

文章编号: 0253-2239(2001)02-129-05

光抽运小型铯束频标中光频移的测量与分析*

陈景标 王凤芝 杨东海 王义道

(北京大学电子学系, 教育部量子信息和测量重点实验室, 北京 100871)

摘要: 在弥漫激光场抽运斜入射光检测小型铯原子束频标实验系统上, 对弥漫激光场产生的散射光所引起的光频移(主要是交流斯塔克移动)以及光抽运区产生的荧光引起的光频移对铯束频标准确度的影响作了仔细的实验测量, 并与理论计算结果作了比较分析。测量结果表明在正常工作条件下, 散射光引起的光频移小于 -2×10^{-13} , 荧光引起的光频移值在 0.8×10^{-13} 左右, 这样的光频移对小型光抽运铯束频标来说是可以接受的。

关键词: 光频移; 光抽运; 铯束频标; 弥漫激光

中图分类号: O431.2 文献标识码: A

1 光抽运铯束频标中光频移的影响

光抽运铯束频标比传统的磁选态铯束频标能够得到更好的频率稳定性和频率准确度, 但是激光抽运和激光检测的荧光和散射光都会引起光频移^[1~3], 这是光抽运铯束频标的研制中需要特别注意的问题。

原子频标中的光频移是指铯原子在外加光场的作用下, 通过交流斯塔克效应, 引起钟跃迁能级的移动, 从而产生的频标输出频率的变化。原子在外加光场的作用下, 取电偶极近似, 由于交流斯塔克效应, 下能级的移动为^[4]

$$\Delta E_g(F_g, f_f, \omega, \nu) = \frac{\langle g | \mathbf{P} \cdot \mathbf{E} | f \rangle^2}{\hbar} \times \frac{\omega - \omega_{fg} - \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\nu}}{(\omega - \omega_{fg} - \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{\nu})^2 + (\Gamma_{fk}/2)^2}, \quad (1)$$

式中, $\langle g |$ 表示原子的基态, $\langle f |$ 表示原子的激发态, \mathbf{k} 为光波矢, $\boldsymbol{\nu}$ 为原子速度, Γ_{fg} 为原子 $\langle f |$ 态自然线宽, \mathbf{P} 为原子的电偶极矩算符, \mathbf{E} 是外加光场的电场矢量。钟跃迁 $F = 3, m_F = 0 - F = 4, m_F = 0$ 的总光频移应该是 $F = 4, m_F = 0$ 态和 $F = 3, m_F = 0$ 态交流斯塔克能级移动的差值(在此, F 表示原子基态的总角动量量子数, F' 表示激发态的总角动量量子数, m_F 为其相应的磁量子数)。铯原子从铯炉里喷射出来后与频率锁定在原子跃迁线上(例如 $F = 4, F' = 4$) 的抽运激光相互作用(见图 1), 跃迁

到激发态; 然后通过自发辐射跃迁回到 $F = 3$ 或 $F = 4$ 的基态, 同时辐射相应的光子。自发辐射产生的各向同性光子会由微波腔的原子通行孔进入到微波作用区和漂移区, 通过交流斯塔克效应影响这一带铯原子的 $F = 3$ 和 $F = 4$ 的钟跃迁能级, 从而引起频标的光频移。另外, 激光束在窗口和束管其他部件表面上产生的杂散光也能够进入微波作用区和漂移区, 引起光频移。检测区循环检测产生的荧光也有类似效果。

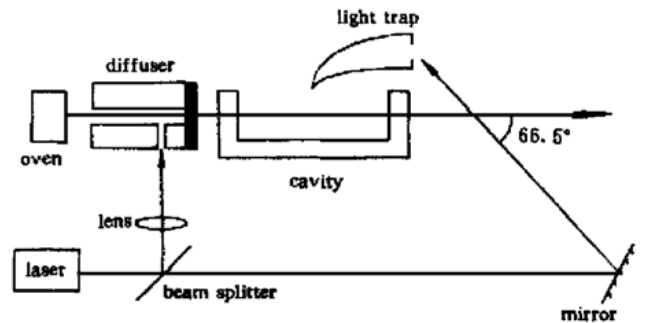


Fig. 1 Diagram of experimental setup of the diffused laser light optically pumped sharp angle incidence laser light probing cesium beam frequency standard

