

单腔原子芯片系统中高效率的四极磁阱转移

程 俊^{1,2} 许忻平¹ 张敬芳¹ 陈钰水^{1,2} 张海潮^{1*} 王育竹¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用两对部分重叠的磁光阱(MOT)和转移线圈产生的可移动四极磁阱(QMT)实现了⁸⁷Rb冷原子从 MOT 中心向原子芯片的高效率运输。采取了线性增加转移线圈电流、同时保持 MOT 线圈电流不变的 QMT 移动方式, 磁阱的移动速度构型为类 Blackman 型。利用该 QMT 运输方案, 冷原子从 MOT 中心转移到原子芯片表面, 转移过程中冷原子温度升高约 30 μ K, 原子转移效率高于 90%。该系统可以为原子芯片干涉仪提供合适的冷原子源, 也可以用来研究原子与芯片表面的相互作用。

关键词 原子与分子物理学; 原子芯片; 磁阱运输; 三维打印; 单腔系统

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1202001

High Efficiency Quadrupole Magnetic Trap Transport in Single Chamber Atom Chip System

Cheng Jun^{1,2} Xu Xinping¹ Zhang Jingfang¹ Chen Yushui^{1,2} Zhang Haichao¹ Wang Yuzhu¹

¹Key Laboratory for Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract With a movable quadrupole magnetic trap (QMT) generated by two pairs of partly-overlapped magneto-optical trap (MOT) and transfer coils, a highly efficient transport of cold ⁸⁷Rb atoms to the atom chip surface is realized. By the QMT movable means of linearly increasing the current in the transfer coils but simultaneously keeping the current in the MOT coils constant, the velocity profile of the moving trap is Blackman-type-like. With this QMT movable scheme, the cold atoms are transferred to the atom chip surface from the MOT center. In the transfer process, the cold atom temperature is increased by about 30 μ K, and the transfer efficiency is above 90%. This system provides an appropriate cold atoms source for the atom chip interferometer and also can be used to investigate the interaction between atom and chip surface.

Key words atomic and molecular physics; atom chip; magnetic trap transport; 3D printing; single chamber system

OCIS codes 020.1335; 020.3320

1 引 言

近年来,原子芯片^[1-3]的研究越来越受到关注。原子芯片是指采用光刻或者电镀的方法,在硅、碳化硅和玻璃等绝缘基底上刻蚀毫米甚至微米量级宽度的金属导线微结构,仅需加载安培量级电流就可操控冷原子。目前,在原子芯片上已经实现了对原子的磁阱囚禁^[4]、磁导引^[5-6]、磁阱分束^[7]以及表面诱导蒸发冷却^[8-9]等,芯片上的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)在 2001 年得到实现^[10-11]。在原子芯片上还能集成光学系统^[12]、原子源以及真空系统^[13]等。基于原子芯片可实现小型化的原子干涉仪^[14-15]和原子钟^[16],从而实现原子干涉仪和

收稿日期: 2016-07-25; 收到修改稿日期: 2016-08-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11604348)

作者简介: 程 俊(1988—),男,博士研究生,主要从事原子芯片干涉仪方面的研究。E-mail: xianshixiaozi3@163.com

导师简介: 王育竹(1932—),男,博士,研究员,中国科学院院士,主要从事量子光学和冷原子物理方面的研究。

E-mail: yzwang@mail.shnc.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zhanghc@mail.siom.ac.cn

