

用于增加三维磁光阱装载率的二维冷原子束系统

曾大吉¹, 黄敏¹, 章显², 黄凯凯¹, 陆璇辉¹

(1. 浙江大学物理学系, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江大学先进技术研究院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在原子干涉仪、原子陀螺仪等精密测量的领域中, 最基本也是最重要的一步就获得冷原子, 而当实验需要连续和高重复性的测量时, 对于冷原子的装载就会要求有更快的速率。为了能更快的装载冷原子, 就需要一束高通量、低速的冷原子束。在实验上实现了 ⁸⁷Rb 原子的二维冷却磁光阱 (2D-MOT) 的冷原子束, 其对 3D-MOT 的装载率为 2.8×10^9 atoms/s。该系统基于 ⁸⁷Rb 原子 2D-MOT+push beam 方案, 选择了红失谐为 20 MHz 功率为 50 mW 的两束入射冷却光, 在冷却光入射到真空腔之前使用扩束系统将其光斑扩束成短轴为 25 mm、长轴为 75 mm 的椭圆形光斑, 在冷却光入射真空腔之后在真空腔的另一端用镀了四分之一波片膜的反射镜来得到对射的激光。

关键词: 磁光阱; 冷原子束; 2D-MOT+push

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0506003

2D cold atomic beam system for increasing the loading rate of 3D MOT

Zeng Daji¹, Huang Min¹, Zhang Xian², Huang Kaikai¹, Lu Xuanhui¹

(1. Department of Physics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Institute of Advanced Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In the field of precision measurement such as atom interferometers and atom gyros, the most basic and important step was to obtain cold atoms. When experiments require continuous and highly reproducible measurements, the faster loading rate of cold atoms will be required. In order to load cold atoms faster, a high-flux, low-speed cold atomic beam was required. A 2D cooling system of ⁸⁷Rb atoms based on 2D-MOT+push beam scheme was built, the 3D-MOT loaded from the 2D-MOT was measured and a loading rate of 2.8×10^9 atoms/s was achieved. Two pairs of cooling beams with two mirrors with $\lambda/4$ coating were implemented. The beams were transformed into a shape which had an ellipse profile with 25mm short axis and 75 mm long axis, by using cylindrical lenses.

Key words: MOT; cold atomic beam; 2D-MOT+push

收稿日期: 2018-12-09; 修订日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(11474254); 中央高校基本科研业务费专项(2016XZZX004-01)

作者简介: 曾大吉(1990-), 男, 硕士生, 主要从事激光应用和冷原子物理与精密测量方面的研究。Email: zjwzdzj@163.com

导师简介: 陆璇辉(1957-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光应用和冷原子物理与精密测量方面的研究。Email: xhlu@zju.edu.cn

0 引言

在原子干涉仪^[1-4]、原子钟^[5-8]等精密测量的领域中,最基本也是最重要的一步就获得冷原子,同时为了得到更高的精度实验中往往就需要一束高通量、低速的冷原子束。

在冷原子实验发展的早期阶段,为了得到冷原子束通常是通过热炉得到热原子束,再加载一束红失谐的激光对热原子进行减速得到冷原子束。然而实验中的原子被减速后,感受到的多普勒频移发生变化,对于原来的激光吸收概率下降,导致减速效果不理想^[9]。为了解决这个问题,比较典型的方案有塞曼减速器^[10]和激光频率扫描^[11]。塞曼减速器是通过改变原子能级跃迁频率与冷却光实时保持一致来获得较好的减速效果,激光频率扫描则是通过改变激光频率来与原子跃迁频率实时保持一致来获得较好的减速效果。通常,通过塞曼减速器得到的冷原子束的通量都比较高,能有 $10^{11} \sim 10^{12}$ atoms/s 量级的通量。然而,为了得到平滑的磁场分布使得减速效果更佳,对于塞曼减速器的设计要求较高,另外塞曼减速器中的强磁场对于 MOT 的影响也需要考虑。

