

文章编号: 1007-6654(2008)01-0044-05

大失谐连续输运激光情形下双磁光阱中冷原子的输运

王婧, 何军, 闫树斌, 耿涛, 张天才, 王军民*

(量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西大学光电研究所, 山西 太原 030006)

摘要: 在我们建立的铯原子双磁光阱实验装置上, 采用连续激光将气室磁光阱中冷却并俘获的冷原子输运到超高真空磁光阱。在前期利用近共振弱光研究原子输运的工作基础上, 我们将输运激光的负失谐量扩展到约 2.0 GHz, 并增大了输运光功率, 对冷原子的输运作了实验研究。结果表明: 在大负失谐情形下, 较强的输运光使冷原子输运更为有效, 归因于输运光束对原子的偶极力造成对冷原子的导引作用。

关键词: 冷原子; 磁光阱; 双磁光阱; 连续输运激光; 大失谐

中图分类号: O431 文献标识码: A

0 引言

利用磁光阱^[1,2]俘获中性原子已经成为原子物理、激光光谱、量子光学、量子频标等领域的的重要手段之一。通过磁光阱, 可以有效地制备冷原子样品, 成为许多实验研究的出发点, 例如玻色 - 爱因斯坦凝聚、冷原子碰撞、光学晶格、原子喷泉、腔量子电动力学等等。对于磁光阱中碱金属原子的装载, 可以通过塞曼减速器 (Zeeman Slower)^[3] 或频率扫描^[4] 将原子束减速后载入磁光阱, 也可以从处于室温下麦克斯韦 - 玻尔兹曼速度分布的稀薄原子蒸气中直接冷却并俘获部分低速原子 (气室磁光阱)^[2]。气室磁光阱不需要复杂的装置对原子束进行减速, 因此更广泛的运用在冷原子物理实验中。另一方面, 由于冷原子物理许多实验都要求工作在较高的背景真空环境中, 如玻色 - 爱因斯坦凝聚、冷原子腔量子电动力学等。为了达到这个条件, 在基于气室磁光阱可方便地从室温下的背景原子中直接制备冷原子

的基础上, 在进行冷原子腔量子电动力学实验研究时建立了由铯原子气室磁光阱和超高真空磁光阱组成的双磁光阱系统。已经制备在气室磁光阱中的冷原子, 可以通过光场作用于冷原子样品, 将原子输运至背景真空中度较高的另一个磁光阱中再次俘获。

本文主要讨论通过光场来输运原子。一些国外的实验小组以及山西大学在前期的工作中研究了连续近共振弱光束情形下冷原子从气室磁光阱到超高真空磁光阱的输运^[5~7]。其基本的物理思想是输运光束对冷原子产生的辐射压力对原子有推送作用, 并且在将冷原子推出气室磁光阱的过程中横向冷却效应在一定程度上减小了冷原子束流的发散角。该方案的优点是易于控制, 可以在实验中进行局部操控及应用。其缺点是, 冷原子从近共振输运光中散射光子, 会导致原子的加热和损耗。为了解决散射光子的问题, 一些实验小组利用空心的蓝失谐光束^[8,9], 使原子在大部分

收稿日期: 2007-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60578018, 10434080); 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-07-0524); 高等学校博士点专项科研基金(20070108003); 国家重点基础研究计划课题(2006CB921102); 山西省自然科学基金(2007011003)

作者简介: 王婧(1982-), 女, 山西太原人, 光学专业硕士研究生。

* 通讯作者: E-mail: wwjmm@sxu.edu.cn

的时间里处在输运光中心暗区内。还可以采用远离共振频率的输运光场也可以大大降低光子散射率。利用大负失谐的激光对冷原子进行输运也已有一些工作^[10~15],并且讨论了在会聚和发散的导引光束中原子绝热冷却的问题^[12],甚至还通过两束红失谐激光实现了冷原子分束器^[13]。这些实验中普遍采用了较高的输运光功率。

