

铯原子 Doppler 冷却中再抽运光对原子俘获影响的理论和实验研究*

高峰¹⁾²⁾ 常宏^{1)†} 王心亮¹⁾ 田晓¹⁾ 张首刚¹⁾

1)(中国科学院国家授时中心时间频率基准重点实验室,西安 710600)

2)(中国科学院研究生院,北京 100049)

(2010年5月29日收到;2010年8月16日收到修改稿)

本文主要研究铯原子光钟 Doppler 冷却过程中再抽运光对俘获冷原子参数的影响,实验上测得再抽运光光强和失谐跟所俘获原子数目的关系,并且测得了在同时注入再抽运光 707 nm 和 679 nm 后使俘获冷原子的数目提高了 17 倍,分析了再抽运光的失谐对俘获原子数目的影响,测得了再抽运光 707 nm 在失谐 5 MHz 的情况下俘获原子数目的波动小于 3%。

关键词: 光频标, 激光冷却与俘获, 原子俘获率

PACS: 06.30.Ft, 32.70.Jz, 37.10.De

1. 引言

光频标是目前公认的精度最高的原子钟^[1-4],高精度冷原子光钟在很多重大物理问题研究方面具有很广泛的应用^[5-7],比如在验证广义相对论和量子电动力学的一些基本原理及探测基本物理常数随时间的微小变化,还有在测量重力红移和提高卫星导航精度等方面,因此被人们广泛深入地研究.特别是原子冷却技术以及光晶格原子囚禁技术在原子光钟方面的应用^[7-9],使光频标的不确定度可达 10^{-18} .基于囚禁中性原子的光晶格钟相对于离子光钟不仅具有更高准确度的潜力^[9,10],而且可以俘获更多的原子数目,克服了离子光钟的低信噪比和高量子投射噪声的弱点.中性铯原子光钟是目前世界上最被广泛研究的冷原子光钟^[4,7,10],铯原子 Doppler 冷却是实现铯原子光钟的基础^[8],在实验上要求所俘获的冷原子样品温度尽量低且数目足够多,本文首先从理论上分析了冷却光光强对原子损失率的影响^[11-15],进而在实验上测得了通过加入再抽运光的方法使俘获原子的数目得到了很大提高,

并且测得再抽运光在不同失谐情况下对俘获原子数目的影响.

2. 铯原子 Doppler 冷却中原子能级封闭的理论分析

近些年来随着冷原子光钟越来越受到人们的重视^[14,16,17],碱土金属原子的冷却与俘获技术也越来越受到广泛的研究和应用^[13-14],相比较于其他碱土金属原子,用于冷却铯原子的激光波段容易实现且可以方便地进行激光冷却.图 1 为铯原子的能级图,因为铯原子最外层有两个电子,所以其能级结构有单重态和三重态两组体系,铯原子 Doppler 冷却利用单重态系的偶极跃迁 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 其对应波长为 461 nm (自发辐射速率 $\Gamma_{1S_0 \rightarrow 1P_1} = 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$,自然线宽为 32 MHz),从能级图中可以看出从基态 $(5s^2)^1S_0$ 跃迁至激发态 $(5s5p)^1P_1$ 的原子除了通过自发辐射、受激辐射回到基态外,还有一部分通过一定的辐射速率布居在 $(5s4d)^1D_2$ 态(自发辐射速率 $\Gamma_{1P_1 \rightarrow 1D_2} = 3.9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$),然后在三重态 $(5s5p)^3P_2$ 和 $(5s5p)^3P_1$ 产生一定的布居数(自

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2005CB72440);中国科学院重要方向项目(批准号:KJXC2-YW-T12)和中国科学院“百人计划”(批准号:0916YC1101)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn

发辐射速率分别为 $\Gamma_{1D_2 \rightarrow 3P_2} = 6.6 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$, $\Gamma_{1D_2 \rightarrow 3P_1} = 1.34 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$), 最后再由三重态 $(5s5p)^3P_1$ 态通过自发辐射跃迁到单重态基态 $(5s^2)^1S_0$ (自发辐射速率分别为 $\Gamma_{3P_1 \rightarrow 1S_0} = 4.7 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$), 这部分通过单重态和三重态间的自发辐射 $1P_1 \rightarrow 1D_2 \rightarrow 3P_2$ 造成的有效损失速率约为 $1.3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, 相对于 Doppler 冷却单重态偶极跃迁 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$ 的速率 $\Gamma_{1S_0 \rightarrow 1P_1} = 2 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$

