量子光学学报 25(2)：180-186，2019
Journal of Quantum Optics

DOI：10.3788/JQO20192502.0501[20]

单原子光镊的激光强度起伏对原子俘获寿命的影响及改善

王家超[1]， 孙瑞[1]， 王欣[1]， 张孔[1]， 何军[1,2]， 王军民[1,2†]

（1.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，太原 030006；
2.山西大学省部共建极端光学协同创新中心，太原 030006）

摘要： 使用单束强聚焦的基模高斯光束可以构建光镊装载原子。虽然光镊一般选择远离原子共振跃迁线的激光，但是光镊的强度起伏仍然会导致原子逃逸，这样原子在光镊中的俘获寿命问题就变得至关重要。本实验以声光频移器（AOM）为主要元件，并施加外部反馈控制电路抑制 937.7 nm 波长光镊频域上的强度噪声以及时域上的功率起伏，降低光镊对原子的参量加热，从而有效延长原子在光镊中的俘获寿命。典型的频域噪声抑制带宽 17 kHz，噪声强度抑制 10 dB，时域内激光强度起伏可以从峰峰值起伏±1.350%抑制到±0.036%，有效地降低了光镊的强度起伏。实验结果表明我们可以将 937.7 nm 波长光镊中单个铯原子俘获寿命从 200 ms 延长至1 180 ms.为后续原子内态的制备、激发等操作提供充足的时间，保证原子处于俘获状态，提高了实验成功率，缩短了实验时长。

关键词： 光镊； 原子俘获寿命； 参量加热； 激光强度噪声； 强度噪声抑制

中图分类号： O431 **文献标识码：** A **文章编号：** 1007-6654(2019)02-0180-07

0 引言

基于激光冷却与俘获的中性原子，相比其他离子阱等系统，原子与外界环境相互作用很弱，基本保持了原子本征的特性，便于我们进行基础原理的探索和研究。降低磁光阱的装载率并使用光镊俘获单个原子，更加方便了我们对于原子的制备与操控。单个原子可以看作最基本的量子系统，做单个量子比特研究，对于量子信息，量子中继的研究有很大的实用意义。还可以将系统进行拓展，进行两个，多个到阵列的规模，实现多位量子比特的寻址计算等等。1994 年，Kimble 小组首次实现了单个原子的冷却与俘获[1]。随后又有很多的单原子相关实验研究[2]，2003 年，Schrader 等人在一维光晶格中俘获一系列单原子，实现了量子寄存器[3]。2015 年，美国 Saffman 小组，在一个 7×7 的二维的偶极阱阵列中成功俘获多个单原子，平均装载率 59%，并实现对阵列中单个原子量子比特的操控及保真度的研究[4]。处于光镊中的原子寿命是有限的，对于原子在光镊中的制备和操控当然希望更多的俘获时间。我们已经在实验上实现了磁光阱中单个铯原子的装载与探测[17,22]，磁光阱和远失谐光镊之间单个原子的高效转移[5,20]，以及魔数波长光镊的搭建[6]。基于 10 MHz 高 on/off 比纳秒脉冲的触发式 852 nm 单光子源的实验[18-19]，我们将在魔数波长光镊中继续优化单光子源的纯

收稿日期： 2019-01-23；**接受日期：** 2019-02-19
基金项目： 国家自然科学基金（11774210；61875111）；山西省“1331 工程”重点学科建设计划经费资助的课题
作者简介： 王家超（1994－），男，山西平遥人，硕士研究生，主要从事冷原子物理方面的研究。E-mail：554605965@qq.com
† **通信作者：** 王军民，E-mail：wwjjmm@sxu.edu.cn

度和不可区分度。

1　通过 AOM 反馈抑制激光强度起伏

如图 1 是我们的实验装置示意图，通过在声光频移器（AOM）上加反馈控制的方法，准确控制 AOM 衍射效率，来控制功率的稳定性。通过 AOM 将光摄频移 80 MHz（这并不影响远失谐的效果），然后将一级衍射光分成两路，一路收集进入探测器，作为反馈信号，功率起伏会反映为探测器输出电压的变化。电压变化输入 PID 作为参考信号，PID 反馈输出信号加在 AOM 的驱动电压上，可以控制 AOM 的衍射效率。这里我们会测量 AOM 的衍射效率随驱动电压的变化，选定衍射效率随驱动电压线性变化的区域作为反馈起点。当激光器功率输出变大时，AOM 衍射功率线性增加，探测器输出电压增大，PID 给出一个负反馈信号，降低驱动电压，衍射效率下降，AOM 输出功率降低，达到功率稳定的目的。反之亦然[7]。

