利用蓝失谐激光诱导微型光学偶极阱中冷原子间的光助碰撞提高单原子制备概率*

刁文婷 何军 刘贝 王杰英 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, 太原 030006)

(2013 年 10 月 5 日收到; 2013 年 11 月 27 日收到修改稿)

借助于微米尺度的远失谐光学偶极阱 (FORT) 中蓝失谐光的光助碰撞效应与反馈控制系统, 文章在实验上实现了FORT中单个原子的高效制备. 结合原子的势能曲线, 分析了原子在红失谐光和蓝失谐光作用下的光助碰撞效应, 并且在实验上得到红失谐光诱导下单原子的制备概率约50%, 蓝失谐光诱导下单原子的制备概率约80%. 通过反馈控制系统, 当原子数目小于1 时, 反馈控制使磁场梯度减小以快速俘获原子, 当原子数目大于1时, 反馈控制开启蓝失谐光场, 使得原子一个个逃逸出阱中, 最终实现了FORT中单原子的制备概率约95%, 为下一步偶极阱的二维扩展奠定了基础. 通过HBT 实验测量FORT中单原子发出光子的统计特性, 得到二阶相干度 $g^{(2)}(\tau=0)=0.08$.

关键词: 单原子, 偶极力阱, 光助碰撞, 光场的二阶相干度

PACS: 37.10.De, 37.10.Jk, 25.20.Dc **DOI:** 10.7498/aps.63.023701

1 引 言

随着量子信息技术的发展, 人们一直致力于寻找各种可作为量子信息的载体, 在这之中, 单原子作为一种完美的量子系统被广泛应用. 借助于激光冷却技术可实现单个原子的冷却与俘获, 相对于离子或其他系统, 中性原子不易受外界电磁场的干扰, 这种同环境弱耦合的特性对于其保持原子内态的相干性非常有优势. 在过去的十几年里, 人们演示了很多种方法来制备和俘获超冷原子. 光学偶极力阱[1]因为不需要加额外的磁场, 并且对原子造成较少的光激发, 因此提供了一种保守的、强约束的俘获势阱. 远失谐偶极阱 (far-off-resonance trap, FORT)[2]可以实现对原子外部自由度的控制和内部自由度的保持, 对于阱中俘获的原子, 可以对其量子态进行制备和操控[3,4]. 原子需要被装载到光学偶极力阱中, 通常的方法是从磁光阱 (magneto-optical trap, MOT) 中将原子装载到偶极力阱中. 有两种方法可以完成单个原子从MOT到FORT的装载, 一种是“top-down (自上往下)”, 即通过减少磁光阱的装载率来减少偶极阱中原子的装载率[5,6]; 另一种“bottom up (自下往上)”, 即先在MOT中俘获多个原子并装载到FORT中, 然后利用碰撞阻挡机制来完成偶极阱中单原子的装载[7,8]. 前一种方案是在MOT中制备单原子然后利用转移技术装载到FORT中, 因为在MOT 中制备的单原子源是少数原子, 不利于扩展到多个光学阱的单原子装载. 后一种方案主要利用碰撞机制获得FORT中单原子的装载. 2001 年, 法国Grangier小组利用碰撞阻挡效应获得了最大50% 的FORT中单原子装载概率[8,9]; 2006年, 韩国An小组利用碰撞获得近确定数目的少数原子到磁光阱的装载[10]; 2010 年, 新西兰Andersen小组提出利用光助碰撞的效应实现FORT中单原子的装载, 获得

* 国家重大科学研究计划 (批准号: 2012CB921601)、国家自然科学基金 (批准号: 11274213, 61205215, 61227902, 61121064)、山西省回国留学人员科研经费 (批准号: 2012-015) 和山西省太原市科技明星专项 (批准号: 12024707) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

© 2014 中国物理学会 Chinese Physical Society

82.7% 的单原子装载概率[11]. 2011年, Andersen 小组获得91% 的FORT中单原子装载概率[12].

