

# 激光冷却获得高亮度的亚稳态惰性 气体原子束和原子阱\*

程存峰 杨国民 蒋蔚 潘虎 孙羽 刘安雯 成国胜 胡水明†

(合肥微尺度物质科学国家实验室, 中国科学技术大学化学物理系, 合肥 230026)

(2010年11月16日收到; 2010年11月30日收到修改稿)

高强度的亚稳态惰性原子束流在原子分子物理实验研究中具有广泛的应用. 使用射频电离方法和激光横向冷却技术制备了高强度的亚稳态氦原子束流, 并使用数值模拟方法对横向冷却激光场中的原子径迹进行了分析. 通过激光诱导荧光光谱方法测量原子束的束流特性, 结果显示, 横向冷却后在束流源下游 230 cm 处的原子束流强度达  $1.6 \text{ atoms}/(\text{s} \cdot \text{sr})$ , 束流强度提高了两个量级. 利用这种高强度原子束流, 我们成功囚禁了  $1.3 \times 10^{10}$  个亚稳态<sup>84</sup>Kr 原子, 同时冷原子装载速率达到了  $3.0 \times 10^{11} \text{ atoms/s}$ ; 并利用该装置成功地实现了高亮度的亚稳态氦原子束和原子阱.

**关键词:** 横向冷却, 原子束, 原子阱, 惰性气体

**PACS:** 37.20.+j, 37.10.Vz, 37.10.De, 32.70.Jz

## 1. 引言

亚稳态惰性元素原子的冷却和囚禁, 具有一些重要的基础和应用意义<sup>[1-3]</sup>, 例如用来测量特殊的原子核结构<sup>[4-7]</sup>, 研究冷原子之间相互作用<sup>[8-12]</sup>和冷分子<sup>[13-19]</sup>, 以及痕量放射性同位素原子的分析和年代测定<sup>[20-23]</sup>. 这些工作中, 高效率 and 快速的冷原子囚禁都是实验中的基本要求. 激光横向冷却 (transverse cooling, TC) 是获得高强度的原子束流的关键技术. 它可以有效降低原子束的横向速度, 增强束流前进方向上原子密度, 在研究中得到广泛应用<sup>[24]</sup>.

高效的横向冷却技术一直以来都未停止发展<sup>[25]</sup>. 如 Leefler 等人利用两束相对传播的共振光, 首次实现了对镝 (Dy) 原子的横向冷却<sup>[26]</sup>; DeGraffenreid 等人通过建立二维的光学黏胶 (optical molasses), 成功实现对钠 (Na) 原子束的准直和增强<sup>[27]</sup>; 国内马艳等人也在理论上和实验上实现了对铬 (Cr) 原子的横向冷却<sup>[28, 29]</sup>. 本文介绍一种有效的激光横向冷却方法, 并对横向冷却过程给出

数值模拟和优化. 我们利用这种横向冷却技术, 可以将亚稳态氦原子束的等效束流强度提高了约两个量级, 达到  $1.6 \times 10^{16} \text{ atoms}/(\text{s} \cdot \text{sr})$ . 利用该原子束, 在磁光阱中实现了高效率的氦原子囚禁, 将  $1.3 \times 10^{10}$  个<sup>84</sup>Kr 原子同时囚禁在约 600  $\mu\text{m}$  直径的空间内, 冷原子团密度约  $1.2 \times 10^{14} \text{ atoms}/\text{cm}^3$ , 装载速率达  $3.0 \times 10^{11} \text{ atoms/s}$ , 就我们所知, 此结果达到了迄今报道的最高水平. 该实验装置和方法还可以方便地扩展应用于其他亚稳态惰性气体原子的研究.

