

基于蒙特卡罗方法进行冷原子束模拟和参数优化

陈 姝^{1,2} 冯焱颖^{2,3} 薛洪波⁴ 熊继军¹

¹ 中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

² 清华大学精密仪器与机械学系精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

³ 清华大学精密测量联合实验室, 北京 100084

⁴ 中国科学院空间科学与应用研究中心太阳系探测研究室, 北京 100190

摘要 采用蒙特卡罗方法对基于制备低速浓密原子源(LVIS)产生的三维磁光阱(3D MOT)冷原子束过程进行模拟和系统性能参数优化。在 Matlab 软件中产生位移满足均匀分布, 速度满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布的 10^7 个原子, 通过仿真计算得到冷原子束的纵向速度分布和原子通量等关键参数。当冷却光光强为 3 mW/cm^2 , 失谐量为 5Γ 时, 模拟得到的原子束的纵向最概然速率为 8 m/s , 速度分布的半峰全宽(FWHM)约为 2 m/s 。模拟和实验研究了原子束最概然速率和通量随冷却光光强和失谐量变化的关系, 结果表明冷却光失谐量为影响冷原子束速度分布和通量的主要因素, 而冷却光功率在达到一定饱和强度后对原子束性能影响不大。

关键词 原子与分子物理学; 冷原子束; 低速浓密原子源; 蒙特卡罗

中图分类号 O562.5; O431.2 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0518001

Monte Carlo Method for Simulation and Parameter Optimization Cold Atomic Beam

Chen Shu^{1,2} Feng Yanying^{2,3} Xue Hongbo⁴ Xiong Jijun¹

¹ Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

² State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

³ Joint Institute of Measurement Science, National Institute of Metrology-Tsinghua University, Beijing 100084, China

⁴ State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract We simulate the production of cold atomic beam in low velocity intense source (LVIS) with Monte Carlo method. Start with 10^7 atoms, the initial positions of the atoms are chosen randomly and the initial velocities are chosen according to Maxwell-Boltzman distributions. According to the simulation result, the longitudinal velocity of the cold atomic beam is 8 m/s and its full width at half maximum (FWHM) is 2 m/s when the intensity of the cooling beam is 3 mW/cm^2 and its detuning is 5Γ . The variation of the atomic beam flux and the longitudinal velocity with the detuning and intensity of the cooling beam is also simulated. The results show that the detuning of the cooling beam is the main parameter impact on the longitudinal velocity distribution and flux of the cold atomic beam, and the intensity of the cooling beam has a little influence on the cold atomic beam when it is up to the saturated intensity.

Key words atomic and molecular physics; cold atomic beam; low velocity intense source; Monte Carlo

OCIS codes 020.1335; 020.3320; 020.7010; 020.7490; 140.3320

收稿日期: 2014-01-13; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家 973 计划(2010CB922901)

作者简介: 陈 姝(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事原子物理、冷原子束和量子光学等方面的研究。

E-mail: chenshufighting@163.com

导师简介: 冯焱颖(1977—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事原子光学及其在惯性和磁场传感领域的应用等方面的研究。E-mail: yyfeng@tsinghua.edu.cn(通信联系人)

1 引言

近年来,冷原子束在量子频标^[1]、原子干涉仪^[2]、玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)实验^[3]、原子光刻^[4]等研究领域得到广泛的应用。速度分布窄、发散角小、通量大的冷原子束成为这些研究领域中通用的技术手段。

产生冷原子束的方法大致可以分为两类。一类方法为基于多普勒冷却原理对热原子束进行减速和冷却从而获得冷原子束,如塞曼减速器^[5]、激光扫频^[6]、宽频激光^[7]等手段。这类方法由于系统较复杂,得到的冷原子束速度分布宽、发散角大等原因,目前已经较少使用。