荧光引起的光频移的大小决定于进入微波作用区和漂移区荧光的强度和频谱, 而光抽运区和光检测区的原子束强度和原子的速率分布以及选择不同的激光频率抽运检测机制都直接影响荧光的强度和频谱。由于原子束中的原子速度在原子束方向上有一定范围的分布, 所以抽运区和检测区所发的荧光在原子束方向具有一个多普勒展宽光谱, 对于微波作用区和漂移区中的原子而言其频率分别向高频和低频方向移动。在铯束频标中, 由于检测区的原子束强度比抽运区的原子束强度低一个数量级左右, 所以检测区原子产生的荧光及其引起的光频移比抽

* 高等学校骨干教师资助计划项目、国家自然科学基金(69678031)资助项目。

运区荧光引起的光频移要小很多。对于光抽运基准铯钟, 铯束管和微波腔比较长, 光抽运区和光检测区离开微波腔和漂移区比较远, 能够进入微波作用区和漂移区引起光频移的荧光很少, 引起的光频移也较小(估计在 1×10^{-15} 左右), 这对于准确度在 10^{-14} 量级的基准钟, 其影响可以忽略^[1-3, 5, 6]。但是随着频标技术的不断发展, 尤其是随着二级多普勒频移和腔相移修正精度的提高, 光抽运基准铯钟的准确度目前已经进入 10^{-15} 量级。法国时间频率基准实验室的基准铯钟的性能评估表明, 其准确度已达 6.3×10^{-15} , 光频移量为 8×10^{-15} , 光频移的不确定度为 2.5×10^{-15} ^[7]。光频移的不确定度已成为光抽运铯束频标准度的重要误差来源, 其影响仅次于腔相移的贡献, 与二级多普勒频移的影响相当。可以预见, 光抽运铯束频标中光频移的精确测量将越来越重要。对于光抽运小铯钟, 由于光抽运区和光检测区距离微波作用腔和漂移区比较近, 抽运区和检测区原子跃迁所发的荧光(以及束管部件表面漫散射激光)容易由微波谐振腔上的原子通行孔进入微波作用区和漂移区, 会引起较大的光频移^[1, 9]。按我们所作的计算, 可达 10^{-13} 量级。

对于我们实验室最新建立的弥漫激光场抽运铯束频标, 除了上述的荧光漫散射光, 同时还要考虑到弥漫激光场的散射光有部分功率从散射圆筒的两端漏出来进入微波作用区和漂移区引起严重的光频移^[8]。根据我们的实验系统结构, 在功率为 1 mW 的激光馈入漫散射圆筒形成抽运光场, 材料的反射系数为 96%, 散射圆筒长 5 cm, 内径 4 mm, 微波腔离散射圆筒一端 25 mm 的条件下, 在微波作用区与漂移区会形成平均强度为 $3.6 \times 10^{-2} \text{ W/m}^2$ 的散射光, 引起的频标光频移约 10^{-9} 量级。为了减少光场散射光带来的严重光频移, 把散射圆筒的内径增大到 6 mm, 并在漫散射管朝向微波腔的端面上加一个直径为散射圆筒内径二分之一的小孔光阑以挡住漫反射直接进入微波腔和漂移区, 同时加大散射圆筒与微波作用区之间的距离。将激光馈入孔选在靠近圆筒有光阑的一端, 这样可以让光阑挡住散射光中光强较强的部分, 如图 1 所示。这一结构使圆筒内壁的漫反射光不能直接进入微波腔和漂移区。

我们建立了弥漫激光场抽运斜入射光检测铯原子束频标实验系统, 并进行了性能测试。与 HP-5071A 商品小铯钟比对, 频标系统频率秒级稳定度为 1.1×10^{-11} , 天稳定度达到 3.5×10^{-13} ^[10]。以此为基础, 测量分析了弥漫激光场抽运铯束频标系

统中的光频移对频标性能的影响, 并与理论计算结果作了比较分析。

2 散射光引起的光频移的测量结果

如图 1 所示, 在我们的频标系统里, 由于有光阑挡住弥漫光场的漫散射光进入微波腔, 所以散射光不能直接进入微波腔和漂移区引起光频移, 但是漫散射光仍然会通过多次反射或衍射进入微波作用区。显然, 由于上述原因进入微波作用区和漂移区的散射光的光强难以计算, 也就无法给出这种光频移的具体数值计算结果。但是, 可以在理论上得到这种散射光引起的光频移随抽运光频率和功率变化的特性。图 2(a) 就是按(1)式理论计算出来的散射光引起的光频移随抽运激光频率变化的关系。图 2(b) 是铯原子 D_2 线的饱和吸收谱。

