

刀口法测量铬原子激光冷却温度

焦晓光 殷 聪 石春英 钱 进

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要 介绍了刀口法测温原理。在自主研制的铬原子光刻系统上,利用稳定到 ^{52}Cr 的 $^7\text{S}_3 \rightarrow ^7\text{P}_4^0$ 跃迁上的真空波长为 425.5 nm 的激光,对高温原子炉喷射的铬原子束进行了一维多普勒冷却准直。设计搭建了刀口法测温实验装置,对激光多普勒冷却准直效果进行了定量评价。在激光功率为 45 mW,失谐量为 -2.5 MHz,光斑大小为 $1\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 的条件下,观察到了明显的冷却现象。在此基础上采用刀口法测温,测得激光冷却后铬原子束角分布的半峰全宽为 (0.616 ± 0.007) mrad,横向温度为 (418 ± 10) μK 。这些结果为优化调整铬原子束激光冷却准直实验提供了依据。

关键词 测量;原子光刻;激光多普勒冷却;刀口测温法;角分布;横向温度

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0708004

Thermometry of Cr Laser Cooling via Knife-Edge

Jiao Xiaoguang Yin Cong Shi Chunying Qian Jin

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract The principle of knife-edge thermometry is introduced. A chromium beam which is jetted from high temperature atomic crucible is collimated by one-dimensional laser Doppler cooling on self-designed system of chromium atom lithography. The laser wavelength in vacuum is 425.5 nm, corresponding to $^7\text{S}_3 \rightarrow ^7\text{P}_4^0$ transition of ^{52}Cr . The setup of knife-edge thermometry is designed and built to quantify the effect of the chromium beam collimation by laser cooling. The obvious cooling phenomenon is observed with power of 45 mW, spot size of $1\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ and detuning of -2.5 MHz. Then, based on it, the knife-edge measurement is carried out. The results show that the full-width at half-maximum (FWHM) of chromium beam angular distribution is (0.616 ± 0.007) mrad and the transverse temperature is (418 ± 10) μK by laser cooling. The results provide a basis for optimizing the chromium beam collimation by laser cooling.

Key words measurement; atom lithography; laser Doppler cooling; knife-edge thermometry; angular distribution; transverse temperature

OCIS codes 020.1335; 020.3320; 040.1520; 040.1880; 100.2960

1 引 言

原子光刻^[1]是一种新的纳米制作技术^[2]。采用该技术制作的纳米结构可直接溯源于激光波长,是理想的纳米尺度长度标准制作技术。近 10 多年来,国外研究机构对 Na ^[3], Cr ^[4], Al ^[5] 等中性金属原子开展了原子光刻实验研究,并初步获得了纳米光栅结构^[6]。2006 年,中国计量科学研究院、同济大学以及国防科技大学合作开展了铬原子光刻关键技术

研究,经过 5 年的努力,成功搭建了一维铬原子光刻系统。

在一维铬原子光刻实验中,激光冷却准直是关键技术之一,也是实现光刻的前提。激光冷却效果的好坏直接影响原子光刻的质量,因此,评价激光冷却效果对实验具有重要意义。常用的激光冷却效果评价方法有直接观察法、释放-重捕法^[7]和飞行时间法^[7]等。其中直接观察法可以直观地判断原子是否

收稿日期: 2011-01-27; **收到修改稿日期**: 2011-03-07

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAF06B08)和冷原子纳米尺度计量基准关键技术研究资助课题。

作者简介: 焦晓光(1985—),男,硕士研究生,主要从事激光冷却及原子光刻方面的研究。E-mail: jxgnim@163.com

导师简介: 钱 进(1957—),男,研究员,主要从事激光技术及冷原子纳米计量等方面的研究。

E-mail: qianjin@nim.ac.cn(通信联系人)

被冷却,但是无法定量给出原子的温度,只能定性评价激光冷却效果;释放-重捕法和飞行时间法虽然能够精确测定原子的温度,但是采用的设备都比较复杂,只应用于类似“光学黏胶”的大型实验中。20世纪末,Scholten等^[8]提出刀口测温法(简称刀口法)测量激光冷却温度。该方法不仅能够准确地测出原子的温度,而且采用的设备简单易用,适用于原子光刻。

本文介绍了刀口法,并搭建了刀口法实验装置。在现有的实验参数下,采用刀口法测量了激光冷却后铬原子束的角分布,并进一步得出了铬原子束的横向温度,定量评价了激光冷却准直效果。

