蓝失谐激光形成灰色光学黏胶(gray molasses)将磁光阱中的 $^7\text{Li}$ 原子进一步冷却到 $60 \mu\text{K}$ <sup>[24]</sup>; 2014年, Müller小组利用西西弗斯冷却技术(Sisyphus cooling)将 $^7\text{Li}$ 原子冷却到 $100 \mu\text{K}$ <sup>[25]</sup>. 上述这些实验均以多普勒冷却为基础,实验中所使用的塞曼减速器的磁场都是由线圈匝数逐渐变化的纺锤型线圈所提供的,这就要求在设计的过程中根据实验参数精确计算磁场大小和梯度,再绕制相应的线圈匝数. 这种构型的塞曼减速器由于线圈绕制工艺等原因会使其实际产生的磁场与理论所需的磁场有一定的偏差,造成30%左右的原子数的损失,在实际调试的过程中通常需要增加补偿线圈来调整局部的磁场<sup>[26,27]</sup>,装置的设计和调试过程比较复杂. 为解决这一问题,多级线圈耦合的塞曼减速器应运而生,它采用多个独立的匝数相同的线圈串行排列,每个线圈中通以不同大小的电流产生局部的磁场,多个磁场叠加得到所需的塞曼减速磁场. 调试过程中可通过微调单个线圈的电流大小来微调局部位置的磁场大小和梯度,实时优化原子与减速激光的共振而提高减速的效率. 目前,这种构型的塞曼减速器已应用于研究简并费米气体<sup>[28]</sup>、原子光钟<sup>[29]</sup>等实验. 为满足高精度原子干涉仪实验对Li原子的冷却的需求,我们设计了一种结构紧凑的腔体内冷式多级线圈叠加的塞曼减速器来对Li原子束进行减速,该减速器的真空管外增加了一层内空冷却水循环腔,腔体外再密绕空芯线圈,这样与空芯线相比增加了线圈匝数,减少了通电电流,使结构更紧凑. 它由8组匝数为280的独立线圈组成,每个线圈分别通以不同的电流产生局部磁场,再串联成塞曼减速所需的磁场分布;通过模拟能得出与激光失谐相应的磁场分布以及每个线圈中所需的电流大小,并在实验中根据观测到的减速效果实时微调个别线圈的电流大小以改变磁

场的大小和梯度,使尽可能多的原子与磁场共振以提高塞曼减速的效率,从而提高 $^7\text{Li}$ 磁光阱的装载速率来满足原子干涉仪多次测量的需要. 利用该塞曼减速器将速度小于 $600 \text{ m/s}$ 的 $^7\text{Li}$ 原子减速到 $60 \text{ m/s}$ ,然后装载入位于减速器末端的磁光阱中,装载速率约为 $5 \times 10^8/\text{s}$ ,磁光阱能在2—3 s内快速囚禁 $1 \times 10^9$ 个 $^7\text{Li}$ 原子,冷原子云密度约为 $10^{11}/\text{cm}^3$ . 在冷却光红失谐 $10 \text{ MHz}$ 时测得磁光阱中原子团的温度为 $220 \pm 30 \mu\text{K}$ ,是目前已见报道的利用磁光阱多普勒冷却获得的温度最低的冷Li原子样品. 我们还仔细研究了光学黏胶中 $^7\text{Li}$ 原子团的寿命与囚禁光频率失谐量的变化关系,为进一步开展锂原子亚多普勒冷却、光势阱蒸发冷却及原子干涉仪实验奠定了基础.

## 2 塞曼减速器模拟设计

我们设计的塞曼减速器是 $\sigma^+$ 型,即塞曼减速光的偏振方向是 $\sigma^+$ 圆偏振,这要求磁场强度随着原子速度的减小而减小,利用塞曼效应来改变原子的共振频率从而补偿原子在速度降低过程中引起的多普勒频移变化,保持原子在减速过程中与固定频率的激光处于持续共振状态.