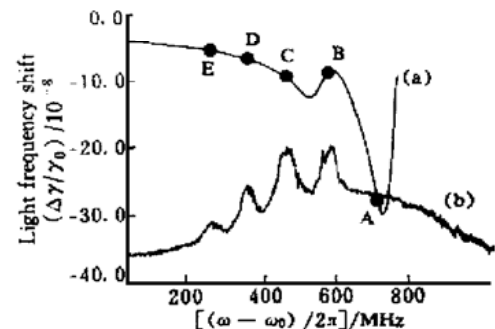


Fig. 2 Light frequency shift caused by diffuse light as a function of the pumping laser frequency, when the average, light intensity in the microwave interaction regions and drift region was assumed to be 1 W/m^2 . Curve (a) is the calculated light frequency shift caused by diffused light as a function of the pumping laser frequency. Curve (b) is the cesium D_2 saturated absorption spectrum. Here, ν_0 is the 0-0 clock transition frequency of cesium atom, ω_0 corresponds to the energy separation between $F = 4$ and $F' = 3$

理论与实验表明, 当馈入散射圆筒激光功率达到 0.2 mW 以上时, 激光频率在从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线到 $F = 4, F' = 4$ 和 $F = 4, F' = 5$ 跃迁的交叉线之间 300 MHz 的范围内都能有效抽运斜光检测的有效原子^[8, 10]。也就是说, 在一定的频率范围内, 抽运激光频率的改变不会影响其正常的抽运效能, 但光频移的大小却会随之变化。所以我们利用改变抽运激光的频率来测量光频移。

图 2 中 A、C、E 三点对应的抽运激光频率分别为 $F = 4 - F' = 5$ 跃迁频率, $F = 4 - F' = 4$ 跃迁频率, $F = 4 - F' = 3$ 跃迁频率。B 点对应的抽运光频率就是斜入射检测光锁定的 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁和 $F = 4 - F' = 5$ 跃迁的交叉线。D 点对应 $F = 4$

- $F' = 4$ 跃迁和 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁的交叉线。

由弥漫激光场抽运性能分析可知, 当馈入散射圆筒激光功率达到 0.2 mW 以上时, 激光频率锁定在 B、C、D、E 各点不会改变对有效原子的抽运性能。所以可以通过将抽运激光分别锁定在对应 B、C、D、E 各点频率上来测量散射光引起的光频移的变化。同时, 看到当抽运光频率在 C、E 两点引起的光频移的差别最大。此外, 散射光引起的光频移的一个重要特点是与馈入散射圆筒的激光功率成正比^[8,9]。抽运光功率从 1 mW 到 3 mW 变化时, 光频移将增加 2 倍, 所以, 通过改变抽运光功率来测量相应频率的散射光引起的光频移也是个有效的办法。当抽运区原子得到有效的抽运之后, 加大抽运光功率并不影响荧光引起的光频移^[9], 所以用改变抽运光功率的办法测量到的仅是散射光引起的光频移的变化。至于荧光引起的光频移的测量可以通过改变抽运光频率的办法来测量。由于散射光引起的频移也随抽运光频率而变, 所以这种方法测量到的的光频移是荧光引起的光频移和散射光引起的光频移之和。

为了排除频标长时间漂移对测量的影响, 采用抽运激光功率来回跳变的方法来测量光频移的变化。让抽运光功率在 1 mW 和 4 mW 两个位置来回跳变, 每万秒左右跳变一下, 这样测量得到结果以后, 对 1 mW 和 4 mW 功率处的值分别拟合, 排除频标长时间的慢漂移对测量结果的影响。图 3 所示就是在抽运激光频率锁定在铯原子饱和谱 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁与 $F = 4 - F' = 5$ 跃迁的交叉线上, 抽运光功率在 1 mW 和 4 mW 两功率值之间跳变测量到光频移的变化值。将不同功率处数据拟合后, 可以得到抽运光功率改变 3 mW 时散射光引起的光频移的变化为 $(-11.5 \pm 3.0) \times 10^{-13}$, 平均每毫瓦产生