另一类方法是采用激光冷却的方法,直接从原子蒸汽室中利用磁光阱(MOT)产生冷原子束。该类方法又根据光场和磁场的构型分为 2D MOT、2D+MOT和 3D MOT 三种。2D MOT 采用四极磁场和横向(垂直于原子束出射方向)冷却光对原子进行二维冷却和陷阱,在原子束出射方向不施加磁场和推射光作用。Schoser 等^[8]采用此方法产生的原子束通量达到 6×10^{10} atoms/s,最概然纵向(原子束出射方向)速度约为 50 m/s。2D+MOT 则是在 2D MOT 的基础上,施加了纵向的冷却光,进一步降低了原子束的纵向温度。Chaudhuri 等^[9]利用该方法实现的冷原子束通量为 2×10^{10} atoms/s,最概然纵向速度为 15 m/s,纵向速度分布半高全宽(FWHM)约为 3.5 m/s,发散角为 26 mrad。3D MOT 方式产生的冷原子束系统,典型的是所谓的低速浓密原子源(LVIS),最早由 Lu 等^[10]提出,与 2D+MOT 方式不同的是采用的磁场在三个方向上具有磁场梯度(标准的三维磁光阱磁场),因而不仅在三个方向上均有原子的冷却,而且也都有陷阱作用,因此对于脱离原子束出射方向的原子具有再回收的能力。Lu 实现的 LVIS 系统获得的原子通量为 5×10^9 atoms/s,最概然纵向速度约为 14 m/s,纵向速度分布的 FWHM 约为 2.7 m/s。上述基于原子蒸汽室的冷原子束制备方法,由于实验装置相对简单,产生的原子束纵向和横向温度低,目前被广泛使用^[11-13]。

冷原子束由于纵向和横向冷却温度低,而且是连续的,不仅可以用于 3D MOT 的装载以获得大原子数目的原子陷阱或者用于产生 BEC,而且可以直接用作原子干涉仪^[2]或者原子频标系统^[14]的原子光源。当被直接用于后者目的时,为了提高干涉仪的灵敏度或者频标系统的频率不稳定性,目前的冷原子束制备

方法在通量和纵向/横向温度方面都有待进一步提高。因此从第一性原理出发,对冷原子束的制备过程进行建模仿真和参数优化对于优化冷原子束制备系统并提出新的制备思路具有重要意义。

本文采用蒙特卡罗方法对基于 3D MOT 方法的 LVIS 系统产生的冷原子束制备过程进行仿真,并与实验结果进行对比。通过对原子蒸汽室中的原子状态进行随机观察抽样,利用 Matlab 平台可以在较短计算时间内获得原子束制备过程的模拟,并获得原子束通量和纵向速度分布等关键参数。值得提出的是该计算方法同样适用于 2D MOT 和 2D+MOT 方式产生的原子束的模拟,因此具有一定的通用性。

2 实验系统

实验中采用的 LVIS 系统在本课题组以前的文章^[13]中有详细介绍。如图 1 所示,该系统是由三对 $\sigma+$ 与 $\sigma-$ 对射光和一对反亥姆霍兹线圈组成的,其中 $\sigma-$ 光是 $\sigma+$ 经由 $\lambda/4$ 波片和反射镜获得的。将原子束路径上的 $\lambda/4$ 波片和反射镜中心钻一个 1 mm 的小孔,在此路径上形成不平衡的光辐射压力,实现不平衡磁光阱结构。

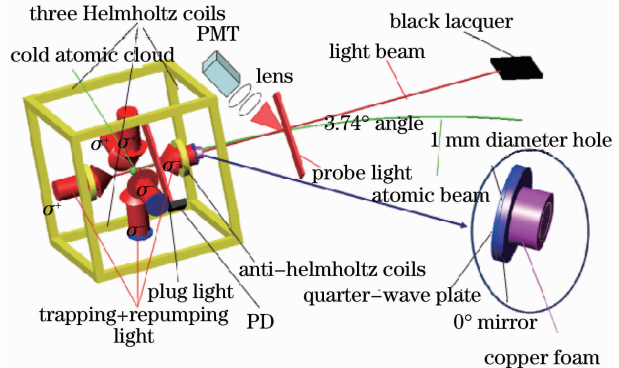


图 1 LVIS 系统图

Fig. 1 Schematic of the LVIS system

冷却光由一台输出约 60 mW 的半导体激光器 (Toptica, DL100) 产生,将其锁定在 ^{87}Rb 原子 $5S_{1/2} (F=2) \rightarrow 5P_{3/2} (F'=3)$ 跃迁,冷却光经声光调制器产生 30 MHz 的红失谐,冷却光直径为 50 mm,光强为 4 mW/cm^2 ;再抽运光由另一台相同型号的激光器提供,将其锁定在 $5S_{1/2} (F=1) \rightarrow 5P_{3/2} (F'=2)$ 跃迁,通过光纤耦合器耦合在冷却光中,功率约 12 mW。