## 2. 实验装置

本实验装置结构见图 1. 氦气样品经过微漏阀进入源腔后, 在氮化铝 (AlN) 陶瓷管处通过射频放电产生亚稳态氦原子. AlN 管被液氮冷却, 冷却后的温度由一个铂电阻式温度传感器测得. 液氮预冷装置的结构见图 2, 液氮预冷方法能够有效地降低原子束的温度到 100 K 左右, 在较低的原子束温度下, 亚稳态原子束的纵向 ( $z$  方向) 和横向速度都会降低. 前者可以使得更多的原子被塞曼减速, 后者会增加横向冷却的效率, 从而提高原子束强度. 该冷

\* 国家自然科学基金 (批准号: 90921006, 10728408) 和中国科学院重大仪器研制项目 (批准号: YZ200765) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: smhu@ustc.edu.cn

却装置还能带走射频放电产生的热量,有效地避免了放电管和射频导线的过热. 亚稳态氪原子飞出 AlN 管道后立即经过长度约 15 cm 的激光横向冷却区域. 激光束在两对长约 20 cm 长的长条形反射镜间来回反射,形成横向冷却激光场. 激光波长为 811.5 nm, 锁定在氪原子的  $5s[3/2]_2 \rightarrow 5p[5/2]_3$  跃

迁线上. 原子束经过横向冷却准直后,进入约 1.2 m 长的塞曼减速管(Zeeman Slower),在多层螺线管产生的磁场和一束塞曼冷却激光的共同作用下,原子的前进速度被大幅减小,最后落入磁光阱(MOT)中,最终被激光冷却和囚禁. 冷原子团可以通过其激光诱导荧光信号进行观测.

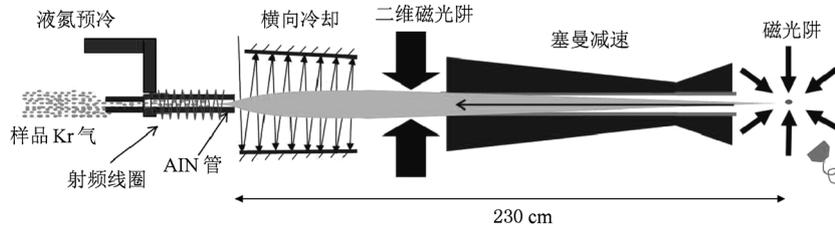


图1 实验装置总图

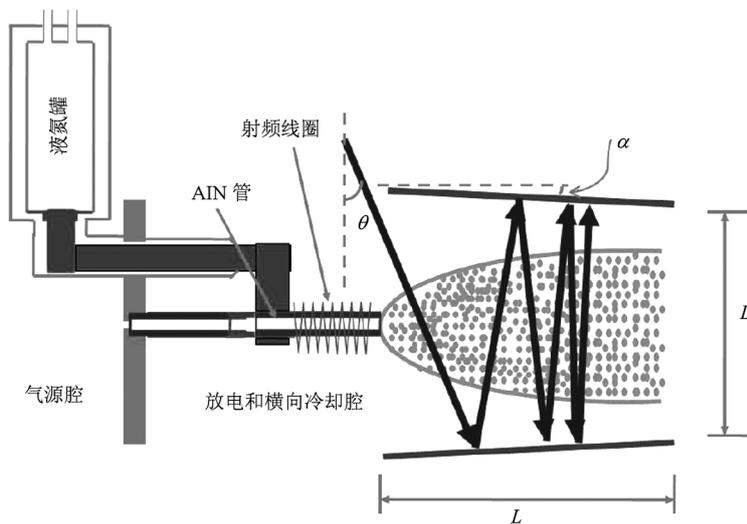


图2 液氮预冷和横向冷却结构图. 横向冷却光的入射角为  $\theta$ . 两面尺寸为  $20 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$  的反射镜与原子束纵向方向的夹角各为  $\alpha$ . 有效的激光横向冷却区域长度  $L$  为 15 cm

激光冷却的光路示意图见图 3. 一台二极管激光器(DL1)被用来作为激光冷却的种子激光,它需要被锁定在特定 Kr 同位素原子的共振线上. 我们首先获得其和另一台二极管激光器(DL2)的拍频信号,并将其锁定在所需要的射频频率上,从而可以主动实现对 DL1 的任意频率控制. 而 DL2 则一直锁定在  $^{84}\text{Kr}$  原子的  $5s[3/2]_2 \rightarrow 5p[5/2]_3$  跃迁线上,由调制饱和吸收光谱方法实现,锁定后激光的波长抖动小于 300 kHz. 通过改变射频信号频率,即可实现迅速切换 DL1 工作到不同的氪同位素(如  $^{82}\text{Kr}$ ,  $I. A. = 11.6\%$ ;  $^{84}\text{Kr}$ ,  $I. A. = 57.0\%$ ;  $^{86}\text{Kr}$ ,  $I. A. = 17.3\%$ )共振频率. 利用锥形半导体激光放大器 TA1

