

文章编号: 0258-7025(2003)12-1083-04

铯原子喷泉的飞行时间信号

黄秉英, 李天初, 林平卫, 李明寿, 钱 进, 王 平, 干云清, 辛明德, 赵晓惠, 陈伟亮

(中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要 应用激光冷却与囚禁的铯原子喷泉是新一代的频率基准。报告了冷原子云上抛信号的序列测量, 发表了飞行时间(TOF)信号的基本估算公式(估算原子云温度和 TOF 峰值信号强度), 讨论了理论计算和实验测量的比较。

关键词 量子光学; 铯原子喷泉; 冷原子云; 飞行时间信号

中图分类号 O 431.2 **文献标识码** A

TOF Signal in the Cesium Atomic Fountain

HUANG Bing-ying, LI Tian-chu, LIN Ping-wei, LI Ming-shou, QIAN Jing,
WANG Ping, GAN Yun-qing, XIN Ming-de, ZHAO Xiao-hui, CHEN Wei-liang

(National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract The cesium atomic fountain used laser cooling and trapping is a new generation primary frequency standard. In this paper, it has been reported a series of measurements on the toss signal; published the fundamental estimated formulae for TOF signal and discussed the comparison between the experimental and calculated results.

Key words quantum optics; cesium atomic fountain; cold atomic cloud; TOF signal

1 引 言

近半个世纪以来,原子钟的发展极大地改进了导航和通讯状况,大大提高了基本物理量的计量水平和科学研究水平。近年来,继法国 LPTF(法国计量局时间频率基准研究所)率先研制成功铯原子喷泉频率基准装置(1995),美国 NIST(美国国家标准技术研究院)、德国 PTB(德国物理技术研究院)也先后研制和评估了自己的铯原子喷泉,其频率准确度和稳定度已分别达到 $\sim 1 \times 10^{-15}$ (1σ) 和 $\sigma_y(\tau) \sim 1 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, 成为新一代性能最好的频率基准;国际空间站(ISS)也将于 2004~2005 年配置工作原理相似的原子钟作为空间频率基准,预期准确度和稳定度分别达到 1×10^{-16} 和 $\sigma_y(\tau) \sim 5 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ 。

同传统型铯原子钟不同,原子喷泉装置使用冷原子样品,它应用获得 1997 年诺贝尔物理奖的激光冷却和囚禁中性原子技术,在常温下的铯气室中,捕获和冷却铯原子,形成冷原子云,使其热运动速度减

低到厘米/秒量级,比传统型铯原子钟所用原子样品减慢四个数量级,然后通过改变上下激光束频率,移动该冷原子云,在获得一定初速度后,令其作自由弹道飞行,上下两次穿过微波腔完成 Ramsey 跃迁。其中,可用信号为冷原子落经探测激光束时被激发的荧光信号,该信号具有确定的时间延迟和特定脉冲形状特征,通称为飞行时间信号(TOF 信号)。TOF 信号的大小与所用激光冷却和囚禁技术的完善程度和原子的冷却温度密切相关,与原子云发射和后冷却程序设计密切相关,还依赖于原子喷泉管的超高真空度,它直接影响到原子跃迁的观测和应用。在原子喷泉研制初期,冷原子云形成之后,常常竟观测不到抛射的 TOF 信号。

我院正在研制的铯原子喷泉装置,继观测到磁光阱信号和阱中心自由下落的 TOF 信号^[1,2]后,于 2001 年完成原子喷泉的整体装配并达到预期真空,2002 年 6 月,观测到上抛高度达 74 cm(主腔上方 34 cm)的 TOF 信号(若用该信号,铯原子的微波

收稿日期:2002-08-09; 收到修改稿日期:2002-10-10

基金项目:国家科技部基础研究项目(2001DEA30028)。

作者简介:黄秉英(1938—),男,研究员,长期从事量子频率基、标准研究。E-mail: Huangby@nim. ac. cn

Ramsey 跃迁的主线半宽只有 0.95 Hz),使原子喷泉研究真正推进到钟的研制阶段。

本文报告了对冷原子上抛信号的序列测量,发表了 TOF 信号的基本估算公式,它是评估和研制原子喷泉的有力工具,最后讨论了理论计算和实验结果的比较。

2 基本估算公式

原子喷泉的 TOF 信号是一个有确定时延 (t_0),具有高斯分布形状的电脉冲,由该脉冲的半值半宽 (Δt_{HWHM}) 可推算出冷原子温度 (T),而该脉冲的峰值强度 $I_0 = I(t_0)$ 依赖于多种因素,包括到达探测区的冷原子数 N_s ,冷原子云温度 T ,冷原子的飞行时间 t_0 ,喷泉管真空度,探测束高度 Δh ,荧光收集率 c ,光电转换率 β ,探测光频率等等。