制备冷原子束的另一个方法是使用二维磁光阱冷却(2D-MOT),具有结构简单、紧凑、稳定、可获得大通量的预制冷原子等优点。具体实验设置上,2D-MOT 有多种方案,主要有 LVIS (Low-velocity intense source)^[12-14]、纯 2D-MOT^[15]、2D+-MOT^[16-18]以及 2D-MOT+push beam^[19-21]等方案。其中 LVIS 方案与平常的 3D-MOT 无异,区别只在于 LVIS 中轴向冷却光的反射镜有一个小孔,在 MOT 中心制备冷原子团后由于轴向不平衡的光,原子在轴向被推送出去形成原子束,能得到装载率为 5×10^9 atoms/s 的冷原子束^[12]。除去 LVIS 方案,其他 2D-MOT 型的方案在结构上都相差不多,其中最为基础的就是纯 2D-MOT 方案。为了得到更多的原子团,纯 2D-MOT 的磁场在轴向上(Z 方向)强度为零,X-Y 平面上磁场强度线性增大,如此加上 X-Y 平面内两对对射的激光就可以得到“原子长条”。实验中为了得到这样的磁场分布一般是用两对矩形反赫姆霍兹线圈得到。由于 Z 轴方向没有激光,原子在 X-Y 被“挤压”像 Z 轴两个方向出射得到原子束。这样得到的原子束由于

Z 轴两个方向都有出射,因此原子的利用率不够高,实验中可以得到 6×10^{10} atoms/s 的冷原子束^[15]。为了解决这点,其他两个 2D-MOT 的方案都在 Z 轴加上了激光。2D+-MOT 方案是在 Z 轴加了一束 push 光,同时在 2D-MOT 区域加一个 45° 斜角的反射镜,反射镜上镀了一层四分之一膜同时在中心开了一个小孔。引入一束功率或者频率与 push 光不同的激光,经过 45° 反射镜得到与 push 光方向相反同时又是空心的 retard 光。“原子长条”因此被 push 光推送出去之后经过空心 retard 光的减速和准直得到的原子束有比较低的纵向速度和发散角,在实验中可以得到 2×10^{10} atoms/s 的冷原子束。2D-MOT+push beam 方案在纯 2D-MOT 的基础上在轴向加上一束 push 光,对比起 2D+-MOT 方案,2D-MOT+push beam 方案得到的原子束由于在 Z 轴上没有 retard 光,因此原子束的纵向速度和发散角会相对较大,但原子束的通量会有大的提升。并且 2D+-MOT 方案由于需要在真空腔内放置一个反射镜,对于真空加工会有一定的难度。因此为了得到结构简单稳定的实验装置和更高通量、装载率的原子束,实验中 J.Catani 小组获得了 1×10^{11} atoms/s 的冷原子束^[21]。对于一些精密测量、BEC(玻色爱因斯坦凝聚态)以及原子钟实验中需要大量的冷原子,常规的冷原子团制备方法(3D-MOT)存在背景气体干扰、制备时间长等不利因素,2D-MOT 就有消除背景气体干扰和提高 3D-MOT 装载率的优点来为 3D-MOT 提供冷原子团。在实验中,选择了基于 ^{87}Rb 原子的 2D-MOT+push beam 方案,实验装置示意图如图 1 所示。可以看出实验由两个部分组成,制备 ^{87}Rb 冷原子束的 2D-MOT 和装载原子的 3D-MOT。

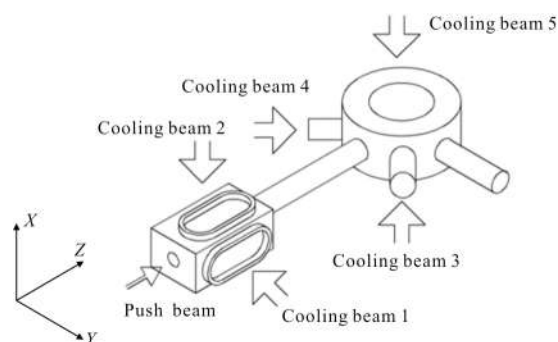


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

1 实验系统

一般来说,实验中 2D-MOT 中的磁场由两对矩形磁场线圈提供,除了矩形线圈,也有许多采用其他构造的反赫姆霍兹线圈的 2D-MOT,比较常见的还有跑道型线圈和马鞍形线圈,如图 2 所示。