要低 5 个数量级, 所以通过 Doppler 冷却可以直接把原子俘获, 但仍有部分原子在经过一系列跃迁辐射后才能回到基态, 这样经过较长时间的布居分布在很大程度上影响了俘获的冷原子数目, 实验上加入 707 nm 和 679 nm 光使之与原子三重态系跃迁 $3P_2 \rightarrow 3S_1$ 和 $3P_0 \rightarrow 3S_1$ 耦合, 进而消除了因原子在三重态能态 $3P_2$ 和 $3P_0$ 态上的堆积而影响 Doppler 冷却所俘获原子数目, 使原子的俘获效率大大加强.

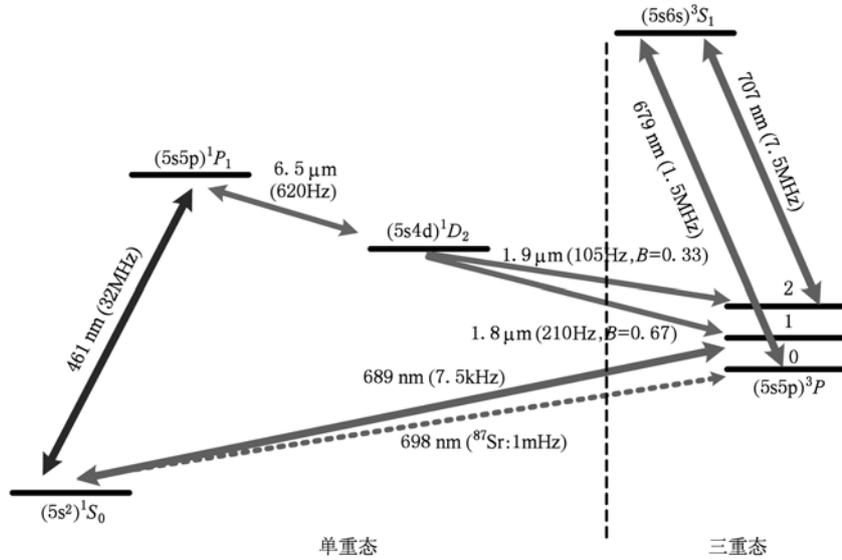


图 1 Sr 原子冷却相关的能级结构图

原子在磁光阱的冷却俘获过程在物理上是一个动态平衡的过程, 其中气室的热原子进入有效的俘获区域后, 速度分布低于俘获速度的原子以一定的俘获率在进入磁光阱后被俘获, 但同时被俘获的原子因热原子的碰撞, 以及冷原子之间的碰撞或因光子自陷效应产生的排斥力等一些因素又以一定的概率逃逸. 在没有再抽运光的前提条件下, 锶原子磁光阱的原子损失率可以表达为^[8]

$$R_{\text{loss-rate}} = R_0 + \frac{I_1}{2I_s} \Gamma_{1P_1 \rightarrow 1D_2} B_{1D_2 \rightarrow 3P_2}, \quad (1)$$

式(1)中 R_0 为背景热原子碰撞引入的损耗, I_1 为六束冷却光的总功率, Δ 为光失谐量, I_s 为 $1S_0 \rightarrow 1P_1$ 跃迁对应的饱和吸收光强, Γ 为 $1S_0 \rightarrow 1P_1$ 跃迁能级线宽, $\Gamma_{1P_1 \rightarrow 1D_2}$ 为 $1P_1 \rightarrow 1D_2$ 态跃迁自发辐射率, $B_{1D_2 \rightarrow 3P_2}$ 为处在 $1D_2$ 态原子落到 $3P_2$ 态的概率, 代入理论值: 光失谐

$\Delta = -40 \text{ MHz}$, 饱和吸收光强 $I_s = 42 \text{ mW/cm}^2$, $1S_0 \rightarrow 1P_1$ 跃迁能级线宽 $\Gamma/2\pi = 32 \text{ MHz}$, $1P_1 \rightarrow 1D_2$ 态跃迁自发辐射速率 $\Gamma_{1P_1 \rightarrow 1D_2} = 3.9 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$, $1D_2$ 态原子落到 $3P_2$ 态的概率 $B_{1D_2 \rightarrow 3P_2} = 0.33$, 最后得到冷却光光强与原子损失率的关系图(图 2).