2.1 冷原子云温度

设冷原子云线度与其飞行路程相比足够小,冷原子穿行探测束高度 Δh 的时间与 TOF 信号的半值宽度相比足够小,原子云中冷原子的速度分布遵从高斯分布,则冷原子垂直方向的弹道飞行与自由质点的弹道飞行相近似,考虑到原子热运动速度分布的各向同性,从推导与原子垂直方向热运动速度分布相应的飞行时间分布入手,推得

$$T \approx 1.11(\Delta t_{\text{HWHM}}/k)^2 \quad (1)$$

式中 Δt_{HWHM} , T 分别以 ms 和 μK 计。 k 为一系数

$$k = 1 + [h/(h+h_0)]^{1/2} \quad (2)$$

h 为原子上抛高度, $h=0$ 相应于自阱中心自由下落情形。 h_0 为阱中心与下方探测区的距离。

实际情形,特别是冷原子上抛高度较大时,引用上述公式估算冷原子云温度,将获得满意的近似。

冷原子云温度 T 是冷原子热运动速度 v_{rms} 的度量

$$v_{\text{rms}} = 0.79T^{1/2} \quad (3)$$

式中 v_{rms} 以 cm/s 计。

对囚禁于磁光阱(MOT)中冷原子云的温度测量,还有一些其他方法,例如,由 CCD 相机记录关断磁场后(囚禁激光仍在)冷原子云线度随时间的变化推算;又如,应用经验公式进行估算。在光学粘胶(optical molasses)情形(重力场中),用 TOF 信号进行估算则是唯一可用的方法,此外,这种方法的精确度也最高。

2.2 TOF 信号峰值强度

设 TOF 信号为高斯分布,即 $I(t) = I_0 e^{-\frac{(t-t_0)^2}{2\sigma^2}}$,

则接收器接收到的电荷量 Q 为

$$Q = \int_{t_0-n\sigma}^{t_0+n\sigma} I(t) dt \quad (4)$$

通常有 $n > 2$ 。

另一方面,由上述到达探测器的信号原子数 N_s 等参量,也可得到电荷量 Q

$$Q = N_s \cdot (\xi \cdot \Delta t_0) \cdot c \cdot \beta \cdot q_0 \quad (5)$$

式中, ξ 为原子的荧光散射率,即原子在探测束照射下,单位时间内可转换的光子数, Δt_0 为原子穿行探测束的时间, c, β, q_0 分别为探测器的荧光收集率、光电转换率及电子电荷量。

由式(4)和(5),容易推得

$$I_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{\Delta t_0}{\sigma} N_s \cdot \xi \cdot c \cdot \beta \cdot q_0 \quad (6)$$

注意到 $\Delta t_0 \approx \frac{\Delta h}{v_p}$, v_p 为原子落经探测束时的竖直方向速度

$$v_p = \sqrt{2g(h+h_0)}$$

$$\Delta t_{\text{HWHM}} = \sqrt{2 \ln 2} \times \sigma$$

记 $b = \frac{2 \sqrt{2 \ln 2}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \xi \cdot c \cdot \beta \cdot q_0$, 最后可得

$$I_0 \approx b \left(\frac{\Delta t_0}{2 \Delta t_{\text{HWHM}}} \right) \cdot N_s \quad (7)$$

(7)式为 TOF 信号峰值强度 I_0 和到达探测区的信号原子数 N_s 之间的转换提供了很好的近似。

3 TOF 信号的测量

为获得可用的 TOF 信号,首先要求制备线度在 1 cm 以内、原子数足够多 ($N_s = 10^7 \sim 10^8$ 个)、原子温度在 5~10 μK 的冷原子云,所用具体方法如下^[1,2]:

在一个铯蒸气相当稀薄的气室中(铯蒸气分压强在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Pa),导入沿 $x-y-z$ 方向对射的圆偏振六束激光(束直径 ~ 1.2 cm,功率密度 ~ 3 mW/cm²,调谐于铯原子 D₂ 线的饱和吸收谱 $\nu_{4,5}$ 附近, $\nu_0 = \nu_{4,5} - \Delta\nu_0$, $\Delta\nu_0 \sim 8$ MHz),而在六束激光交汇中心附近叠加一反亥姆霍兹磁场,磁场梯度 $\Delta B \sim 0.5 \times 10^{-3}$ T/cm。上述配置的磁光阱(MOT)将在中心附近俘获和冷却铯原子,在一定装载时间(0.3~0.4 s)下,形成原子数足够多,温度在 100 μK 左右的冷原子云。此后,由磁光阱过渡到光学粘胶(关断反亥姆霍兹磁场),在较低激光束功率下保持若干毫秒,最后,迅速地(例如 1 ms 内)将激光束的