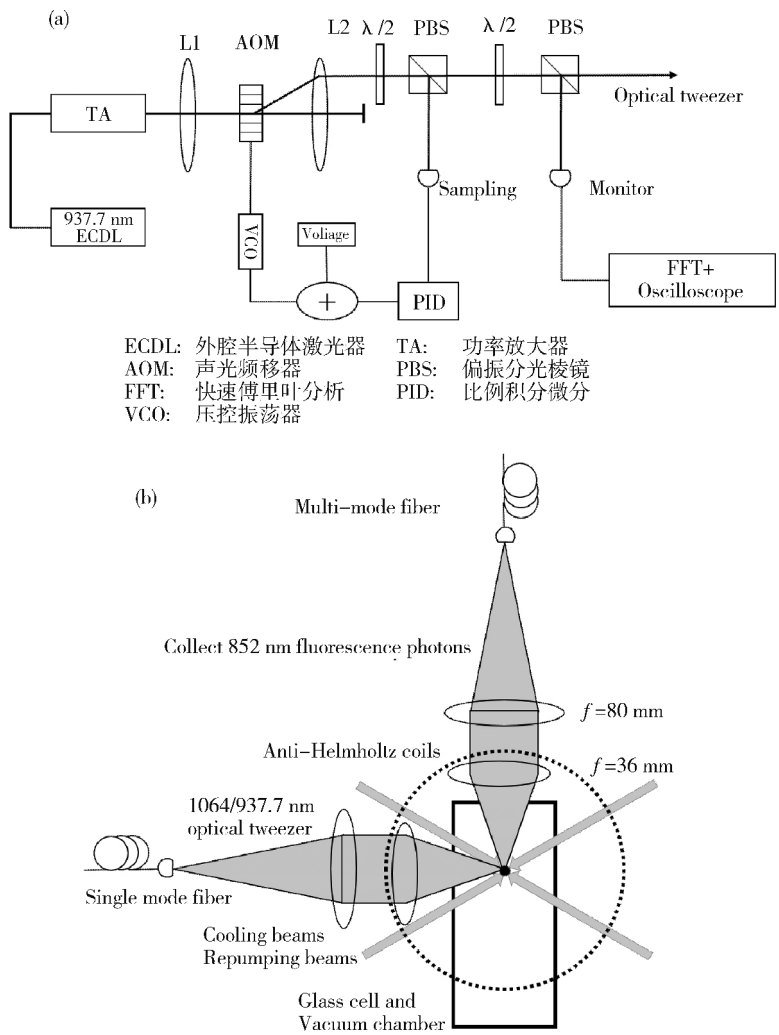

Fig. 1　Experiment setup of AOM feedback (a) and the schematic of atoms transfer between MOT and ODT (b)

图 1　AOM 反馈控制实验装置(a)和原子在磁光阱与光镊之间转移示意图(b)

反馈锁定的效果与取样功率比例有一定的关系。理论上，假如把全部的光收集进入探测器，不考虑探测器的饱和及响应带宽，那么探测器可以得到激光所有的强度起伏信息，通过 PID

进行积分放大探测器输出的电压信号，并与给定的设置值(Setpoint)进行比较，给出反馈信号，反馈环路就可以对光强进行闭合锁定，假如没有任何取样那么得不到任何强度起伏信息，也无法进行反馈锁定。我们在实验上比较了保持取样功率 5 mW 不变，改变总功率，在分别取样三分之一，四分之一，以及十分之一情况下，优化 PID 反馈参数，比较时域上强度起伏的大小。由图 1 可知当激光器自由运转时功率起伏在±1.350%，当取样三分之一功率作为反馈时可以将强度起伏抑制在±0.036%，取样四分之一锁定时强度起伏为±0.059%，取样十分之一时强度起伏为±0.073%。随着取样比例的下降，强度起伏变大，锁定效果逐渐下降。我们认为这是强度起伏信息的丢失，取样的强度起伏并不能完全代表全部光场的强度起伏，取样越少那么代表性越弱。同时也引入了偏振变化带来的影响，全部取样时我们不需要考虑光场偏振态的变化，使用波片加 PBS 方法调整取样比例时则需要依赖偏振，当激光器输出功率不变，而是偏振面发生了旋转，导致取样比例变化，那么探测器就会得到一个错误的强度起伏信号，虽然能够通过反馈将取样功率锁定回初始设置值，但是总功率发生了变化，待用一路的功率也随之增大或者减小，偏振面旋转过大则会直接导致反馈环路的失锁。