(Sacher Lasertechnik),将 DL1 种子激光放大至 1.5 W 并分成三束,分别为横向冷却光、磁光阱陷俘光(和二维磁光阱陷俘光)和塞曼减速光. 三束光的频率失谐用声光调制器(AOM)控制,分别为 0, -6 MHz, -80 MHz. 其中横向冷却光总功率为 300 mW,被分成两束,分别对  $x$  和  $y$  方向分别进行二维冷却,光斑大小为  $35 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ ;塞曼减速光光斑直径为 30 mm,激光功率  $5 \text{ mW/cm}^2$ ;而磁光阱冷却激光经过了第二级激光放大器(TA2)放大到约 400 mW,光斑直径 30 mm,磁光阱中每束激光的功率密度约  $10 \text{ mW/cm}^2$ .

实验中,通过激光诱导荧光方法测量亚稳态氪

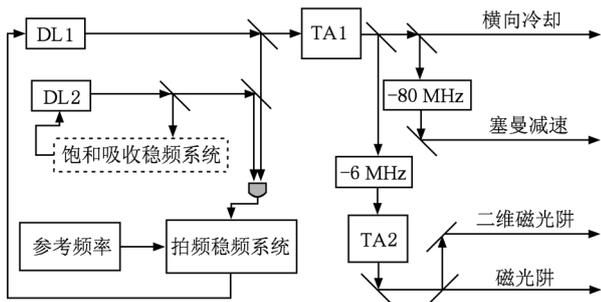


图3 实验中的光路简图. DL:半导体激光器;TA:锥形半导体激光放大器

原子束流的强度和速度,以及冷原子团的亮度和密度等参数. 探测激光被分成四束,一束在距氮化铝陶瓷管口约 50 cm 处(图 1 中 2D-MOT 处),以测量原子束强度和发散角;两束在距离 AlN 管口 230 cm 处(磁光阱处),分别与原子束呈 90°和 45°角,以测量原子束强度和利用多普勒频移方法测量原子束轴向( $z$  方向)速度;第四束探测光则经过光纤耦合的电光调制器,被送入自由光谱范围(FSR)为 1.5 GHz 的超稳 F-P 干涉腔(ATFilms Inc.),用以定标探测激光频率. 超稳腔被置入真空中,并与外界进行弹性隔离,以保证其 FSR 漂移率小于 1 MHz/h.

### 3. 结果和讨论

#### 3.1. 激光横向冷却原子束的模拟

有效的激光横向冷却(transverse cooling, TC)是产生高强度原子束流的关键. 为理解横向冷却机理,优化横向冷却光路,我们对一维横向冷却激光场中的原子轨迹进行了模拟. 横向冷却区的结构如图 2 所示. 原子束流方向为  $z$  方向,简单起见,以下仅考虑与束流垂直的  $x$  方向上原子束被激光横向冷却的效果. 激光横向冷却区域在 AlN 管口下游 5—20 cm 处,入射激光与  $x$  方向的夹角为  $\theta$ ,两块长方形反射镜与  $z$  方向的夹角均为  $\alpha$ ,反射镜间距  $D$  为 15 cm. 在实验和模拟中,对  $\theta$  和  $\alpha$  进行优化,优化后结果  $\theta = 0.1, \alpha = 0.0025$ . 模拟和实验结果基本一致.