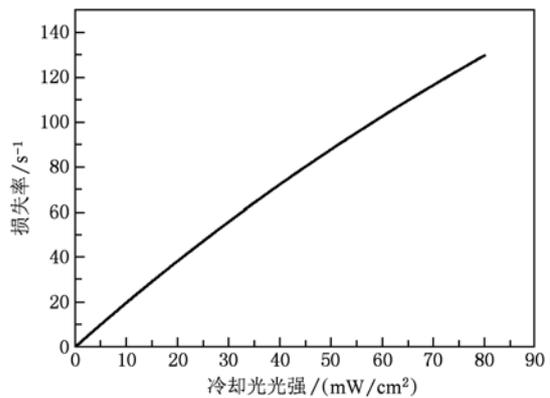


图 2 冷却光光强与原子损失率的关系图

从图 2 中可以看出随着冷却光光强的增大,由于原子能级为不封闭造成原子损失率越来越大,为了能够使获得的原子团数目和密度更大,实验上引入再抽运光 707 nm 和 679 nm,它们分别与原子能级三重态能态跃迁 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 和 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 耦合. 在 没有再抽运光的情况下原子寿命很大程度取决于跃迁到 3P_2 态的布居数,所以耦合三重态能态 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 跃迁光 707 nm 直接作用能级 3P_2 态,耦合三重态能态 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 跃迁光 679 nm 是将自发辐射到 3P_0 态的原子重新参与整个俘获过程.

实验中我们详细测量了在只有 Doppler 冷却光、加入 707 nm 再抽运光耦合三重态能态跃迁 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 和同时加入再抽运光 707 nm, 679 nm 耦合三重态能态跃迁 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 和 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 三种情况下,再抽运光在不同光强和失谐的情况下对铯原子 Doppler 冷却所俘获原子数目的影响.

3. 实验光路系统及实验结果

实验装置在文献[14]中有详细描述,图 3 为实

验上对铯原子进行 Doppler 冷却的实验光路示意图,作为铯原子 Doppler 冷却的 461 nm 激光器其标准输出为线偏振光,对应于铯原子单重态能级跃迁 $(5s^2)^1S_0 \rightarrow (5s5p)^1P_1$,激光线宽小于 2 MHz,标准输出功率为 220 mW. 实验上 461 nm 激光分出一束光在正失谐 440 MHz 后射入用于锁频的铯炉中,炉温度为 630 °C,然后将激光器锁定 ^{88}Sr 的吸收峰上;一束相对于原子谱线负失谐 40 MHz 激光光功率为 70 mW 作为冷却光分成三束射入铯原子磁光阱中;一束相对于原子谱线负失谐 560 MHz 激光光功率为 35 mW 作为 Zeeman 减速光正对于原子飞出的方向射入. 再抽运光光源采用 Littrow 结构的光栅反馈外腔半导体激光器,激光的工作波长分别为 707 nm 和 679 nm 分别对应于铯原子三重态能态跃迁 $(5s6s)^3S_1 \rightarrow (5s5p)^3P_2$ 和 $(5s6s)^3S_1 \rightarrow (5s5p)^3P_0$,标准输出功率分别为 30 mW 和 20 mW. 实验上将完全重合后的两束再抽运光扩束为直径约为 10 mm 的光束,分成两束使之双次穿过冷原子团. 同时利用同一个 F-P 腔测定再抽运光 707 nm 和 679 nm 频率失谐的变化情况.