由塞曼效应,可推得原子在磁场中运动时外加磁场 $B$ 与减速激光失谐量 $\Delta$ 及轴向位置 $z$ 之间的关系<sup>[30]</sup>为

$$B(z) = \frac{h}{\mu_B} \left( \Delta + \frac{1}{\lambda} \sqrt{v_i^2 - 2az} \right), \quad (1)$$

其中, $h$ 是普朗克常量, $\lambda$ 是减速激光的波长, $\mu_B$ 是玻尔磁子, $v_i$ 是原子在 $z = 0$ 处(减速器的前端)的初始速度, $a$ 是激光辐射压力对原子的加速度. 对于 $^7\text{Li}$ 原子,激光辐射压力对原子减速的最大加速度为

$$\begin{aligned} a_{\max} &= \frac{F_{\max}}{m} = \frac{\hbar k \Gamma}{2m} \\ &= 1.57 \times 10^6 \text{ m/s}^2. \end{aligned} \quad (2)$$

对于大多数的塞曼减速器来说,原子实际感受到辐射压力的加速度大小都不能达到最大加速度值,一般有 $a = \alpha a_{\max}$ ,其中 $0.5 < \alpha < 0.75$ . 我们利用Mathematica程序模拟计算,取 $\alpha = 0.6$ , $\Delta = -120 \text{ MHz}$ 时,减速 $^7\text{Li}$ 原子所需的磁场分布如图1所示,其中 $\Delta$ 连成的曲线为理论所需的磁场分布. 为了验证我们所设计的程序模拟的磁场分布是否可

靠,我们在各线圈中通以线性递减的电流,用高斯计测试线圈中心所产生的磁场与程序模拟的结果(如图1中○连成的曲线所示)进行了对比,结果显示实际磁场与理论磁场的梯度在有效减速区(0.025—0.04 m)范围内基本相同,实际磁场的最小值与理论需求值相同,以保证原子能被持续减速.根据<sup>7</sup>Li原子的参数所设计的塞曼减速器实物图如图2所示,冷却水循环腔内置于密绕线圈与真空腔之间,塞曼减速器的外径小于7 cm(内径3 cm).

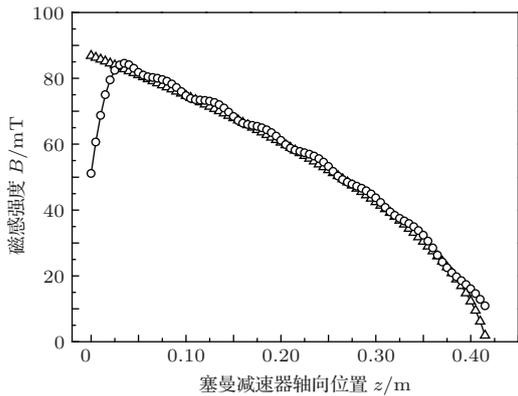


图1 持续减速所需磁场分布(△)与实际磁场分布(○)的对比

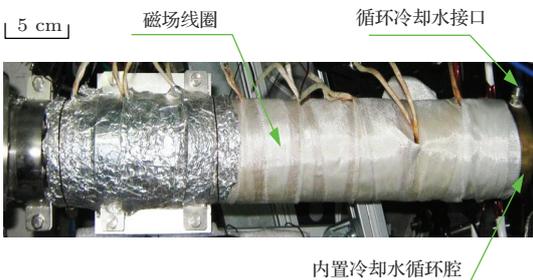


图2 锂原子塞曼减速器实物图

### 3 实验装置

<sup>7</sup>Li原子磁光阱制备的相关能级方案如图3所示,塞曼减速与囚禁采用D<sub>2</sub>线(2<sup>2</sup>S<sub>1/2</sub> → 2<sup>2</sup>P<sub>3/2</sub>跃迁),对应的激光波长为670.962 nm.由于原子在冷却循环过程中有部分概率跃迁到另一个基态,因此要用相应的回泵光将原子回泵到冷却循环内.实验中,我们需要用到四个频率成分的激光,而且它们相对共振光都具有不同的失谐量,这些频率成份的激光由声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)来调制产生,光学系统示意图如图4所示.主激光器采用半导体激光器及其锥形放大系统