原子钟的工程实用化,拓展其应用范围。

将冷原子转移到芯片微磁阱是原子芯片实验系统的基础和关键环节,通常有两种实施方式。一种是利用原子芯片作为反射镜的镜面磁光阱(MOT)^[17]来制备冷原子。为了保证原子芯片表面的高反射率,芯片表面的刻线结构不能太复杂。另一种是利用标准六束光 MOT 来制备冷原子,再利用光或磁转移的方式将原子云从 MOT 中心转移到芯片表面,进而装载到芯片微磁阱中。光转移的方式包括共振光推送^[18]、光镊^[19]、移动的光偶极阱^[20-21]和光晶格^[22]等。光阱的束缚能力有限,在转移过程中原子云会扩散,不利于芯片微磁阱的装载。磁阱束缚大、阱深及陷俘体积大,采用磁阱运输原子有利于芯片微磁阱的装载。磁转移包括利用伺服电机移动磁场线圈^[23-24]、按时序改变部分重叠线圈的电流^[25-29]、利用芯片背后的大 Z 线与偏置磁场形成转移 Ioffe-Pritchard 阱^[30]以及改变两个 MOT 线圈的相对电流^[31]等方式。

本文仅利用一对 MOT 线圈和一对转移线圈的简单结构,通过线性增大转移线圈电流并保持 MOT 线圈电流不变的简单方式,实现了类 Blackman 型的绝热转移速度构型,即原子跟随着四极磁阱(QMT)中心从 MOT 中心转移到原子芯片表面(转移距离 27.5 mm),转移效率高于 90%,且转移过程造成的原子云加热效应很小。基于高效率的原子 QMT 转移方案,实现了将原子从宏观 QMT 直接装载到芯片微磁阱(Z 型磁阱)中,装载效率可达 50%。这种仅利用两对磁场线圈组合的方案可以有效增大原子芯片附近的通光孔径,有利于芯片表面原子云的探测和操控。此外,利用三维(3D)打印技术制作的 MOT 和转移线圈一体化的线圈骨架,可保证两对线圈的精确定位、提高线圈骨架的稳定性,并避免传统闭合金属骨架中存在的涡流的影响。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,以 MOT 中心为坐标原点建立 xyz 坐标系。原子芯片置于石英玻璃池内部,原子芯片表面的刻线主要包括 Z 线、单环线和三环线,这些导线通过电气贯穿法兰引出,并连接到外部电源接线端。利用标准的六束光 MOT 冷却和陷俘⁸⁷Rb 原子。MOT 中心距离原子芯片表面 28 mm。冷却光的频率锁定在⁸⁷Rb 原子 D2 线 $5^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}, F'=3$ 共振跃迁失谐 -12 MHz 处(F 和 F' 为原子能级),每束冷却光的功率密度为 18 mW/cm^2 ,光束的高斯直径为 7.5 mm。再抽运光频率锁定在 $5^2S_{1/2}, F=1 \rightarrow 5^2P_{3/2}, F'=2$ 的共振跃迁频率上,并将其耦合到冷却光路中,再抽运光功率为 5 mW,高斯直径为 7.5 mm。为了实现 QMT 的陷俘,需要将原子抽运到弱场趋寻态,抽运光频率锁定在 $5^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}, F'=2$ 跃迁共振频率处,光功率为 $300 \mu\text{W}$ 。探测光频率锁定在⁸⁷Rb 原子 D2 线 $5^2S_{1/2}, F=2 \rightarrow 5^2P_{3/2}, F'=3$ 共振跃迁频率上,光功率为 1.5 mW。

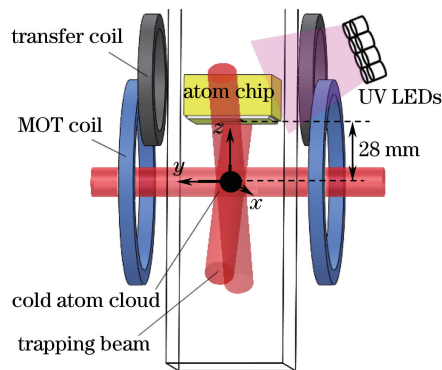


图 1 单腔原子芯片系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single chamber atom chip system