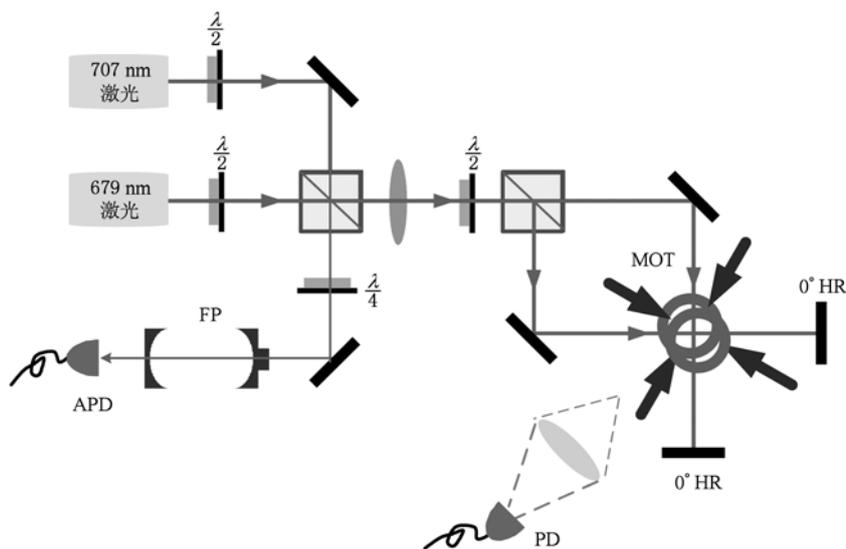


图 3 铯原子 Doppler 冷却实验系统中再抽运光光路的示意图

图 4 为实验上测量得到的再抽运光 707 nm 和 679 nm 光功率分别为 25 mW 和 15 mW 时,磁光阱中铯原子分别在不同情况下装载过程的荧光强度曲线图,曲线 a 为只有俘获光 461 nm 的情况下原子在磁光阱中的装载图,曲线 b 为加入再抽运光 707 nm 光后的装载图,曲线 c 为同时加入再抽运光 707 nm 和 679 nm 光后的装载图,从图中可以看出三种情况下铯原子在磁光阱中装载过程的最大荧光强

度 $I_a : I_b : I_c = 1 : 2.8 : 18$,装载时间 $t_a : t_b : t_c = 1 : 2.2 : 10.8$,可以看出在加入两种再抽运光后被俘获原子的数目有了很大提高,但同时原子在磁光阱中的装载时间也相应地变长.

在一定的温度下原子的饱和蒸气压为一定值,这样原子俘获率就是由光斑大小、光强、光频率失谐、磁场梯度、及元素自然丰度等这些因素共同决定^[15]. 在俘获原子开始时冷原子很少,其损耗

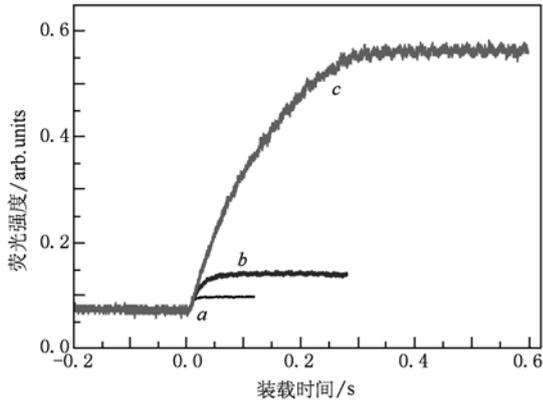


图4 磁光阱中铯原子在三种情况下的装载曲线图(曲线 *a* 为在只有俘获光的情况下的装载曲线, *b* 为加入 707 nm 光后的装载曲线, *c* 为同时加入 707 nm 和 679 nm 光后的装载曲线)

率也就较小,此时原子俘获率远大于损耗率,随着原子数目的增加,冷原子的数目逐渐积累损耗率也随着增大,二者渐趋于平衡. 可以把原子的俘获与损耗最终达到平衡的关系唯象的表达为

$$dN/dt = R - N/\tau, \quad (2)$$

其中 N 是被俘获的原子数目, R 是原子磁光阱的装载率, τ 为原子在阱中的寿命, N/τ 为热原子的碰撞引起的原子损耗率, N_s/τ 为原子在磁光阱中的俘获率, N_s 为最大俘获原子数目.

