

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2019-01-0012-05

一种原子气室缓冲气体压强的测量方法^{*}

陈大勇^{1,2}, 涂建辉^{1,2}, 廉吉庆^{1,2}, 王剑祥^{1,2}

(1. 兰州空间技术物理研究所, 兰州 730000;

2. 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

摘要:在被动型 CPT(相干布居数囚禁)原子钟中,缓冲气体、C 场主要作用是改善原子钟信号的特性,但同时会对碱金属原子能级产生扰动,引起 CPT 共振信号频率的偏移,通过建立被动型 CPT 原子钟频移量的理论模型,并基于被动型 CPT 原子钟建立频移量测量系统,对缓冲气体和 C 场等因素引起的频移量进行测量,并通过数值计算,得到被动型 CPT 原子钟气室缓冲气体压强。

关键词:相干布居数囚禁;原子钟;频移;数值计算

A method for measuring the pressure of the buffer gas in the chamber

CHEN Da-yong^{1,2}, TU Jian-hui^{1,2}, LIAN Ji-qing^{1,2}, WANG Jian-xiang^{1,2}

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum Technology and Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: For passive CPT atomic clock, the core function of the buffer gas and the C field is to improve the signal to noise ratio of the atomic clock signal, at the same time, the buffer gas and C field will disturb the energy level of the alkali metal atom and cause small shifts of CPT signal resonance frequency. We set up the theoretical model for the frequency shift of passive CPT atomic clock and a frequency shift measurement system for the CPT atomic clock based on the passive CPT atomic clock test system. And we measure the frequency shift caused by the buffer gas and the C field and we obtain the buffer gas pressure by numerical calculation.

Key words: coherent population trapping(CPT); atomic clock; frequency shift; numerical calculation

0 引言

在原子钟中,缓冲气体主要作用为压窄共振信号的线宽、提高频率稳定度,然而缓冲气体与碱金属原子发生频繁的碰撞,会对碱金属原子的电子运动状态产生影响,使得原子能级产生微小移动。C 场由于塞曼效应,同样会使原子能级产生微小移动,这两种作用最终会引起碱金属原子能级间共振频率的偏移,从而引起原子钟频率的偏移^[1]。

在被动型 CPT(coherent population trapping)原子钟中,缓冲气体在提高信噪比的同时,会引起 CPT 共振信号频率发生偏移;C 场在为碱金属原子与光作用提供量子化轴,获得高品质 CPT 共振信号的同时,会引

* 收稿日期:2018-04-21;接受日期:2018-07-26

作者简介:陈大勇,男,工程师,主要从事量子频标技术研究。

起碱金属原子能级发生偏移。在被动型 CPT 原子钟设计相干布居数囚禁中、可通过调整 C 场线圈工作电流改变 C 场强度,从而实现 CPT 原子钟输出频率的校正。本文通过建立被动型 CPT 原子钟频移测量系统,测量 CPT 信号的共振频率,得到缓冲气体等因素引起的频率偏移量,并通过数值计算,反演得到缓冲气体压强、C 场工作电流与频移量间的关系,为 CPT 原子钟的设计及工艺改进提供参考依据^[2-15]。

1 被动型 CPT 原子钟频移模型

CPT 现象是两束相干激光与碱金属原子相互作用,当两相干激光的频差严格等于基态超精细能级间隔时,原子就会处于一个相干叠加态上,两个子能级的原子不再吸收激光,不会被激发、不发射荧光,原子被“囚禁”在基态。原子的荧光光谱,出现“暗线”(dark line),透射光是透明的,检测透射光则出现“亮线”。被动型 CPT 原子钟以 CPT 的共振“亮线”为参考谱线,其线宽较窄,可得到高稳定的原子钟频标信号。

