

利用光致原子解吸附实现磁光阱中单原子的高概率快速装载

刘 贝, 靳 刚, 王杰英, 何 军, 王军民

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

摘要 基于 390 nm 紫光诱导的光致原子解吸附效应, 实现了大磁场梯度磁光阱中少数原子快速和高概率的装载。实验中通过开启 390 nm 紫光使吸附在真空气室内壁上的原子解吸附, 从而有效地增加了背景铯原子数密度, 降低了大磁场梯度磁光阱中原子的装载时间, 同时研究了磁光阱中装载的原子数目对紫光参数的依赖关系。利用这种全光学控制的方法, 最终获得了磁光阱中装载一个原子、两个原子、三个原子的概率分别为 98.0%, 95.0%, 80.1%, 这对于下一步利用光学手段实现远失谐光学偶极阱中单原子高概率快速的装载以及利用空间光调制器扩展偶极阱阵列, 实现偶极阱阵列中每个阱中单原子快速高概率装载具有重要意义。

关键词 原子与分子物理学; 磁光阱; 光致原子解吸附; 反馈控制; 快速高概率装载

中图分类号 O562

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1102001

Fast and High Probability Production of Single Cesium Atoms in a Magneto-Optical Trap Using Light-Induced Atomic Desorption

Liu Bei Jin Gang Wang Jieying He Jun Wang Junmin

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

Abstract Fast and high probability production of single atoms in a cesium (Cs) magneto-optical trap (MOT) is demonstrated by using light-induced atomic desorption (LIAD). The atom's loading time in a high-gradient vapor-cell MOT is reduced by using the violet light emitting diode (LED), which can fire atomic desorption from the inner wall of vacuum glass cell to increase the density of background Cs atoms. The influence of the intensity of the violet LED light to the background atom number is also discussed. Finally, the measured occupation probability of one atom, two atoms, and three atoms are 98.2%, 95.0%, and 80.1% respectively in the MOT. Moreover, this technique could be especially useful for the deterministic loading of a single atom in a single microscopic optical tweezer or in two-dimensional array of microscopic optical tweezer.

Key words atomic and molecular physics; magneto-optical trap; light-induced atomic desorption; feedback control; fast and high probability production

OCIS codes 020.1335; 020.3320; 140.3320

1 引 言

光学阱阵列中俘获的少数中性原子不易受外界电磁场干扰, 这种与环境弱耦合的特性使基于中性原子实现的量子比特广泛应用于量子计算、量子模拟等信息科学领域^[1-4]。实验中通常利用强聚焦的高斯光束或者光学晶格构建微米尺度的光学偶极阱俘获单个中性原子。基于微米尺度光学偶极阱中单原子的俘获, 已

收稿日期: 2015-05-18; 收到修改稿日期: 2015-06-05

基金项目: 国家重大科学研究计划(2012CB921601)、国家自然科学基金(61475091, 11274213, 61205215, 61227902)

作者简介: 刘贝(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事冷原子物理方面的研究。E-mail: liubei0628@qq.com

导师简介: 王军民(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事量子光学与冷原子物理等方面的研究。

E-mail: wjjmm@sxu.edu.cn(通信联系人)

实现触发式的单光子源^[5]以及中性原子量子比特的相干操控等实验^[6-8]。借助于二维微透镜阵列或者空间光学调制器可以实现二维光学偶极阱阵列^[9-10],基于偶极阱阵列的冷原子俘获可以实现量子移位寄存器以及多量子比特的信息存储^[11]。量子计算和量子存储等实验需要大量的量子比特,这就要求构建二维或者三维的光学阱阵列并实现每个阱中高效的单原子装载,目前仍然是一个实验挑战。

偶极阱中单原子的俘获目前主要有两种技术方案,一种方案是利用磁光阱俘获一定数量的原子,构建与磁光阱空间重合的微米尺度光学偶极阱,利用微米尺度光学偶极阱中原子之间的碰撞阻挡效应实现偶极阱中单原子的俘获^[12-13];另一种方案通过降低磁光阱装载率,在磁光阱中实现少数原子或单个原子的俘获,再将磁光阱的原子转移到微米尺度的光学偶极阱中^[14]。大磁场梯度可以有效降低磁光阱的装载率,实现磁光阱中少数原子甚至单原子的装载,但是由于单原子磁光阱装载率较低,实验中一旦原子丢失,需要较长的时间才能俘获新的原子。