本文中, 我们在MOT中俘获宏观数量的冷原子, 然后装载到FORT中, 利用蓝失谐的近共振光与反馈控制系统来控制FORT中的单原子概率, 在装载过程中, 如果FORT中是多原子, 进一步利用优化的蓝失谐近共振光使多余的原子碰撞出阱, 获得FORT中95% 的单原子装载. 同时, 我们可以实现单原子在MOT与FORT 几乎接近100% 的转移. 利用这种高效的单原子装载技术, 可以实现二维偶极力阱的扩展.

2 实验装置与实验原理

实验中, 通过蓝失谐光的光助碰撞和反馈控制回路, 实现了单原子在偶极阱中的高效率装载, 通过HBT (Hanbury Brown-Twiss) 实验测量了单原子发出的荧光的光子统计. 实验的控制过程与装置如图1 所示. 首先利用磁光阱捕获原子, 然后装载到远失谐偶极力阱中[13,14]. 磁光阱是由3对特定偏振的冷却光束和反抽运光束和提供四极磁场的1对反向亥姆霍兹线圈构成的, 在冷却光辐射压力的作用下原子可以被推到梯度磁场的零点附近并被冷却, 梯度磁场提供了一个与位置有关的回复力使原子能够俘获在磁场零点处, 最终原子位于光场和磁场的交汇区域. 为了把原子装载到FORT中, 我们通过降低背景真空度, 有效地缩小俘获光束的直径, 增大磁场梯度来降低装载率, 进而减小MOT中原子的数目, 然后再装载到1064 nm强聚焦的红失谐光构成的偶极阱中. 1064 nm的激光经透镜组聚焦后腰斑半径2.3 μm, 典型的功率为45 mW时, 对应的势阱深度 $U = k \times 1.5$ mK (k 是玻尔兹曼常数). 实验中, 原子发出的荧光信号是通过单光子计数模块 (single photon counting module, SPCM) 探测的, 光信号转变成电脉冲信号后输入到计算机中的多通道脉冲计数卡 (multi-channel scaler, MCS), 由计算机进行计数统计.

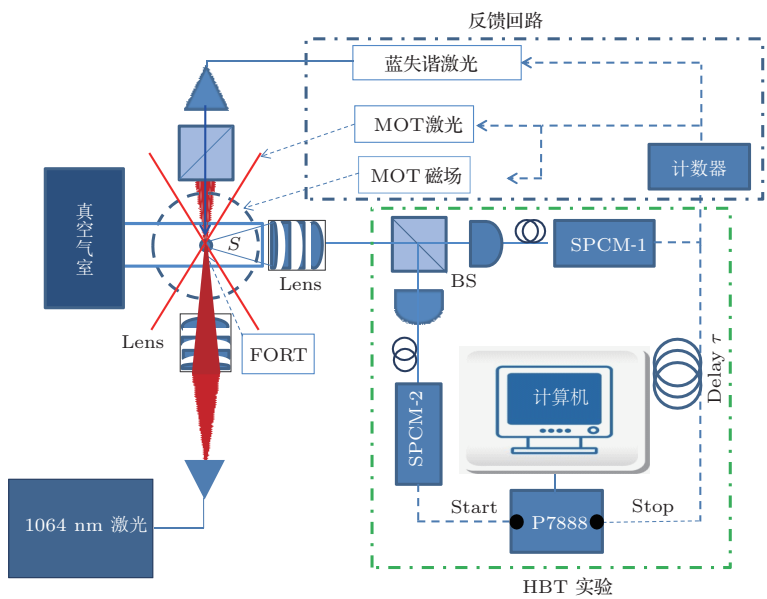

图1 单原子的俘获、装载与反馈控制实验图. 图中MOT 激光 (冷却光和再抽运光) 和MOT 磁场 (磁光阱四极磁场) 构成MOT; 强聚焦的1064 nm激光构成FORT; Lens, 透镜组; SPCM, 单光子计数模块