失谐量由其初始值 $\Delta\nu_0$ 扩大至 -50 MHz, 激光束功率大幅下降, 获得温度在 $5 \mu\text{K}$ 左右的冷原子云。

制备所需冷原子云后, 对称地改变 z 方向对射激光束的相对失谐量, 例如, 令向上激光束频率为 $\nu_0 + \Delta\nu_c$, 向下激光束频率为 $\nu_0 - \Delta\nu_c$, 并保持 2 ms 左右, 冷原子云便获得上抛初速度 v_0 , $v_0 = 0.852\Delta\nu_c$ (MHz) m/s, 此后切断六束激光便可观测冷原子云的 TOF 信号。

为避免抛射过程对原子的再加热, 实际操作时把原子的抛射和后冷却结合起来进行, 执行的时序是, 关磁场—保持光学粘胶—抛射—后冷却—一切断 x - y - z 六束激光, 称之为移动光学粘胶方法。

TOF 信号的收集和测量配置如图 1 所示。

图中, 探测激光束调谐于 $\nu_{4,5} - 2$ MHz, 工作于驻波状态, 探测束高度 $\Delta h = 0.5$ cm。冷原子样品先用磁光阱(MOT)装载于阱中心附近, 线度约 0.4 cm, 然后去掉反亥姆霍兹磁场, 用光学粘胶方法(OM)继续冷却到工作温度 ($5 \sim 10 \mu\text{K}$), 最后撤去六束激光, 便可得到自由下落的 TOF 信号。

观测冷原子云上抛信号时, 先以自由下落和上一上抛的 TOF 信号为调试信号, 以获得温度最低, 峰值强度最大为目标, 调整有关参量达到最佳状态; 最后只改变上下激光束的参差调谐频率 $\Delta\nu_c$ (通过声光调制器), 便可获得冷原子云上抛情形的 TOF 信号。典型的 TOF 信号如图 2 所示。图中横坐标为时间 t (标度 $\times 20 \mu\text{s}$), $t_0 = 290$ ms, $\Delta t_{\text{HWHM}} = 5.30$ ms。

表 1 列出具体的测量数据。其中, 所得信号时延最长达到 800 ms, 即观测到飞行时间长达 800 ms 的冷原子云信号, 相应原子云抛射高度 $h = 74$ cm,

飞行路程 ~ 158 cm。

应用上节给出的估算公式, 由测量值可推算出相应原子云温度 T 和信号原子数的比值 N_s/N_{s1} , N_{s1} 为 $t_0 = 200$ ms 时接收到的信号原子数, 它们一并列于表 1。

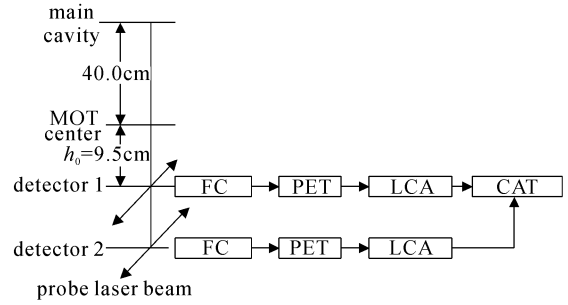


图 1 TOF 信号的收集和测量配置

FC: 荧光收集器; PET: 光-电转换器;

LCA: 低电流放大器; CAT: 探测和测量用微机

Fig. 1 Arrangement for collecting and measuring TOF signal

FC: fluorescence collector; PET: photo-electronic transform; LCA: low current amplifier; CAT: acquisition and treatment using micro-computer

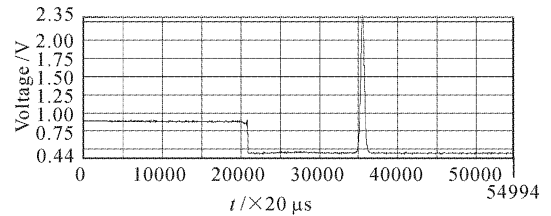


图 2 典型 TOF 信号

Fig. 2 A typical TOF signal

表 1 冷原子云上抛情况下 TOF 信号的测量和推算值

Table 1 Measured and calculated values of TOF signal in launching case

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$\Delta\nu_c$ / MHz	0.60	0.90	1.30	1.60	2.00	2.40	2.80	3.14	3.60	4.06	4.48
h / cm	1.33	3.00	6.25	9.47	14.79	21.30	28.99	36.40	47.93	60.96	74.26
t_0 / ms	200	237	291	334	395	457	521	576	653	729	800
I_0/I_{01} / %	100	47.5	35.5	24.6	12.5	7.6	4.8	4.4	2.1	1.5	0.6
Δt_{HWHM} / ms	3.28	4.06	4.11	3.75	4.19	3.70	4.07	4.00	4.44	4.38	3.85
T / μK	6.55	8.24	7.06	5.33	6.15	4.53	5.25	4.97	6.00	5.71	4.37
Δt_0 / ms	3.43	3.19	2.85	2.59	2.29	2.03	1.82	1.67	1.49	1.35	1.23
N_s/N_{s1} / %	100	63.1	54.0	37.4	23.9	14.5	11.2	11.0	6.5	5.1	3.5