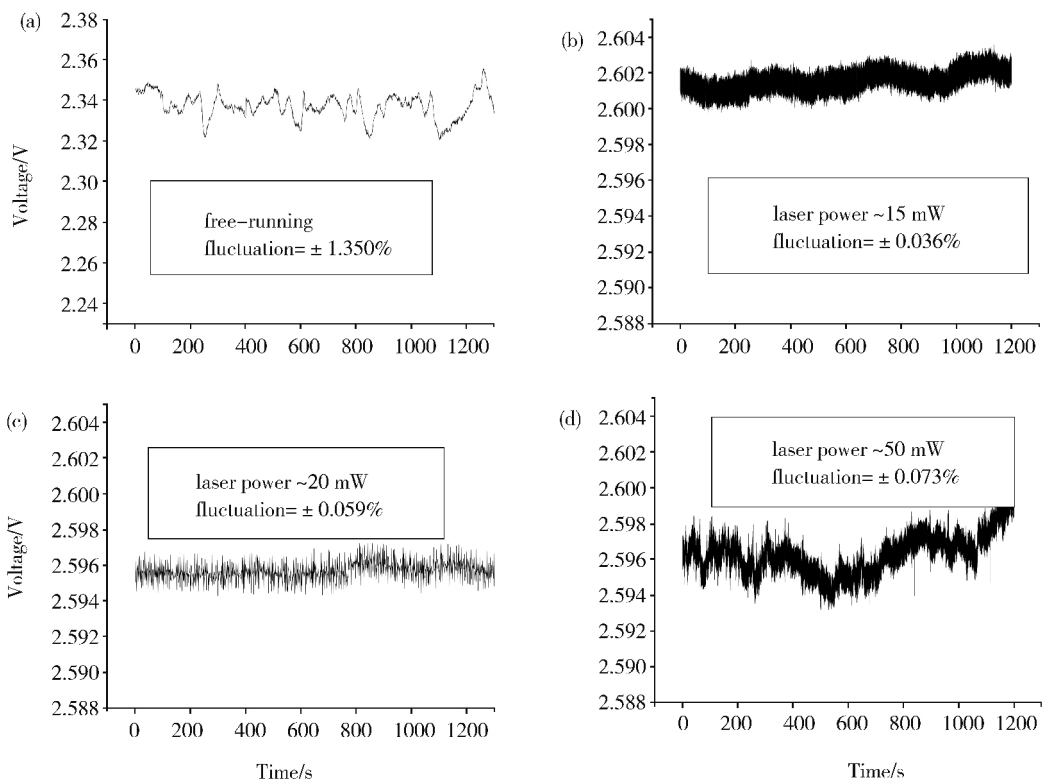

Fig. 2 Intensity fluctuation of 937.7 nm ODT laser beam when free-running(a) and comparison of intensity fluctuation when feedback on at different sampling ratio(b),(c),(d)

图 2 激光器自由运转时强度起伏(a)及不同取样比例下反馈环路锁定后强度起伏对比(b),(c),(d)

反馈锁定的效果也与反馈带宽的大小有关系，我们同样取样 5 mW，取样比例三分之一，通过修改 PID 的积分时间，可以改变时域上噪声强度抑制的带宽，积分时间越长带宽越小，那么带宽内的抑制效果越好，通常情况下我们比较关注低频段(千赫兹量级)的噪声强度。对于本实验，我们比较关心光镊的两个特征频率～4 kHz和～40 kHz，以及它们的二倍频～8 kHz 和～80

kHz。图 3 是一组典型的频域上的抑制结果，黑色的线是反馈前激光在时域上噪声强度，红色的线是反馈开启后激光在频域上的噪声强度，在直流到 17 kHz 带宽内我们将强度起伏抑制了 10 个 dB 左右，超出带宽范围，起伏反而会增强。图 4 是在同样取样功率以及比例下，只调整积分时间，改变带宽，我们在时域上测得的强度起伏，由图可知，不断拓展带宽，锁定效果会逐渐下降，我们暂时还无法把带宽拓展到 100 kHz，当拓展到 30 kHz 的带宽，频域上的锁定效果就很差了，这样是没有实际意义的。当缩小带宽到 10 kHz 则可以在频域和时域上得到非常好的锁定效果，只有±0.025%峰峰值起伏，这刚好覆盖了光镊较小的振荡频率以及它的二倍频，这对于改善原子寿命具有一定的作用。