图 1 是 ¹³³Cs 原子能级示意图。考虑到缓冲气体和 C 场对能级的作用, ¹³³Cs 基态 $|F=4, m_F=0\rangle$ 和 $|F=3, m_F=0\rangle$ 两能级间跃迁频率满足公式(1):

$$\nu_{0-0} = \nu_{Cs} + \Delta\nu_{bg} + \Delta\nu_B, \tag{1}$$

式(1)中, ν_{Cs} 是无干扰时的 ¹³³Cs 原子基态两能级间跃迁频率,取 9 192 631 770 Hz; $\Delta\nu_{bg}$ 是缓冲气体引起的碰撞频移,正比于原子气室内缓冲气体的密度和压强,且对温度敏感性很高; $\Delta\nu_B$ 是 C 场引起的频移,且只受磁场强度平方项的影响^[2-4]。

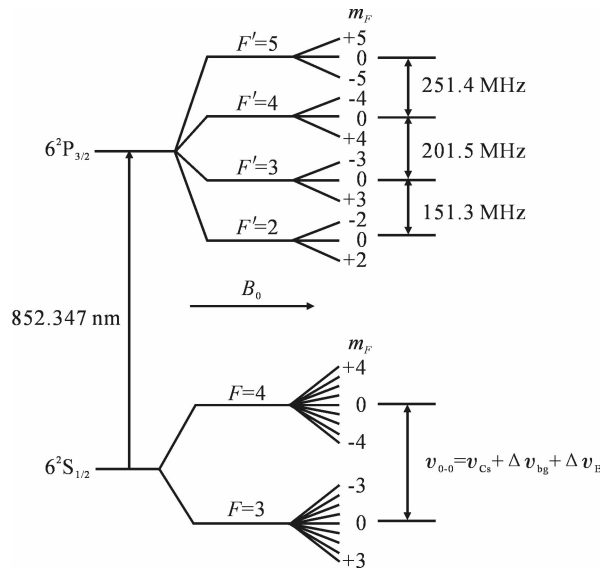


图 1 ¹³³Cs 原子能级

在原子气室中,缓冲气体与碱金属原子发生频繁碰撞,碰撞过程会对碱金属原子的电子运动状态产生一些扰动,使能级产生微小移动,从而引起频移^[3],其碰撞频移 $\Delta\nu_{bg}$ 满足式(2):

$$\Delta\nu_{bg} = P_0 [\beta_0 + \delta_0 (T - T_0)], \tag{2}$$

式(2)中, P_0 是缓冲气体压力, β_0 是压力频移系数, δ_0 是温度系数, T 是原子气室工作温度, T_0 是确定压力系数和温度系数时的温度。基于公式(2)可对原子气室充入缓冲气体的频移量进行设计,若缓冲气体采用混合气体时,缓冲气体的碰撞频移是各种气体单独存在时频移量的代数和^[2-4]。

在被动型 CPT 原子钟中,C 场为原子气室沿光场传播方向提供强度约 100 mG 的磁场,为原子与光作用提供量子化轴,并选出 ¹³³Cs 中对磁场不敏感的基态 $|F=4, m_F=0\rangle$ 和 $|F=3, m_F=0\rangle$ 两能级制备 CPT 态。由于 Zeeman 效应,基态 $|F=4, m_F=0\rangle$ 和 $|F=3, m_F=0\rangle$ 两能级间频移量满足公式(3):

$$\Delta\nu_B = 427.45 \times 10^8 B_0^2, \tag{3}$$

式(3)中, B_0 是磁场强度,在 C 场较弱时,两能级间的频移量只受磁场强度平方项影响^[2-8]。

2 测量系统及频移量测量

被动型 CPT 原子钟频移测量系统是基于被动型 CPT 原子钟而搭建,从而对缓冲气体和 C 场等因素引起的频移量进行测量,并对误差分析。

2.1 测量系统

被动型 CPT 原子钟频移测量系统如图 2 所示,包括激光器波长锁定电路、微波控制模块和物理部分。激光器波长锁定电路实现 VCSEL 激光器的工作波长锁定;微波控制模块由微波信号源和三角波信号源构成,微波信号源输出为频率扫描模式,三角波信号作为微波信号源外部调制信号,控制频率的扫描范围;物理部分包括 $\lambda/4$ 波片、原子气室、加热丝、磁屏蔽和 C 场等,是相干光场与原子相互作用的区域,用于产生 CPT 现象。