2 刀口法原理

刀口法的基本原理:激光冷却后,原子束在传播过程中,受到刀口阻挡。在刀口阴影中,原子束角分布和原子束分布满足^[8]

$$P'(\alpha) = -L \frac{df(x)}{dx}, \quad (1)$$

式中 $P'(\alpha)$ 为刀口阴影中的原子束角分布, $f(x)$ 为原子束分布(即探测激光处荧光强度分布), x 的坐标原点为刀口在激光探测处的投影, L 为探测激光和刀口之间的距离。

原子束角分布与原子束横向温度满足^[9]

$$T_c = T_0 \frac{\alpha_0^2}{4(\sqrt{2}-1)}, \quad (2)$$

式中 α_0 为原子束角分布的半峰全宽(FWHM)。 T_c 为激光冷却铬原子束的横向温度, T_0 为原子炉温度。

3 刀口法装置及实验

依据刀口法测温原理,设计搭建了刀口法实验装置,如图1所示。该装置主要包括铬原子束、预准直孔、冷却激光、刀口、探测激光和 CCD 相机等6个部分。铬原子束由 GmbH-Effusion(VTS-CreaTec)高温原子炉加热铬粉产生,喷射方向沿 z 方向(定义 z 方向为纵向)。实验时,原子炉温度为 1823 K。预准直孔采用三孔系结构^[10],这种结构便于实验观察和定位。冷却激光沿 x 方向(定义 x 方向为横向)对射,两束激光的偏振态相同(实验采用多普勒冷却机制^[11]),实验时,采用感生荧光稳频技术^[12]将激光稳定到⁵²Cr原子的 $7S_3 \rightarrow 7P_0$ 跃迁上,对应的真空波长在 425.5 nm 附近。冷却激光的频率、功率、光斑大小等参数均可调。经过反复实验,得出冷却激光

的最佳参数(定性观察时,激光冷却现象最明显)是激光功率为 45 mW,失谐量为 -2.5 MHz,光斑大小为 1 mm×20 mm。刀口位置需要尽量紧邻冷却边缘。实验时,刀口和冷却边缘的纵向距离为 50 mm。刀口连接有控制端,可以横向移动。探测激光需要和刀口有一定距离。实验时,探测激光和刀口的纵向距离为 700 mm。CCD相机的分辨率为 1024 pixel×768 pixel,在 y 方向进行荧光观测^[13]。

刀口法测量的步骤^[14]如下:

- 1) 由 CCD 相机采集感生荧光(LIF)图像;
- 2) 由荧光图像得出荧光强度分布,即原子束强度分布,得出“ $f(x)-x$ ”。
- 3) 对 $f(x)$ 进行求导,依据(1)式进行适当的坐标变换得出刀口阴影中的原子束角分布“ $P'(\alpha)-\alpha$ ”,做对称,得出完整的原子角分布;
- 4) 求出原子束角分布的半峰全宽,代入(2)式,得出原子束的横向温度。

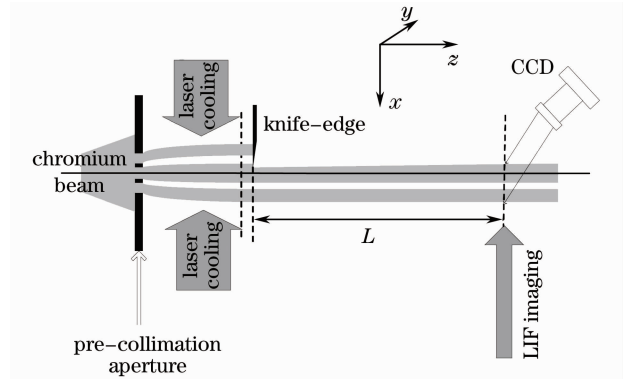


图1 刀口法测温装置

Fig. 1 Schematic of knife-edge thermometry

4 实验结果与分析

4.1 激光冷却现象观察

调整刀口位置,使铬原子束能够自由通过。调整激光功率为 45 mW,失谐量为 -2.5 MHz,光斑大小为 1 mm×20 mm。CCD 相机采用短焦镜头,此时采集到的荧光图像如图2所示。其中图2(a)为未冷却时的荧光图像,图2(b)为冷却后的荧光图像。由图2可以看出,经过激光冷却,荧光光斑的长度明显变小,强度明显增强。表明经过激光冷却,原子束的发散角已明显减小,激光冷却效果显著。

4.2 刀口法测量结果

在观察到明显的冷却现象之后,调整刀口位置,使刀口靠近三孔系结构中心,如图1所示。CCD相机换用长焦镜头,此时采集到的荧光图像如图3(a)