对于单腔原子芯片系统来说,原子从 MOT 中心向上转移 27.5 mm 就可以到达芯片表面。不同于常见的多线圈对的设计,此处采用了简单的两线圈对的方式,包括一对 MOT 线圈和一对转移线圈,而且不需要推送线圈^[25]。先将利用 MOT 制备的冷原子云装载到 MOT 线圈产生的宏观 QMT 中,然后保持 MOT 线圈电流 I_{MOT} 不变,不断增大转移线圈电流 I_t ,原子会跟随着 QMT 中心零点向芯片表面移动。利用这种简单的两线圈对的设计方案,可以将原子从 MOT 中心转移至芯片表面。

为了实现原子的高效率磁阱转移,同时保证芯片表面附近有足够大的通光孔径,以及降低整个线圈系统的功耗和线圈本身的热耗散等,对线圈设计进行了优化。两对线圈均设计为圆环形,其中 MOT 线圈的内半径为 60 mm,宽度为 20 mm, MOT 线圈对的中心间距为 84 mm。转移线圈的内半径为 30 mm,宽度为 15 mm,转移线圈对的中心距离为 46 mm。为避免线圈骨架产生涡流,骨架为 3D 打印的尼龙材质的一体化骨架,并将 MOT 和转移线圈的骨架一体化,保证了两对线圈精确的相对位置。两对线圈都采用直径 1.3 mm 的漆包线绕制,其中 MOT 线圈的匝数为 232,线圈加载 1 A 电流时产生的轴向磁场梯度为 0.5 mT/cm;转移线圈的匝数为 98,线圈加载 1 A 电流时产生的轴向磁场梯度为 0.5 mT/cm;转移线圈的中心位于 MOT 线圈对的中心正上方 40 mm 处。这种设计方式不仅简化了线圈的设计,使整个线圈结构更加小型化,而且整个磁场线圈系统的功耗更低,不需要水冷或者风冷等常用的散热装置。

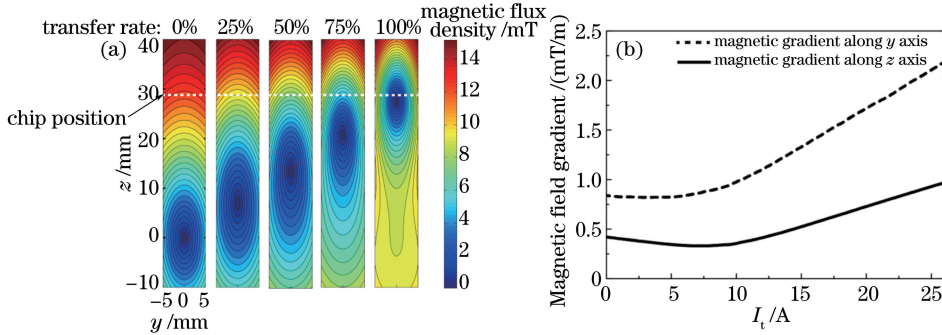


图 2 (a)四极磁阱转移的模拟结果;(b) y 轴和 z 轴方向上的磁场梯度随转移电流 I_t 的变化
Fig. 2 (a) Simulation result of QMT transfer; (b) variations of magnetic gradients along y and z directions with transfer current I_t

MOT 线圈电流 I_{MOT} 保持 18 A 不变,当线性增加转移线圈电流 I_t 时,QMT 中心零点沿着 z 轴向上移动,转移过程中磁场强度等高线分布如图 2(a)所示。转移过程中 QMT 中心沿 y 轴和 z 轴方向上的磁场梯度变化如图 2(b)所示。磁阱的纵横比定义为 y 轴和 z 轴磁场梯度的比值,可以用来表征转移过程中 QMT 的形状变化情况。从图 2(b)可以看出,磁阱的纵横比随转移电流的增大在 2~3 之间缓慢变化,说明在 QMT 转移过程中磁阱的形状变化平缓。