(Toptica, TA100-671),激光最大输出功率为350 mW,从其尾端分出约3 mW的激光进行饱和吸收稳频.由于Li原子熔点较高,常温下原子气体密度非常小,需将其加热至450 °C左右才能得到较好的饱和吸收谱线.因此,我们设计了一个结构紧凑、温度可控、能保护两端窗口不被原子气体污染的热管炉来进行饱和和吸收稳频.我们将主激光器的频率锁定在F = 2 → F'跃迁吸收峰上,稳频光进入热管炉之前先经过一个+200 MHz的AOM(Crystal, 3200-124)移频,这样TA输出的光相对于锁频点有

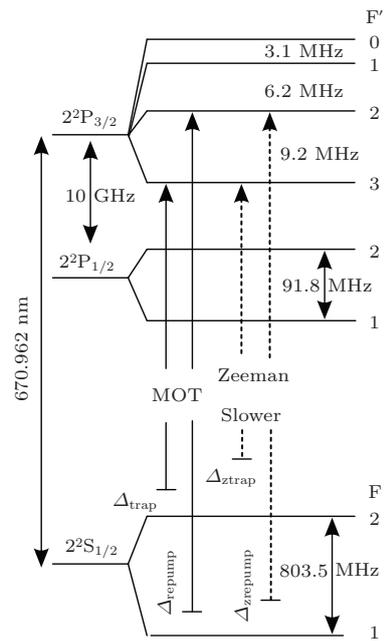


图3 <sup>7</sup>Li原子MOT实验能级与激光频率分配方案

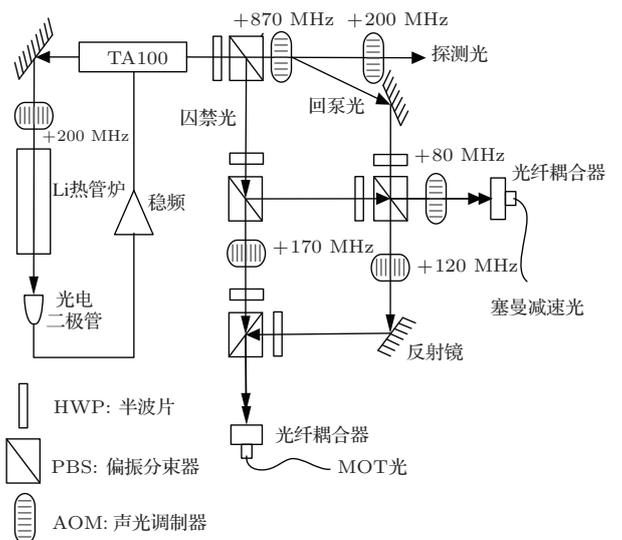


图4 实验光路示意图

-200 MHz的失谐. TA前端输出的大功率激光(囚禁光)经过偏振分束器(polarizing beam splitter, PBS)分束和AOM(Brimrose, GPF-800-671)移频+870 MHz得到回泵光. 将囚禁光和回泵光合束后经一个+80 MHz的AOM移频后作为塞曼减速光(塞曼减速囚禁光失谐 $\Delta_{ztrap} = -120$  MHz, 塞曼减速回泵光失谐 $\Delta_{zrepump} = -53.5$  MHz). 将分出的囚禁光和回泵光分别用AOM移频+170 MHz和+120 MHz后合束耦合进光纤, 即得到MOT囚禁光(MOT囚禁光失谐 $\Delta_{trap} = -30$  MHz, MOT回泵光失谐 $\Delta_{repump} = -13.5$  MHz). 使用AOM移频便于利用计算机时序控制AOM来快速开关各束激光以进行MOT参数的测量和后续的原子干涉实

验. 所有的激光束通过单模保偏光纤和准直扩束镜传输到实验装置相应的窗口.

Li原子激光冷却与囚禁的实验装置示意图如图5所示, 该装置位于十米喷泉式原子干涉仪(本文不涉及, 图中未标出)的顶端, 由Li原子炉、塞曼减速器、磁光阱三部分组成. 原子炉加热到550 °C, 产生的原子经过准直后形成Li原子束进入塞曼减速器. 塞曼减速光与原子束飞行方向相向并聚焦, 减速后的原子在MOT区域被囚禁. MOT由三对互相对射的囚禁光和一对反亥姆霍兹线圈所形成的四极磁场组成, MOT的囚禁光用三束光经反射镜反射后形成, 用 $\lambda/4$ 波片调整每一束反射光的偏振方向.