图5 为利用(2)式理论模拟计算磁光阱中铯原子在三种情况下的装载曲线图,其中曲线 *a*, *b*, *c* 分别代表在只有俘获光、加入再抽运光 707 nm、同时加入再抽运光 679 nm 和 707 nm 三种情况下,磁光阱中原子装载过程中的原子数目随时间变化的曲线图,它们分别与图4 中实验测得磁光阱中铯原子

分别在三种情况下装载过程的荧光强度曲线(图4 中曲线 *a*, *b*, *c*) 相对应. 在考虑了光电转换效率及探测器放大电路放大倍数及效率后,利用收集到的荧光强度间接推算出所俘获原子数目分别为 1.7×10^7 , 4.7×10^7 , 3.1×10^8 ; 原子的俘获率分别为 $1.7 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $2.1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$, $2.8 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$.

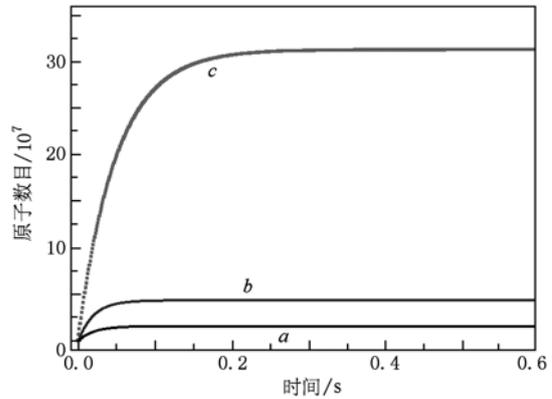


图5 模拟计算磁光阱中铯原子在三种情况下的装载曲线图 (*a*, *b*, *c* 分别代表在只有俘获光、加入 707 nm 再抽运光、同时加入再抽运光 679 nm 和 707 nm 三种情况下,原子在磁光阱中装载过程的原子数目随时间变化的曲线)

利用收集荧光法来推算被俘获的原子数,测得在加入再抽运光 679 nm 和 707 nm 后所俘获原子数目比只有俘获光的情况下所俘获原子数目增大了 17 倍,图6 为利用 CCD 检测冷原子团荧光图像,图6 (a) 为铯原子在没有再抽运光的情况下的俘获原子团的荧光图像,图6 (b) 为加入再抽运光 707 nm 和 679 nm 后的原子团的荧光图像,通过分格估算的办法可以得知在只有俘获光的情况下,冷原子团体

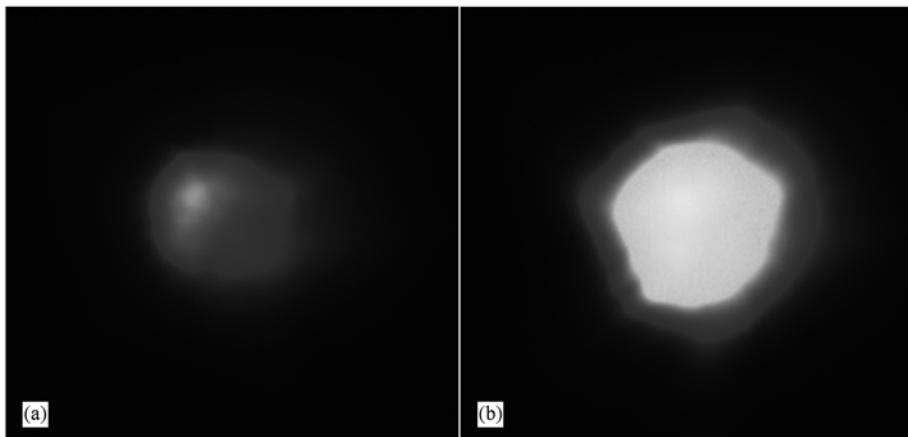


图6 (a) 为铯原子在没有再抽运光的情况下的俘获原子团的荧光图像; (b) 为加入再抽运光 707 nm 和 679 nm 后的原子团的荧光图像

积约为 2.2 mm^3 ; 在加入两种再抽运光后冷原子团体积约为 51 mm^3 , 可以看出冷原子体积增大 22 倍大于荧光法探测原子数目的增大倍数. 我们分析认为这与荧光法探测原子数目与原子团的密度有关^[18], 被囚禁原子辐射出来的荧光光子被其他原子再吸收(辐射陷获效应)的现象在随着原子团密度逐步增大时越来越明显, 实验上通过收集荧光法测得冷原子数目比实际所俘获的数目偏小, 所以实际所俘获原子数目应大于 3.1×10^8 .

为了研究再抽运光 679 nm 和 707 nm 光强对原子俘获的影响, 首先通过铯原子能级图可以看出, 707 nm 对应的三重态能级跃迁 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 的线宽 $\Gamma_{^3P_2 \rightarrow ^3S_1}$ ($\Gamma_{^3P_2 \rightarrow ^3S_1} = 7.5 \text{ MHz}$) 大于 679 nm 对应的三重态能级跃迁 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 跃迁线宽 $\Gamma_{^3P_0 \rightarrow ^3S_1}$ ($\Gamma_{^3P_0 \rightarrow ^3S_1} = 1.5 \text{ MHz}$), 可知两种再抽运光相对应的三重态能级跃迁 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 和 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 的饱和吸收光强大小应该满足 $I_{^3P_2 \rightarrow ^3S_1} > I_{^3P_0 \rightarrow ^3S_1}$.

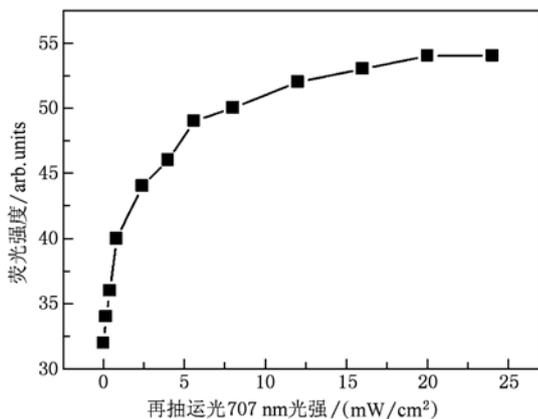


图 7 被俘获原子随着再抽运光 707 nm 光强的逐步增大而趋于饱和的荧光强度曲线图

我们在实验上利用收集荧光法分别测量了只加入 707 nm 和同时加入 679 nm 和 707 nm 两种情况下, 所俘获原子数目随再抽运光光强的变化情况. 图 7 为实验上测得了俘获原子数目随再抽运光 707 nm 光强的变化, 从图中可以看出随着逐渐增大 707 nm 光光强, 观测到在光强为 20 mW/cm^2 时达到饱和吸收光强; 图 8 为实验上再抽运光 707 nm 光光强固定在 25 mW/cm^2 时, 同时加入再抽运光 679 nm, 通过逐渐增大再抽运光 679 nm 的光强, 观测到 679 nm 在 4 mW/cm^2 时达到饱和吸收光强, 可以得到再抽运光 707 nm 的饱和光强大于 679 nm 的饱和光强, 与理论给出的能级跃迁线宽大小定性符合.