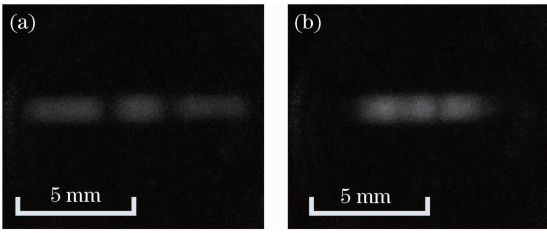


图2 LIF图像。(a)未冷却;(b)冷却

Fig.2 LIF image. (a) Without cooling; (b) cooling

所示。由图 3(a)可以看出,CCD采集到的荧光图像

有明显的噪声,要想得到准确的荧光强度信息,必须进行降噪处理^[15,16]。噪声主要来源是金属真空管道的漫反射和 CCD 相机自身噪声。这两种噪声都是加性噪声,因此采用多幅图像平均的方法去除噪声。首先拍摄 10 幅荧光图像,然后调整激光频率使其远离共振(此时没有荧光,其他参数不变),拍摄 10 幅背景图像。将 10 幅荧光图像叠加取平均,减去 10 幅背景图像叠加取平均,得到如图 3(b)所示的荧光图像(其中虚线所示位置即为探测激光中心位置)。

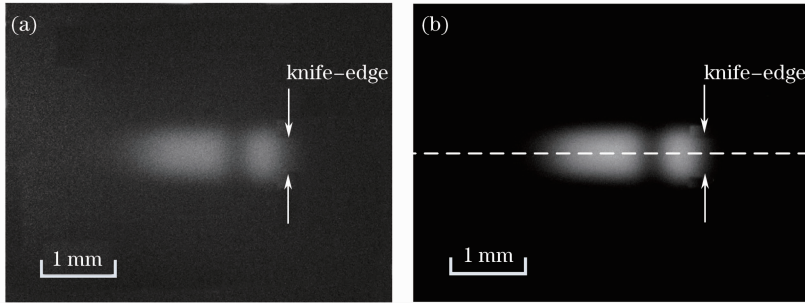


图3 荧光图像去噪处理。(a)未去噪;(b)去噪

Fig.3 LIF image denoising. (a) Without denoising; (b) denoised

按照第 3 节中介绍的刀口法测温步骤,选取图 3(b)中探测激光中心位置附近 10 行像素对应的荧光强度平均值作为 $f(x)$;对 CCD 相机进行校对(即在物距相同时,使用 CCD 相机拍摄标有刻度的游标卡尺),测得 CCD 单个像素在探测激光处对应的检测距离为 $5 \mu\text{m}$,依次将横坐标由像素点数转化为横向距离。由此做出“ $f(x)-x$ ”曲线,如图 4 中灰线所示(已进行归一化处理)。对 $f(x)$ 进行求导,如图 4 中黑线所示,刀口位置如图 4 中虚线所示。依据 $\alpha=x/L$ 将横坐标由 x 转化为 α ,导数图的反向峰(刀口处的反向峰)的右半峰即为刀口阴影中的角分布,做对称,得出完整的原子束角分布,如图 5 所示。

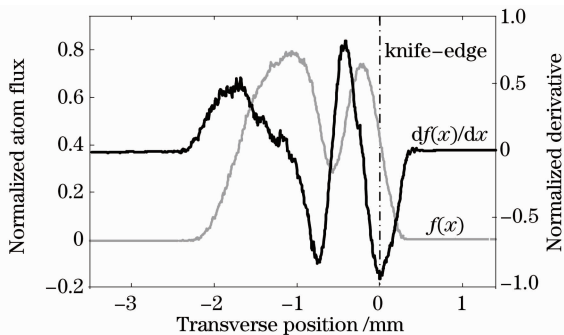


图4 刀口法测量

Fig.4 Knife-edge measurement

由图 5 得出原子束角分布的半峰全宽 α_0 为 0.616 mrad ,代入(2)式可得激光冷却后原子束横向温度为 $418 \mu\text{K}$ 。

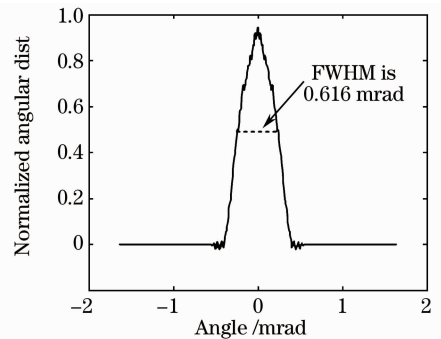


图5 原子束角分布

Fig.5 Atomic beam angular distribution

4.3 误差分析

刀口法测量的误差大小主要取决于荧光图片采集系统。实验中经过校对,CCD 单个像素对应的检测距离为 $5 \mu\text{m}$,依据 $\alpha=x'/L$ (其中 $x'=5 \mu\text{m}$)得出对应的角度为 0.007 mrad ,因此荧光图片采集系统的角度误差为 0.007 mrad 。此时,原子束角分布的半峰全宽应为 $(0.616 \pm 0.007) \text{ mrad}$,代入(2)式得出原子束的横向温度为 $(418 \pm 10) \mu\text{K}$ 。