为了简化,假设所有原子  $z$  方向的速度同为 178 m/s(后文会有讨论),对应于 108 K 温度原子束中原子的最可几前进速度,并假设所有原子是从同一

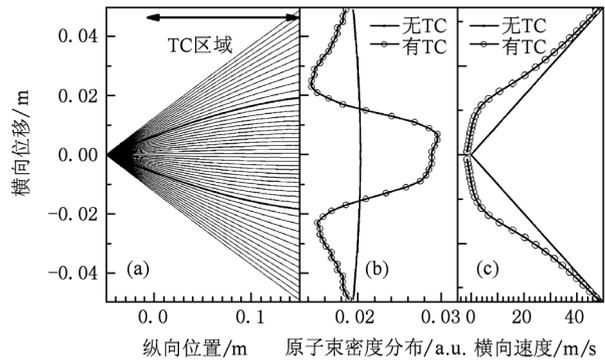


图4 亚稳态 Kr 原子在一维横向冷却激光作用下的模拟结果 (a)原子轨迹;(b)原子数密度分布;(c)原子飞出横向冷却区域时的横向速度

点飞出,飞出时原子初始速度的角分布为均匀分布. 模拟结果见图 4,其中图 4(a)展示了沿不同方向飞出(不同的初始横向速度)的原子的飞行轨迹. 在经过横向冷却区域后,在横向上原子束流密度的空间分布将发生变化,见图 4(b). 没有加横向冷却光时,束流分布各个方向几乎相同,是我们假设的初始分布;横向冷却激光作用后,束流中心的密度大大增加,原子被明显压缩到横向位移较小的位置. 同时,原子的横向速度也明显减小,如图 4(c)所示. 可以看到,横向冷却激光的作用使得原子束向轴线中心附近集中,横向速度减小,这使得原子束的发散被有效抑制,原子束中心的亮度大为提高. 根据模拟结果可计算出,使用一维的横向冷却,在束流下游 50 cm 处探测,原子束流中心的强度将提高至无横向冷却时的 4.7 倍,使用两维的横向冷却将增强至 22 倍.

#### 3.2. 激光横向冷却效果与原子束强度

为了确定横向冷却对原子束横向速度的影响,我们在距原子束源 50 cm 处(图 1 中 2D-MOT 处),用激光诱导荧光方法测量了亚稳态 Kr 荧光光谱,见图 5. 该图下部为没有加横向冷却的光谱. 利用高斯线型可以很好拟合所测得光谱(如图中实线所示),拟合得到的高斯线宽(半高全宽,FWHM)  $\Gamma_D = 31 \pm 1$  MHz,此展宽应主要为多普勒展宽的贡献,对应的横向速度为  $15 \pm 0.5$  m/s. 这与从横向冷却腔(5.5 cm × 5.5 cm × 27 cm)空间限制所估算的结果基本符合. 由此可计算出自由原子束束流强度约为  $4 \times 10^{14}$  atoms/(s \* sr). 图 5 上部为加了横向冷却激光后的光谱,此时横向冷却激光锁

在<sup>84</sup>Kr 同位素共振线上,仅对该同位素有横向冷却作用. 经过横向冷却,<sup>84</sup>Kr 原子横向速度大大减小,此时谱线线型可以用 Voigt 线型描述,拟合得到的高斯线宽  $\Gamma_D = 5.3 \pm 0.2$  MHz,洛伦兹线宽  $\Gamma_L = 7.3 \pm 0.2$  MHz. 洛伦兹线宽应当由原子跃迁的自然线宽(5.3 MHz)和激光功率加宽导致,高斯展宽应主要由原子的横向速度决定,由此得到的原子横向速度为  $2.6 \pm 0.1$  m/s. 在此处使用二维横向冷却后,原子束荧光信号强度提高了约 12 倍,与模拟结果相比略有差别,这可能是由于模拟时对初始速度采用了简单的均匀分布,并且简化了原子束在  $z$  方向的速度分布.