原子束的通量和纵向速度分布采用飞行时间法进行测量,其基本原理为用一束阻断光将原子束切断,在距阻断光 0.6 m 的位置处设置一束与原子束垂直相交的检测光,如图 1 所示。两束光均锁定在

$5S_{1/2}(F=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F'=3)$ 跃迁, 检测光功率密度为 0.24 mW/cm^2 , 阻断光功率密度为 3 mW/cm^2 。由于原子束内原子的纵向速度不同, 不同速度的原子到达检测区域处的时间不同, 利用

荧光法可得到随时间变化的荧光信号, 如图 2(a) 所示。对此结果微分, 即可得原子束速度分布及最可几速度, 如图 2(b) 所示, 并可计算得原子束通量。

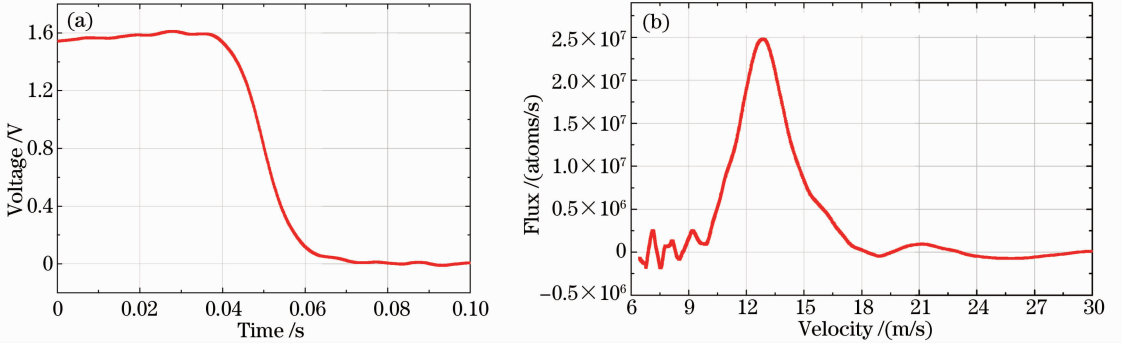


图 2 (a) TOF 信号; (b) 冷原子束的纵向速度分布曲线。最可几速度为 12.5 m/s , FWHM 为 3 m/s

Fig. 2 (a) Signal of TOF; (b) longitudinal velocity distribution curve of the cold atomic beam. The longitudinal velocity is 12.5 m/s , and its FWHM is 3 m/s

3 基于蒙特卡罗方法的数值模型

原子在真空中的位置是均匀分布的, 但其速度分布满足麦克斯韦-玻尔兹曼分布(其速率是三个独立、呈正态分布的速度分量 v_x 、 v_y 和 v_z 的平方之和的平方根), 所以在模拟冷原子束的制备时, 首先要产生满足均匀分布和麦克斯韦-玻尔兹曼的随机数。

原子在磁光阱中受到的力可由散射力来表示^[15], 即

$$F_{\pm} = \pm \frac{\hbar k \gamma}{2} \frac{s_0}{1 + s_0 + (2\delta_{\pm}/\gamma)^2}, \quad (1)$$

式中 Γ 是原子跃迁的自然线宽, $\hbar = h/2\pi$, h 是普朗克常数, k 是激光束的波矢, $s_0 = I/I_{\text{sat}}$ 是冷却光的饱和因子, 其中 I 是冷却光光强, I_{sat} 是饱和光强(对铷的 D_2 线跃迁, I_{sat} 的值为 1.6 mW/cm^2)。

每束激光束的失谐量 δ_{\pm} 为

$$\delta_{\pm} = \delta \mp \mathbf{k} \cdot \mathbf{v} \pm \mu' B / \hbar. \quad (2)$$

式中 δ 是冷却光相对共振频率的失谐量, \mathbf{v} 是原子的速度, $\mu' \equiv (g_e m_e - g_g m_g) \mu_B$ 是联系上、下两能级跃迁的有效磁矩。 $B = \Delta B \cdot \mathbf{z}$, ΔB 是由反亥姆霍兹线圈产生的磁场梯度。