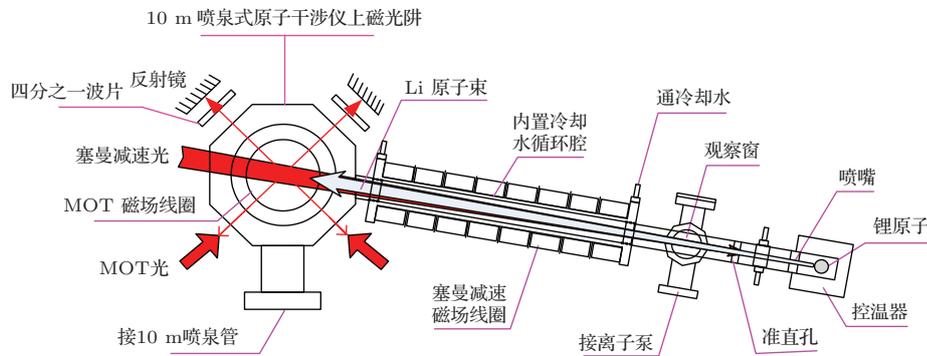


图5 Li原子激光冷却与囚禁实验装置示意图(水平方向的两束对射囚禁光未画出)

#### 4 实验结果与讨论

塞曼减速光经光纤耦合输出后总功率为15 mW, 其中囚禁光和回泵光的比例约为1:1, 再经过可调偏振的准直镜输送到相应的窗口. 准直镜出射的光斑直径为13 mm( $1/e^2$ 直径), 将准直透镜微调使光束会聚至原子束的喷嘴处. 为了探测到MOT中心区域内原子束速度分布情况, 我们调整探测光使之与原子束呈35°夹角, 利用多普勒效应获得原子束速度分布. 原子发出的荧光用一组直径40 mm、焦距50 mm的透镜成像到光电倍增管(PMT), PMT输出的电压信号用示波器来进行观测和数据记录. 根据观测得到的MOT中心区域的速度分布图像实时优化减速磁场的大小和梯度, 我们得到最优的减速原子速度分布如图6所示. 图中实线是未减速之前的原子速度分布, o连成的曲线是减速后的原子速度分布. 由图可见, 速度600 m/s以下的原子开始被减速, 并累积、减速到

60 m/s左右, 在该速度处形成一个峰值(图中双峰源于基态相距803.5 MHz的两个能级粒子数分布的叠加), 这个速度原子的动能已低于MOT势阱可囚禁的最大速度(实验设计参数约为85 m/s), 能被磁光阱俘获. MOT光总功率为15 mW, 囚禁光和回泵光的比例约为1:1, 经过准直后的光斑直径为10 mm( $1/e^2$ 直径). MOT区磁场由水平放置的一对相距60 cm的反亥姆霍兹线圈提供, 轴向磁场梯度为3 mT/cm. 经过光强和失谐等一系列参数的优化<sup>[31,32]</sup>, 当囚禁光失谐 $\Delta_{trap} = -5\Gamma$ , 回泵光失谐 $\Delta_{repump} = -2\Gamma$ (其中 $\Gamma = 5.9$  MHz, 为<sup>7</sup>Li原子D<sub>2</sub>线的自然线宽), MOT在2—3 s内囚禁的原子数达到 $1 \times 10^9$ , 初始装载速率约为 $5 \times 10^8$ /s, 原子团的直径约为2.5 mm, 密度约为 $10^{11}$  /cm<sup>3</sup>, MOT装载曲线如图7所示.

由于<sup>7</sup>Li原子D<sub>2</sub>线跃迁的多普勒冷却极限为142  $\mu$ K, 原子团的平均速度较高, 当MOT囚禁光和磁场关闭时, 原子会迅速扩散, 用传统的时间飞行法(time of flight, TOF)<sup>[33]</sup>来测量其温度存在较