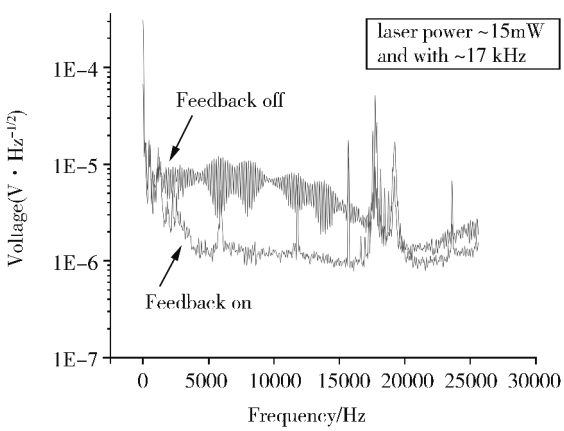

Fig. 3　Suppression of the 937.7 nm laser beam's intensity flucfuation in frequency domain.

图 3　频域内 937.7 nm 波长光镊激光束的强度噪声抑制

当然影响最后激光的强度噪声不仅仅是以上两个因素，还与探测器的输入输出噪声，参考电压的噪声，以及电子学噪声都有一定的关系[8]，本文不再详细讨论。

2　原子在光镊中寿命的测量及改善

原子在光镊中的寿命有很多因素影响，影响最大的来自于碰撞损耗以及光镊的强度噪声加热，碰撞损耗可以通过提高背景真空度来减弱。而强度噪声起伏则不可避免，单束强聚焦的高斯

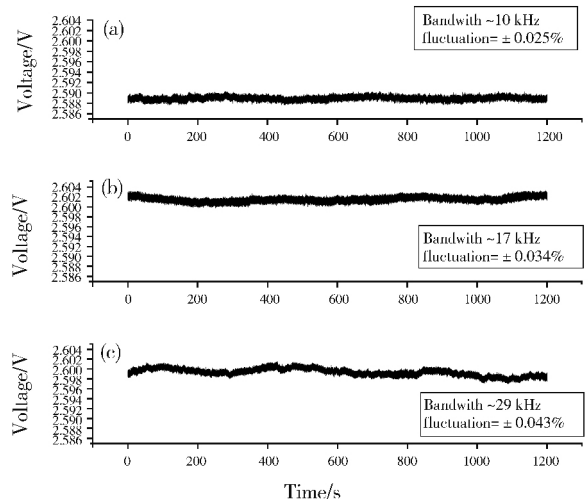

Fig. 4　Comparison of feedback locking with different bandwidth

图 4　不同带宽下反馈锁定效果对比

光束在腰斑处形成一个保守势阱，原子在势阱中可以看作一个三维的谐振子，光镊对原子在三个方向都形成势垒，那么原子在阱中就有特定的振荡频率，当光场的强度噪声起伏在这些特征频率处以及二倍频处就会与原子产生共振，原子就会被逐渐加热而逃逸。单个原子在一维简谐势阱中的运动哈密顿量可以用下式来描述[9-10]

$$H = \frac{p^2}{2M} + \frac{1}{2}M w_{trap}^2 [1 + \varepsilon(t)] x^2, \qquad (1)$$

式中第一项是动能，第二项为势能，M 为原子质量，$w_{trap} = \sqrt{k_0/M}$ 为原子在阱中的振荡频率，k_0 弹性系数的平均值，正比于光镊的平均光强，$\varepsilon(t)$ 为光镊的相对强度起伏，根据微扰理论可以计算得出光强的随机起伏在频域上的噪声会与原子产生共振逐渐加热原子，且主要依赖于振荡频率的二倍频，说明原子在光镊中的运动加热是一个参量加热的过程。本文主要目的在于利用反馈控制，对光镊强度噪声进行抑制，从而减弱对原子的参量加热，提高原子寿命。

