

文章编号: 0258-7025(2002)Supplement-0001-03

激光抽运铯原子束频标中选择应用慢速原子*

张军海 陈景标 王凤芝 杨东海 王义道

(北京大学电子学系 量子信息与测量教育部重点实验室, 北京 100871)

摘要 在激光抽运荧光检测铯原子束频率标准上,利用斜检测激光与原子束成一定角度产生的多普勒频移效应,选择应用热原子束中的慢速原子群,从而压窄 Ramsey 谱线宽度。计算给出了当温度为 100 s 时,为了使所得信号的束管优值最大,对应的被选铯原子群的速度为 153 m/s。

关键词 光抽运铯束频标, 原子束速度分布, 循环跃迁, 束管优值

中图分类号 O431.2 **文献标识码** A

Selection and Application of Slow Velocity Atom in Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard

ZHANG Jun-hai CHEN Jing-biao WANG Feng-zhi YANG Dong-hai WANG Yi-qiu

(Department of Electronics Peking University, Key Laboratory for Quantum Information and Measurement MOE, Beijing 100871)

Abstract In this paper, by using the Doppler effect between atom beam and laser beam in optically pumped cesium beam frequency standard to select and apply slow atoms in thermal atomic beam, the Ramsey line-width has been narrowed. In order to maximize the tube merit factor, the selected atom velocity should be 153 m/s by theoretical calculation, when the oven temperature of atom beam is 100 °C.

Key words cesium frequency standard, velocity distribution, cycling transition, tube merit factor

1 引言

时间(或频率)是最基本的物理量之一,铯原子频率标准作为一级频率标准是现代国防和现代科技不可缺少的设备,它产生的高准确度、高稳定度时间频率信号在卫星、导弹发射和各种现代化武器装备的同步等方面起着决定性作用。并抽运铯束频标是近年来发展起来的一种新型铯原子束频率标准,它与传统的磁选态铯频标主要区别是:利用光抽运的原理实现选态和利用探测激光诱发荧光获得频标信号。这样就不再需要复杂的选态磁铁,也不需要离子探测器或电子倍增器。这一改进使铯束管的结构有了很大简化,降低了制作难度。在传统的磁选态铯原子束频率标准上,为了压窄 Ramsey 频谱线宽,二级多普勒频移,往往采取一定光学结构,有选择性地利用热原子束中的慢速原子群。如惠普公司的商品磁选态小铯钟(HP5071),有效原子速度分布峰值在 130 m/s^[1]。德国 PTB 的磁选态铯基准钟,CS2 原子束平均速度是 90 m/s^[2];CS3 原子束平均

速度是 70 m/s^[3]。但在激光抽运检测铯原子束频标上,有效原子束平均速度往往在 220 m/s 左右,甚至更快。

考虑到铯束管优值,可以在激光抽运荧光检测铯原子束频率标准上,利用斜入射检测激光与原子束成一定角度产生的多普勒频移效应,选择应用热原子束中的慢速原子群。我们在理论上证明了利用慢速原子群可以得到线宽在 600 Hz 左右,甚至更小的 Ramsey 谱线(利用速度在最可几速率附近的原子群可以得到线宽上 1050 Hz 左右的 Ramsey 谱线),并且维持较好的信噪比及较好的束管优值。实验纪录的有效原子束速度分布及产生的 Ramsey 频谱与计算结果符合得很好。

2 理论分析

实验装置如图 1 所示。在铯束管中,当铯原子气体达到热力学平衡时,铯原子束速度分布为^[4]:

$$f_1(u) = f_{10} u^3 \exp(-u^2/\alpha^2) \quad (1)$$

其中 f_{10} 为归一化系数, $\alpha = \sqrt{2kT/m}$, u 为铯原子的速度, k 为玻耳兹曼常数, T 为铯炉的绝对温度,

m 为铯原子的原子质量。

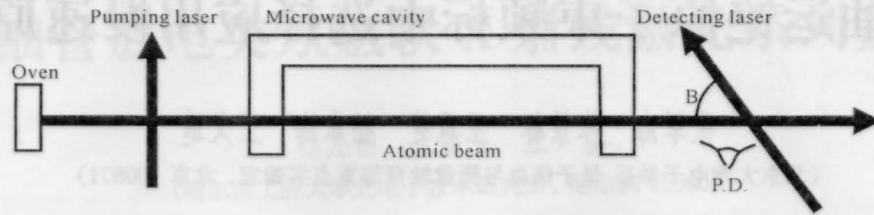


图1 斜射激光检测的铯原子频标的结构

Fig. 1 Diagram of experimental set-up of optically pumped cesium beam frequency standard with sharp angle detecting laser beam

当原子束经过检测区时,与检测光相互作用使原子产生基态 ($F = 4$) 到激发态 ($F' = 5$) 的循环跃迁。若考虑循环跃迁的影响,不同速度的原子对荧光信号的贡献与原子的速度成反比,所以在检测区所检测到的原子荧光信号所对应的原子的有效速度分布为^[3]:

$$f_2(u) = f_{20} u^2 \exp(-u^2/\alpha^2) \quad (2)$$

其中 f_{20} 为归一化系数。

在原子能级近共振情况下,跃迁几率为^[4]:

$$P_{mn} = \frac{1}{2} [1 + \cos(\omega - \omega_0)T] \sin^2 2b\tau \quad (3)$$

式中 P_{mn} 为跃迁几率, ω 为微波频率, ω_0 为漂移区平均跃迁频率, τ 为原子在相互作用区飞行时间, T 为原子在漂移区飞行的时间。当 $\omega = \omega_0$, 且 $2b\tau = \pi/2$ 时, $P_{mn}(2\tau + T) = 1$ 取极大值, 而当 $(\omega - \omega_0)T/2 = \pi/2$ 时, P_{mn} 为极小值, 此时 $P_{mn}(2\tau + T) = 0$ 是它的第一个极小点。衡量一个铯束管的指标是束管优值, 束管优值正比于信噪比与原子谱线宽度之商, 因此在假设具有相同噪声的条件下, 束管优值正比于荧光信号强度, 反比于原子运动速度^[4]。因此管优值与原子的速度满足以下方程:

$$F(u) = F_0 u \exp(-u^2/\alpha^2) \quad (4)$$

式中 F_0 为归一化系数。

当铯炉温度为 100°C , 把式中 $f_1(u)$, $f_2(u)$ 和 $F(u)$ 画作为 u 的函数如图 2 所示。

计算可得:

1) 当速度 $u = 264 \text{ m/s}$ 时, 所对应的有效原子数 $f_1(u)$ 为最大值;

2) 当速度 $u = 216 \text{ m/s}$ 时, 所对应的信号强度 $f_2(u)$ 为最大值;

3) 当速度 $u = 153 \text{ m/s}$ 时, 所对应的束管优值 $F(u)$ 为最大值。

若把三种速度分布函数的最大值设为单位 1,

则三种速度分布在三个特定速度值的相对几率如表 1 所示。

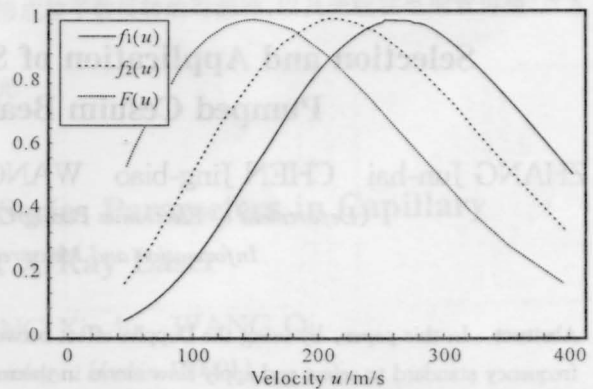


图2 $f_1(u)$, $f_2(u)$ 和 $F(u)$ 随速度 u 的变化曲线

Fig. 2 $f_1(u)$, $f_2(u)$ and $F(u)$ as a function of velocity

表 1 三种速度分布取三个特定速度值的相对几率

Table 1 Relatively probability of the three functions at specific velocity

	$F(u)$	$f_2(u)$	$f_1(u)$
264 m/s	0.6395	0.9114	1
216 m/s	0.8575	1	0.8977
153 m/s	1	0.8260	0.5252

3 实验结果

在装有相互作用区长度为 10 mm 、自由漂移区长度为 126 mm 的 Ramsey 微波腔的小铯束管上, 在铯炉温度为 100°C 的条件下进行实验。由于我们的检测光频率锁定在 $F = 4, F' = 5$ 和 $F = 4, F' = 4$ 谱线频率的交叉线上, 当检测光与原子运动方向成 113.5° 夹角时, 由多普勒效应导致 $u = 264 \text{ m/s}$ 原子群所感受的激光频率向高频方向移动 125 MHz 。理论 Ramsey 频谱及速度分布如图 3 所示, 图 4 是实验得到的 Ramsey 及由此得到的速度分布, 显然理论和实验符合得相当好。同理, 当检测光与原子运

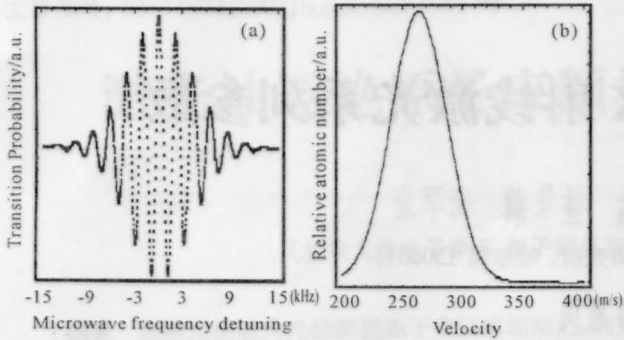


图3 (a)检测光与原子束夹角为 113.5° 时的理论计算所得 Ramsey 花样;(b)从图 3(a)变换得到有效原子速度分布

Fig.3 (a) Theoretic Ramsey patterns when angle between detect light and atom is 113.5° ; (b) The effective velocity distribution transformed from the recorded Ramsey patterns shown in Fig.3(a)