大误差. 因此, 我们用 EMCCD(PI, ProEM+512) 拍摄出其自由扩散图像来测量其温度. 原子团粒子数可看成高斯分布, 根据拟合得到的不同时刻拍摄的原子团高斯半径, 由公式

$$\sigma_i^2(t) = \sigma_0^2(0) + \frac{k_B T}{m} t^2 \quad (3)$$

可拟合得到原子团的温度, 其中,  $\sigma_i$  为原子团高斯半径,  $k_B$  为玻尔兹曼常数,  $m$  为原子质量,  $T$  为原子团的温度,  $t$  为原子自由扩散时间. 当囚禁光失谐从  $-30$  MHz 到  $-10$  MHz, 回泵光失谐从  $-13.5$  MHz 到  $-5$  MHz 之间扫描, 同时优化两者的光强  $I_{\text{trap}}$  和  $I_{\text{repump}}$ , 测得原子团的最低温度约为  $220 \pm 30 \mu\text{K}$ , 此时囚禁的原子数目  $N$  约为最大时的一半. 图 8 即为温度最低时对应的激光参数和原子自由扩散图像.

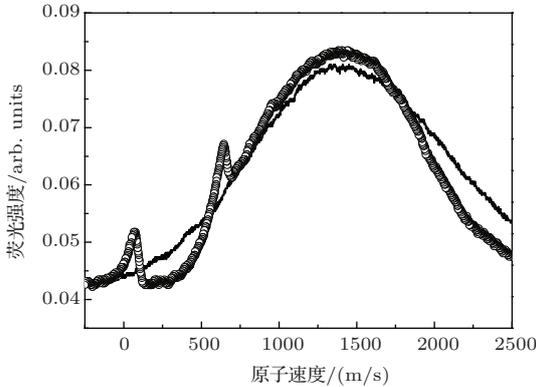


图 6 原子塞曼减速前后速度分布 (图中实线是未减速之前的原子速度分布,  $\circ$  连成的曲线是减速后的原子速度分布 (纵坐标进行了移位修正))

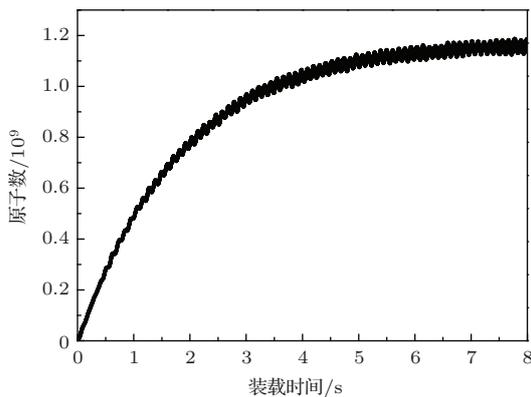


图 7  $^7\text{Li}$  MOT 装载曲线

我们研究了  $^7\text{Li}$  原子光学黏胶的寿命随囚禁光失谐的变化情况, 如图 9 所示. 在囚禁光重合度调整到最好的情况下, 关掉 MOT 磁场, 利用 CCD 拍

摄原子团在囚禁光形成的光学黏胶中的扩散轨迹, 直到原子由于扩散或下落逸出光学黏胶的囚禁范围. 当囚禁光失谐  $\Delta_{\text{trap}} = -10$  MHz 时, 光学黏胶最长的寿命约为 30 ms, 这让我们有足够的时间对原子进行亚多普勒冷却.

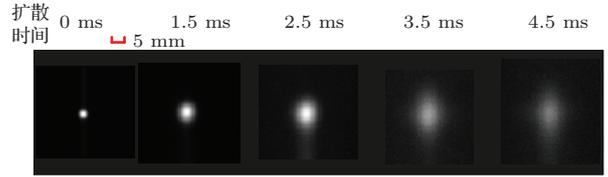


图 8 原子自由扩散图像 ( $\Delta_{\text{trap}} = -10$  MHz,  $\Delta_{\text{repump}} = -5$  MHz;  $I_{\text{trap}} = 4.8 \text{ mW/cm}^2$ ,  $I_{\text{repump}} = 1.9 \text{ mW/cm}^2$ ,  $N = 5 \times 10^8$ ,  $T = 220 \pm 30 \mu\text{K}$ )