为了有效地控制FORT中单原子的装载率, 借助于反馈控制, 控制回路磁场梯度的大小[10]和蓝失谐光的光助碰撞效应[11,12] 实现了FORT中单原子的高效装载. 反馈控制是通过一个计数器来记录一定时间内单光子探测器探测到的光子信号的高低, 以相同时间 (50 ms) 内MCS卡记录到的零个原子、单原子与多个原子发出光子信号的计数作为参考, 设置计数器的控制范围, 并根据需求反馈控制磁场梯度大小以及蓝失谐光的开关以实现FORT中单个原子的有效控制. 对于实现FORT中原子的反馈控制时, 当原子的荧光计数小于单原子的荧光计数时, 减小磁场梯度至120 Gauss/cm以便快速的俘获原子; 当原子的荧光计数等于单原子的荧光计数时, 关断磁场, 使单原子在偶极阱中得到最长时间的保持; 当原子的荧光计数大于单原子的荧光计数时, 反馈控制蓝失谐光的开启, 并借助

于蓝失谐光的光助碰撞使两个以上的原子被一个个地碰撞出阱外, 直至荧光计数降为单原子的荧光水平以实现单原子的高效装载.

为了验证我们得到的FORT中单原子所发出荧光的光子统计特性, 我们通过HBT实验[15]测量了光场的统计特性, 实验装置如图1右下角虚线框所示.

3 实验结果与分析

3.1 偶极阱中原子之间光助碰撞效应的原理及实验结果

图2为偶极阱中原子之间的光助碰撞示意图. 在红失谐光助碰撞下, 原子被激发到吸引势, 这使得原子结合成分子或者得到较大的能量, 原子一对一对地逃逸出阱中. 所以当偶极阱中原来有偶数个原子时, 所有原子都逃逸出阱中; 当偶极阱中有奇数个原子时, 最终有一个原子留在了阱中. 因此原理上红失谐光的作用下, 阱中有50% 的概率是单原子. 在蓝失谐光的作用下, 两个原子通过长程偶极吸引势形成一个弱束缚态分子中, 在弱束缚态分子中, 一个原子在S态上, 另外一个原子在P态上, 如果原子对在辐射回基态之前获得的能量大于偶极阱的势阱深度, 那么原子对中的一个原子逃逸出阱中, 因此导致原子一个个地被损耗. 这种由相互作用导致的原子丢失的机制, 也就是所说的原子受到辐射逃逸出阱中, 同时也伴随着单个原子在阱中由于吸收与自发辐射而加热出阱的单体丢失机制.

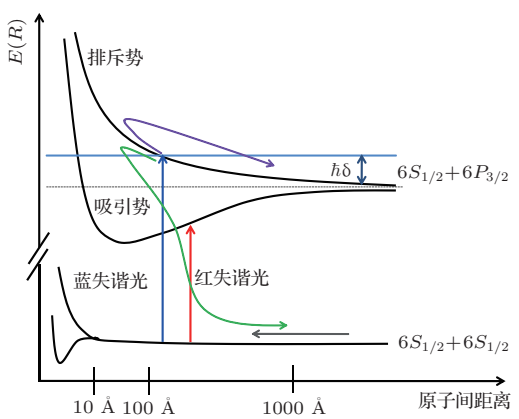

图2 偶极阱中原子光助碰撞原理: 原子在蓝失谐光和红失谐光的激发下吸引势和排斥势的变化曲线

我们首先在磁光阱中俘获少数的原子, 然后装载到偶极阱中. 磁光阱俘获原子的原理及其分析在参考文献[1, 2]中详细解释, 本实验中, 磁场梯度大于200 Gauss/cm, 真空度保持在10^{-10}—10^{-11} Torr, 光束直径2 mm. 法国的Grangier等[8]首先借助于红失谐的光诱导碰撞实现了单原子近50%的制备效率, 我们在实验上也实现了单原子近50%的装载率 (如图3(a)). Andersen 等[11]利用蓝失谐光的光助碰撞效应实现了FORT中单原子的装载, 获得82.7% 的单原子装载概率, 我们在实验上利用一束蓝失谐于原子$F_g = 4$—$F_e = 5$共振线30 MHz, 光强$I =\sim 20Is$ ($F_g = 4$—$F_e = 5$的饱和光强$Is = 1.12\ \mathrm{mW/cm^2}$) 的蓝失谐光照射原子, 实现了单原子80% 的装载概率 (如图3(b)).