对 LVIS 系统, 在沿原子束出射方向的反射镜和 $\lambda/4$ 波片中心有 1 mm 的小孔, 以形成辐射压力不平衡, 将原子束经小孔推出。所以当原子处于小孔所在圆柱体位置时, 仅受到沿原子束出射方向的推射光的作用。

选择冷却光和原子每间隔 $10 \mu\text{s}$ 作用一次^[12], 经 20 ms ^[16] 使原子被充分冷却并形成原子束。在此

过程中, 当原子超出冷却光所在位置时, 程序中将从模拟样本中去掉该原子, 即认为原子打在真空腔壁上。冷却光束直径为 50 mm , 在原子束出射方向(z 轴方向), 当原子满足 $z > 25$ 时, 认为原子已形成原子束经 1 mm 小孔出射, 因此不再受冷却光的作用。

以 10 个原子为例, 在 Matlab 软件中模拟得到的其在 LVIS 系统中的轨迹如图 3 所示, 当原子满足被磁光阱囚禁的条件时, 则被激光冷却并形成原子束, 若不满足囚禁条件, 则始终保持在真空腔内运动。

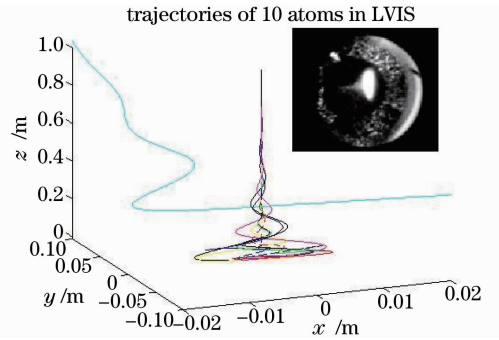


图 3 在 Matlab 中模拟 10 个原子的运动轨迹以及和实验中原子团的对比

Fig. 3 Simulated trajectory of 10 atoms in Matlab and its comparison chart in experiment

4 结果与讨论

考虑到 Matlab 软件的计算能力及运行时间问题, 选取 10^7 个原子来模拟原子在 LVIS 系统中的状态。在三维方向上分别产生位移满足均匀分布, 速度满足正态分布的随机数, 且三维方向分别受到

F_{\pm} 的作用。经 20 ms 的时间,原子被冷却并形成原子束,统计 v_z 方向原子速度分布,即为 LVIS 系统中原子束的纵向速度分布。模拟时保持磁场不变,三维方向上磁场梯度均为 10 G/cm。如图 4 所示为模拟得到的原子束的纵向速度分布,其分布满足高斯线型。图中的插图为同样条件下的实验测得的原子束的纵向速度分布。

当冷却光失谐量为 5Γ 时,模拟得到原子束最概然速率和通量随冷却光光强的变化趋势如图 5 所示。由图中可以看出,原子束的通量随着冷却光光强的增加而增加,并在 3 mW/cm^2 时 ($I_{\text{sat}} = 1.62 \text{ mW/cm}^2$) 达到饱和。而冷原子束的纵向最概然速率随冷却光光强的增加而缓慢增加,但变化并不明显。

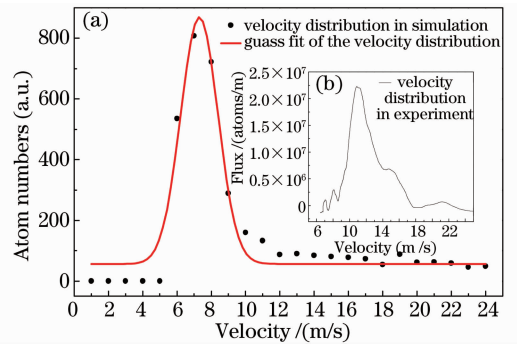


图 4 模拟得到的原子束纵向速度分布和实验结果对比。(a) 模拟得到的原子束纵向速度分布及高斯拟合;(b) 相同条件下,实验中得到的结果
Fig. 4 Comparison of the longitudinal velocity in simulation and experiment. (a) Numerical result of the longitudinal velocity distribution by Monte-Carlo; (b) experimental result in the same situation