图 3 所示为 QMT 转移过程中磁阱中心零点在 z 轴方向的位置和以及移动速度的变化,设定在 120 ms 内转移线圈电流 I_t 从 0 线性增大到 26 A,同时 MOT 线圈电流 I_{MOT} 保持 18 A 不变。由图 3 可知,QMT 中心在 z 轴方向的位置不断升高,运动速度先缓慢增大后缓慢减小,呈类 Blackman 型^[32],转移过程中最大速度为 0.35 m/s。如果增大转移时间,转移速度会进一步减小。这种线性加速的时间短而减速的时间长,既加快了输运过程,又尽可能降低了对冷原子的加热效应。如果输运过程时间太长,原子数会因 Majorana 跃迁和背景散射而损失。综上所述,仅利用两对磁场线圈的组合,并采用保持 MOT 线圈电流 I_{MOT} 不变、线性增加转移线圈电流的 QMT 转移方案是可行的,这个方案可以实现冷原子的高效率转移。

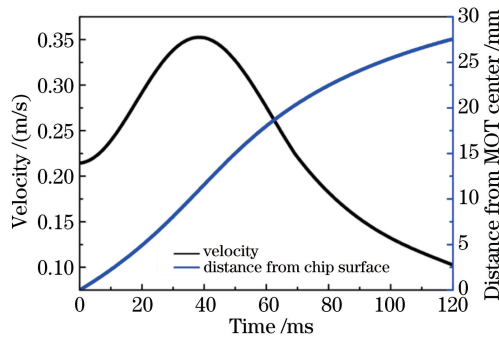


图 3 磁阱中心零点在 z 轴方向的位置和移动速度随时间的变化

Fig. 3 Variations of position and velocity of MOT center along z direction with time

探测光路系统设计如图 4 所示,该系统可实现对原子转移过程中不同竖直位置处的原子云的荧光成像和吸收成像。光纤准直器出射的探测光经过二分之一波片、偏振分光棱镜(PBS)和四分之一波片变为圆偏振光,该圆偏振光经过一个焦距为 100 mm 的透镜 F_1 后水平入射玻璃池正下方的 45° 反射镜 M_1 ,再经过一个焦距为 90 mm 的透镜 F_2 准直之后竖直向上打到原子芯片上。在水平方向上通过一个直径为 50 mm、焦距为 75 mm 的透镜 F_3 收集原子荧光信号,并将其成像到电荷耦合器件(CCD) I 上。通过在 z 方向精确调节透镜 F_3 和 CCD I 组合的高度,从而对转移到不同竖直位置处的冷原子云进行荧光成像探测。另外,竖直向上射入原子芯片的探测光会被芯片表面反射回来,由于四分之一波片的作用,此芯片反射光会经 PBS 反射,之后成像到 CCD II 上,从而实现竖直方向上对原子云的吸收成像探测,这个方向的原子吸收图像可以用来使冷原子云与芯片 Z 阱(ZMT)的横向(x 和 y 方向)位置准确对齐,以提高原子从宏观四极阱装载到芯片 ZMT 的效率。

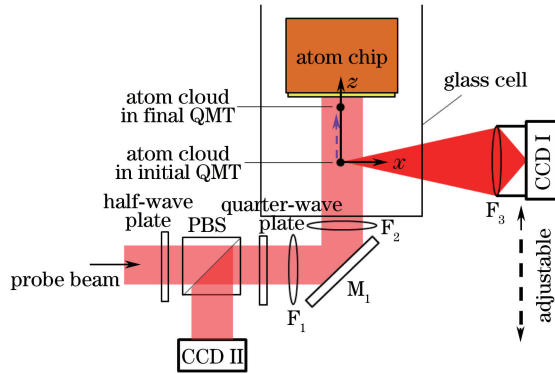


图 4 探测光路成像系统

Fig. 4 Imaging system with detection optical paths

3 实验过程、结果和讨论

实验中磁场和电流的时序控制过程如图 5 所示,其中 I_z 为 Z 线电流, B_x 为 x 方向上的偏置磁场强度, PGC 表示偏振梯度冷却阶段, OP 表示光抽运阶段。首先利用标准的六束光 MOT 冷却和陷俘原子, MOT 线圈产生的轴向磁场梯度为 1.4 mT/cm。MOT 过程中采用了光诱导的原子脱附技术^[33]。在 MOT 装载阶段,打开 160 个波长为 390 nm 的紫外 LED 灯 3 s,将铷原子从玻璃池内壁快速剥离,瞬间增加玻璃池内铷原子的蒸汽压,从而增加 MOT 的原子装载速率。MOT 装载完毕后,关掉紫外 LED 灯,并保持 MOT 3 s 以等

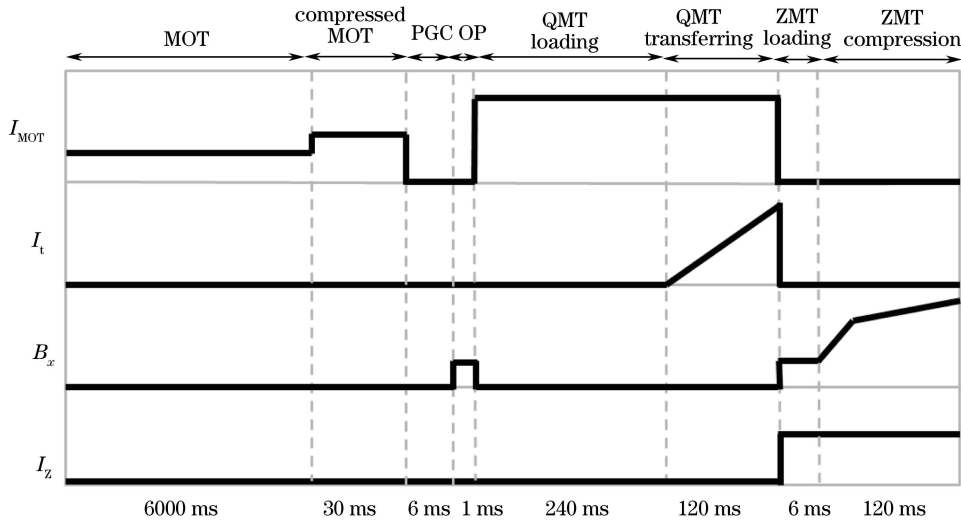


图 5 实验中的磁场和电流的时序控制图

Fig. 5 Time sequence controls of magnetic field and current in experiment

待超高真空快速恢复,从而减小背景气体对冷原子碰撞造成的冷原子损失,提高原子在磁阱中的寿命。最终 MOT 俘获的原子数约为 1×10^8 , 温度约为 $300 \mu\text{K}$ 。

接着进行压缩 MOT 过程,时间为 30 ms 。将冷却光失谐增大到 -32 MHz ,再将抽运光功率降低到 1 mW ,同时将 MOT 磁场梯度从 1.4 mT/cm 增加到 4 mT/cm ,以压缩冷原子云尺寸,提高 QMT 装载效率。之后进行 6 ms 的偏振梯度冷却(POC)过程,关掉 MOT 梯度磁场,同时将冷却光失谐增大到 -72 MHz ,并将其功率降低到 10 mW ,最终冷原子云温度降低到 $10 \mu\text{K}$ 。接下来进行 1 ms 的光抽运(OP)过程,利用 x 方向的偏置磁场提供 0.4 mT 的取向磁场,并打开抽运光脉冲将原子抽运到弱场趋寻态 $5^2\text{S}_{1/2}$, $|F=2, m_F=2\rangle$ (m_F 为磁子能级)。之后立即打开 MOT 磁场线圈电流进行 QMT 原子装载过程,此时 MOT 线圈的电流为 18 A (轴向磁场梯度约为 9 mT/cm)。原子装载到 QMT 中会发生阻尼振荡,此处选定 QMT 装载时间为 240 ms ,最终装载的原子数约为 1×10^7 ,原子温度为 $110 \mu\text{K}$ 。对于温度为 10^{-4} K 量级的原子云, 1 s 以内的 QMT 磁场零点导致的原子 Majorana 跃迁损失可以忽略^[26]。

之后进行原子的 QMT 转移,将 MOT 线圈电流 I_{MOT} 保持在 18 A 不变,转移线圈电流 I_t 从 0 线性增加到 26 A ,冷原子云随着 QMT 中心磁场零点的移动向芯片表面转移,最终原子云转移至芯片表面(距离芯片表面约 $500 \mu\text{m}$)。

通过图 4 所示的荧光成像探测系统,利用飞行时间法获得了转移前和转移后的原子数和原子温度。转移效率定义为转移前后的原子数的比值。对不同转移时间下原子的转移效率和转移前后的温度升高值分别取 6 次重复测量的平均值,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,当转移时间为 80 ms 时,原子转移效率为 70% ;当转移时间从 100 ms 增加到 400 ms 时,原子的转移效率均在 90% 以上,相差不大。如果转移时间过长,虽然原子在转移过程中加热速率小,但背景气体的碰撞会导致磁阱中原子损失。从图 6 也可以看出,在 80 ms 到 400 ms 的转移时间范围内,转移前后的温度变化并没有随转移时间的改变发生明显变化,磁阱转移前后原子温度升高在 $30 \mu\text{K}$ 左右。当磁阱转移开始时,磁阱的速度从零瞬间增加到 0.22 m/s 造成了原子质心的模式激发,进而导致了这种加热效应。

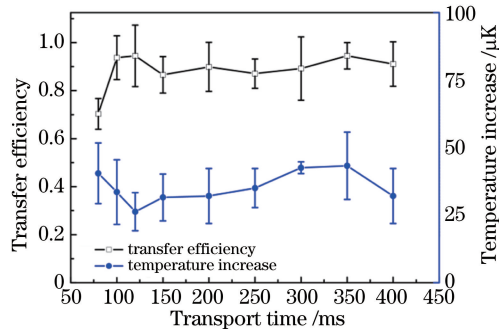


图 6 四极磁阱的转移效率和转移前后温度升高值随时间的变化

Fig. 6 Variations of transfer efficiency and temperature increase between before and after transfer in QMT with transport time

图 7(a)为转移到芯片表面的宏观四极磁阱中原子云的吸收图。当原子跟随着 QMT 中心移动到原子芯

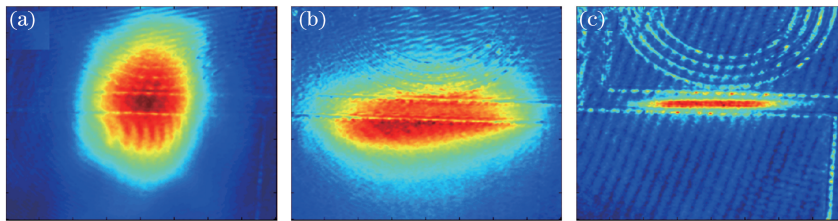


图 7 原子云的吸收成像。(a) $I_{\text{MOT}}=18 \text{ A}$, $I_t=26 \text{ A}$, 四极磁阱;(b) $I_z=3.5 \text{ A}$, $B_x=1.25 \text{ mT}$, 芯片 ZMT 初始装载;(c) $I_z=3.5 \text{ A}$, $B_x=6.5 \text{ mT}$, 芯片 ZMT 压缩后

Fig. 7 Absorption images of atom clouds. (a) $I_{\text{MOT}}=18 \text{ A}$, $I_t=26 \text{ A}$, in QMT; (b) $I_z=3.5 \text{ A}$, $B_x=1.25 \text{ mT}$, in initial microchip ZMT; (c) $I_z=3.5 \text{ A}$, $B_x=6.5 \text{ mT}$, in compressed microchip ZMT

片表面时,关掉 MOT 和转移线圈的电流,并同时打开芯片 Z 线的电流和 x 方向的偏置磁场,原子云就可以直接装载到芯片 ZMT 中。ZMT 装载时 Z 线电流 I_z 为 3.5 A, x 方向偏置磁场为 1.25 mT,装载到芯片 ZMT 中的原子个数为 4×10^6 ,吸收图如图 7(b)所示。之后进行 ZMT 压缩,分两个阶段线性增加 x 方向的偏置磁场强度 B_x ,第一阶段在 20 ms 内从 1.25 mT 升高到 2.25 mT,第二阶段在 120 ms 内继续升高到 6.5 mT,最终原子云的吸收图如图 7(c)所示。

4 结 论

利用单真空腔外的两对线圈构建了冷原子输运系统。采用 3D 打印技术制作的一体化尼龙线圈骨架稳固,避免了闭合金属骨架可能带来的涡流效应,有利于对冷原子进行精确而稳定的转移。通过保持 MOT 线圈电流不变、同时线性增大转移线圈电流的简单方式,可形成先加速后减速的类 Blackman 型的速度构型。在这种速度构型下,原子的转移效率高,且加热效应小。实验上把 ^{87}Rb 原子从 MOT 中心转移到了距离其 28 mm 的原子芯片附近,转移效率大于 90%,温度升高仅 30 μK 左右。这种两线圈的简单设计和线圈电流的控制方式不仅实现了原子到芯片表面的高效率转移,而且功耗低、体积小,还保证了芯片表面有足够大的通光孔径,有利于芯片表面原子云的探测和激光分束等后续实验操作。利用该方案把原子云转移到芯片表面,可实现原子芯片的 ZMT 装载及压缩,原子数可达 4×10^6 。该方案为实现芯片 BEC、原子干涉以及探究原子与金属表面的相互作用等后续实验提供了参考。

参 考 文 献

- 1 Chuang H C, Huang C S, Chen H P, *et al.* The design, fabrication and characterization of a transparent atom chip[J]. *Sensors*, 2014, 14(6): 10292-10305.
- 2 Huet L, Ammar M, Morvan E, *et al.* Experimental investigation of transparent silicon carbide for atom chips[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(12): 121114.
- 3 Feenstra L, Andersson L M, Schmiedmayer J. Microtraps and atom chips: Toolboxes for cold atom physics[J]. *General Relativity and Gravitation*, 2004, 36(10): 2317-2329.
- 4 Reichel J. Microchip traps and Bose-Einstein condensation[J]. *Applied Physics B*, 2002, 74(6): 469-487.
- 5 Dekker N H, Lee C S, Lorent V V, *et al.* Guiding neutral atoms on a chip[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(6): 1124-1127.
- 6 Hänsel W, Reichel J, Hommelhoff P, *et al.* Magnetic conveyor belt for transporting and merging trapped atom clouds [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(4): 608-611.
- 7 Schumm T, Hofferberth S, Andersson L M, *et al.* Matter-wave interferometry in a double well on an atom chip[J]. *Nature Physics*, 2005, 1(1): 57-62.
- 8 Reichel J, Hansell W, Hansch T W. Atomic micromanipulation with magnetic surface traps[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 83(17): 3398-3401.
- 9 Du S W, Oh E. Three-wire magnetic trap for direct forced evaporative cooling[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(1): 013407.
- 10 Hansel W, Hommelhoff P, Hansch T W, *et al.* Bose-Einstein condensation on a microelectronic chip[J]. *Nature*, 2001, 413(6855): 498-501.
- 11 Ott H, Fortagh J, Schlotterbeck G, *et al.* Bose-Einstein condensation in a surface microtrap [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(23): 230401.
- 12 Straatsma C J, Ivory M K, Duggan J, *et al.* On-chip optical lattice for cold atom experiments[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(14): 3368-3371.
- 13 Rushton J A, Aldous M, Himsforth M D. Contributed review: The feasibility of a fully miniaturized magneto-optical trap for portable ultracold quantum technology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(12): 121501.
- 14 Wang Y J, Anderson D Z, Bright V M, *et al.* Atom Michelson interferometer on a chip using a Bose-Einstein condensate [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(9): 090405.
- 15 Muntinga H, Ahlers H, Krutzik M, *et al.* Interferometry with Bose-Einstein condensates in microgravity[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(9): 093602.
- 16 Maineult W, Deutsch C, Gibble K, *et al.* Spin waves and collisional frequency shifts of a trapped-atom clock[J]. *Physical*