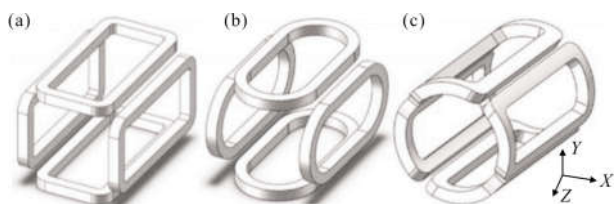


图 2 三种磁场线圈模型^[21]

Fig.2 Three magnetic field coils models^[21]

这三种线圈产生的磁场都是四极型磁阱,对于原子的捕获都有比较好的效果。在轴向所产生的磁场分布也基本类似,如图 3 所示。

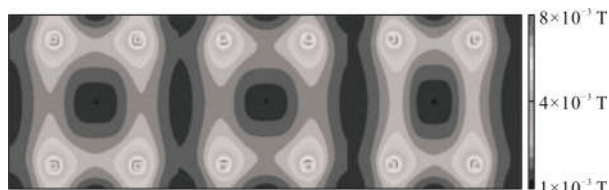


图 3 三种磁场线圈轴向磁场分布^[21]

Fig.3 Axial magnetic field distributions of three magnetic coils^[21]

实验中选择了跑道型线圈,实验所用的线圈每层绕 23 匝,共 11 层,线圈架尺寸宽为 20.7 mm,高为 9.9 mm,在电流为 1.7 A 时可以得到 10 Gs/cm 的磁场梯度。同时,为了进一步消除线圈装配和制造所造成的的磁场误差,避免磁场 Z 轴与出射管道错位,实验中四个磁场线圈都由单独电流源供电。可以控制每个线圈的电流大小来改变磁场零点在 X-Y 平面内的位置。实验中用了三个频率的激光,分别为 cooling 光、push 光和 repump 光。其中 cooling 光共有五束,其频率都与 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 跃迁频率有 20 MHz 的负失谐。其中两束 cooling 光经过一个四分之一波片变成圆偏振光之后,通过扩束准直筒扩束成直径为 25 mm 的光斑,再经过一组棱柱凹凸透镜组将光斑扩束成 25 mm×75 mm 的椭圆光斑,入射进入 2D-MOT 经过镀四分之一膜的反射镜后得到两对对射的激光。其他三束 cooling 光经过扩束到 30 mm

直径之后进入 3D-MOT。Push 光扩束成光斑 3 mm 直径从轴向入射,偏振为线偏振,同时频率设置为与 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 跃迁频率有 30 MHz 的负失谐。Repump 光有两束,2D-MOT 和 3D-MOT 各有一束,频率设置为 $|F=1\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ 的跃迁共振频率,见图 4。

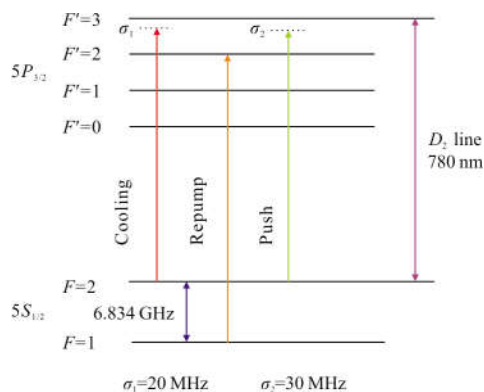


图 4 基于 ⁸⁷Rb 的激光频率设置示意图

Fig.4 Schematic of laser frequency setting based on ⁸⁷Rb

实验中这三束光由两台激光器提供,cooling 光和 push 光来自德国 Toptica 公司的 DL pro,repump 光则来自国产的 UniQuanta 外腔半导体激光器。

除了在线圈的选择上与已有的 2D-MOT+push beam 方案有所区别之外,冷原子束不仅可以连续输送,而且可以脉冲式输送。在实验的数据收集上,已有的方案是通过探测光收集荧光数据来计算得到实验结果,通过后面的 3D-MOT 直接测量捕获原子团来得到实验结果,更贴近实际情况。