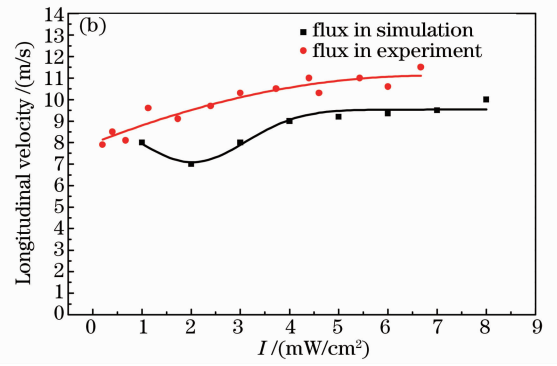
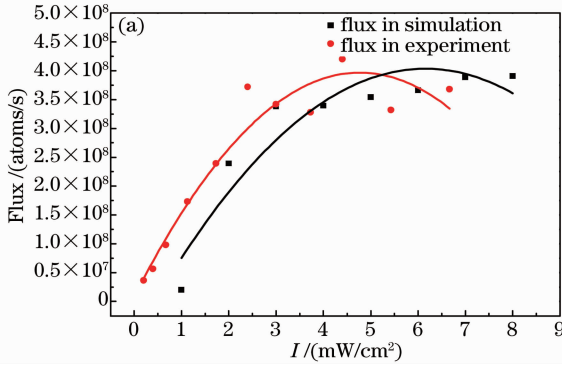


图 5 原子束最概然速率和通量随光强变化趋势。(a) 原子束通量随光强变化趋势;(b) 原子束最概然速率随光强变化趋势。黑色点为模拟结果,红色点为实验结果

Fig. 5 Atomic flux and peak velocity as a function of the cooling beam power. (a) Atomic flux as a function of the cooling beam power; (b) atomic peak velocity as a function of the cooling beam power. The black dot is the numerical result and the red dot is the experimental result

当冷却光光强为 3 mW/cm^2 时,模拟得到原子

束纵向最概然速率和通量随冷却光失谐量的变化趋

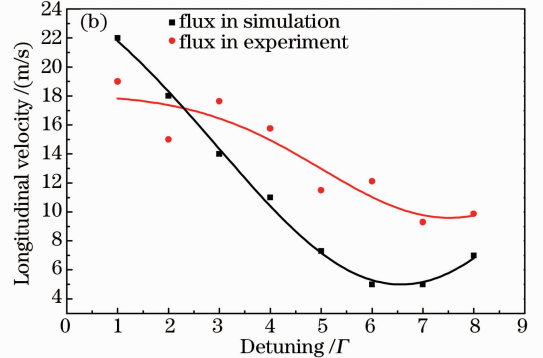
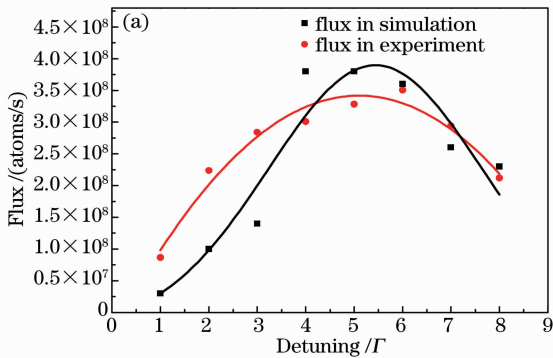


图 6 原子束最概然速率和通量随失谐量变化趋势。(a) 原子束通量随失谐量变化趋势;(b) 原子束最概然速率随失谐量变化趋势,黑色点为模拟结果,红色点为实验结果

Fig. 6 Atomic flux and peak velocity as a function of the cooling beam detuning. (a) Atomic flux as a function of the cooling beam detuning; (b) atomic peak velocity as a function of the cooling beam detuning. The black dot is the numerical result and the red dot is the experimental result

势,如图 6 所示。从图中可以看到,原子束通量在冷却光失谐量为 5Γ 时达到最大,而原子束的纵向最概然速率则随着冷却光失谐量的增加而减小,并在约 7Γ 达到最低。由此可见,冷却光失谐量是影响冷原子束纵向最概然速率和通量的主要因素。冷却光的功率则主要影响冷原子束的通量,并在达到一定光强时冷原子束通量趋于饱和。模拟结果与同样条件下的实验结果相比较,基本变化趋势一致,通量数据基本在同一量级,但模拟的速度要低于实验测得的原子束速度。这一方面是由于真实实验条件很难与模拟条件完全一致;另一方面是由于实验测试中,测试区距离原子出射口较远,速度较低的原子由于重力作用不能到达检测区而只有速度较高的原子才能被检测到。但模拟结果已经基本能够仿真冷原子束的形成过程并用于系统的参数优化。