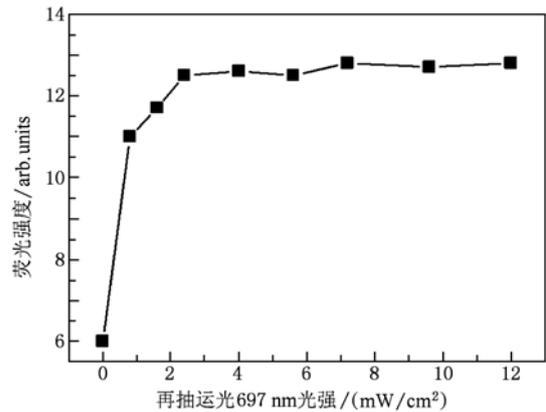


图 8 被俘获原子在同时加入再抽运光 707 nm 和 679 nm 时, 随着再抽运光 679 nm 光强度的逐步增大而趋于饱和的荧光强度曲线图

实验中再抽运光 679 nm 和 707 nm 是通过 PDH 方法锁定在经过恒温控制的 F-P 腔(漂移量小于 5 MHz/min) 上以达到频率相对稳定的目的. 实验上测定了再抽运光的失谐跟对俘获冷原子数目的影响, 由于再抽运光 707 nm 耦合 $^3P_2 \rightarrow ^3S_1$ 跃迁光直接作用能级 3P_2 态, 耦合 $^3P_0 \rightarrow ^3S_1$ 跃迁光 679 nm 是间接地将自发辐射到 3P_0 态的原子重新参与整个俘获过程, 所以相比较而言 707 nm 光的频率稳定性更为重要, 实验上测定了再抽运光 707 nm 光的失谐对原子俘获的影响.

图 9 曲线 a 为实验上利用收集荧光法测得了 707 nm 光光强为 25 mW/cm^2 时, 俘获原子数目随再抽运光失谐的变化曲线, 从图中可以看出在再抽运光 707 nm 失谐 5 MHz 的情况下, 俘获原子数目的波动小于 3%, 并且通过拟合得知实验测得的曲线 a 为非 Gauss 曲线, 通过数值拟合发现曲线 a 可以通过两个 Gauss 型曲线 b, c 叠加而成, 这是因为它们对应原子气室中的两部分原子, 一部分为气室中温度约为 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 的背景原子气体, 如曲线 b 所示, 其线宽约为 2 GHz, 理论估算该线宽所对应的原子气体温度在 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右; 一部分为通过 Zeeman 减速后但速度远大于 Doppler 冷却极限温度的速度的原子, 如曲线 c 所示, 其线宽约为 650 MHz. 实际上还存在第三部分原子, 即实验中所俘获的冷原子, 这些原子处在磁光阱中心, 且温度很接近多普勒冷却温度极限, 由于第三部分原子相对应线宽的贡献较小, 所以实验结果主要是背景原子气体和经过 Zeeman 减速但温度仍远大于多普勒冷却温度极限的原子两部分共同作用的结果.

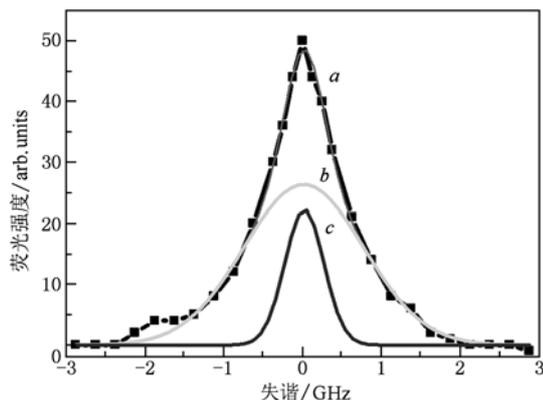


图9 俘获原子荧光光强随着再抽运光 707 nm 失谐的变化曲线, *a* 为拟合曲线, *b*, *c* 为曲线 *a* 可以分解成的两个高斯曲线

4. 结 论

本文从实验上研究了碱土金属元素锶的 Doppler 冷却过程,再抽运光的光强和失谐的变化对所俘获冷原子参数的影响,并在理论上给出了拟合,得出在注入再抽运光 707 nm 和 679 nm 后,所俘获原子数目提高 17 倍,同时在实验上观测到了辐射陷获效应对收集荧光法来测量原子数目的影响,测得了 707 nm 光的失谐与所俘获原子数目的关系图,并在理论上给出了分析结果与实际原子的速度分布相对应,这些为下一步锁定再抽运光进行 689 nm 窄线宽冷却提供了实验参数和基础.