- Review Letters, 2012, 109(2): 020407.
- 17 Chen Shu, Feng Yanying, Xue Hongbo, *et al.* Monte Carlo method for simulation and parameter optimization cold atomic beam[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0518001.
陈 姝, 冯焱颖, 薛洪波, 等. 基于蒙特卡罗方法进行冷原子束模拟和参数优化[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0518001.
- 18 Myatt C J, Newbury N R, Ghrist R W, *et al.* Multiply loaded magneto-optical trap[J]. Optics Letters, 1996, 21(4): 290-292.
- 19 Roberts K O, McKellar T, Fekete J, *et al.* Steerable optical tweezers for ultracold atom studies[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 2012-2015.
- 20 Gustavson T L, Chikkatur A P, Leanhardt A E, *et al.* Transport of Bose-Einstein condensates with optical tweezers[J]. Physical Review Letters, 2002, 88(2): 020401.
- 21 Zhou Qi, Lu Junfa, Pan Xiaoqing, *et al.* Theoretical and experimental study of a novel combinative triple-well optical trap for triple-species cold atoms or molecules[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0402001.
周 琦, 陆俊发, 潘小青, 等. 新颖操控冷原子/冷分子的组合三光学阱新方案及实验研究[J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0402001.
- 22 Schmid S, Thalhammer G, Winkler K, *et al.* Long distance transport of ultracold atoms using a 1D optical lattice[J]. New Journal of Physics, 2006, 8: 159.
- 23 Kumar S, Sarkar S, Verma G, *et al.* Bose-Einstein condensation in an electro-pneumatically transformed quadrupole-Ioffe magnetic trap[J]. New Journal of Physics, 2015, 17(2): 023062.
- 24 Lewandowski H J, Harber D M, Whitaker D L, *et al.* Simplified system for creating a Bose-Einstein condensate[J]. Journal of Low Temperature Physics, 2003, 132(516): 309-367.
- 25 Greiner M, Bloch I, Hänsch T W, *et al.* Magnetic transport of trapped cold atoms over a large distance[J]. Physical Review A, 2001, 63(3): 031401.
- 26 Gao K Y, Luo X Y, Jia F D, *et al.* Ultra-high efficiency magnetic transport of ^{87}Rb atoms in a single chamber Bose-Einstein condensation apparatus[J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(6): 063701.
- 27 Horikoshi M, Nakagawa K. Atom chip based fast production of Bose-Einstein condensate[J]. Applied Physics B, 2006, 82(3): 363-366.
- 28 Han J S, Xu X P, Zhang H C, *et al.* Optimal transport of cold atoms by modulating the velocity of traps[J]. Chinese Physics B, 2013, 22(2): 023702.
- 29 Chen D, Zhang H, Xu X, *et al.* Nonadiabatic transport of cold atoms in a magnetic quadrupole potential[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(13): 134103.
- 30 Farkas D M, Hudek K M, Salim E A, *et al.* A compact, transportable, microchip-based system for high repetition rate production of Bose-Einstein condensates[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(9): 093102.
- 31 Jian B, van Wijngaarden W A. Double-loop microtrap for ultracold atoms[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(2): 238-243.
- 32 Hommelhoff P, Hänsel W, Steinmetz T, *et al.* Transporting, splitting and merging of atomic ensembles in a chip trap[J]. New Journal of Physics, 2005, 7: 3.
- 33 Zhang Pengfei, Xu Xiping, Zhang Haichao, *et al.* UV light-induced atom desorption for magnetic trap in a single vacuum chamber[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(6): 3205.
张鹏飞, 许忻平, 张海潮, 等. 紫外光诱导原子脱附技术在单腔磁阱装载中的应用[J]. 物理学报, 2007, 56(6): 3205.