本文介绍在铯原子双磁光阱的实验装置上,利用大负失谐连续激光对冷原子进行输运。原子在受到来自输运光辐射压力的推送作用之外,实验表明了在大负失谐的情形下,较强的输运光使冷原子输运更为有效,这归因于输运光束横截面内光强高斯分布会对冷原子形成指向中心的偶极力^[14,15],造成对冷原子的束缚及导引作用。

1 实验装置

我们的铯原子双磁光阱的真空系统采用上下两个不锈钢真空腔体,中间通过一个竖直的无氧铜压差管相连。上方的气室磁光阱用一个 40 l/s 的离子泵维持真空,并通过一个金属阀门与铯源相连;下级超高真空磁光阱连接一个 300 l/s 的离子泵,使背景真空间度维持在大约 8×10^{-8} Pa。而气室磁光阱内适当的真空间度(释放出适量铯蒸气时的压力约 1×10^{-6} Pa)可以使铯蒸气在较短的时间内装载到磁光阱中。两个腔体的真空间度通过真空计进行监测。

线宽在 500 kHz 左右的半导体激光器(SDL-TG40)用来提供双磁光阱的冷却/俘获光。激光频率锁定在铯原子 $6S_{1/2} F_g = 4 \rightarrow 6P_{3/2} F_e = 5$ 负失谐 11 MHz 处。为了避免光抽运过程使原子停留在 $6S_{1/2} F_g = 3$ 的超精细基态,实验中使用分布布拉格反射式(DBR)半导体激光器(SDL-5712-H1)提供反抽运光,频率锁定在 $6S_{1/2} F_g = 3 \rightarrow 6P_{3/2} F_e = 4$ 跃迁线上。两个激光器频率锁定后的典型频率起伏几十秒内约 1 MHz。用偏振分光棱镜合束后的冷却俘获光和反抽运光耦合入保偏光纤进行空间滤波,然后通过望远镜系统将光斑直径扩束至约 10 mm。