我们认为在光束的径向是轴对称的，原子振荡频率～40 kHz，在光束传输方向瑞利长度内振荡频率～4 kHz。如图 1 所示，我们调节光镊位置使之在空间上与磁光阱完全重叠，可以认为原子同时处于两个阱中，转移效率为 100%，方便观

察，我们在垂直光镊方向架设另一组透镜收集原子辐射的荧光，如图 5 是我们观察到的磁光阱中单个原子或者少数原子的台阶信号，单个原子可以在磁光阱中稳定存在几十到上百秒，背景计数 267 counts/50 ms，一个原子台阶高度 253 counts/50 ms，由图可知我们可以清晰地分辨磁光阱中单个，双个，三个原子，可以通过调节磁光阱参数及荧光收集透镜位置改善信噪比，分辨更多的原子。通过时序控制磁光阱和光镊的开关及重叠时间，不断改变光镊的持续时间，测量原子转移效率，随着时间的增长，原子重新转移回来的概率呈 e 指数衰减，拟合就可以得到原子在光镊中的寿命。图 6 是我们测量的原子在 937.7 nm 魔数波长光镊中原子的寿命，只有 200 ms。对光镊进行强度噪声抑制后（带宽 17 kHz，只抑制轴向特征频率及其二倍频），重新测量原子寿命，改善寿命达到 1 180 ms（图 7）。

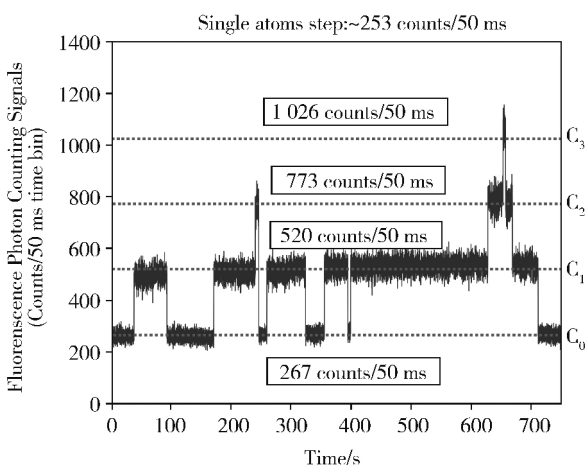

Fig. 5 Fluorenscence photon counting signal of a single cesium atom in magneto-optical trap

图 5 单个铯原子在磁光阱中的荧光光子计数信号

原子在光镊中的寿命还可以通过其他方法来继续提高，例如使用蓝失谐光镊[11]，在转移过程中做偏振梯度冷却[12,16,21]，或者对光镊的偏振做调控，使用略带一点椭度的椭圆偏振光[13]等。

3 结论

本文通过一套外部反馈电路，以 AOM 为主要元件对光镊时域以及频域上的强度噪声进行抑制，虽然不能将抑制带宽拓展至 100 kHz 完全覆盖原子所有的参量加热特征频率，但是仍可以有效延长单原子的俘获寿命。这对于后续的单原子操控实验具有重要意义，该方法同样也可以拓展到其他实验系统，例如激光直写技术[14]，散粒噪声极限的探测[15]等，根据不同的实验需要，可以降低频域上不同的带宽内的强度噪声，或者时域上的强度起伏。

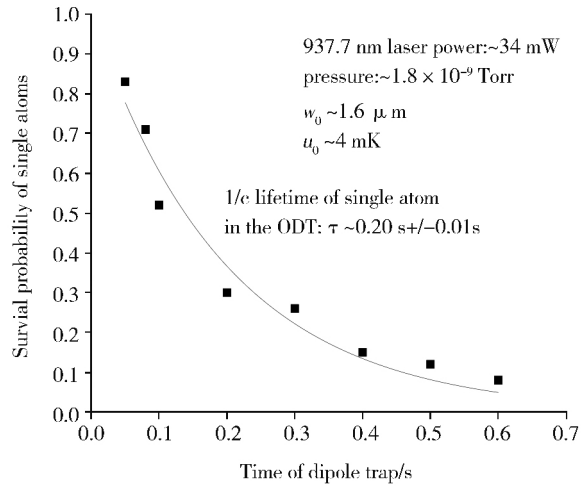

Fig. 6 Trapping lifetime of single cesium atom in optical dipole trap at 937.7 nm