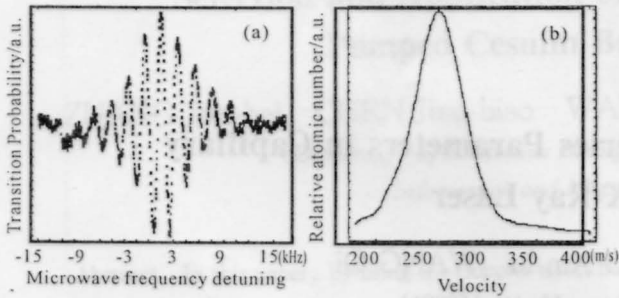


图4 (a)检测光与原子束夹角为 113.5° 时实验所得的 Ramsey 花样;(b)从图 4(a)变换得到有效原子速度分布

Fig.4 (a) Experimental Ramsey patterns when angle between detect light and atom is 113.5° ; (b) The effective velocity distribution transformed from the recorded Ramsey patterns shown in Fig.4(a)

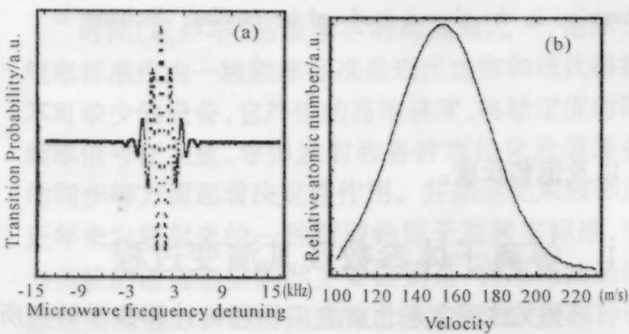


图5 (a)检测光与原子束夹角为 134.1° 时的理论计算所得 Ramsey 花样;(b)从图 5(a)变换得到有效原子速度分布

Fig.5 (a) Theoretic Ramsey patterns when angle between detect light and atom is 134.1° ; (b) The effective velocity distribution transformed from the recorded Ramsey patterns shown in Fig.5(a)

动方向成 134.1° 夹角时,导致 $u = 153$ m/s 原子群所感受的激光频率向高频方向移动 125 MHz,可以得到线宽为 600 Hz 左右的 Ramsey 频谱。理论 Ramsey 频谱及速度分布如图 5 所示。图 6 是实验得到的 Ramsey 及由此得到的速度分布,理论和实验符合得也很好。

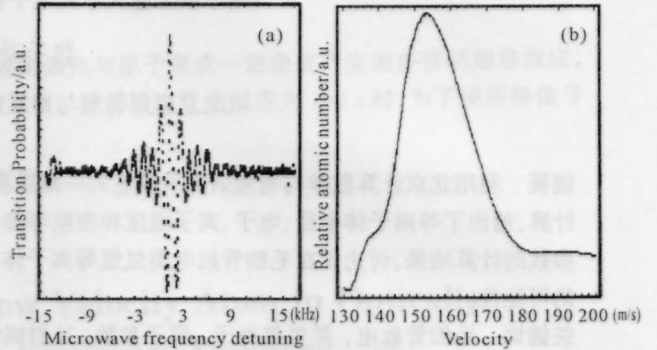


图6 (a)检测光与原子束夹角为 134.1° 时实验所得 Ramsey 花样;(b)从图 6(a)变换得到有效原子速度分布

Fig.6 (a) Experimental Ramsey patterns when angle between detect light and atom is 134.1° ; (b) The effective velocity distribution transformed from the recorded Ramsey patterns shown in Fig.6(a)

参 考 文 献

- 1 L. S. Culter, C. A. Flory, R. P. Giffard *et al.*. Frequency pulling in cesium beam frequency standards due to $\Delta M = \pm 1$ transitions. Proc. of 45th Annual Symposium on Frequency Control, 1991. 544~553
- 2 A. Bauch, K. Dorenwendt, T. Theindorff. The PTB's atomic frequency standards CS2 and CSX: frequency shift by pulling due to neighboring transitions. *Metrologia*, 1987, 24:199~203
- 3 T. Heindorff, R. Schroeder, A. Bauch. The PTB's Primary clock CS3. Proc. of Symposium on Frequency Standards and Metrology, 1995. 413~414
- 4 王义道. 量子频标原理. 北京: 科学出版社, 1986
- 5 S. Ohshima, Y. Nakadan, T. Ikegami *et al.*. Light shift in an optically pumped CS beam frequency standard. *IEEE Trans. Instrum.*, 1991, 40:1003~1007