气室磁光阱中冷却俘获光束直径约 10 mm,每束光的功率密度约为 5.3 mW/cm^2 ,反抽运光

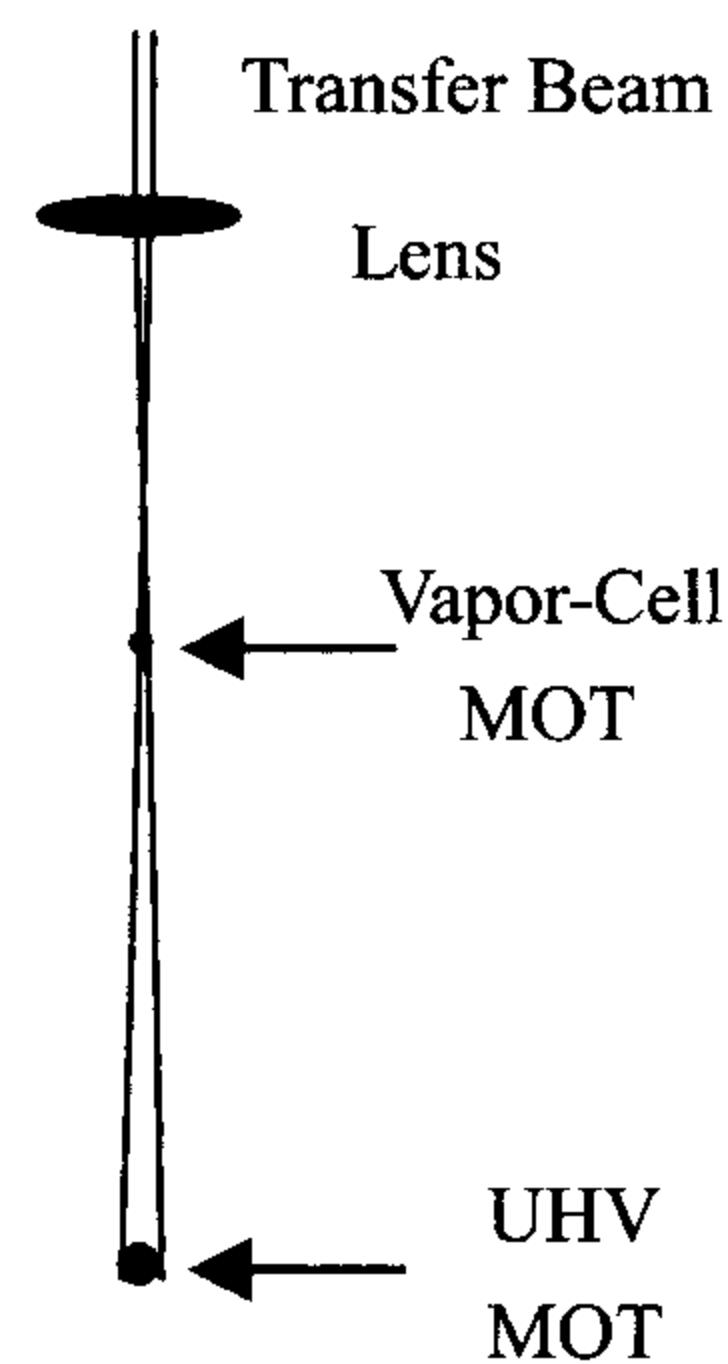


图 1 铯原子双磁光阱示意图。气室磁光阱工作在上方真空腔中心,从背景铯原子中冷却与俘获原子,为下方的超高真空磁光阱制备冷原子。连续单频可调谐钛宝石激光作为冷原子的输运光,经由单模保偏光纤导引至双磁光阱上方,通过凸透镜聚焦进入真空腔体。

Fig. 1 Schematic diagram of the cesium double MOT. The upper one is vapor - cell MOT, which cools and traps atoms from background to prepare the cold sample for UHV MOT beneath it. The continuous - wave transfer beam is filtered and guided by a polarization - maintained optical fiber above the double - MOT, focused by a lens into the vacuum chamber.

约 3 mW,冷却光失谐量为 -2Γ ,四极磁场的轴向磁场梯度为 1 mT/cm,真空间度为 1×10^{-6} Pa 时可以俘获到约 5×10^7 个铯原子。通过短程飞行时间法测量得到典型的冷原子温度约为 70 μK ,低于铯原子的多普勒极限温度 125 μK 。超高真空磁光阱的参数为: $I_{cooling} \sim 12.7 \text{ mW/cm}^2$, $\Delta \sim -2\Gamma$, $P_{repumping} \sim 4 \text{ mW}$, 四极磁场梯度为 0.8 mT/cm。

实验中采用连续可调谐钛宝石激光器(Coherent MBR-110)作为输运激光源,采用铯饱和吸收光谱标定钛宝石激光频率。钛宝石激光器单频运转时,其输出激光典型的线宽约 100 kHz;锁定到激光器内部的共焦 FP 腔上时,频率可连续调谐约 20 GHz。手动调谐激光频率时,采用激光波长计实时监视波长(可换算为频率)。输出的连续激光通过保偏光纤传输并进行空间滤波。光纤输出得到直径约 1 mm 的近平行光束,然后经透镜聚焦,经过气室磁光阱时的输运光光斑 $2\omega_1 \sim 1.6 \text{ mm}$,大于气室磁光阱中俘获的冷原子云直

径 $\sim 1\text{ mm}$ 。输运光束的焦点位于气室磁光阱上方90 mm处。气室磁光阱和超高真空磁光阱之间的距离约为193 mm。在超高真空磁光阱区域，输运光光斑 $2\omega_2 \sim 5.1\text{ mm}$ 。使得输运光束在超高真空磁光阱处的光强远低于在气室磁光阱处，从而使得输运光束对气室磁光阱中冷原子有效作用的同时，对超高真空磁光阱的影响显著降低。同时采用大面积光电探测器实时监视超高真空磁光阱中所俘获冷原子的荧光信号。可近似地认为冷原子荧光信号强度正比于冷原子数目。