图 6 单个铯原子在 937.7 nm 光镊中的俘获寿命

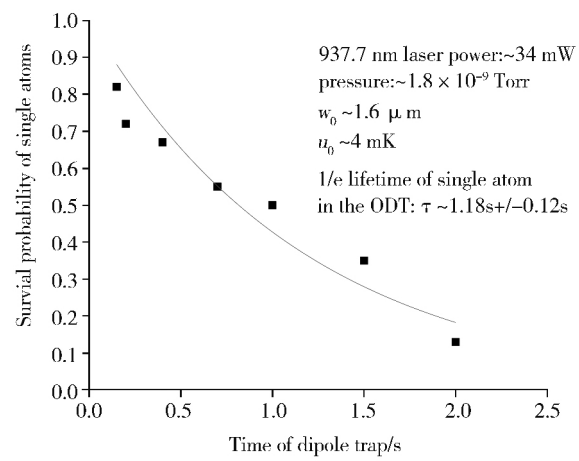

Fig. 7 Trapping lifetime of single cesium atom in optical dipole trap at 937.7 nm after intensity noise suppressed

图 7 经过强度噪声抑制后单个铯原子在 937.7 nm 光镊中的俘获寿命

参考文献：

[1] Hu Z, Kimble H J. Observation of a Single Atom in a Magneto-optical Trap [J]. *Opt Lett*, 1994, **19**: 1888-1890. DOI: 10. 1364/OL. 19. 001888.

[2] Kuhr S, Alt W, Schrader D, *et al*. Deterministic Delivery of a Single Atom[J]. *Science*, 2001, **293**: 278-280. DOI: 10. 1126/science. 1062725.

[3] Schrader D, Dotsenko I, Khudaverdyan M, *et al*. Neutral Atom Quantum Register[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, **93**: 150501. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 93. 150501.

[4] Xia T, Lichtman M, Maller K, *et al*. Randomized Benchmarking of Single Qubit Gates in a 2D Array of Neutral Atom Qubits[J]. *Phys Rev Lett*, 2015, **114**: 100503. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 114. 100503.

[5] He J, Wang J, Yang B D, *et al*. Single Atoms Transferring Between a Magneto-optical Trap and a Far-off-resonance Optical Dipole Trap[J]. *Chinese Phys B*, 2009, **18**(8): 3404-3408. DOI: 10. 1088/1674－1056/18/8/046.

[6] Liu B, Jin G, Sun R, *et al*. Measurement of Magic-wavelength Optical Dipole Trap by using the Laser-induced Fluorescence Spectra of Trapped Single Cesium Atoms [J]. *Opt Expres*, 2017, **25**(14): 15861-15867. DOI: 10. 1364/OE. 25. 015861.

[7] **白乐乐，温馨，杨煜林，等. 基于声光频移器反馈控制的** 397. 5 nm **紫外激光功率稳定研究**[J]. **中国激光**, 2018, **45**(10): 1001008. DOI: 10. 3788/CJL201845. 1001008.

[8] Trlcof F, Phung D H, Lours M, *et al*. Power Stabilization of a Diode Laser with an Acousto-optic Modulator[J]. *Rev Sci Instrum*, 2018, **89**: 113112. DOI: 10. 1063/1. 50468520.

[9] Savard T A, KM O'Hara, Thomas J E. Laser-noise-induced Heating in Far-off Resonance Optical Traps[J]. *Phys Rev A*, 1997, **56**(2): 1095-1098. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 56. R1095.

[10] Gehm ME, K MO'Hara, Savard TA, *et al*. Dynamics of Noise-induced Heating in Atom Trap[J]. *Phys Rev A*, 1998, **58**(5): 3914-3919. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 58. 3914.

[11] Jarvis K N, Devlin J A, Wall T R, *et al*. Blue-Detuned Magneto-Optical Trap [J]. *Phys Rev Lett*, 2018, **120**: 083201. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 120. 083201.

[12] Paul D Lett, Richard N Watts, Christoph Westbrook, *et al*. Observation of Atoms Laser Cooled Below the Doppler Limit[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **61**: 169. DOI: 10. 1103/PhysRevLett. 61. 169.

[13] Garcia S, Romain J, Long R. Improving the Lifetime in Optical Microtraps by using Elliptically Polarized Dipole Light [J]. *Phys Rev A*, 2018, **97**: 023406. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 97. 023406.