Note: 1) $h(\text{cm}) = 3.7\Delta\nu_c^2(\text{MHz})$; 2) $t_0 = 45[\sqrt{h_{\text{an}}} + \sqrt{(h+h_0)_{\text{an}}}]$ ms; 3) $N_{s1} \sim 2 \times 10^7$ atoms.

4 讨 论

4.1 关于冷原子云温度 T

由表 1 所列数据可见,对我们的测量系统,由 TOF 信号的半值半宽 Δt_{HWHM} 测量数据推算的冷原子温度 T ,在一定条件限制下,相当一致,如表中 No. 5~No. 9,其统计量为 $\bar{T} = 5.4 \mu\text{K}$, $1\sigma = 0.6 \mu\text{K}$ 。这些具体条件如下: $\Delta t_0/2\Delta t_{\text{HWHM}} < 0.3$, TOF 信号比干扰信号大 20 倍以上。在引用全部推算值下,数据在平均值附近最大变化也小于 $2.4 \mu\text{K}$ ($\bar{T} = 5.8 \mu\text{K}$)。可见,所给估算公式近似程度较好,在一定限制下可获得更加满意的近似。

4.2 TOF 信号峰值强度

TOF 信号峰值强度的比值 I_0/I_{01} 随飞行时间 t_0 增大而减小,其衰减程度只与下述因素有关:

1) 冷原子云温度 T 。 T 愈大,衰减得愈快;2) 喷泉管真空度及铯蒸气分压强。较好的真空和较小的铯本底蒸气压强,将减缓该衰减程度;3) 喷泉管管轴相对铅垂线的偏离度。该偏离愈大,衰减愈快。

2) 所获数据(见表 1)与美国 NIST-F1 1998 年的试验数据^[3]相近,当时,他们的冷原子云温度 $T \sim 6 \mu\text{K}$,在 $t_0 = 800 \text{ ms}$ 时比值 I_0/I_{01} 约为本文观测值的 1.5 倍;与法国 LPTF 最近给出的试验数据则差得远些,他们的冷原子云温度 $T \sim 2 \mu\text{K}$,在 $t_0 = 729 \text{ ms}$ 时比值 I_0/I_{01} 约为本文观测值的 3 倍。

3) 文献[4]曾对原子喷泉中回落信号原子的损失进行过预测,应用该模型,代入现装置的有关工作

参量,在飞行时间 $t_0 \leq 340 \text{ ms}$ 区间,信号比值 (I_0/I_{01}) 的测量值与预测值符合得很好,但随飞行时间增大,测量与预测值的偏差增大,最后约有 3 倍之差(在 $t_0 = 800 \text{ ms}$ 时测量值降低到预测值的 1/3)。究其原因,可能是喷泉管真空度、特别是铯蒸气分压强的实际值与设定值有差异,此外,该计算属理想情形,对原子实际的弹道飞行轨迹相对若干内部件孔轴的偏差,并未考虑引入修正。

致谢 试验研究期间,作者曾与张首钢同志进行过多次有益的讨论,谨此致谢。

参 考 文 献

- 1 W. Liji, Wu Changhua, Huang Bingying *et al.*. Design & Preliminary Results of NIM Cesium Fountain Primary Frequency Standard [C]. Proc. of the 1999 Joint Meeting of EFTF-IEEE-IFCS, France, 1999. 30~33
- 2 Li Tian-chu, Li Ming-shou, Huang Bing-ying *et al.*. Progresses of NIM laser-cooled cesium fountain time/frequency standard in 2000 [J]. *Modern Measurement and Test* (现代计量测试), 2001, 9(2): 8~12 (in Chinese)
- 3 D. M. Meekhof, S. R. Jefferts, D. Lee *et al.*. NIST Cesium Fountain Frequency Standard: Preliminary Results [C]. 1998 CPEM Digest, p130~131; Proc. of 1998 IEEE-IFTS, 2~5
- 4 Huang Bing-ying, Gan Yun-qing. A loss estimation for dropping-back atom number in the atomic fountain [J]. *Modern Measurement and Test* (现代计量测试), 2001, 9(1): 53~55 (in Chinese)