5 结 论

在一维铬原子光刻平台上,进行了激光多普勒冷却准直铬原子束实验,并采用刀口法定量评价了激光冷却效果。最终测得激光冷却后铬原子束角分布的半峰全宽为 $(0.616 \pm 0.007) \text{ mrad}$,由此推断铬

原子束的横向温度为 $(418 \pm 10) \mu\text{K}$ 。这为优化调整激光冷却实验,进一步开展原子光刻提供了依据。

参 考 文 献

- 1 R. E. Behringer, Vasant Natarajan, G. Timp. Laser focused atomic deposition: A new lithography tool[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(8): 1034~1036
- 2 Liu Quan, Wu Jianhong, Yang Weipeng *et al.*. Fabrication of linearly chirped phase mask[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 677~682
刘全, 吴建宏, 杨卫鹏等. 线性啁啾相位掩模的研制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 677~682
- 3 Vasant Natatajan, R. E. Behringer, D. M. Tennant *et al.*. Nanolithography using a laser focused neutral atom beam[J]. *Microelectronics and Nanometer Structures*, 1995, **13**(6): 2823~2827
- 4 J. J. McClelland, R. E. Scholten, E. C. Palm *et al.*. Laser focused atomic deposition [J]. *Science*, 1993, **262**(5135): 887~890
- 5 Roger W. McGowan, David M. Giltner, Siu Au Lee. Light force cooling, focusing and nanometer-scale deposition of aluminum atoms[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(24): 2535~2537
- 6 Li Hailiang, Wu Jian, Zhu Xiaoli *et al.*. Fabrication and study of 2000 l/mm X-ray self-standing transmission gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2650~2655
李海亮, 吴坚, 朱校立等. 2000 l/mm X射线镂空透射光栅的制备研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2650~2655
- 7 Wang Yiqiu. Atom Traps and Laser Cooling [M]. Beijing: Beijing University Press, 2007. 175~182
王义遒. 原子的激光冷却与陷阱[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007. 175~182
- 8 R. E. Scholten, R. Gupte, J. J. McClelland *et al.*. Laser collimation of a chromium beam[J]. *Phys. Rev. A.*, 1997, **55**(2): 1331~1338
- 9 J. J. McClelland, M. R. Scheinfein. Laser focusing of atoms; a particle-optics approach[J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 1991, **8**(9): 1974~1986
- 10 Baowu Zhang, Tongbao Li, Yan Ma. One-dimensional Doppler laser collimation of chromium beam with a novel pre-collimating scheme[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 782~784
- 11 William D. Philips. Laser cooling and trapping of neutral atoms [J]. *Rev. Mod. Phys.*, 1998, **70**(3): 721~741
- 12 Zhang Baowu, Li Tongbao, Zheng Chunlan *et al.*. Theoretic analysis on laser frequency stabilization derived from Cr atomic beam laser induced fluorescence [J]. *China Measurement Technology*, 2006, **32**(3): 12~15
张宝武, 李同保, 郑春兰等. 铬原子束激光感生荧光稳频技术理论分析[J]. *中国测试技术*, 2006, **32**(3): 12~15
- 13 Cheng Cheng, Zeng Feng, Cheng Xiaoyu. Photoluminescence spectra of CdSe/ZnS-quantum dot doped fiber with high doping concentrations [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2698~2704
程成, 曾凤, 程潇羽. 较高掺杂浓度下 CdSe/ZnS 量子点光致荧光光谱[J]. *光学学报*, 2009 **29**(10): 2698~2704
- 14 Wang Zhanshan, Ma Shanshan, Ma Yan *et al.*. Knife-edge technique for laser cooling [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(1): 63~69
王占山, 马姗姗, 马艳等. 刀口技术在激光冷却中的应用[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(1): 63~69
- 15 Wang Xin, Zhao Dazun. Influence of noise to phase diversity wavefront sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2142~2146
王欣, 赵达尊. 图像噪声对相位变更波前传感的影响研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2142~2146
- 16 Deng Juxiang, Liang Yanmei. Noise reduction with wavelet transform in optical coherence tomographic images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2138~2141
邓菊香, 梁艳梅. 光学相干层析图像的小波去噪方法研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2138~2141