2 实验结果及分析

这里简单说明冷原子在双磁光阱中的输运过程。当形成气室磁光阱的冷却俘获光束作用于原子时，产生与原子运动方向相反的辐射压力，阻碍原子运动从而降低了原子的速度，并且将原子局域在四极磁场的零点处。当输运光作用于冷原子云后，打破了气室磁光阱中冷原子所受辐射压力的平衡。适当的输运光强对冷原子产生了向下的推送作用，使冷原子产生一定的加速度，离开气室磁光阱形成冷原子束流，到达超高真空磁光阱被再次俘获。

前期我们已经研究了采用连续近共振弱光输运时对冷原子的输运^[7]：将输运光的功率保持在 $100\text{ }\mu\text{W}$ 左右，激光频率在 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$ 的循环跃迁失谐 -30 MHz 到 $+30\text{ MHz}$ 之间可调，测量了超高真空磁光阱中冷原子稳态荧光的强度。荧光强度近似正比于超高真空磁光阱中的冷原子数。在失谐量为 -12 MHz 和 $+21\text{ MHz}$ 处，图2中出现两个峰值^[7]。

从图中可以看出当输运光的频率负失谐量远大于冷却俘获激光的负失谐量时，辐射压力的作用将很弱，不足以将原子推出气室磁光阱的俘获区域。而在 -12 MHz 时，输运光的强度和频率失谐与气室磁光阱中的冷却俘获光的参数可相比拟，这样可以提高对冷原子云横向冷却的效率，并且减小了冷原子束的发散角，超高真空磁光阱中会俘获到较多的冷原子。而当输运光与 $F_g = 4 \rightarrow F_e = 5$ 循环跃迁共振时，由辐射压力引起的冲击会增强，使原子获得更大的加速度。一方面原子在气室磁光阱中停留时间较短，无法获得充分

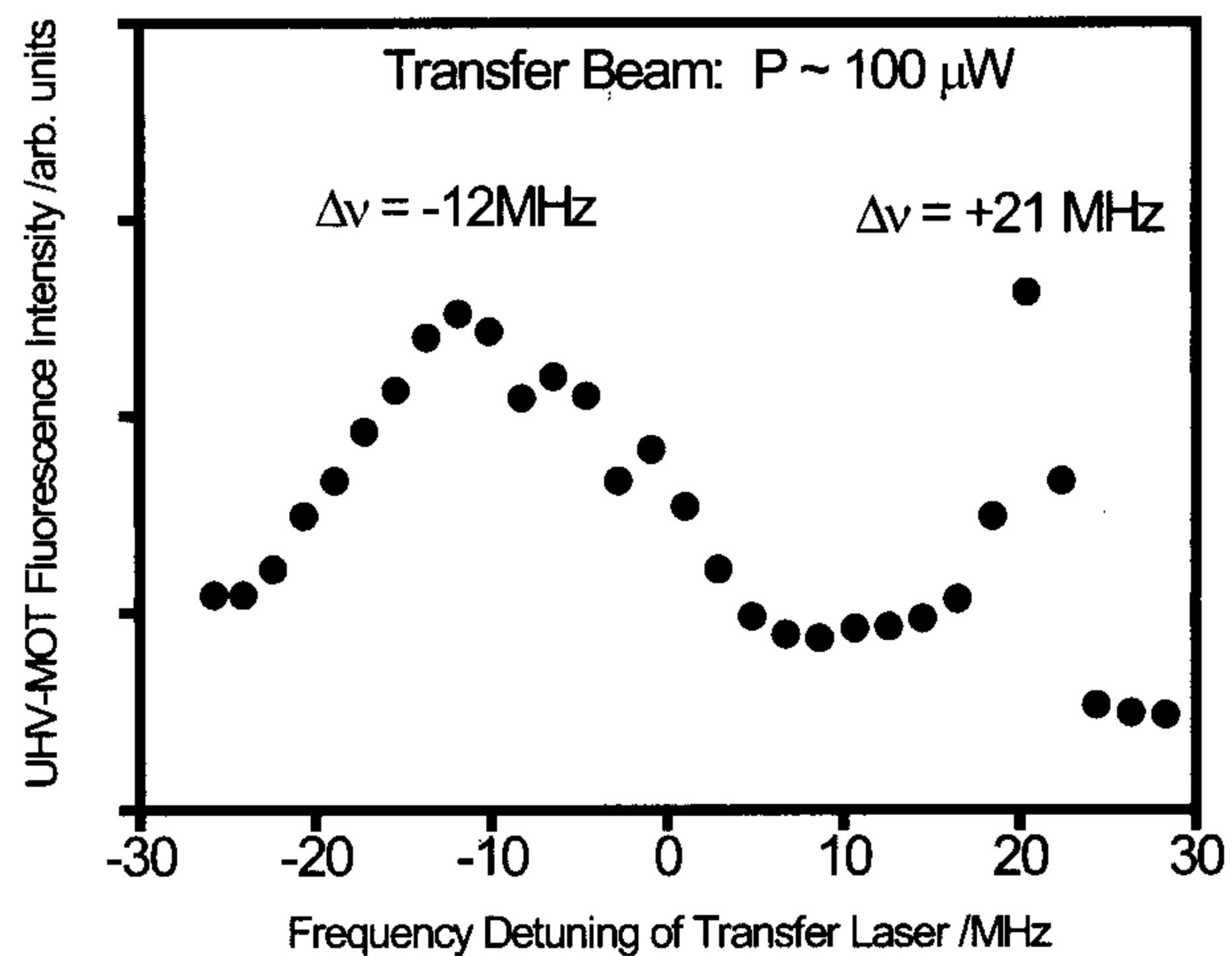


图2 近共振弱光输运时下方的超高真空磁光阱中俘获的冷原子荧光强度随输运光失谐量的变化情况。零失谐对应于输运光与铯原子 $F_g = 4 - F_e = 5$ 循环跃迁共振。此图引自文献[7]。

Fig. 2 Fluorescence intensity of the UHV MOT versus frequency detuning of the transfer beam. Zero detuning denotes that the transfer beam is resonant with cesium $F_g = 4 - F_e = 5$ cycling transition. This figure is cited from ref [7].

横向冷却；另一方面，很大的加速度使原子在到达超高真空磁光阱的俘获区域时末速度较大以至于不能被俘获。

在研究输运光在近共振小功率区与冷原子的相互作用的基础上，将输运光失谐量加大，同时也增大输运光功率，得到了如图3所示的实验结果。由图3可清楚地看到以下两点：1) 当输运光功率增大时，在大负失谐区（图3中曲线a、b）左边的峰），冷原子的输运效率在提高的同时，有效的失谐范围也明显加大。2) 在小失谐区，当输运光频率接近铯原子 $F_g = 4 - F_e = 3, 4, 5$ 三个超精细跃迁线时，输运效率极低。实验中我们核对了在输运光功率 $P \sim 100\text{ }\mu\text{W}$ ，失谐量 -12 MHz 时（图2中左边峰值），超高真空磁光阱中稳态冷原子数约为 5×10^6 。在输运光功率 $P \sim 20.2\text{ mW}$ ，失谐量 $\sim -1.2\text{ GHz}$ 时（图3曲线b）左边峰值），超高真空磁光阱中稳态冷原子数约为 2×10^7 ，大约是前者的四倍。挡掉输运光束时，上方气室磁光阱中的稳态冷原子数约为 5×10^7 。

分析其原因，在大负失谐情况下，输运激光束横截面内光强的高斯分布会对冷原子形成指向中心的偶极力，从而可起到对冷原子的二维约束作

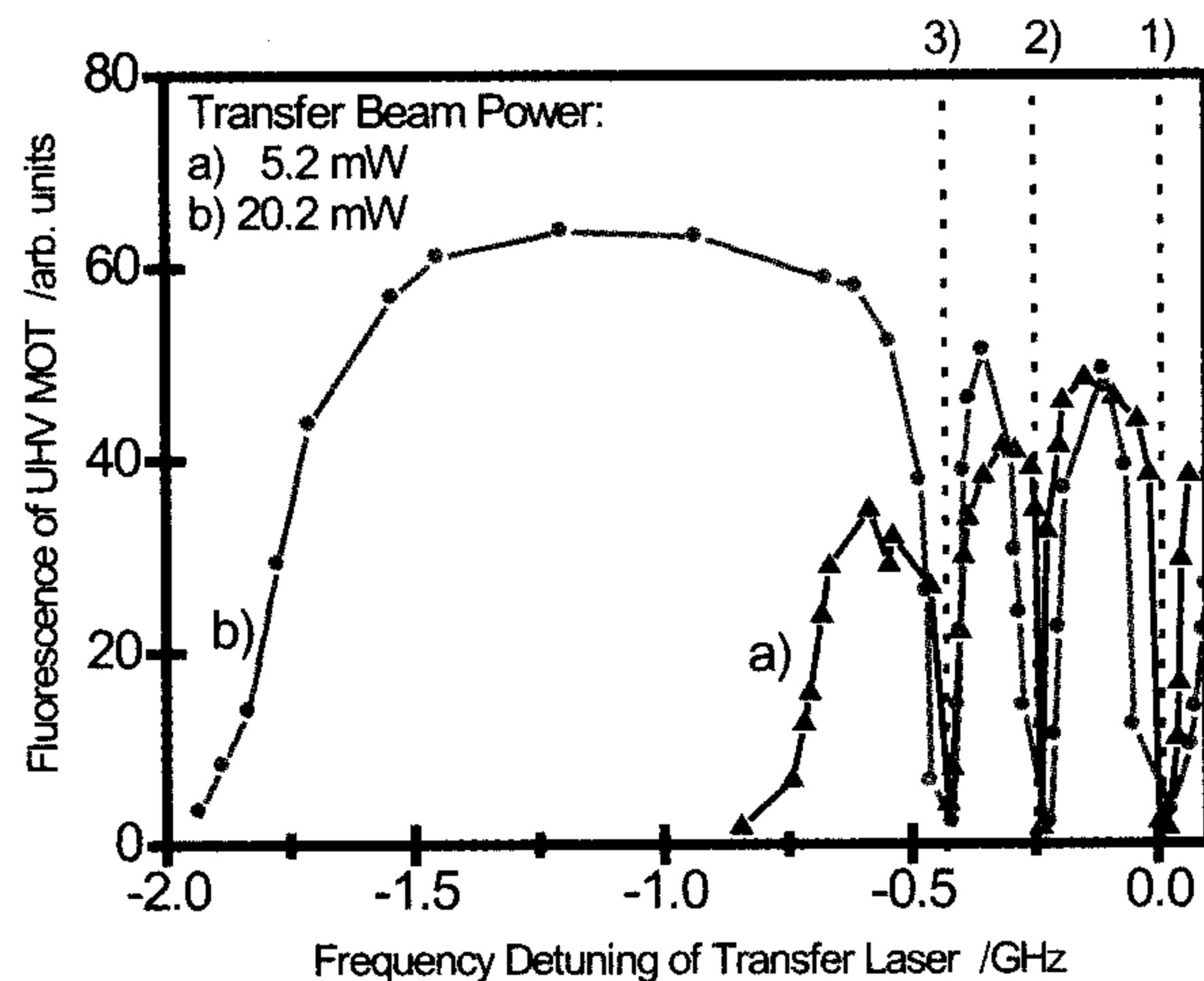


图3 在较强的输运光情形下超高真空磁光阱中俘获的冷原子荧光强度随输运光失谐量的变化情况。曲线 a) b) 分别对应输运光功率为 5.2 mW 和 20.2 mW 时的情况,点线 1)2)3) 分别对应于铯原子 $F_g = 4 - Fe = 5$, $F_g = 4 - Fe = 4$ 和 $F_g = 4 - Fe = 3$ 三个超精细跃迁的频率。