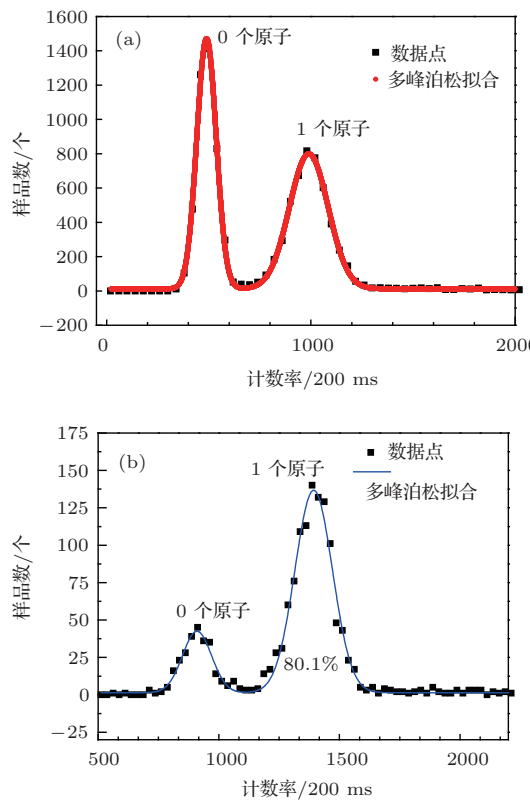

图3 利用光助碰撞在偶极阱中实现单原子的制备 (a) 红失谐光诱导下偶极力阱中的零个原子与单个原子的比例; (b) 蓝失谐光诱导下偶极力阱中的零个原子与单个原子的比例

3.2 利用反馈控制系统以及蓝失谐光场实现偶极阱中单原子的高效制备

我们把蓝失谐光诱导FORT中单原子的高效装载与反馈控制磁场梯度大小结合起来, 即通过控制磁场梯度的大小快速的俘获原子并长时间的保持单原子状态, 当偶极力阱中原子数目多于1个时, 反馈控制蓝失谐光场的开启, 使得原子一个个地辐射逃逸出阱中, 最终单个原子保留在阱中, 如图4所示, 我们在FORT中获得了单原子95% 的高

效装载.