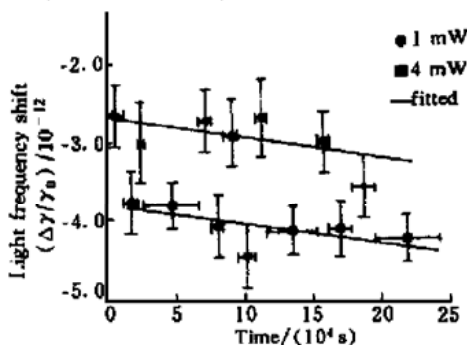


Fig. 3 Light frequency shifts measured with changing the diffused laser light power. ν_0 is the 0-0 clock transition frequency of cesium atom. The pumping laser frequency was locked on the crossover line between $F = 4 - F' = 4$ transition and $F = 4 - F' = 5$ transition. The vertical difference of the two fitted lines is 11.5×10^{-13}

$(-3.8 \pm 1.0) \times 10^{-13}$ 光频移。根据前面的计算, 相当于每 1 mW 的抽运激光功率, 在微波腔与漂移区造成平均散射光功率 $4.3 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2$ 。将激光频率分别锁定在 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁线, $F = 4 - F' = 4$ 跃迁和 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁饱和吸收的交叉线以及 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线上进行上述同样的光频移测量, 如图 4 所示。将实验结果与理论计算值比较, 可看出散射光引起的光频移随抽运光频率变化的特征是一致的, 说明散射光引起的光频移随抽运激光频率变化关系的测量结果与理论基本相符。

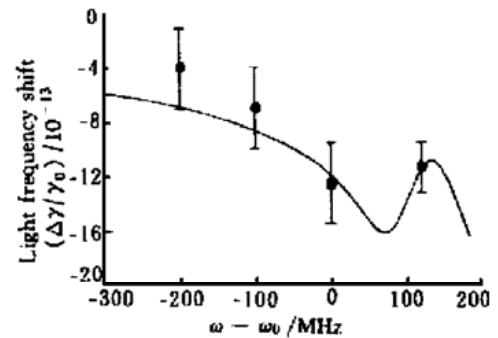


Fig. 4 Light frequency shifts caused by diffused laser light as a function of pumping laser frequency when the pumping laser power switched between 1 mW and 4 mW . Here, ν_0 is the 0-0 clock transition frequency of cesium atom, ω_0 is the cesium $D_2 F = 4, F' = 4$ transition frequency. Calculated curve was assumed under the condition that the average diffused light intensity in the microwave interaction regions and drift region to be $1.3 \times 10^{-5} \text{ W/m}^2$, without considering the light frequency shift caused by fluorescence

上面的测量结果说明, 当弥漫激光场抽运斜入射光检测铯束频标正常工作条件下, 0.5 W 的抽运光功率足以满足原子束光抽运的要求, 而它所带来的散射光引起的光频移小于 -2×10^{-13} , 光频移对微波功率、铯炉温度等因素不敏感^[8], 所以对小型光抽运铯束频标, 这样的光频移影响是可接受的^[10]。

此外, 散射光引起的光频移随散射光频率变化的计算和测量结果给了我们一个揭示: 在光抽运铯束频标中, 利用 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线频率的抽运光, 可以减小相应杂散光引起的光频移。由于束管上光窗反射产生的管内杂散光也会进入微波作用区和漂移区, 其大小和方向都难以计算。在我们的频标系统中, 对于抽运区, 这些杂散光产生的光频移随激光功率变化的特性与弥漫激光场散射光引起的光频移相同, 也会与杂散光功率成正比, 所以上面改变抽运激光功率所测量的结果中包含了这种光频移影响。对于检测区产生的杂散光, 实验上采用功率跳变的

方法来测量,但在我们的系统稳定性范围内,没有测到明显的光频移,其原因可能是实验中采取的减少检测区杂散光的措施抑制了这种影响。

3 荧光光频移的测量与分析

对于光抽运铯束频标中的光频移,文献[1~3,5]中关于这方面的研究工作中唯一的实验测量结果是来自将一定功率的激光直接导入微波作用区和漂移区来进行实验,没有对荧光引起的光频移作直接实验测量。最近,法国时间频率基准实验室的基准铯钟采用改变抽运区与微波腔之间的距离来测量荧光引起的光频移^[10]。但对于小型的铯束频标,由于小束管体积有限,这种方法是不现实的。

本文采用改变抽运光的频率来测量荧光光频移。当抽运激光强度大于饱和抽运功率后,增加抽运激光功率,荧光所引起的光频移并不随之而变,这是因为原子束与激光作用产生的荧光强度与原子束强度成正比。所以对于我们的频标系统在抽运激光功率大于0.2 mW时测量到的光频移也只是散射光引起的,如上节的测量结果,其中不包括荧光引起的光频移。在抽运光能有效抽运原子的情况下,无法通过改变抽运激光功率来测量到荧光引起的光频移。因为不同的抽运光频率改变了荧光的光谱分布从而使荧光引起的光频移有变化,荧光引起的光频移还是随抽运光的频率而变化。所以本工作通过改变抽运光频率来测量荧光引起的光频移。相对于抽运区来说,检测区的原子束强度比抽运区弱一个数量级,其荧光引起的光频移的影响相对也要小一个数量级^[8],所以仅讨论抽运区荧光的影响。

根据频标实验系统的结构,计算了110 °C炉温时抽运区产生的荧光引起的光频移与抽运激光频率的关系如图5所示。激光频率从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线到 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁线变化时荧光引起的光频移的变化为 0.73×10^{-13} 。在能够有效抽运铯原子束的激光频率范围内,激光频率从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线到 $F = 4 - F' = 4$ 和 $F = 4 - F' = 5$ 跃迁交叉线时荧光引起的光频移的变化最大为 1.23×10^{-13} 。对本文频标系统来说,测量这么小的变化是困难的,但可以在系统的测量精度范围内给出测量结果。结合散射光引起的光频移随抽运激光频率变化的计算结果,当抽运激光功率为4 mW时将抽运光激光频率从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线转变到 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁线,按计算的散射光引起的光频移和

荧光引起的光频移总的变化量是 -5.8×10^{-13} (参考表1)。图6所示的是抽运激光功率为4 mW时将抽运光激光频率从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线到 $F = 4 - F' = 4$ 跃迁线来回跳变的测量数据。平均结果测量到的总光频移变化是 $(-3.9 \pm 3) \times 10^{-13}$,与计算的结果是相符的。

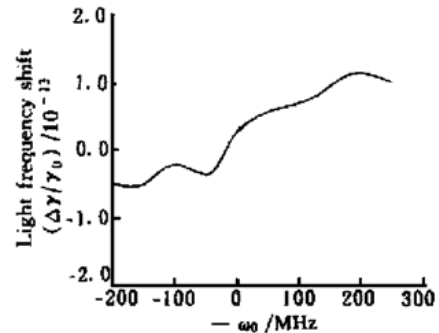


Fig. 5 Calculated light frequency shift caused by fluorescence as a function of pumping laser frequency. ω_0 is the cesium $D_2 F = 4, F' = 4$ transition frequency.

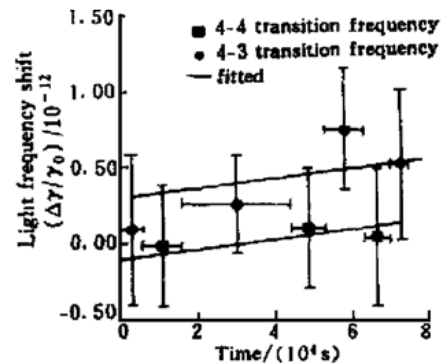


Fig. 6 The measured total light frequency shift when the pumping laser frequency changed between two transition frequencies. The vertical difference of the two fitted lines is 3.9×10^{-13}

Table 1 Light frequency shifts caused by different pumping laser frequency with 4 mW laser power

pumping laser frequency	diffuse light frequency shift / 10^{-13}	fluorescent light frequency shift / 10^{-13}	total light frequency shift / 10^{-13}
4- 3 transition	- 9.23	- 0.49	- 9.72
4,3 crossover line	- 11.46	- 0.22	- 11.68
4- 4 transition	- 15.77	+ 0.23	- 15.54
4,5 crossover line	- 15.06	+ 0.74	- 14.32

用同样的方法测量抽运激光功率为4 mW时,抽运光频率从 $F = 4 - F' = 3$ 跃迁线到 $F = 4 - F' = 4$ 和 $F = 4 - F' = 5$ 跃迁交叉线的总光频移变化是 $(-6.1 \pm 3) \times 10^{-13}$,与计算值 -4.6×10^{-13} 也是相符的,参见表1。