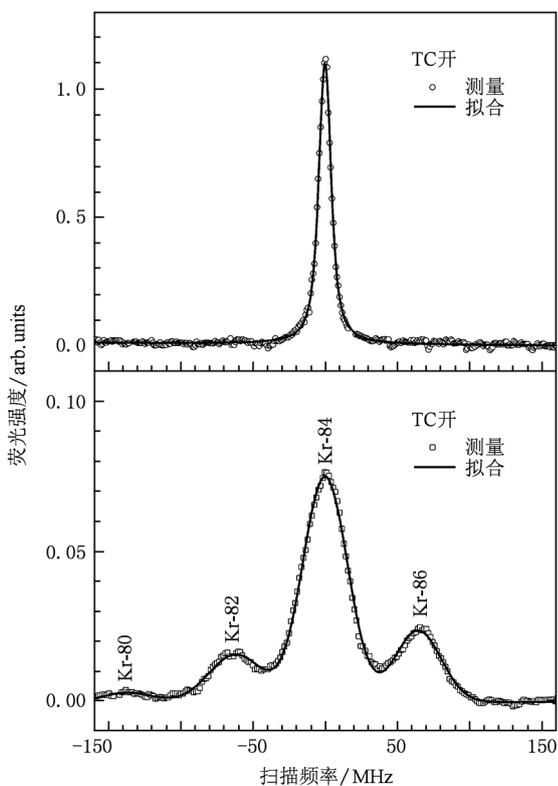


图5 亚稳态氪原子束的激光诱导荧光光谱,探测区域在距原子束源 50 cm 处(图 1 中 2D-MOT 处). 上图为有横向冷却光下测得,下图为关闭横向冷却光下测得. 横向冷却激光频率锁定在<sup>84</sup>Kr 原子共振线上(频移为零处).

我们在 MOT 处用同样的方法也测量了激光诱导荧光光谱,通过荧光光谱信号的强度可估算得到的原子束强度. 激光诱导荧光的结果表明,亚稳态<sup>84</sup>Kr 在 MOT 处原子数通量达  $1.5 \times 10^{12}$  atoms/s,相当于等效的亚稳态原子束流强度为  $1.6 \times 10^{16}$  atoms/(s \* sr),比文献中的结果<sup>[30,31]</sup> 大约提高了两个量级.

### 3.3. 原子束的塞曼减速

为了测量原子束的纵向速度,检验塞曼减速器的效果,我们使用激光诱导荧光光谱方法,对经过塞曼减速器后的原子束进行测量. 两束探测激光一束垂直于原子束,另一束与原子束呈 45°角. 观察到的激光诱导荧光光谱见图 6. 图 6(a)和(b)分别是关闭塞曼减速和打开塞曼减速得到的光谱图. 其中零频移位置附近的谱峰由垂直于原子束的探测光诱导产生,而蓝移的谱峰则由与原子束呈 45°角的探测光产生. 通过该谱峰的多普勒频移量可得到原子束的纵向速度分布. 温度为  $T$  的原子束在纵向( $z$ )的速度分布<sup>[21]</sup>为

$$f(v) = N_0 v^3 \exp(-3v^2/2V_m^2), \quad (1)$$

其中  $N_0$  是归一化因子,  $V_m$  是原子束的最可几速度,  $V_m = \sqrt{3k_B T/M}$ ,  $k_B$  是波尔兹曼常数,  $M$  是原子质量. 根据方程(1)拟合观测到的光谱,拟合结果也显示在图 6 中,拟合得到在关闭塞曼减速时的最可几速度  $V_m$  为  $178.3 \pm 0.8$  m/s,对应的温度为  $107.8 \pm 1.0$  K. 打开塞曼减速时,  $V_m$  降至  $42.2 \pm 0.3$  m/s,对应的温度为 6 K. 同时,该谱峰蓝端平坦的基线也说明绝大部分的原子都被有效地减速.

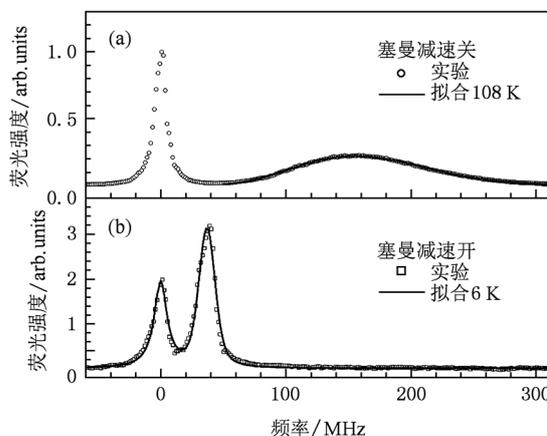


图6 原子束在 MOT 腔的激光诱导荧光光谱 (a)关闭塞曼减速光; (b)打开塞曼减速光

### 3.4. 原子的冷却和囚禁

在磁光阱中,由六束交叉垂直的激光(红失谐 6 MHz)和磁场共同作用下,被塞曼减速的原子最后被囚禁在磁光阱中心. 大量被同时囚禁的冷原子的荧光发射可被置于磁光阱外 CCD 摄像头直接观测. 在图 7 中给出了一幅冷原子团的伪 3D 荧光图像. 荧光信号还被透镜成像系统收集后由一个光敏二极管

管探测. 根据荧光信号强度、荧光收集和探测效率, 可估算出被囚禁的原子数. 当扫描激光器 DL1 频率时, 可分别将不同的氪同位素原子囚禁, 得到的冷原子数随激光频率的变化如图 7. 在激光频率失谐  $-6$  MHz 时, 可获得  $^{84}\text{Kr}$  冷原子数为  $1.3 \times 10^{10}$ , 原子团的尺寸约为  $600 \mu\text{m}$ , 可估计出原子数密度约  $1.2 \times 10^{14} \text{ atoms}/\text{cm}^3$ . 利用对开关激光冷却时得到的冷原子团信号随时间的变化关系, 以及原子阱装载冷原子的速率方程<sup>[32]</sup>, 可计算得到该原子阱的装载效率为  $3 \times 10^{11} \text{ atoms}/\text{s}$ .

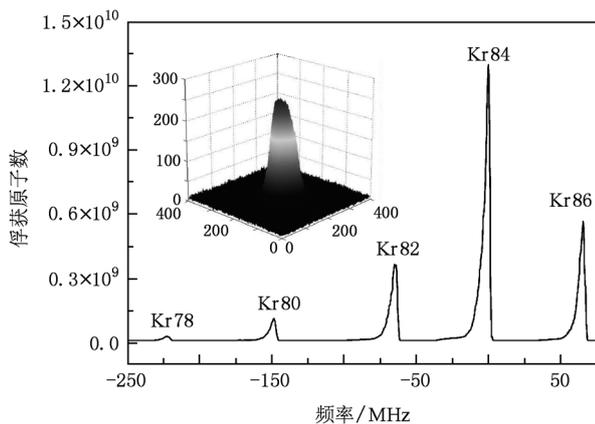


图 7 被囚禁的亚稳态氪冷原子团的荧光信号. 扫描激光频率时, 得到不同氪同位素原子的冷原子团信号. 左上角插入图为用 CCD 拍得的  $^{84}\text{Kr}$  冷原子团伪 3D 荧光照片

以上数据都是在液氮预冷下测得的. 作为对比, 我们对无预冷情况下也做了相应的测量. 结果显示, 无液氮预冷时, 由于射频放电的加热作用, 气流温度增加到  $350 \text{ K}$ , 原子束的速度增加一倍, 激光横向冷却对束流的增强效果也下降近一半, 塞曼减

速效率也有所下降. 根据前面对原子束激光诱导荧光光谱的测量, 原子束经过横向冷却后横向速度压缩到约  $2.6 \text{ m/s}$ , 考虑到测得的原子束纵向的最可几速度为  $178 \text{ m/s}$ , 可以估算出, 原子束经过塞曼减速管、到达磁光阱时的横向位移将为约  $3 \text{ cm}$ . 而实验中由于塞曼冷却磁场线圈的限制, 我们使用的塞曼冷却管半径约  $18 \text{ mm}$ . 因此, 原子束中原子会有很大一部分在飞行中碰到管壁而损失掉, 这也是为什么实际最后获得的冷原子阱装载速率远远小于原子束流量. 为此, 我们在横向冷却区域之后, 在垂直原子束的二维方向上增加了二维磁光阱 (2D-MOT), 试图对原子束形成弱聚焦, 以减少原子在飞行中的损失. 初步的实验表明, 2D-MOT 的应用使原子阱的装载效率得到约 2—3 倍的提高.

#### 4. 总 结

本文介绍了所建立的激光冷却亚稳态惰性气体原子束和原子阱装置. 利用这种装置, 实现了对射频放电产生的亚稳态 Kr 原子束的空间准直, 使得原子束亮度大幅提高, 束流等效流强达到  $1.6 \times 10^{16} \text{ atoms}/(\text{s} * \text{sr})$ . 利用该高强度束流, 并结合对原子束的聚焦和减速技术, 最后实现了  $^{84}\text{Kr}$  冷原子装载速率达  $3 \times 10^{11} \text{ atoms}/\text{s}$  的原子阱. 由于 Ar 原子的冷却激光频率和 Kr 原子十分接近 (仅相差  $0.2 \text{ nm}$ ), 我们使用同一套装置, 不需要更换激光器和其他器件, 即成功实现了对氩原子的激光囚禁, 初步实验得到的亚稳态氩冷原子装载速率亦超过  $10^{11} \text{ atoms}/\text{s}$  水平. 本装置使用到的原子束流增强方法也可应用到其他需要高强度原子束的实验之中.

[1] Wieman C, Pritchard D, Wineland D 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S253  
 [2] Metcalf H J, van der Straten P 1999 *Laser cooling and trapping* (New York: Springer-Verlag)  
 [3] Hu S M, Lu Z T, Yan Z C 2009 *Frontiers of Physics in China* **4** 165  
 [4] Mueller P, Wang L B, Drake G W F, Bailey K, Lu Z T, O'Connor T P 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 133001  
 [5] Wang L B, Mueller P, Drake G W F, Greene J P, Henderson D, Holt R J, Janssens R V F, Jiang C L, Lu Z T, O'Connor T P, Pardo R C, Rehm K E, Schiffer J P, Tang X D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 142501

[6] Mueller P, Sulai I A, Villari A C C, Alcantara-Nunez J A, Alves-Conde R, Bailey K, Drake G W F, Dubois M, Eleon C, Gaubert G, Holt R J, Janssens R V F, Lecesne N, Lu Z T, O'Connor T P, Saint-Laurent M G, Thomas J C, Wang L B 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 252501  
 [7] Wang L B, Lu Z T, Mueller P 2009 *Wuli* **38** 339 (in Chinese) [王立邦, 卢征天, 彼得穆勒 2009 物理 **38** 339]  
 [8] Deuar P, Drummond P D 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 120402  
 [9] Band Y B, Trippenbach M, Burke J P, Julienne P S 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5462  
 [10] Zahzam N, Vogt T, Mudrich M, Comparat D, Pillet P 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 023202