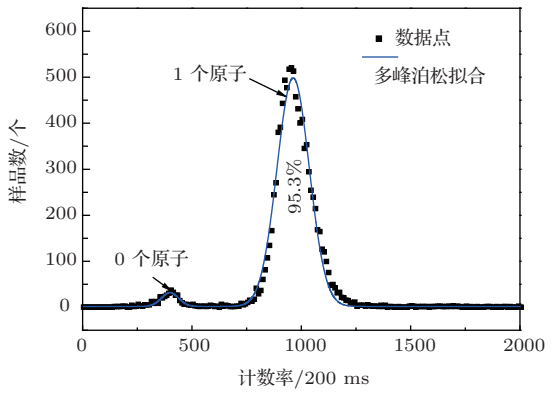

图 4 通过蓝失谐光诱导以及反馈控制磁场得到的 FORT 中单原子信号

3.3 HBT 实验测量二阶相干度

为了验证单原子发出荧光的光子统计特性, 我们通过 HBT 实验测量了单原子发出的荧光光场的统计特性, 分析得到了单原子发出单光子的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau)$. 实验装置如图 1 右下角虚线框所示, 原子发出的光子在 4π 立体角范围内大约 2.1% 的光子经过真空气室的窗片及聚焦透镜光纤等最终大概 6‰ 的光子到达 SPCM. 在 HBT 实验中, 50/50 分束器把光子分为两部分并分别进入到两个单光子探测器中, 一路做开始 (start) , 另外一路经过延时做停止 (stop) . 两路信号经过 P7888 快速计数卡做统计计数. 我们在其中 stop 一路加上一个延时器, 延时大约 186 ns. 单光子只能到达其中的一个单光子探测器, 若是理想的单光子源, 则 start 与 stop 两路信号在延时为 186 ns 的地方荧光计数为零, 即光子呈现反群聚效应. 由于单光子是不可分的, 所以两个单光子探测器不可能同时探测到同一个单光子, 与只用一个单光子探测器相比, 在 HBT 实验中用两个或者更多个单光子探测器的最主要优点是这可以避免探测器死时间的限制, 并且可以增加强度的范围. $g^{(2)}(\tau)$ 受限于光子的计数率, 因此我们用快速计数卡 P7888 来进行光子计数. 两个信号分别被送到 P7888 卡的 start 与 stop 端口, 计数的结果被一台工控机处理, 通过归一化计数的数据, 我们可以得到 MOT 中单原子发出荧光光子的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau=0)=0.09$ (如图 5 (a) 所示), FORT 中单原子发出荧光光子的二阶相干度 $g^{(2)}(\tau=0)=0.08$ (如图 5 (b) 所示), 说明单原子发出单光子是反群聚的. 数据处理时, 我们只是对数据进行了归一化, 并没有减去背景和暗计数对二阶相干度的影响.

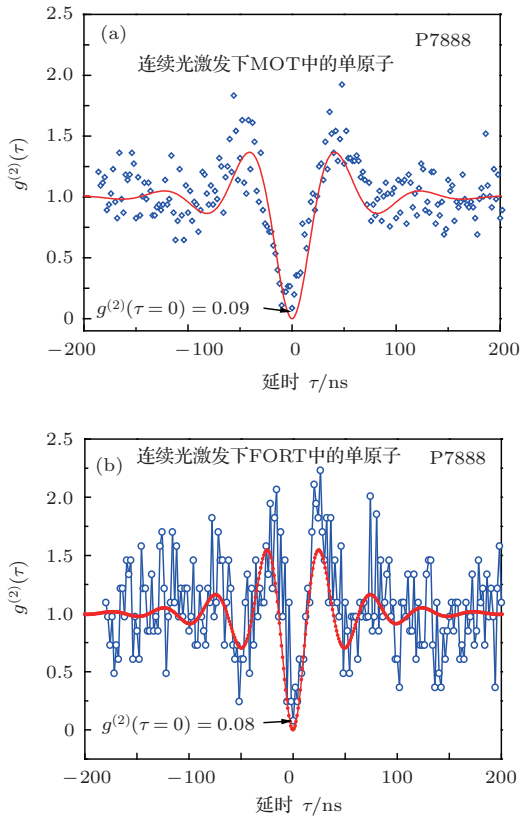

图 5 HBT 实验验证单原子发出单光子的统计特性 (a) MOT 中单原子的 HBT 实验结果; (b) FORT 中单原子的 HBT 实验结果

我们对实验数据采用文献 [15] 的二能级模型进行了拟合, 拟合公式为

$$g^{(2)}(\tau)=1-\mathrm{e}^{-3\Gamma\tau/4}[\cos(\Omega_{\mathrm{R}}\tau)+3\Gamma\sin(\Omega_{\mathrm{R}}\tau)/4\Omega_{\mathrm{R}}],$$

其中 $\Omega_{\mathrm{R}}^2=\Omega_0^2+\Delta^2/(\Gamma/4)^2$, Ω_0 为共振 Rabi 频率, Γ 为铯原子 $F_{\mathrm{e}}=5$—$F_{\mathrm{g}}=4$ 跃迁的自然线宽, Δ 为激发光角频率相对于原子跃迁线的失谐量. 拟合后 MOT 中的等效 Rabi 频率 $\Omega_{\mathrm{R}}=2\pi\times12.2$ MHz, FORT 中的等效 Rabi 频率 $\Omega_{\mathrm{R}}=2\pi\times18.2$ MHz.