以上的测量结果说明在弥漫激光抽运斜入射光检测铯束频标系统中当频率在 $F = 4 - F' = 4$ 和

$F = 4 - F' = 5$ 跃迁线交叉线的检测光同时用来产生抽运弥漫光场时的荧光引起的光频移值在 $(0.8 \pm 3.0) \times 10^{-13}$ 左右。在我们的小型弥漫激光抽运铯束频标系统的准确度范围内, 测量的荧光光频移与理论值是相符的。

结束语 在弥漫激光场抽运铯束频标中, 如果不采取有交措施而让部分散射光直接进入微波作用区和漂移区, 将会引起严重的光频移。在弥漫散射圆筒靠微波腔的端面上加上适当孔径的光阑, 可以有效减少散射光引起的光频移。我们所建立的弥漫激光场抽运斜入射光检测铯原子束频标系统的性能测试表明, 与 HP-5071A 商品小铯钟比对, 频标系统频率秒级稳定度为 1.1×10^{-11} , 天稳定度达到 3.5×10^{-13} 。以此为基础, 测量分析了弥漫激光场抽运铯束频标系统中的光频移对频标性能的影响, 并与理论计算结果作了比较分析。结果说明在抽运光功率为 0.5 mW 的正常工作条件下散射光引起的光频移的影响小于 -2×10^{-13} 。此外, 对频标系统的荧光引起的光频移测量结果表明, 荧光引起的光频移的计算值与测量值在测量误差范围内是相符的。光频移的准确测量将有助于提高频标的准确度。

参 考 文 献

- [1] Brillet A. Evaluation of the light shifts in an optically pumped cesium beam frequency standard. *Metrologia*, 1981, **17**(1): 147~ 150
- [2] Boussert B. Evaluation of the performances of an optically pumped miniature atomic frequency standard. [Ph. D. thesis], Orsay(France): University Paris XI, 1996
- [3] Ohshima S, Nakadan Y, Ikeshi T *et al.*. Light shifts in an optically pumped Cs beam frequency standard. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1991, **40**(6): 1003~ 1007
- [4] Happer W, Mathur B S. Effective operator formalism in optical pumping. *Phys. Rev.*, 1967, **163**(1): 12~ 25
- [5] Lee W D, Shirley J H, Lowe J P *et al.*. The accuracy evaluation of NIST-7. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1995, **44**(1): 120~ 123
- [6] Rovera D, de Clercq E, Clairon A. An analysis of major frequency shifts in the LPTF optically pumped primary frequency standard. *IEEE Trans. on UFFC.*, 1994, **41**(2): 245~ 249
- [7] Makdissi A. Research on the frequency shifts in Cs beam frequency standard. [Ph. D. thesis], Orsay (France): University Paris XI
- [8] 陈景标, 杨东海. 小型光抽运铯束频标在不同抽运-检测机制下的光频移. *计量学报*, 1998, **19**(2): 94~ 100
- [9] 陈景标. 弥漫激光抽运铯原子束频率标准[博士学位论文]. 北京: 北京大学, 1998
- [10] Chen Jingbiao, Wang Fengzhi, Yang Donghai *et al.*. A new design of a diffused laser light optically pumped small cesium beam frequency standard. *IEEE Trans. on UFFC.*, 2000, **47**(2): 457~ 460

Measurements and Analyses of Light Frequency Shift in a Small Optically Pumped Cesium Beam Frequency Standard

Chen Jingbiao Wang Fengzhi Yang Donghai Wang Yiqiu

(Department of Electronics, Key Lab. of Quantum Information and Measurement, MOE, Peking University, Beijing 1000871)

(Received 10 September 1999; revised 28 February 2000)

Abstract: In the experimental system of diffused laser light field pumped sharp angle incidence laser light probing small cesium beam frequency standard, the light frequency shift (mainly the AC Stark shift) caused by diffused laser light comes from the diffused laser light field, and the light frequency shift caused by fluorescent light comes from the pumping region have been measured carefully. The measured results were analyzed and compared with the calculated results. The results proved that, under normal working condition, the light frequency shift caused by diffused laser light is less than -2×10^{-13} , the light frequency shift caused by fluorescent light is about 0.8×10^{-13} , such results are acceptable for a small optically pumped cesium beam frequency standard.

Key words: light frequency shift; optically pumping; cesium beam frequency standard; diffused laser