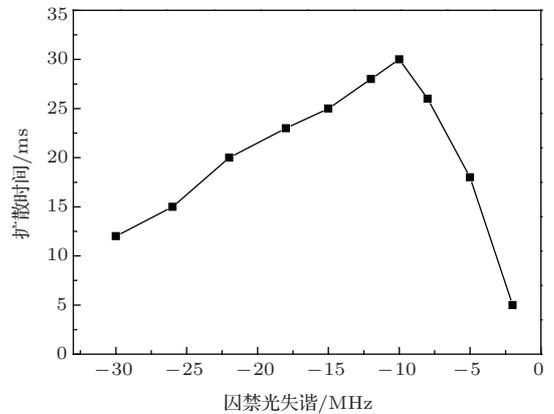


图 9  $^7\text{Li}$  原子光学黏胶的寿命与囚禁光失谐的变化关系

## 5 结 论

我们设计了一种结构紧凑的腔体内冷式多级线圈叠加的塞曼减速器, 将速度小于 600 m/s 的  $^7\text{Li}$  原子减速到 60 m/s. 利用磁光阱囚禁原子数目  $1 \times 10^9$  个, 原子团的最低温度约为  $220 \pm 30 \mu\text{K}$ . 原子数目已足够满足下一步开展冷原子干涉仪实验的需求. 为了更好地开展物质波干涉的实验, 可在本工作基础上对原子进行进一步的冷却, 如进行亚多普勒冷却、光势阱蒸发冷却等. 总之, 该工作为后续的高精度原子干涉实验奠定了基础.

## 参考文献

- [1] Navon N, Piatecki S, Günter K, Rem B, Nguyen T C, Chevy F, Krauth W, Salomon C 2011 *Phys. Rev. Lett.* **107** 135301

- [2] Nascimbène S, Navon N, Jiang K J, Chevy F, Salomon C 2010 *Nature* **463** 1057
- [3] Bradley C C, Sackett C A, Hulet R G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 985
- [4] Cetina M, Grier A T, and Vuleti V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 253201
- [5] Lepoutre S, Gauguier A, Tréneç G, Büchner M, Vigué J 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 120404
- [6] Cronin A D, Schmiedmayer J, Pritchard D E 2009 *Rev. Mod. Phys.* **81** 1051
- [7] Delhuille R, Champenois C, Büchner M, Jozefowski L, Rizzo C, Tréneç G, Vigué J 2002 *Appl. Phys. B* **74** 489
- [8] Miffre A, Jacquy M, Büchner M, Tréneç G, Vigué J 2006 *Phys. Rev. A* **73** 011603
- [9] Jacquy M, Büchner M, Tréneç G, Vigué J 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 240405
- [10] Hohensee M A, Müller H 2011 *J. Mod. Opt.* **58** 2021
- [11] Hamilton P, Kim G, Ossiander M, Mukharjee B, Tiarks D, Müller H 2012 *The 23rd International Conference on Atomic Physics Palaiseau*, France, July 23–27, 2012 p283
- [12] Zhou L, Xiong Z Y, Yang W, Tang B, Peng W C, Hao K, Li R B, Liu M, Wang J, Zhan M S 2011 *Gen. Relativ. Gravit.* **43** 1931
- [13] Phillips W D, Metcalf H 1982 *Phys. Rev. Lett.* **48** 596
- [14] Bradley C C, Story J G, Tollett J J, Chen J, Ritchie N W M, Hulet R G 1992 *Opt. Lett.* **17** 349
- [15] Tiecke T G, Gensemer S D, Ludewig A, Walraven J T M 2009 *Phys. Rev. A* **80** 013409
- [16] Lin Z, Shimizu K, Zhan M S, Shimizu F, Takuma H 1991 *Jap. J. App. Phys.* **30** L1324
- [17] Okano M, Hara H, Muramatsu M, Doi K, Uetake S, Takasu Y, Takahashi Y 2010 *Appl Phys B* **98** 691
- [18] Zhao P Y, Xiong Z X, Long Y, He L X, Lü B L 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 083702
- [19] Wang S K, Wang Q, Lin Y G, Wang M M, Lin B K, Zang E J, Li T C, Fang Z J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 93202
- [20] Wang Q, Lin B K, Zhao Y, Li Y, Wang S K, Wang M M, Zang E J, Li T C, Fang Z J 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 03321
- [21] Tian X, Chang H, Wang X L, Zhang S G 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 898 (in Chinese) [田晓, 常宏, 王心亮, 张首刚 2010 光学学报 **30** 898]
- [22] Schünemann U, Engler H, Zielonkowski M, Weidemüller M, and Grimm R 1998 *Opt. Commun.* **158** 263
- [23] Mewes M, Ferrari G, Schreck F, Sinatra A, and Salomon C 1999 *Phys. Rev. A* **61** 011403
- [24] Grier A T, Ferrier-Barbut I, Rem B S, Delehayé M, Khaykovich L, Chevy F, Salomon C 2013 *Phys. Rev. A* **87** 063411
- [25] Hamilton P, Kim G, Joshi T, Mukherjee B, Tiarks D, Müller H 2014 *Phys. Rev. A* **89** 023409
- [26] Zhang Y Y, Fang Z J, Zhang Z G 2010 *Acta Opt. Sin.* **30** 935 (in Chinese) [张远洋, 方占军, 张志刚 2010 光学学报 **30** 935]
- [27] Wang X L, Ma Z, Wang J B, Tian X, Gao F, Zhang S G, Chang H 2011 *Acta Sin. Quan. Opt.* **17** 124 (in Chinese) [王心亮, 马喆, 王靖斌, 田晓, 高峰, 张首刚, 常宏 2011 量子光学学报 **17** 124]
- [28] Savard T A 1998 *Ph. D. Dissertation* (Durham: Duke University)
- [29] Xiong Z X, Long Y, Xiao H X, Zhang X, He L X, Lü B L 2011 *Chin. Opt. Lett.* **9** 010201
- [30] Wang Y Q 2007 *Laser cooling and trapping of atoms* (Beijing: Peking University Press) p122 (in Chinese) [王义道 2007 原子的激光冷却与陷阱 (北京: 北京大学出版社) 第122页]
- [31] Jiang K J, Li K, Wang J, Zhan M S 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 125 (in Chinese) [江开军, 李可, 王谨, 詹明生 2006 物理学报 **55** 125]
- [32] Wang Y H, Yang H J, Zhang T C, Wang J M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3403 (in Chinese) [王彦华, 杨海菁, 张天才, 王军民 2006 物理学报 **55** 3403]
- [33] Geng T, Yan S B, Wang Y H, Yang H J, Zhang T C, Wang J M 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5104 (in Chinese) [耿涛, 闫树斌, 王彦华, 杨海菁, 张天才, 王军民 2005 物理学报 **54** 5104]