5 结 论

采用蒙特卡罗方法对基于 3D MOT 方式产生的冷原子束进行了仿真,获得了冷原子束通量和纵向速度分布等关键参数。将模拟结果和实验结果比较,证明了该方法在用于预测冷原子束性能参数和优化系统的可行性。模拟结果表明:冷却光的失谐量是影响冷原子束通量和速度分布的主要因素。冷却光的功率在达到一定饱和光强后对冷原子束的通量和速度分布影响不大。模拟结果与实验结果吻合得较好。

下一步工作将进一步完善数值算法,逐步开展各设计和工作参数对冷原子束横向速度分布的影响研究,并对磁场分布和光场分布对冷原子束的性能影响进行探讨。并将该方法用于对基于 2D MOT 和 2D+MOT 方式的冷原子束制备过程的模拟,将三种冷原子束产生方法进行对比,以期获得更好光学性能的冷原子束系统的设计。

参 考 文 献

- 1 G Di Domenico, L Devenoges, C Dumas, *et al.*. Combined quantum-state preparation and laser cooling of a continuous beam of cold atoms[J]. *Physical Review A*, 2010, 82: 053417.
- 2 H B Xue, Y Y Feng, X J Wang, *et al.*. Note: Generation of Raman laser beams based on a sideband injection-locking technique using a fiber electro-optical modulator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(4): 046104.
- 3 K B Davis, M O Mewes, M R Andrews, *et al.*. Bose-Einstein condensation in a gas of sodium atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(22): 3969–3973.
- 4 P Engels, S Salewski, H Levens, *et al.*. Atom lithography with a cold, metastable neon beam[J]. *Appl Phys B*, 1999, 69(5-6): 407–412.
- 5 W D Phillips, H Metcalf. Laser deceleration of an atomic beam [J] *Physical Review Letters*, 1982, 48(9): 596–599.
- 6 M A Joffe, W Ketterle, A Martin, *et al.*. Transverse cooling and deflection of an atomic beam inside a Zeeman slower[J]. *J Opt Soc Am B*, 1993, 10(12): 2257–2262.
- 7 R Calabrese, V Guidi, P Lenisa, *et al.*. Transverse laser cooling of ions in a storage ring[J]. *Optics Communications*, 1996, 123 (4-6): 530–534.
- 8 J Schoser, A Batär, R Löw, *et al.*. Intense source of cold Rb atoms from a pure two-dimensional magneto-optical trap [J]. *Physical Review A*, 2002, 66: 023410.
- 9 S Chaudhuri, S Roy, C S Unnikrishnan. Realization of an intense cold Rb atomic beam based on a two-dimensional magneto-optical trap: experiments and comparison with simulations[J]. *Physical Review A*, 2006, 74: 023406.
- 10 Z T Lu, K L Corwin, M J Renn, *et al.*. Low-velocity intense source of atoms from a magneto-optical trap[J]. *Physical Review Letters*, 1996, 77(16): 3331–3334.
- 11 K H Kim, K I Lee, H R Noh, *et al.*. Cold atomic beam produced by a conical mirror funnel[J]. *Physical Review A*, 2001, 64: 013402.
- 12 J M Kohel, J Ramirez-Serrano, R J Thompson, *et al.*. Generation of an intense cold-atom beam from a pyramidal magneto-optical trap: experiment and simulation[J]. *J Opt Soc Am B*, 2003, 20(6): 1161–1168.
- 13 W Xiaojia, F Yanying, X Hongbo, *et al.*. A cold 87 Rb atomic beam[J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12): 126701.
- 14 L Devenoges, A Stefanov, A Joyet, *et al.*. Improvement of the frequency stability below the dick limit with a continuous atomic fountain clock [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(2): 211–216.
- 15 E Gustafsson. Design Study of a Magneto-Optical Trap for Laser Cooling of Rubidium Atoms[R]. Lund: LRAP-325, 2004.
- 16 W Wohlleben, F Chevy, K Madison, *et al.*. An atom faucet[J]. *Eur Phys J D*, 2001, 15: 237–244.

栏目编辑:韩 峰