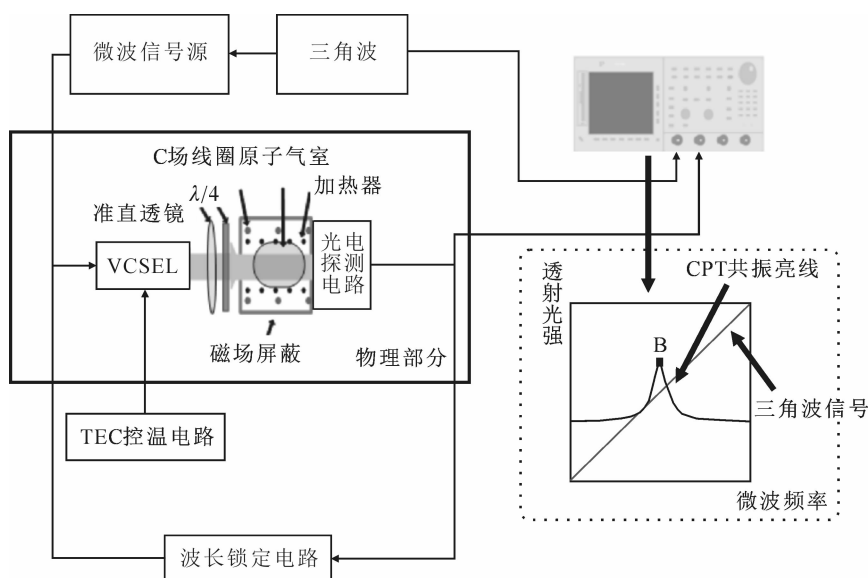


图 2 被动型 CPT 原子钟频移量测量系统

2.2 测量原理及步骤

缓冲气体频移测量方法是:首先将 VCSEL 工作波长调整到 Cs 原子 D_2 线;微波信号源输出信号设置为扫频模式,中心频率为 $4.596\ 315\ 886 + (\Delta\nu_{bg1}/2)$ GHz, $\Delta\nu_{bg1}$ 是缓冲气体引起的碰撞频移设计值;在频移量测量系统中,微波信号用于调制 VCSEL,获得的调制光谱如图 3 所示,其中 0 级边带对应的是 VCSEL 工作波长,两 ± 1 级边带与待测铯原子气室作用,用于产生 CPT 共振信号;通过改变 VCSEL 工作波长,可获得多波长多普勒吸收光谱,获得的吸收光谱如图 4 所示,选择两 ± 1 级边带的吸收谱线用于 VCSEL 工作波长的锁定,波长锁定对应的是 Cs 原子 D_2 线。在 VCSEL 实现波长锁定后,三角波信号源用于微波信号源扫频模式输出的控制,使微波信号在中心频率处实现 ± 20 kHz 频率扫频,用以观测待测原子气室 CPT 信号“共振亮线”,观测得到的 CPT 信号“共振亮线”如图 2 所示,谱线 B 点对应的就是 CPT 信号的共振频率,对比 CPT 信号共振频率与 ν_{Cs} ,即可得到 $\Delta\nu_{bg2}$ 是缓冲气体引起的碰撞频移测量值。

C 场采用有限长螺线管,C 场在为碱金属原子与光作用提供量子化轴,获得高品质 CPT 共振信号的同时,也可通过调整螺线管线圈工作电流来改变 C 场强度,实现对 CPT 原子钟输出频率的校正。测量 C 场引起频移量主要目的是得到 C 场工作电流与 CPT 原子钟输出频率间频移量的关系,从而准确地实现对 CPT 原子钟输出频率的校正。测量过程是:在频移测量系统获得 CPT 信号“共振亮线”后,螺线管加入电流,此时