2 结果和讨论

在 10 G/cm 的横向磁场梯度,每束冷却光功率入射为 50 mW 的参数设置下,通过 CCD 观测到 ⁸⁷Rb 原子被囚禁在二维磁光阱中的图像,图 5 是原子团在轴向的投影和在侧面的图像。采用荧光成像法测量原子数。在光电放大模块 C10439-02 的低增益模式下,实验得到 80 mV 的原子荧光信号,通过查询相应的手册数据,得到对应的荧光实际功率为 20 nW,荧光与粒子数的转换关系如公式(1)所示^[23-24]:

$$N = \frac{16P^2}{D^2 \hbar\omega} \cdot \left(\frac{\Gamma}{2} \cdot \frac{C_1^2 \Omega^2 / 2}{\delta^2 + \Gamma^2 / 4 + C_2^2 \Omega^2 / 2} \right)^{-1} \quad (1)$$

式中:P 为探测到的荧光功率;l 为原子到观察窗的距离;D 为观察窗直径;ħω 为光子能量;Γ 为原子自

发辐射率; Ω 为拉比频率; δ 为激光失谐量; C_1 与 C_2 是与相关塞曼子能级布局有关的参量。在弱光近似下 $C_1=C_2=0.46$, 最终得到原子个数为 1.9×10^{11} 。

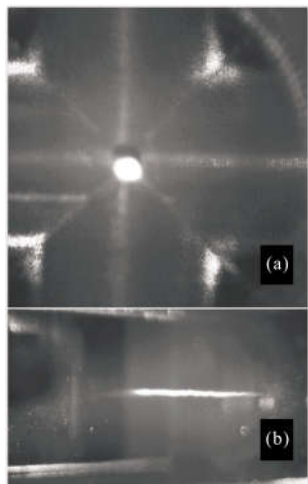


图 5 原子团的轴向(a)和侧面(b)图像

Fig.5 Axial (a) and side (b) image of atomic cluster

实验中采用黏团扩展法来测量二维冷却温度。其基本过程是,首先完全关断磁场和冷却光,使原子做自由扩散运动,在特定时间后照射激光激发原子的荧光信号,通过 CCD 拍照得到冷原子横向的大小尺寸。再根据不同时刻的原子尺寸大小可估算得到冷原子团的温度。得到实验纵向原子团如图 6 所示。

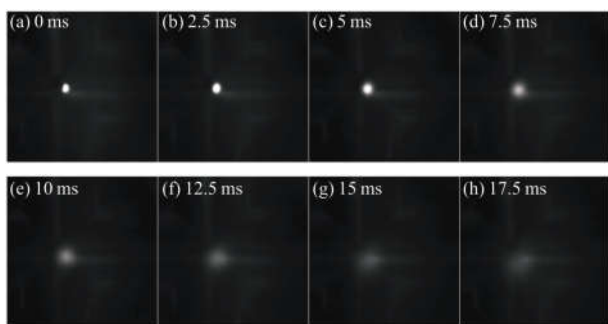


图 6 原子团的横向自由扩散

Fig.6 Free diffusion of atomic cluster in the transverse direction

该方法的温度计算公式为:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \frac{a^2(t_2) - a^2(t_1)}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中; m 为铷原子质量; k_B 为玻尔兹曼常数; $a(t)$ 为 t 时刻原子团 $1/e$ 强度半径。得到原子横向温度约为 $350 \mu\text{K}$ 。

测量了二维冷却原子束对 3D-MOT 的装载率。

3D-MOT 中的光与 2D-MOT 的光同频率,通过三根光纤引入到放大准直筒,功率大小为 10 mW 每束,使用四分之一波片与全反镜来得对射的三束反射光,从而得到六束冷却光。再泵浦光在耦合进光纤之前与其中一束冷却光合束。

图 7 为 CCD 探测的 2D-MOT 冷原子束装载到 3D-MOT 的原子团。

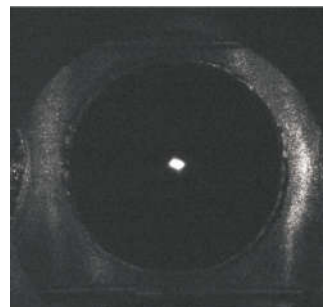


图 7 3D-MOT 中捕获的原子团

Fig.7 Atomic cluster trapped in the 3D-MOT

3D-MOT 装载率的数据测量方法如下: 实验中给 3D-MOT 的磁场一个周期性时序,通过光电管获得装载原子时电压幅值随时间的变化,再通过公式(2)获得原子装载的数目,除以装载时间就得到原子的装载率。可以看出装载率代表的是 3D-MOT 中原子的捕获速率,更高的装载率代表在 3D-MOT 中每秒能捕获的冷原子数越多。最终实验结果如图 8 原子装载率随 push 光功率的变化(此时 cooling 保持为 50 mW); 与图 9 原子装载率随 2D-MOT 中 cooling 光功率的变化(此时 push 光功率保持在 2.5 mW)。