# Zeeman slowing and magneto-optically trapping of lithium atoms in atomic interferometry experiments\*

Yang Wei<sup>1)2)</sup> Sun Da-Li<sup>1)2)</sup> Zhou Lin<sup>1)3)</sup> Wang Jin<sup>1)3)</sup> Zhan Ming-Sheng<sup>1)3)†</sup>

1) (*State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

3) (*Center for Cold Atom Physics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

( Received 27 February 2014; revised manuscript received 6 April 2014 )

## Abstract

To prepare cold lithium atoms for atomic interferometry experiments, we have carried out experimental researches on Zeeman deceleration and magneto-optical trap (MOT) of lithium atoms. We have also designed and implemented a compact adjustable Zeeman slower with an inner water cooling chamber, to decelerate the velocity of the  ${}^7\text{Li}$  atom beam from 600 m/s down to 60 m/s, and load them into the MOT. The loading rate is  $5 \times 10^8$  /s, the total trapped atom number is  $1 \times 10^9$ , and the lowest temperature of the atom cloud is  $220 \pm 30 \mu\text{K}$ . Then we investigate the dependence of lifetime of  ${}^7\text{Li}$  atoms in optical molasses on the detuning of trapping laser beams. The above results lay a foundation for further sub-Doppler cooling, optical trap based on evaporative cooling, and atomic interferometry experiments.

**Keywords:** laser cooling and trapping, Zeeman slower, magneto-optical trap, atom interferometer

**PACS:** 37.10.Gh, 37.10.De, 37.10.Vz, 37.25.+k

**DOI:** 10.7498/aps.63.153701

---

\* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB 832805), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074281, 11227803).

† Corresponding author. E-mail: [mszhan@wipm.ac.cn](mailto:mszhan@wipm.ac.cn)