对应的 CPT 信号“共振亮线”发生平移,通过测量图 2 所示 B 点的平移距离,即可得到频移量,既可得到 C 场工作电流与频移量间的关系。

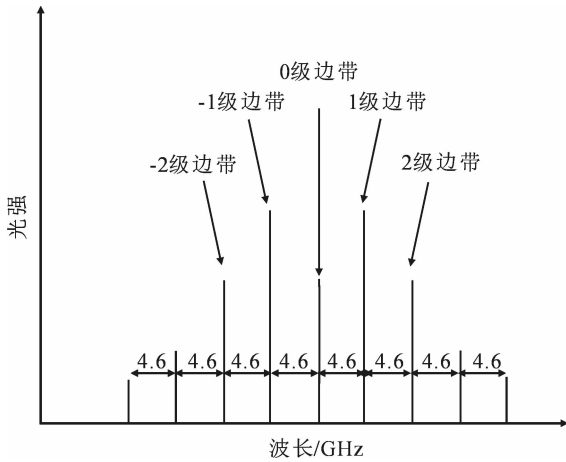


图 3 VCSEL 激光器调制光谱图

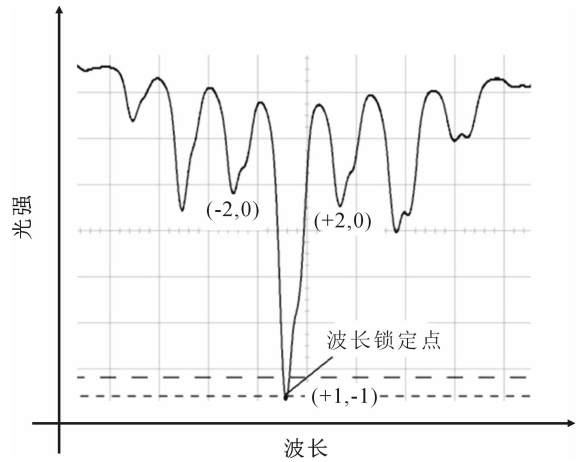


图 4 多波长多普勒吸收光谱

2.3 频移量测量及误差分析

在被动型 CPT 原子钟中,缓冲气体引起的频移量一般在千赫兹,是被动型 CPT 原子钟频移量主要影响因素,同时也是被动型 CPT 原子钟微波信号源重要的设计参数。在被动型 CPT 原子钟中原子气室缓冲气体压强测量中,选用缓冲气体为 $N_2 : Ar = 7 : 3$,气压 100 Torr;缓冲气体为 $N_2 : Ar = 7 : 3$,气压 80 Torr;缓冲气体为 N_2 ,气压 100 Torr;缓冲气体为 N_2 ,气压 80 Torr 的四种类型的原子气室进行测量,表 1 给出待测原子气室缓冲气体频移量的设计值和测量值,并经过数值计算得到了待测气室内缓冲气体的压强值^[2-8]。

表 1 原子气室缓冲气体引起的频移量

缓冲气体压强	频移量设计值/kHz	频移量测量值/kHz
$N_2 : Ar = 7 : 3$,气压 100 Torr	60	53.83(气压 91 Torr)
$N_2 : Ar = 7 : 3$,气压 80 Torr	47.2	48.83(气压 83 Torr)
N_2 ,气压 100 Torr	92.4	84.63(气压 92 Torr)
N_2 ,气压 80 Torr	73.9	66.23(气压 72 Torr)

经过数据对比,待测原子气室缓冲气体频移量的设计值和测量值之间存在误差,造成测量误差的主要因素包括气室缓冲气体混合比例存在误差、气室工作温度、缓冲气体扩散过程中气体压强的梯度等因素。其中缓冲气体混合比例精度取决于系统真空规的测量精度,精度优于 0.3 Torr 时,气体混合比例控制精度为 0.3 Torr,缓冲气体混合比例带来的误差对测量值的影响可忽略;气室工作温度对气体压强测量值带来的误差可通过式(2)进行误差分析。工作原子是 Cs 原子、缓冲气体为 $N_2 : Ar = 7 : 3$,公式(2)中, $\beta_0 = 589.87 \text{ Hz/Torr}$, $\delta_0 = 0.121 \text{ Hz/(Torr} \cdot \text{C)}$,经计算,缓冲气体压强引起的频移量远大于工作温度引起的频移量。缓冲气体为 N_2 , $\beta_0 = 924.7 \text{ Hz/Torr}$, $\delta_0 = 0.623 \text{ Hz/(Torr} \cdot \text{C)}$,缓冲气体压强引起的频移量同样远大于工作温度引起的频移量,气室工作温度带来的误差对测量值的影响同样可忽略;在气室充制过程中,缓冲气体在充制系统中扩散过程中形成的气体压强的梯度分布是最不可控的因素,造成气室内部实际的压强与设计值存在误差,此因素是造成表 1 测量数据出现误差的主要因素,造成的测量误差小于 10 Torr。