相比于传统的磁光阱^[15]而言,少数原子的磁光阱需要有效地控制实验参量,降低装载率。实验中主要通过提高背景真空度、缩小冷却与俘获激光束直径、加大轴向磁场梯度等措施降低磁光阱的装载率,从而实现磁光阱中少数原子甚至单原子的冷却与俘获^[16-17]。2003年,美国国家标准技术研究院^[18]通过反馈控制环路控制铬原子的蒸发过程从而控制背景原子密度,实现了磁光阱中单原子98.7%的装载概率。2006年,韩国Yoon等^[19],利用实时反馈控制磁光阱四极磁场梯度的方法,实现了磁光阱中十分钟内单原子99%的装载概率。2014年山西大学王军民等^[20]通过反馈控制四极磁场梯度的方法实现了磁光阱中单原子95.2%的装载概率。上述反馈控制技术为获得磁光阱中单个原子的高效装载提供了可行性方案,对于反馈控制四极磁场梯度的方法,在反馈过程中由于开启关断磁场的速度比较慢,且在关断或降低大磁场的过程中不可避免地产生涡流,这会对磁光阱中原子的快速装载造成一定的影响。

本文基于一种全光学控制的方法实现了磁光阱中单原子的快速装载。实验中利用390 nm紫光诱导的光致原子解吸附效应(LIAD)解吸附附着在真空气室内壁上的原子,改变磁光阱区域背景原子密度,实现大磁场梯度磁光阱中少数原子快速和高概率的装载。当装载过程完成,关闭解吸附光场,磁光阱区域背景原子会重新吸附到真空内壁,不会影响阱中原子的寿命^[21-23]。

实验中首先基于高背景真空度下大磁场梯度的磁光阱实现了长寿命的单原子俘获;其次研究了390 nm紫光诱导的LIAD对磁光阱装载时间以及装载原子数目的影响;最后结合实时反馈四极磁场梯度的方法实现了磁光阱中少数原子确定性的装载,为下一步实现光学偶极阱中确定数目原子的装载以及扩展偶极阱阵列实现每个阱中确定数目原子的装载提供了一种可行方案。

2 实验装置

实验装置如图1(a)所示,其中MOT:磁光阱,lenses:聚焦透镜,IF:干涉滤波片,APD:单光子探测器。实验主要是在一个真空度为 3×10^{-9} Pa的超高真空气室里完成的。相关的实验装置以及激光锁频系统已在文献[14,24]中有详细的介绍。相比于先前的实验系统,实验中增加了两条反馈回路,回路1用于控制四极磁场梯度,四极磁场梯度由一对安装在玻璃气室外通过水冷的反向亥姆霍兹线圈提供,20 A的直流电流可产生约350Gs/cm($1\text{Gs}=10^{-4}\text{T}$)的轴向磁场梯度;回路2用于控制解吸附光的开启和关断,解吸附光由一组中心波长为390 nm的紫光LED构成。

LIAD实验过程如图1(b)所示,LIAD主要利用短波长的非相干光(紫光或者紫外波段)直接照射真空气室内壁从而使吸附在真空气室内壁上的原子解吸附,有效地增加了真空气室中背景铯原子数密度,从而增加磁光阱的装载率并实现单原子的快速装载。实验中可以通过控制解吸附光的光强和照射时间控制解吸附原子的数目,更为重要的是在完成磁光阱装载并且关闭解吸附光后,真空气室背景中的原子在很短的时间内重新被吸附到气室内壁上,背景真空随即恢复到初始的状态。LIAD实验过程主要是吸附和解吸附两个过程共同作用的结果,在某时刻 t ,真空气室中原子数密度 $n(t)$ 可表示为 $dn(t)/dt = D - An(t)$, D 表示解吸附速率,即单位时间内从真空气室内壁上解吸附的原子数目, A 表示吸附系数, $1/A$ 表示原子被重新吸附的速率,对方程进行求解可得到 $n(t) = D[1 - \exp(-At)]/A$ 。实验中可以通过改变解吸附光光强和照射时间控制 D 和 A 的大小,获得磁光阱中不同数目原子的装载^[23]。