- [1] Ludlow A D, Zelevinsky T, Campbell G K, Blatt S, Boyd M M, Miranda M H G, Martin M J, Thomsen J W, Foreman S M, Ye J, Fortier T M, Stalnaker J E, Diddams S A, Le Coq, Barber Z W, Pili N, Lemke N D, Beck K M, Oates C W 2008 *Science* **319** 1805
- [2] Baillard X, Fouché M, Targat R Le, Westergaard P G, Lecallier A, Chapelet F, Abgrall M, Rovera G D, Laurent P, Rosenbusch P, Bize S, Santarelli G, Clairon A, Lemonde P, Grosche G, Lipphardt B, Schnatz H 2008 *Eur. Phys. J. D* **48** 11
- [3] Udem Th, Diddams S A, Vogel K R, Oates C W, Curtis E A, Lee W D, Itano W M, Drullinger R E, Bergquist J C, Hollberg L 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 4996
- [4] Ma L S, Bi Z Y, Bartels A, Robertsson L, Zucco M, Windeler R S, Wilpers G, Oates C, Hollberg L, Diddams S A 2004 *Science* **303** 1843
- [5] Fortier T M, Ashby N, Bergquist J C, Delaney M J, Diddams S A, Heavner T P, Hollberg L, Itano W M, Jefferts S R, Kim K, Levi F, Lorini L, Oskay W H, Parker T E, Shirley J, Stalnaker J E 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 070801
- [6] Uzan J P 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 403
- [7] Takamoto M, Katori H 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 223001
- [8] Xu X, Loftus T H, Hall J L, Gallagher A, Ye J 2003 *J. Opt. Soc. Am. B* **20** 968
- [9] Barber Z W, Hoyt C W, Oates C W, Hollberg L 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 083002
- [10] Shen N C, Wei ZY, Nie Y X 2004 *Chinese Journal of Quantum Electronics* **2** 21 (in Chinese) [沈乃澈、魏志义、聂玉昕 2004 量子电子学报 **2** 21]
- [11] Zhang Y Q, Tan L, Zhu Z H, Liu L W 2010 *Chin. Phys. B* **19** 3033202
- [12] Li Y M, Yang D H, Wang Y Q 1998 *Acta Phys. Sin.* **7** 07060414
- [13] Wang S K, Wang Q, Lin Y G, Wang M M, Lin B K, Zang E J, Li T C, Fang Z J 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 093202
- [14] Tian X, Chang H, Wang X L, Zhang S G 2010 *Acta Optica Sinica* **30** 3 (in Chinese) [田 晓、常 宏、王心亮、张首刚 2010 光学学报 **30** 3]
- [15] Wang Y H, Yang H J, Zhang T C, Wang J M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3403 (in Chinese) [王彦华、杨海菁、张天才、王军民 2006 物理学报 **55** 3403]
- [16] Qiu Y, He J, Wang Y H, Wang J, Zhang T C, Wang J M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6227 (in Chinese) [邱 英、何 军、王彦华、王 婧、张天才、王军民 2008 物理学报 **57** 6227]
- [17] Zhao P Y, Xiong Z X, Long Y, He L X, Lü B L 2009 *Chin. Phys. Lett.* **26** 083702
- [18] Zhou S Y, Xu Z, Qu Q Z, Zhou S Y, Liu L, Wang Y Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1590 (in Chinese) [周蜀渝、徐 震、屈求智、周善钰、刘 亮、王育竹 2009 物理学报 **58** 1590]

The theoretical and experimental investigation of repumping laser impact on cooling and trapping of strontium atoms^{*}

Gao Feng¹⁾²⁾ Chang Hong^{1)†} Wang Xin-Liang¹⁾ Tian Xiao¹⁾ Zhang Shou-Gang¹⁾

1) (*National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Time and Frequency Primary Standards of Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 29 May 2010; revised manuscript received 16 August 2010)

Abstract

We have conducted experimental investigations on the effect of repumping laser on the cooling and trapping of strontium atoms. More than 3.1×10^{888} Sr atoms have been trapped with 679 nm and 707 nm repumping laser added. The two repumping lasers enhance the trappopulation by a factor of 17. We also made experimental investigations on the effect of 707 nm repumping laser detuning on the cooling and trapping of strontium atoms. The fluctuation of atom trapping population is less than 3 % when the detuning from 707 nm is 5 MHz.

Keywords: optical frequency standard, laser cooling and trapping, capture rate of atom

PACS: 06.30.Ft, 32.70.Jz, 37.10.De

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2005CB72440), the Major Program for the Fundamental Research of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJCX2-YW-T12), the '100 Talents Project' of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 0916YC1101).

[†] Corresponding author. E-mail: changhong@ntsc.ac.cn