在被动型 CPT 原子钟中,C 场强度决定了原子 Zeeman 能级的频移量,而 C 场强度是通过控制 C 场线圈工作电流来实现的,因此准确测量 C 场强度与 C 场线圈工作电流的对应关系是非常有必要的。表 2 给出了 C 场线圈在不同工作电流时,测量得到的 C 场频移量,并经过数值计算得到了不同 C 场线圈工作电流对

应的 C 场强度。

表 2 原子气室缓冲气体引起的频移量

C 场工作电流/mA	频移量测量值/Hz	C 场工作电流/mg
1	40	96.7
2	133	176.4

3 结论

本文基于被动型 CPT 原子钟工作原理,设计并搭建了被动型 CPT 原子钟频移量测量系统,完成了缓冲气体和 C 场频移量的测量,并通过数值计算得到了气室缓冲气体压强和 C 场强度。本文开展的研究工作,可为被动型 CPT 原子钟设计及参数优化提供参考依据。本文提出的缓冲气体频移量测量方法,可用于气室缓冲气体压强的测量,在原子钟气室参数优化及老化实验中,具有重要意义。

参考文献:

- [1] 陈大勇,廉吉庆,翟浩,等. CPT 原子钟 VCSEL 波长锁定环路的设计与实现[J]. 原子能科学技术,2017,51(6):1140-1144.
- [2] VANIER J. Atomic clock based on coherent population trapping: a review[J]. Applied Physics Laser and Optics,2005, B81:421-442.
- [3] 王义遒,王吉庆,董太乾,等. 量子频标原理[M]. 北京:科学出版社,1986.
- [4] VANIER J. The passive optically pumped Rb frequency standard: the laser approach[J]. Applied Physics Laser and Optics, 2007, B87:565-593.
- [5] 王鑫,范琦,杜志静,等. 激光参量对 CPT 铷原子钟稳定度影响的数值分析[J]. 时间频率学报,2008,31(2):86-91.
- [6] VANIER J. Atomic clock based on coherent population trapping: a review[J]. Applied Physics B,2005, B81(4):421-442.
- [7] VANIER J. Coherent population trapping for the realization of a small stable atomic clock[C]//IEEE International Frequency Control Symposium & PDA Exhibition,2002:424-434.
- [8] VANIER J. Coherent population trapping in cesium: dark lines and coherent microwave emission[J]. Physical Review A, 1998,58(3):2345-2358.
- [9] VANIER J, AUDOIN R. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards[M]. England: A. Hilger, 1989.
- [10] VANIER J. Practical realization of a passive coherent population trapping frequency standard[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement,2004,54(6):92-99.
- [11] STEC D A K. Cesium D line data[R]. Oregon: University of Oregon, 2010.
- [12] VANIER J. The passive optically pumped Rb frequency standard: the laser approach[J]. Applied Physics Laser and Optics,2007, B87(4):1346-1351.
- [13] VANIER J. On the use of intensity optical pumping and coherent population trapping techniques in the implementation of atomic frequency standards[J]. Transactions on Instrumentation & Measurement,2001,52(3):822-831.
- [14] ROSENBLUH M, SHAH V, KNAPPE S, et al. Differentially detected coherent population trapping resonances excited by orthogonally polarized laser fields[J]. Optics Express,2006,14(15):6588-6594.
- [15] 杨仁福,高连山. 国外微型 CPT 原子钟的最新进展[D]. 北京:2008 全国频率控制技术年会论文集, 2008:113-120.