[14] Kim D, Rhee H G, Song J B, *et al*. Laser Output Power Stabilization for Direct Laser Writing System by using an Acousro-optic Modulator[J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**: 103110. DOI: 10. 1063/1. 2801012.

[15] Jonas Junker, PatrickOppermann, Benno Willke. Shor-noise-limited Laser Power Stabilization for the AEI 10 m Prorotype Interferometer[J]. *Opt Lett*, 2017, **42**(4): 755-758. DOI: 10. 1364/OL. 42. 000755.

[16] He J, Yang B D, Cheng Y J, *et al*. Extending the Trapping Lifetime of Single Atom in a Microscopic Far-off-resonance Optical Dipole Trap[J]. *Front Phys*, 2011, **6**(3): 262-270. DOI: 10. 1007/s11467-011-0179-y.

[17] He J, Yang B D, Zhang T C, *et al*. Improvement of the Signal-to-noise Ratio of Laser-induced-fluorescence Photon-counting Signals of Single-atoms Magneto-optical Trap [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2011: 44135102. DOI: 10. 1088/0022-3727/44/13/135102.

[18] Liu B, Jin G, He J, *et al*. Suppression of Single-cesium-atom Heating in a Microscopic Optical Dipole Trap for Demonstration of an 852 nm Triggered Single-photon Source[J]. *Phys Rev A*, 2016, **94**: 013409. DOI: 10. 1103/PhysRevA. 94. 013409.

[19] Jin G, Liu B, He J, *et al*. High on/off Ratio Nanosecond Laser Pulses for a Triggeredsingle-photon Source[J]. *Appl Phys Express*, 2016, **9**: 072702. DOI: 10. 7567/APEX. 9. 072702.

[20] He J, Liu B, Diao W T, *et al*. Efficient Loading of a Single Neutral Atom Into an Optical Microscopic Tweezer [J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(4): 043701. DOI: 10. 1088/1674-1056/24/4/043701.

[21] He J, Yang B D, Zhang T C, *et al*. Efficient Extension of the Trapping Lifetime of Single Atoms in an Optical Tweezer

by Laser Cooling[J]. *Physica Scripta*, 2011, **84**: 025302. DOI: 10. 1088/0031-8949/84/02/025302.

[22] He J, Liu B, Wang J Y, *et al*. Deterministic Loa Ding of an Indicidual Atom: Towards Scalable Implementation of Multi-qubit[J]. *Chinese Physics B*, 2017, **26**(11): 113702. DOI: 10. 1088/1674-1056/26/11/113702.

Effect of Single atom Optical Tweezer's Intensity Fluctuation upon Single Cesium Atom's Trapping Lifetime and it's Improvement

WANG Jia-chao[1], SUN Rui[1], WANG Xin[1], ZHANG Kong[1], HE Jun[1,2], WANG Jun-ming[1,2]

(1. *State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, and Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*;
2. *Collaborative Innovation Center of Extreme Optics of the Ministry of Education and Shanxi Province, Shanxi University, Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: Using a single highly focused fundamental-mode Gaussian beam could form an optical tweezer and load atoms, although optical tweezers generally choose to far away from the atom resonance transition line of the laser, optical tweezers intensity fluctuations will also lend to the atoms' escape, so the lifetime of the atom in optical tweezers becomes crucial. In this experiment, acoustic optical modulator was used as the main component, and a set of external feedback control circuit was added to suppress the intensity noise in frequency domain and power fluctuation in time domain of 937. 7 nm optical tweezers, reducing the heating parameters of atoms in optical tweezers, so as to effectively extend the trapping life of atoms in optical tweezers. The typical bandwidth is 17 kHz, noise suppression is 10 dB, and the time-domain laser intensity fluctuation could be reduced from a peak-to-peak fluctuation of ±1. 350% to ±0. 036%, effectively reducing the intensity fluctuation of optical tweezers. The experimental results showed that the trapping lifetime of single cesium atom in 937. 7 nm optical tweezers could be extended from 200 ms to 1 180 ms. It provides sufficient time for the subsequent preparation and excitation of atomic states, ensures the capture of atoms, improves the success rate of experiments, and saves the time of experiments.

Key words: optical tweezer; trapping lifetime of atoms; parameteric heating; laser intensity noise; intensity noise suppression