- [11] Yurovsky V A, Ben – Reuven A 1998 *J. Phys. Chem. A* **102** 9476
- [12] Wang G P, Ji W B, Ma J, Wang L R, Xiao L T, Jia S T 2008 *Chinese Journal of Lasers* **35** 221 (in Chinese) [王贵平、冀炜邦、马 杰、汪丽蓉、肖连团、贾锁堂 2008 中国激光 **35** 221]
- [13] Van Abeelen F A, Heinzen D J, Verhaar B J 1998 *Phys. Rev. A* **57** R4102
- [14] Courteille P, Freeland R S, Heinzen D J, Van Abeelen F A, Verhaar B J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 69
- [15] Deb B, You L 2003 *Phys. Rev. A* **68** 033408
- [16] Ramirez-Serrano J, DeGraffenreid W, Weiner J, Tiesinga E, Julienne P S 2004 *Phys. Rev. A* **69** 042708
- [17] Junker M, Dries D, Welford C, Hitchcock J, Chen Y P, Hulet R G 2008 *Phys. Rev. Lett.* **101** 060406
- [18] Mu R W, Li Y L, Ji X M, Yin J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6333 (in Chinese) [沐仁旺、李雅丽、纪宪明、印建平 2006 物理学报 **55** 6333]
- [19] Wang L R, Jia S T 2006 *Acta Sinica Quantum Optica* **12** 143 (in Chinese) [汪丽蓉、贾锁堂 2006 量子光学学报 **12** 143]
- [20] Chen C Y, Li Y M, Bailey K, O'Connor T P, Young L, Lu Z T 1999 *Science* **286** 1139
- [21] Du X, Purtschert R, Bailey K, Lehmann B E, Lorenzo R, Lu Z T, Mueller P, O'Connor T P, Sturchio N C 2003 *Geo. Res. Lett.* **30** 2068
- [22] Du X, Bailey K, Lu Z T, Mueller P, O'Connor T P, Young L 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3224
- [23] Du X, Lu Z T 2005 *Wuli* **34** 408 (in Chinese) [杜 旭、卢征天 2005 物理 **34** 408]
- [24] Zhou S Y, Xu Z, Zhou S Y, Wang Y Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 165 (in Chinese) [周蜀渝、徐 震、周善钰、王育竹 2007 物理学报 **56** 165]
- [25] Liu L, Chen H X, Wang Y Z 1993 *Acta Phys. Sin.* **42** 1762 (in Chinese) [刘 亮、陈洪新、王育竹 1993 物理学报 **42** 1762]
- [26] Leefer N, Cingoz A, Gerber-Siff B, Sharma A, Torgerson J R, Budker D 2010 *Phys. Rev. A* **81** 043427
- [27] DeGraffenreid W, Ramirez-Serrano J, Liu Y M, Weiner J 2000 *Rev. Sci. Instrum.* **71** 3668
- [28] Ma Y, Zhang B W, Zheng C L, Ma S S, Li F S, Wang Z S, Li T B 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4086 (in Chinese) [马 艳、张宝武、郑春兰、马珊珊、李佛生、王占山、李同保 2006 物理学报 **55** 4086]
- [29] Zhang B W, Zhang W T, Ma Y, Li T B 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5485 (in Chinese) [张宝武、张文涛、马 艳、李同保 2008 物理学报 **57** 5485]
- [30] Ding Y, Bailey K, Davis A M, Hu S M, Lu Z T, O'Connor T P 2006 *Rev. Sci. Instrum.* **77** 126105
- [31] Young L, Yang D, Dunford R W 2002 *J. Phys. B* **35** 2985
- [32] Telles G, Ishikawa T, Gibbs M, Raman C 2010 *Phys. Rev. A* **81** 032710

# Bright metastable noble gas atomic beam and atom trap using laser cooling\*

Cheng Cun-Feng Yang Guo-Min Jiang Wei Pan Hu Sun Yu Liu An-Wen  
Cheng Guo-Sheng Hu Shui-Ming<sup>†</sup>

(*Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Micro-scale, Department of Chemical Physics,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 16 November 2010; revised manuscript received 30 November 2010)

## Abstract

Metastable noble gas atomic beam is widely used in atomic and molecular physics studies. Using radio-frequency discharge and transverse laser cooling, we produced a well-collimated intense meta-stable Krypton beam. Numerical simulation is also used to analyze the trajectories of atoms in an optic field produced by transverse cooling laser beams. The charactersistic of the atomic beam are determined by measuring the laser induced fluorescence. The atomic beam flux measured at 230 cm downstream is  $1.6 \times 10^{16}$  atoms/(s \* sr), which is enhanced by two orders of magnitude. The Kr atoms are finally trapped in a magneto-optic trap. A total of  $1.3 \times 10^{10}$  meta-stable  $^{84}\text{Kr}$  atoms can be simultaneously trapped with a loading rate of  $3.0 \times 10^{11}$  atoms/s. The same setup is also successfully used to obtain a bright metastable atomic argon beam and trap.

**Keywords:** transverse cooling, atomic beam, atom trap, noble gas

**PACS:** 37.20.+j, 37.10.Vz, 37.10.De, 32.70.Jz

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90921006, 10728408), and the Chinese Academy of Sciences (Grant No. YZ200765).

<sup>†</sup> E-mail: smhu@ustc.edu.cn