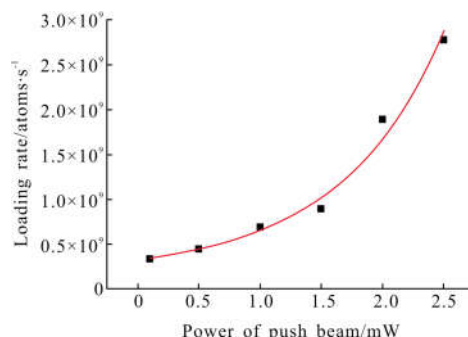


图 8 原子装载率随 push beam 功率的变化

Fig.8 Variation of atomic loading rate with the power of push beam

从图中可以看到,随着 push 光的增强,原子所感受到的散射力也随之变大,“原子长条”中被推送

出去的原子越多,同时此时原子获得的纵向速度更高,在 3D-MOT 中的装载率也随之上升。同样的,随着 cooling 光功率的增加,对应的 CCD 中的图像会更亮,在 2D-MOT 区域捕获的原子数会越多,会有更多的原子被推送出去,3D-MOT 中的装载率也随之上升。然而从图 9 中可以看出原子的装载率会有一些的饱和现象,这是因为在 2D-MOT 中,虽然冷却光的加强会增加 2D-MOT 中冷原子的捕获能力,但也会“加热”原子——原子间的相互碰撞更加剧烈使得被俘获的原子逃逸出去。当两者平衡时就会出现饱和现象。理论上 push 光也会有饱和现象,如果实验中能继续提高 push 光的功率,理论上会得到更高的装载率。由于实验中的功率限制 push 光最多能得到 2.5 mW 的功率,因此未能看见饱和现象,从实验中可以看出 cooling 光和 push 光对于装载率有比较大的影响,除这两个因素外,cooling 光和 push 光的失谐量也是一个比较重要的因素,因此实验中需要选择一个合适的失谐量。总之,上述这些参数是相互影响的,一般通过实验优化这些参数,可以提高装载率。

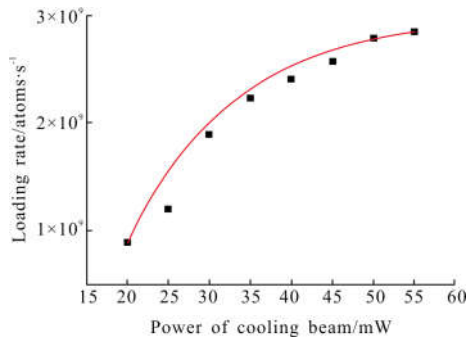


图 9 原子装载率随 cooling 光功率的变化

Fig.9 Variation of atomic loading rate with the power of cooling beam

3 结论

基于 ⁸⁷Rb 原子的 2D-MOT+push beam 方案,在实验上实现了横向温度为 350 μK 的二维冷却的冷原子束,3D-MOT 装载率为 2.8×10⁹ atoms/s。这个量级的装载率已经能够符合后续实验的需求和实际应用,也有课题组制备出 2.0×10⁹ atoms/s 装载率的 2D-MOT,并将其用于重力仪的研究,取得良好的结果^[25]。并且,在实验上对影响装载率的相关因素进行了测量和分析。该冷原子束为原子干涉仪、原子陀螺仪等实验提供了预冷制的原子,也可以为基于冷原

子的科学实验提供参考。

参考文献:

- [1] Fixer J B, Foster G T, McGuirk J M, et al. Atom interferometer measurement of the newtonian constant of gravity [J]. *Science*, 2007, 315(5808): 74-77.
- [2] Mülle H, Peters A, Chu S. A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves [J]. *Nature*, 2010, 463(7283): 926-929.
- [3] Xue H B, Feng Y Y, Chen S, et al. A cold atomic beam interferometer [J]. *J Appl Phys*, 2014, 117(9): 4913711.
- [4] Muller H, Chiow S W, Long Q, et al. Atom interferometry with up to 24-photon-momentum-transfer beam splitters [J]. *Phys Rev Lett*, 2008, 100(18): 180405.
- [5] Gibble K, Chu S. 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.
- [6] Devenoges L, Stefanov A, Joyet A, et al. Improvement of the frequency stability below the dick limit with a continuous atomic fountain clock [J]. *IEEE Transon Ultrason. Ferroelectr and Freq Control*, 2012, 59(2): 211-217.
- [7] Wang H, Iyanu G. MOT-based continuous cold Cs-beam atomic clock [C]//2010 IEEE International Frequency Control Symposium, 2010: 454-458.
- [8] Vanier J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review [J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(4): 421-442.
- [9] Wang Yiqiu. Atomic Laser Cooling and Trap [M]. Beijing: Peking University Press, 2007. (in Chinese)
- [10] Pordan J, Migdall A, Phillips W D, et al. Stopping atoms with laser light [J]. *Phys Rev Lett*, 1985, 54(10): 992-995.
- [11] Balykin V I, Letokhov V S, Mishin V I. Cooling of sodium atoms by resonant laser emission [J]. *Zeitschrift Fur Phys*, 1980, 78: 1376-1385.
- [12] Lu Z T, Corwin K L, Renn M J, et al. Low-Velocity Intense Source of Atoms From a Magneto-optical Trap [M]. Hong Kong: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2008: 420-423.
- [13] Feng Y Y, Zhu C X, Wang X J, et al. Characterization of a velocity-tunable ⁸⁷Rb cold atomic source with a high-speed imaging technology [J]. *Chin Phys B*, 2009, 18(8): 3373-3278.
- [14] Wang X J, Feng Y Y, Xue H B, et al. A cold ⁸⁷Rb atomic beam [J]. *Chin Phys B*, 2011, 20(12): 126701.
- [15] Dieckmann K, Spreew R J C, Weidemülle, et al. Two-

- dimensional magneto-optical trap as a source of slow atoms [J]. *Phys Rev A*, 1998, 58(5): 3891–3895.
- [16] Wang H, Buell W F. Velocity-tunable magneto-optical-trap-based cold Cs atomic beam [J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, 20(10): 2025–2030.
- [17] Chaudhuri S, Roy S, Unnikrishnan C S. Realization of an intense cold Rb atomic beam based on a two-dimensional magneto-optical trap: Experiments and comparison with simulations [J]. *Phys Rev A*, 2006, 74(2): 023406.
- [18] Fang J C, Lu Q, Zhang Y C, et al. Compact high-flux cold cesium beam source based on a modified two-dimensional magneto-optical trap [J]. *J Opt Soc Am B*, 2015, 32(5): B61–B66.
- [19] Wohlleben W, Chevy F, Madison, Dalibard J. An atom faucet [J]. *Eur Phys J D*, 2001, 15(2): 237–244.
- [20] Cacciapuoti L, Castrillo A, de Angelis M, et al. A continuous cold atomic beam from a magneto-optical trap [J]. *Eur Phys J D*, 2001, 15(2): 245–249.
- [21] Catani J, Maioli P, De Sarlo L, et al. Intense slow beams of bosonic potassium isotopes [J]. *Phys Rev A*, 2006, 73(3): 033415.
- [22] Fan P G, Wu Y M, Jia S, et al. Optimal design of two-dimensional magneto optical trap field coils for cold atom interferometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0618003.
- [23] Townsend C G, Edwards N H, Cooper C J, et al. Phase-space density in the magneto-optical trap [J]. *Phys Rev A*, 1995, 52(2): 1423–1440.
- [24] Gabbanini C, Evangelista A, Gozzini S, et al. Scaling laws in magneto-optical traps [J]. *Europhys Lett*, 1997, 37(4): 251–256.
- [25] Wu B, Wang Z Y, Cheng B. A study of the μ -Gal-level cold atom gravimeter [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(S1): 47–52.