磁光阱中原子辐射的荧光光子通过单光子计数器进行探测并利用多通道脉冲计数卡(MCS)记录单光子探测器的输出信号,如图1(c)所示。通过MCS卡中记录的台阶状信号可以准确判断磁光阱中俘获原子的数目,原子的台阶状信号被用作反馈信号控制回路1和回路2。

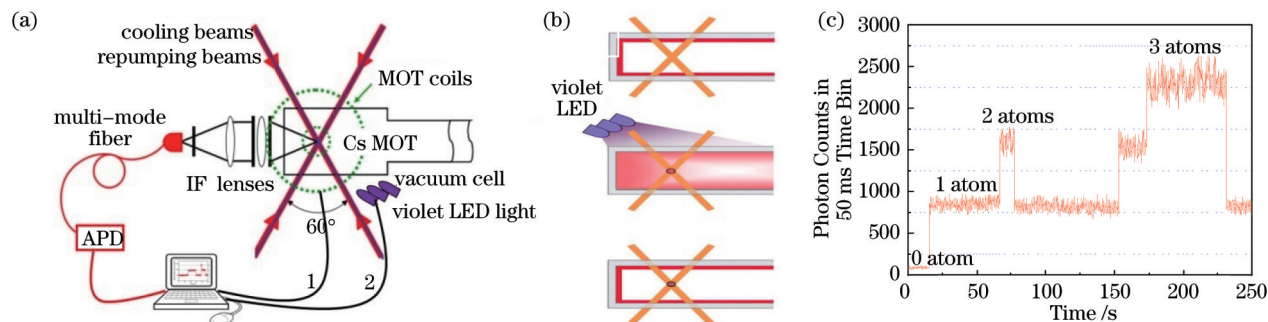


图1 (a) 实验装置; (b) 紫光诱导的光致原子解吸附(LIAD)示意图; (c) 大磁场梯度磁光阱中少数原子装载产生的荧光信号
Fig.1 (a) Experimental setup; (b) schematic of light-induced atomic desorption by using violet LED;
(c) fluorescence photon counting signal for a few atoms are loaded into a high-gradient MOT

3 实验结果和讨论

实验中要想获得单原子或者少数原子装载的磁光阱,其中一个很重要的措施就是控制磁光阱的装载率和损失率。通过增加四极磁场梯度和提高背景真空度的方法可以获得大磁场梯度磁光阱中少数原子长寿命的俘获,但是大磁场梯度磁光阱中,一旦原子逃离需要等待较长时间俘获下一个原子,这导致磁光阱中零原子的概率较高。利用紫光诱导的LIAD增加真空气室中背景原子数密度的方法可以有效地解决这一问题,从而实现大磁场梯度磁光阱中少数原子的快速俘获。

实验中首先研究了紫光LED诱导的LIAD对磁光阱装载时间的影响。如图2(a)所示,首先测量了紫光LED在关闭条件下大磁场梯度磁光阱中原子的装载过程,四极磁场梯度为100 Gs/cm(1 Gs=10⁻⁴T),原子数为几十个时磁光阱趋于饱和,磁光阱典型的装载时间为4.4 s。紫光LED开启时磁光阱的装载过程如图2(b)所示,紫光光强为0.5 mW/cm²,打开解吸附光之后磁光阱中原子数快速增加到某一值并趋于饱和,磁光阱典型的装载时间为120 ms,关闭紫光之后,部分原子又被重新吸附在气室内壁上。由图(b)可以看出紫光诱导的LIAD过程有效地增加了背景铯原子数密度,降低了大磁场梯度磁光阱的装载时间。

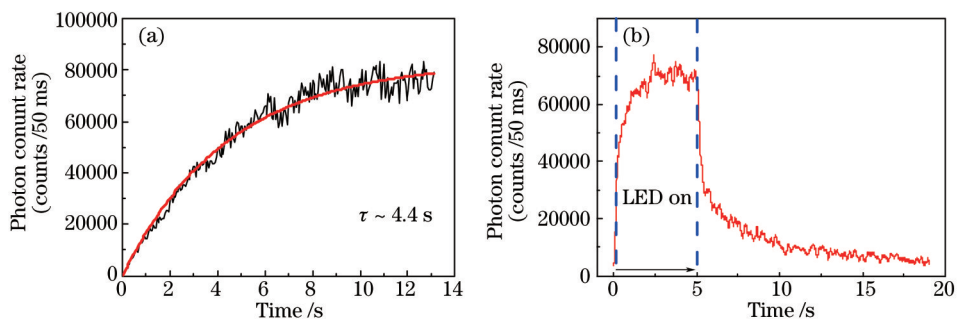


图2 磁光阱中原子的装载过程。(a)紫光关闭,磁光阱中原子装载时间为4.4 s;
(b)零时刻打开紫光,磁光阱的原子装载时间为120 ms

Fig.2 Atomic loading process in the MOT. (a) Without violet LED light, the loading time is about 4.4 s;
(b)when the glass-cell is illuminated by violet LED, the typical loading time is about 120 ms

大磁场梯度磁光阱中的平均原子数依赖于背景气体原子数,通过控制紫光光强可以控制背景原子数目,进一步控制磁光阱中俘获的原子数。图3为不同紫光光强对磁光阱中装载原子数目的影响。图3(a)是磁光阱中俘获原子的荧光光子统计分布图,四极磁场梯度为200 Gs/cm(1 Gs=10⁻⁴T),冷却光光强 $I_{eff}=20I_s$ ($I_s=1.12$ mW/cm²),失谐量 $\Delta = -1.5\Gamma$ ($\Gamma = 2\pi \times 5.2$ MHz),紫光关闭的条件下0~8个原子被随机的装载到磁光阱中,平均原子数目为1.9。大磁场梯度磁光阱由于装载率较低,一旦原子逃离需要等待较长的时间去俘获下一个原子,因此磁

光阱中零个原子的概率比较高。图 3(b)是紫光开启时,磁光阱中不同数目原子的统计分布图,从图 3(b)可以看出,在紫光的功率密度为 0.1 mW/cm^2 的条件下,磁光阱中零个原子的概率被有效地抑制,一个原子的概率明显增加,此时磁光阱中平均原子数为 2.8。通过改变紫光光强可以控制磁光阱中俘获原子的数目,如图 3(c)所示。增加紫光光强,磁光阱中平均原子数发生变化。选择合适的光强可以在磁光阱中获得不同平均数目的原子。

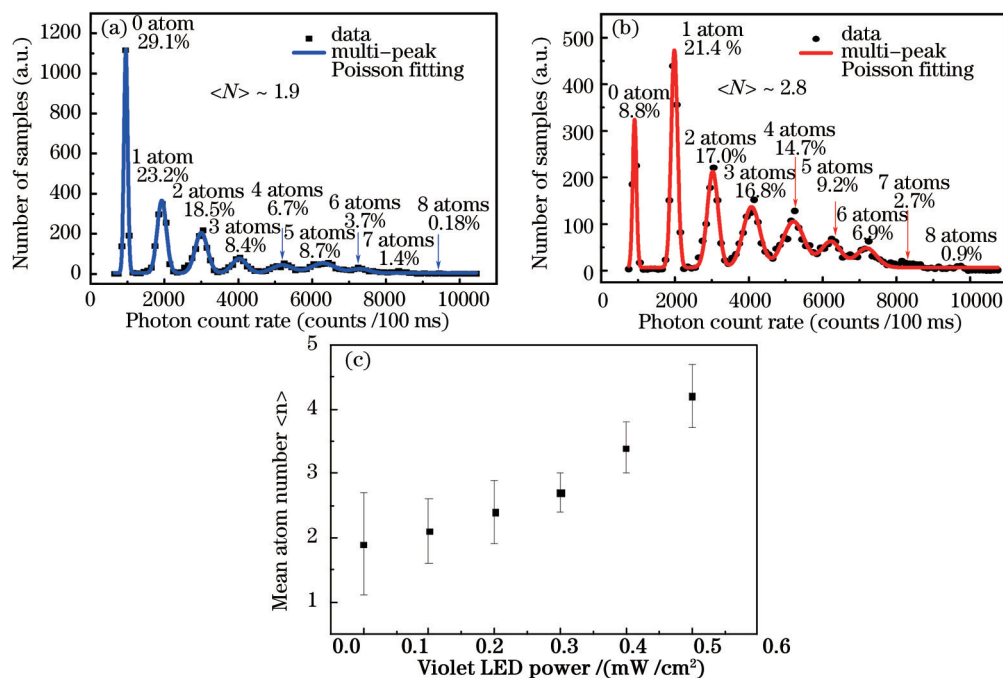


图 3 (a)关闭紫光,平均原子数为 1.9; (b) 打开紫光,平均原子数为 2.8; (c)磁光阱中平均原子数随紫光光强的变化

Fig.3 (a) When the violet LED is switched off, mean atom number is 1.9; (b) with the help of the LIAD, mean atom number is 2.8; (c) mean atom number versus the violet LED light intensity

先前的实验中利用反馈控制四极磁场梯度的方法已经实现了磁光阱中单原子 95%的装载概率^[20]。为了进一步利用光学手段实现磁光阱中确定数目原子快速和高概率的装载,实验中重新设计了反馈回路,通过增加反馈回路 2 的方法解吸附真空室内壁的原子,实现了磁光阱中确定数目原子的快速装载。具体的实验过程如下:首先在大磁场梯度条件下获得了磁光阱中典型的单原子信号[如图 1(c)所示],根据 MCS 卡记录的原子信号对反馈系统进行设定。设定磁光阱中零个原子时,紫光开启,同时四极磁场梯度为 100 Gs/cm ($1 \text{ Gs}=10^{-4}\text{T}$),当 MCS 卡记录的原子信号为需要的原子数目时,反馈控制关断紫光,同时四极磁场梯度被增加到 240 Gs/cm ($1 \text{ Gs}=10^{-4}\text{T}$),大磁场梯度的条件下,原子的装载率几乎下降到零,短时间内不会有新的原子装载到磁光阱中,同时高的背景真空度能够避免俘获原子与背景气体的碰撞,使磁光阱中原子保持较长的寿命。当原子逃离磁光阱之后,即 MCS 卡上显示不是需要的原子数目,反馈装置控制磁场关断,这时磁光阱中原子数目为 0,重新进行下一个循环。如图 4 所示,利用紫光有效地增加真空室中背景铯原子数密度,降低大磁场梯度磁光阱的装载时间,改变不同的紫光光强控制磁光阱中装载原子的数目。最终实现磁光阱中 500 s 时间内一个原子的概率为 98.2%,一个原子损失的原因主要是由于原子与背景气体的碰撞;两个原子的概率 95%,三个原子的概率为 80.1%,两个原子或三个原子损失的主要原因是原子与背景气体的碰撞以及磁光阱中原子与原子之间的碰撞。

4 结 论

磁光阱中原子数目的改变主要有三种机制:1) 初始装载到磁光阱中原子的数目;2) 俘获原子与背景原子碰撞导致原子的损失;3) 磁光阱中俘获原子与原子之间的碰撞。构建了高背景真空度下大磁场梯度的磁光阱,利用 390 nm 紫光诱导的 LIAD 过程增加了真空室中背景原子数密度,降低了大磁场梯度磁光阱的装载时间,控制紫光的光强实现了磁光阱中不同数目原子的装载,利用光学控制的方案同时结合反馈

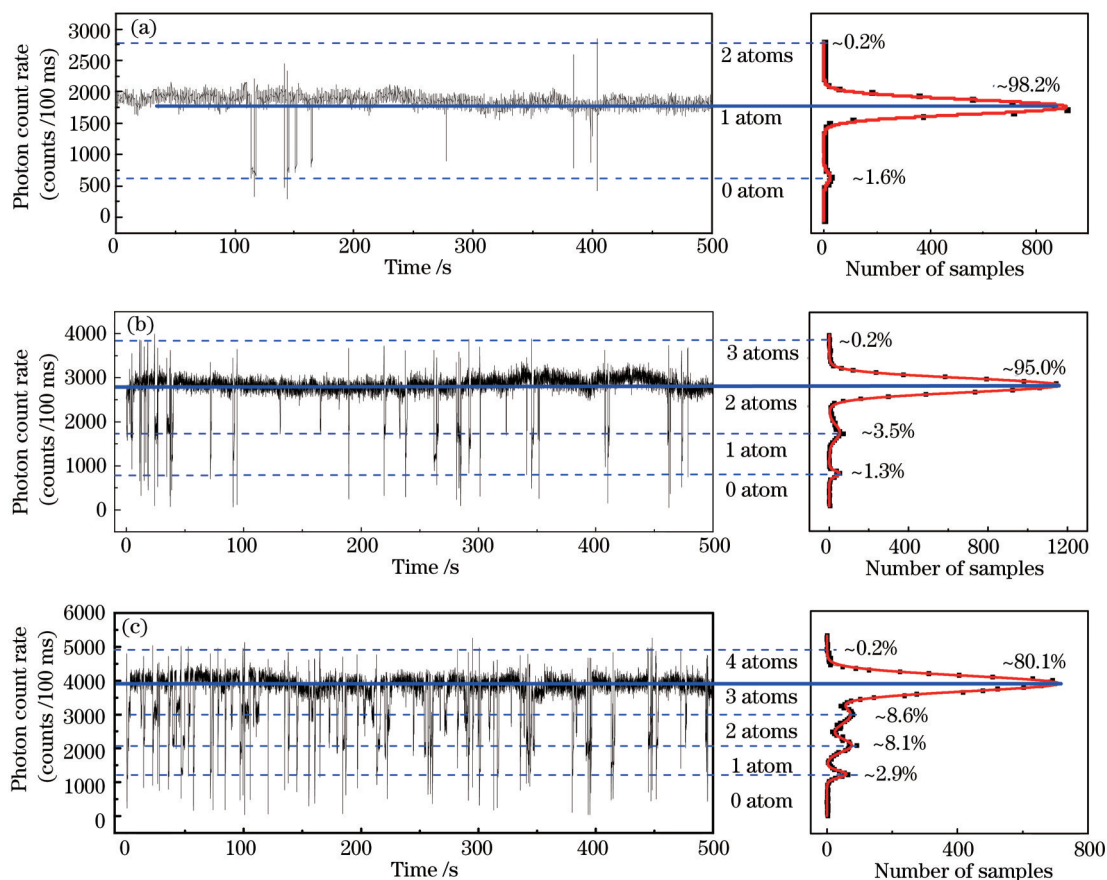


图4 500 s时间内(a)一个原子的概率为98.2%;(b)两个原子的概率为95.0%;(c)三个原子的概率为80.1%

Fig.4 Occupation probabilities in 500 second are (a) 98.2% for single atom; (b) 95.0% for two atoms; (c) 80.1% for three atoms
控制磁场梯度的方法,有效地控制了磁光阱的装载率和损失率,最终实现了磁光阱中确定原子数目的快速和高概率装载,这为下一步实现远失谐光学偶极阱中单原子快速和高概率的装载以及利用反射式纯位相空间光调制器构建二维偶极阱阵列,实现偶极阱阵列中每个阱中单个原子快速和高概率的装载奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 H J Kimble. The quantum internet[J]. Nature, 2008, 453(7198): 1023–1030.
- 2 M Hijkema, B Weber, H P Specht, *et al.*. A single-photon server with just one atom[J]. Nature Phys, 2007, 3(4): 253–255.
- 3 M Saffman, T G Walker. Quantum information with Rydberg atoms[J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(3): 2313–2363.
- 4 C F Roos, M Chwalla, K Kim, *et al.*. ‘Designer atoms’ for quantum metrology[J]. Nature, 2006, 443(7109): 316–319.
- 5 B Darquie, M P A Jones, J Dingjan, *et al.*. Controlled single-photon emission from a single trapped two-level atom[J]. Science, 2005, 309(5733): 454–456.
- 6 E Urban, T A Johnson, T Henage, *et al.*. Observation of Rydberg blockade between two atoms[J]. Nature Phys, 2009, 5(2):110–114.
- 7 Diao Wenting, Liang Qiangbing, Liu Zhi, *et al.*. Study of large Raman laser systems used for two-photon coherent manipulation of the ground state of single cesium atom[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(11): 1102001.
刁文婷, 梁强兵, 刘智, 等. 用于铯原子基态双光子相干操控的大失谐Raman激光系统的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102001.
- 8 S Yu, P Xu, X D He, *et al.*. Suppressing phase decoherence of a single atom qubit with Carr–Purcell–Meiboom–Gill sequence[J]. Opt Express, 2013, 21(26): 32130–32140.
- 9 M Schlosser, S Tichmann, J Kruse, *et al.*. Scalable architecture for quantum information processing with atoms in optical micro-structures [J]. Quantum Inf Process, 2011, 10(6): 907–924.
- 10 F Nogrette, H Labuhn, S Ravets, *et al.*. Single-atom trapping in holographic 2D arrays of microtraps with arbitrary geometries[J]. Phys Rev X, 2014, 4(2): 021034.

- 11 T Xia, M Lichtman, K Maller, *et al.*. Randomized benchmarking of single qubit gates in a 2D array of neutral atom qubits[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, 114(10): 100503.
- 12 N Shclosser, G Reymond, I Protsenko, *et al.*. Sub-poissonian loading of single atoms in a microscopic dipole trap[J]. *Nature*, 2001, 411(6841): 1024-1027.
- 13 T Grünzweig, A Hilliard, M McGovern, *et al.*. Near-deterministic preparation of a single atom in an optical microtrap[J]. *Nature Phys*, 2010, 6(12): 951-954.
- 14 J He, B D Yang, Y J Cheng, *et al.*. Extending the trapping lifetime of single atom in a microscopic far-off-resonance optical dipole trap [J]. *Frontiers Physics*, 2011, 6(3): 262-270.
- 15 Wang Guiping, Ji Weibang, Ma Jie, *et al.*. Measurement on collisional loss rate coefficient of cesium cold atoms in a magneto-optical trap[J]. *Chinese J Lasers*, 2008, 35(2): 221-224.
王贵平, 冀伟邦, 马 杰, 等. 磁光阱中铯冷原子碰撞损失率系数的测量[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 221-224.
- 16 Z Hu, H J Kimble. Observation of a single atom in a magneto-optical trap[J]. *Opt Lett*, 1994, 19(22): 1888-1890.
- 17 D Haubrich, A Hope, D Meschede. A simple model for optical capture of atoms in strong magnetic quadrupole fields[J]. *Optics Communications*, 1993, 102(3-4): 225-230.
- 18 S B Hilland, J Mc Clelland. Atoms on demand: fast, deterministic production of single Cr atoms[J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(18): 3128-3130.
- 19 S Yoon, Y Choi, S Park, *et al.*. Definitive number of atoms on demand: controlling the number of atoms in a few-atom magneto-optical trap[J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(21): 211104.
- 20 Wang Jieying, Liu Bei, Diao Wenting, *et al.*. Optimization of the light-induced-fluorescence signals of single atoms and efficient loading of single atoms into a magneto-optical trap[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(5): 053202.
王杰英, 刘 贝, 刁文婷, 等. 磁光阱中单原子荧光信号的优化及单原子的高效装[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 053202.
- 21 S N Atutov, R Calabrese, V Guidi, *et al.*. Fast and efficient loading of a Rb magneto-optical trap using light-induced atomic desorption [J]. *Phys Rev A*, 2003, 67(5): 053401.
- 22 S Villalba, H Failache, A Lezama. Light-induced atomic desorption and diffusion of Rb from porous alumina[J]. *Phys Rev A*, 2010, 81(3): 032901.
- 23 P F Zhang, G Li, Y C Zhang, *et al.*. Light-induced atom desorption for cesium loading of a magneto-optical trap: analysis and experimental investigations[J]. *Phys Rev A*, 2009, 80(5): 053420.
- 24 Wang Jing, Yang Baodong, He Jun, *et al.*. Influence of the bandwidth of feedback loop in frequency stabilization of external-cavity diode laser by polarization spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 425-430.
王 婧, 杨保东, 何 军, 等. 采用偏振光谱对外腔半导体激光器稳频时反馈环路带宽的影响[J]. *光学学报*, 2009, 29(2): 425-430.

栏目编辑: 刘丰瑞