Fig. 3 Fluorescence intensity of the UHV MOT versus frequency detuning of the transfer beam with moderate power. Curve a) and b) are the situations when optical power of transfer beam equals 5.2 mW and 20.2 mW respectively. The dot lines 1), 2) and 3) correspond to cesium hyperfine transition frequency of $F_g = 4 - Fe = 5$, $F_g = 4 - Fe = 4$ and $F_g = 4 - Fe = 3$ respectively.

用,在很大程度上使得从气室磁光阱中形成的冷原子束的发散角得到压缩,更多的冷原子即可到达超高真空磁光阱区域被俘获。

负失谐的输运光束对冷原子产生指向光束轴心的偶极力,形成的偶极势可以用下式来表示:

$$U_{dip}(r, z) = \frac{3\pi c^2}{2\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} I(r, z)$$

其中 $\Gamma = 2\pi \times 5.2$ MHz 是铯原子 D_2 线自发辐射衰减率, ω_0 为原子的共振频率, 红失谐相应的 $\Delta < 0$ 。由于我们的输运光是经透镜聚焦的高斯光束, 故沿着 z 轴传播的高斯光束的光强可表示为:

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi w^2(z)} \exp\left[-\frac{2r^2}{w^2(z)}\right]$$

当 $r = 0$ 时, 得到在输运光束中心处产生的偶极势:

参考文献:

- [1] RAAB E L, PRENTISS M, CABLE ALEX, et al. Trapping of Neutral Sodium Atoms with Radiation Pressure [J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 59(23): 2631.
- [2] MONROE C, SWANN W, ROBINSON H, et al. Very Cold Trapped Atoms in a Vapor cell [J]. *Phys Rev Lett*, 1990,

$$U_{dip}(z) = \frac{3c^2}{\omega_0^3} \frac{\Gamma}{\Delta} \frac{P}{w^2(z)}$$

由于负失谐会使产生的偶极势为负, 原子受到偶极势的束缚和导引作用。

从偶极势的表达式可以看出固定失谐量, 改变输运光的功率会使光束中心的势阱深度发生变化; 另一方面, 固定输运光功率, 改变失谐量, 势阱深度同样会改变。实验中分别取输运光功率在 5.2 mW 和 20.2 mW 时, 在 -2.0 GHz ~ $+0.1$ GHz 之间调节失谐量。随着输运光功率的增加, 势阱变深, 从而导致偶极力对原子束的导引作用加大。在适当的失谐范围内, 更多的原子输送到超高真空磁光阱中, 提高了输运效率。而在较小的负失谐区域, 偶极力的束缚和导引作用不明显, 也会降低到达超高真空磁光阱的原子数目。在输运光频率接近铯原子 $F_g = 4 - Fe = 3, 4, 5$ 三个超精细跃迁线时, 近共振的输运光产生的辐射压力使原子获得较大的加速度, 到达超高真空磁光阱时原子速度可能超过了超高真空磁光阱的俘获速度, 使输运效率明显降低。

3 结论

在我们已建立的双磁光阱系统上, 研究了连续输运光束参数对输运效率的影响。为了在超高真空磁光阱中再次冷却和俘获更多的原子, 有两方面的制约因素: 首先, 输运过程中原子束在两个真空气室之间应该得到较好的准直, 尽量减小其发散角, 并且最终到达超高真空磁光阱时原子云横向的尺寸要小于超高真空磁光阱的俘获区域尺度。其次, 原子云到达超高真空磁光阱时纵向的末速度需小于俘获速度。实验中我们发现利用大负失谐的输运激光束, 在较强的输运光功率下, 使得原子的输运更加有效。输运光对原子产生的二维偶极势在一定条件下对原子起到了束缚和导引的作用, 功率越大, 势阱的作用越明显。但过大的失谐量会减弱原子受辐射压力的推送作用, 原子输运效率反而明显降低。

65(13): 1571.

- [3] PHILLIPS W D, METCALF H. Laser Deceleration of an Atomic Beam [J]. *Phys Rev Lett*, 1982, **48**(9): 596.
- [4] ERTMER W, BLATT R, HALL J L, et al. Laser Manipulation of Atomic Beam Velocities: Demonstration of Stopped Atoms and Velocity Reversal [J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **54**(10): 996.
- [5] WOHLLEBEN W, CHEVY F, MADISON K, et al. An Atom Faucet [J]. *Eur Phys J D*, 2001, **15**(2): 237.
- [6] 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.
- [7] YAN Shu-bin, GENG Tao, ZHANG Tian-cai, et al. Continuously Transferring Cold Atoms in Cesium Double Magneto-optical Trap [J]. *Chinese Physics*, 2006, **15**(8): 1746.
- [8] SONG Y, MILAM D, HILL III W T. Long, Narrow All-light Atom Guide [J]. *Opt Lett*, 1999, **24**(24): 1805.
- [9] MANEK I, OVCHINNIKOV YU B, GRIMM R. Generation of a Hollow Laser Beam for Atom Trapping Using an Axicon [J]. *Opt Commun*, 1998, **147**(1-3): 67.
- [10] SZYMANIEC K, DAVIES H J, ADAMS C S. An Atomic Fountain Guided by a Far-off Resonance Laser Beam [J]. *Europhys Lett*, 1999, **45**(4): 450.
- [11] DAVIES J H, ADAMS C S. Transferring Laser-cooled Atom to a Spatially Separated Magnetic Trap Using a Far-off Resonance Optical Guide [J]. *J Phys B: At Mol Opt Phys*, 2000, **33**(19): 4079.
- [12] PRUVOST L, MARESCAUX D, HOODE O, et al. Guiding and Cooling of Cold Atoms in a Dipole Guide [J]. *Opt Commun*, 1999, **166**(1-6): 199.
- [13] HOODE O, KADIO D, PRUVOST L. Cold Atom Beam Splitter Realized with two Crossing Dipole Guide [J]. *Phys Rev Lett*, 2000, **85**(26): 5543.
- [14] WOISCHRIJN B T, CORNELUSSEN R A, SPREEUW R J, et al. Guiding of Cold Atoms by a Red-detuned Laser Beam of Moderate Power [J]. *New Journal of Physics*, 2002, **4**: 69.
- [15] DIMOVA E, MORIZOT O, STERN G, et al. Continuous Transfer and Laser Guiding Between two Cold Atom Traps [J]. *Eur Phys J D*, 2007, **42**(2): 299.

Transportation of Cold Atoms in Double Magneto-Optical Trap with Continuous-Wave Large-Detuning Transfer Laser Beam

WANG Jing, HE Jun, YAN Shu-bin, GENG Tao, ZHANG Tian-cai, WANG Jun-min

(State Key Laboratory of Quantum optics and Quantum Optics Devices, and Institute of Opto-Electronics,
Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: We have established a cesium double magneto-optical trap (double MOT) system, and realized transferring cold atoms from the vapor-cell MOT to the ultra-high-vacuum (UHV) MOT by continuous transfer laser. On the base of our former work on transferring atoms by weak resonance laser, we extended red detuning of transfer beam to 2.0 GHz, and increased the laser power. We have studied on the transportation of cold atoms. It is demonstrated that the stronger laser power would make the transportation much more efficient if the detuning is far off-resonance. It is induced by the confinement and guidance of cold atoms due to the transverse dipole force of the transfer beam.

Key words: cold atom; magneto-optical trap (MOT); double magneto-optical trap (double MOT); continuous-wave transfer laser; large detuning