4 结 论

我们在磁光阱与偶极阱原子长时间俘获的基础上, 利用近共振蓝失谐光场的光助碰撞效应, 高效地制备单个原子到微米尺度的光学阱中. 其次使用对磁光阱中磁场梯度以及蓝失谐光的反馈控制的方法, 获得了偶极阱中单原子 95% 的装载概率, 为下一步二维的远失谐偶极阱阵列中单原子的高效装载奠定了基础.

参考文献

[1] Grimm R, Weidemuller M, Ovchinnikov Y 2000 *Adv. At. Mol. Opt. Phys.* **42** 95

[2] Miller J D, Cline R A, Heinzen D J 1993 *Phys. Rev. A* **47** 4567(R)

[3] Yavuz D D, Kulatunga P B, Urban E, Johnson T A, Proite N, Henage T, Walker T G, Saffman M 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 063001

[4] Jones M P A, Beugnon J, Gaëtan A, Zhang J, Messin G, Browaeys, Grangier P 2007 *Phys. Rev.* A **75** 040301 (R)

[5] Hu Z, Kimble H J 1994 *Opt. Lett.* **19** 1888

[6] Ruschewitz F, Bettermann D, Peng J L, Ertmer W 1996 *Europhys. Lett.* **34** 651

[7] Haubrich D, Schadwinkel H, Strauch F, Ueberholz B, Wynands R, Meschede D 1996 *Europhys. Lett.* **34** 663

[8] Shclosser N, Reymond G, Protsenko I, Grangier P 2001 *Nature* **411** 1024

[9] Schlosser N, Reymond G, Grangier P 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 023005

[10] Yoon S, Choi Y, Park S, Kim J, Lee J H, An K 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 211104

[11] Grünzweig T, Hilliard A, McGovern M, Andersen M F 2010 *Nature Phys.* **6** 952

[12] Grünzweig T, Hilliard A, McGovern M, Andersen M F 2011 *Quantum Inf. Process.* **10** 925

[13] He J, Yang B D, Cheng Y J, Zhang T C, Wang J M 2011 *Front. Phys.* **6** 262

[14] He J, Wang J, Yang B D, Zhang T C, Wang J M 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3404

[15] Carmichael H J, Walls D F 1976 *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **9** 1199

Improving the single atom probability by using the blue-detuned laser-assisted-collisions between the cold atoms trapped in the far-off-resonance trap*

Diao Wen-Ting He Jun Liu Bei Wang Jie-Ying Wang Jun-Min†

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

(Received 5 October 2013; revised manuscript received 27 November 2013)

Abstract

Using the light-assisted-collisions (LAC) and the feedback controlling loop on a quadrupole magnetic field, we have realized high probability of single atoms in the far-off-resonance trap (FORT). We analyzed the principle of LAC irradiated by a red-detuning laser or by a blue-detuning laser. And we also experimentally proved that using the red-detuned laser (the blue-detuned laser) we can realize 50% (80%) of single atom probability in the FORT. Using the feedback controlling loop, we realized 95% of single atom probability in the FORT, which opens a way for a two-dimensional FORT array. When the number of atom was zero, we decreased the gradient of the quadrupole magnetic field to quickly load atoms, and when we had more than one atom in the FORT, we switched on the blue-detuned laser to irradiate the atoms to play LAC. We measured the second-order coherence degree of the fluorescence photons emitted by the atom trapped in the FORT by using HBT scheme and found it was $g^{(2)}(\tau = 0) = 0.08$.

Keywords: single atoms, far-off-resonance trap, light-assisted-collisions, the second-order degree of coherence of optical field

PACS: 37.10.De, 37.10.Jk, 25.20.Dc **DOI:** 10.7498/aps.63.023701

* Project financially supported by the State Key Research Program of China (Grant No. 2012CB921601), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11274213, 61205215, 61227902, 61121064), the Shanxi Scholarship Council of China (Grant No. 2012-015), and the Research Program far Sci and Tech Star of Taiyuan, Shanxi Province, China (Grant No. 12024707).

† Corresponding author. E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn