

相干布居囚禁原子钟光频移性能优化

张艳 张奕* 尹毅 陈杰华 顾思洪

(中国科学院武汉物理与数学研究所, 原子频标重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘要 光频移是影响相干布居囚禁(CPT)原子钟输出频率质量的重要因素之一,优化 CPT 原子钟光频移特性往往需要很长的调试时间。采用现场可编程门阵列,实现了一种数字正交解调方法,能够方便地优化原子钟与光频移相关工作参数,大大缩短了优化原子钟光频移特性所需时间,减少了调试工作量。该方法应用于原子钟生产可节省产品出厂调试周期和工作量。

关键词 光谱学;原子钟;光频移;数字正交解调;纵腔面发射激光器

中图分类号 O433.5; O562.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0415001

Optimization of Light Frequency Shift Characteristics for Coherent Population Trapping Atomic Clock

Zhang Yan Zhang Yi Yin Yi Chen Jiehua Gu Sihong

(Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Wuhan Institute of Physics and Mathematics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract Light frequency shift is one of the important factors which influence the performance of the standard frequency of a coherent population trapping (CPT) atomic clock. Usually, it takes a long time to optimize the light frequency shift behavior of a CPT atomic clock. With field programmable gate array, a digital quadrature demodulation method which considerably reduces the time and amount of work to optimize light frequency shift behavior of a CPT atomic clock is developed. Applying the method to the production of the CPT atomic clocks, the debug period and workload can be reduced.

Key words spectroscopy; atomic clock; light frequency shift; digital quadrature demodulation; vertical cavity surface emitting laser

OCIS codes 020.1335; 020.3690; 030.1670; 270.1670

1 引言

当两相干光场与原子基态两超精细能级至同一个激发态能级跃迁频率共振时,有些原子会被抽运到两基态能级的相干叠加态上,从而不吸收光子,产生相干布居囚禁(CPT)现象^[1-2]。利用 CPT 现象可以研制被动型 CPT 原子钟,简称 CPT 原子钟^[3-6]。通常 CPT 原子钟通过微波调制纵腔面发射激光器(VCSEL)的驱动电流使其输出多色光,一般所用微波的频率为工作原子基态超精细能级分裂工作频率的 1/2,因而多色光的 ± 1 阶边带用来与原子实现 CPT 共振^[7-10]。

CPT 原子钟采用光与原子作用产生的 CPT 信号作为微波鉴频信号,因此不需要微波腔,也不存在微波频移。CPT 原子钟的主要频移为光频移、磁场频移和缓冲气体造成的压力频移,其中光频移是影响其长期稳定度的重要原因。除用于制备 CPT 态原子的 ± 1 阶边带光外,多色光中还存在其他边带,各边带光成分都会引起原子的能级移动。研究光频移特性,有助于抑制光频移的负面影响,提高原子钟的性能。对于原子钟的光频移特性通常需要经过几轮万秒以上长期频率稳定度测量来判断和改善,该方法调试周期长、工作量大。本文提出并研究了采

收稿日期: 2013-09-24; 收到修改稿日期: 2013-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(11304362,11204351)

作者简介: 张艳(1987—),女,硕士研究生,主要从事 CPT 原子钟方面的研究。E-mail: yanzhangandjuno@163.com

导师简介: 顾思洪(1955—),男,博士,研究员,主要从事原子钟方面的研究。E-mail: shgu@wipm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: zhangyi@wipm.ac.cn

用现场可编程门阵列实现的一种数字正交解调方法,利用正交解调结果监测 CPT 原子钟光频移,能大大缩短优化光频移特性所需的时间,减少调试工作量。利用数字正交解调表征 CPT 谱线光频移变化,通过研究 CPT 原子钟中光频移特性与 VCSEL 工作温度和激光失谐等参数的关系,进而改善原子钟的性能。

2 实 验

在 CPT 原子钟里的光频移主要由各边带的交流(AC)斯塔克效应引起,对于如图 1 所示的作用对象,各边带光功率满足贝塞尔函数关系,总光频移可表示为^[11]

$$\frac{\Delta\omega_{1,S}}{\omega_{\mu\mu'}} = \frac{\omega_{RL}^2}{\omega_{\mu\mu'}^2} [A(m) + B(m)C(\Delta_0)], \quad (1)$$

式中 $\Delta\omega_{1,S}$ 表示频移量, $\omega_{\mu\mu'}$ 表示没有光频移时基态超精细能级跃迁频率,对⁸⁷Rb 原子约为 6.8 GHz, ω_{RL} 表示激光无调制时的拉比频率,与总光强相对应, m 表示微波调制指数, Δ_0 表示激光频率失谐, $A(m)$ 和 $B(m)$ 为与调制指数 m 有关的系数, $C(\Delta_0)$ 为关于 Δ_0 的函数。

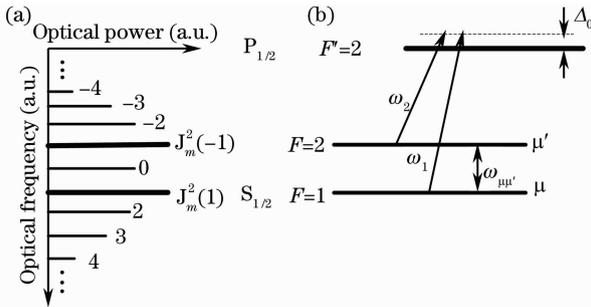


图 1 (a) 多色激光的频谱分布;
(b) 三能级 ‘A’ 型 CPT 共振构型

Fig.1 (a) Spectral distribution of the multi chromatic laser; (b) three level ‘A’ configuration CPT resonance model

可见激光频率失谐量变化,总光强变化,以及各个边带光功率相对变化都会导致光频移的变化。对于处于闭环锁定正常工作的 CPT 原子钟,当 VCSEL 温度发生缓慢漂移,负反馈系统会通过注入 VCSEL 的电流变化来补偿由温度引起的激光频率变化,然而这将造成激光光强和调制指数的变化,因而引起光频移变化;另外原子钟经过长期使用激光光强会随着 VCSEL 的老化逐渐减小,这也会引起光频移变化。寻找出 VCSEL 输出激光的频率、功率以及调制指数的合适工作点,就可以减小光频移

变化率,提高原子钟性能。

采用现场可编程门阵列(FPGA)作为控制器实现了 CPT 原子钟的激光频率稳频环路和微波频率锁定环路从而进一步实现了闭环锁定原子钟,其具体方法与本课题组之前研制的 CPT 原子钟相同^[6]。微波源将压控晶振输出的 10 MHz 信号综频得到 3.4 GHz 微波,该微波通过 Bias-T 与直流混合后注入 VCSEL。VCSEL 输出多边带线偏振激光,经 1/4 波片转变成圆偏振光,进入原子吸收泡与原子发生如图 1 所示的作用,产生原子吸收谱线和 CPT 谱线。透射光经光电探测器转变成光电流信号,再经信号处理电路转变成数字信号。为了将原子吸收谱线和 CPT 谱线转变成激光频率和微波频率的鉴频信号,VCSEL 驱动电流的直流分量中施加了 300 nA、10 kHz 的正弦调制,驱动电流的微波中施加了 152 Hz、深度 80 Hz 的二进制移频键控(2FSK)调制,伺服电路通过同步解调的方式从光电信号中提取并获得关于激光频率的负反馈信号,以电流形式叠加在 VCSEL 的注入电流中实施激光频率纠偏;提取并处理获得关于微波频率的负反馈信号,以电压形式叠加在晶振控制电压中实施微波频率纠偏。在此基础上,采用基于坐标旋转数字计算方法(CORDIC)^[12]对微波频率伺服数字正交解调,也就是在原有 CPT 原子钟伺服方案上利用 FPGA 对光电流放大信号中与微波调制同频的信号进行正交解调,解调结果用来表征光频移,与同步解调结果需要将数字量转化为模拟量用来控制不同,正交解调所获为数字量,通过数据端口直接输出。实验装置图如图 2 所示,压控晶振(VCXO)输出的频率信号与氢微波激射器(H-MASER)输出的 10 MHz 频率经频率比对仪比对得到相对频差,数据采集系统记录频率比对结果以及正交解调结果。实验中 VCSEL 的温控和样品泡的温控、激光频率伺服和微波频率伺服由 FPGA 及相关控制电路完成,样品泡温控图中未标出。

鉴于温度与激光光强和微波调制指数关系,通过主动调节 VCSEL 温度来改变微波调制指数和总光强,并相应调节注入 VCSEL 的电流来改变激光失谐而开展光频移研究。实验中所用原子钟的频率稳定度千秒内在小系数 $10^{-11} \tau^{-1/2}$ 水平, τ 为采样时间,万秒在大系数 10^{-12} 水平,缓冲气体频移和磁场起伏导致频移均在 10^{-12} 量级,而光频移的变化量一般在 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 量级,比其他频移至少高一个量级,因此改善光频移特性将明显提升原子钟的性

能^[4]。因为与光频移直接相关的 VCSEL 温度和激光失谐在所用原子钟电路中由各自模块分别独立控

制,因此特别适合开展研究和实施优化。

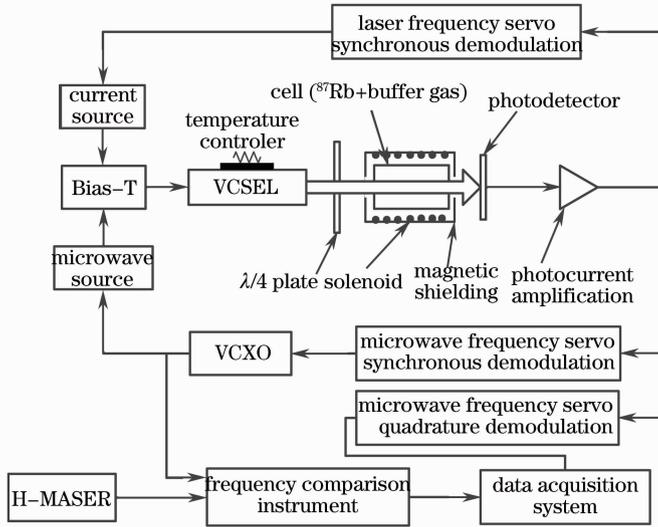


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

原理上,微波频率伺服同步解调结果为 0 时,相应的伺服正交解调结果也应为 0,而存在光频移时,原子样品泡中不同位置的原子对微波频率伺服中调制信号的幅度和相位响应不同,造成正交解调结果发生一定的偏移,这种偏移是随光频移变化而变化的,因此微波频率伺服正交解调结果的变化可以用来表征 CPT 原子钟光频移的变化^[13]。这里采用数字正交解调方法开展光频移特性的研究和优化工作。

3 实验结果

3.1 温度对光频移的影响

通过温控电路改变 VCSEL 的温度,监测正交解调值,得到解调结果与 VCSEL 温度的关系。实验中,VCSEL 温度从 29 °C 变化到 36.3 °C,间隔为 0.1 °C,每个温度维持 180 s,正交解调积分时间设置为 50 ms,根据比对结果得到微波频率偏移 Δf_{temp} 与 VCSEL 温度 T_{VCSEL} 的关系如图 3 所示。 $\Delta f_{\text{temp}} = \nu_{\text{CPT}} - 3.417343852 \text{ GHz}$, ν_{CPT} 为 CPT 共振频率。VCSEL 输出激光的频率由它的工作温度和驱动电流共同确定,为了将激光保持在与原子作用所要求的频率上,当将 VCSEL 控在不同工作温度,实验稳频系统通过相应调整驱动电流保持激光频率不变,因此 VCSEL 的输出光强随温度升高而减弱。需要指出的是,调制激光的微波功率一般不能按最佳比例作相应的调整,因此光频分布会有所变化。随温度变化出现的光强和频谱的改变共同影响光频移特性。由图 3 可见在 31 °C ~ 33 °C 区间,微波频率随

温度的变化率最小,表明光强与调制微波的功率配合得最好。因此将 VCSEL 温度设置在 32 °C 能够实现 VCSEL 温度变化对 CPT 原子钟光频移的影响最小化,提高 CPT 原子钟的长期稳定度。

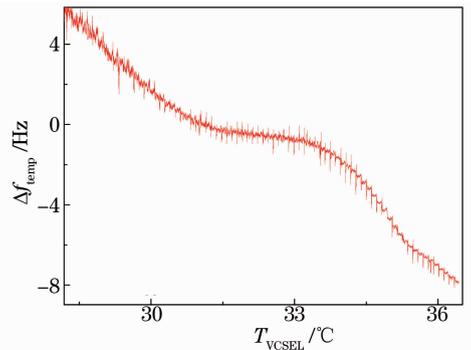


图 3 频率偏移与 T_{VCSEL} 关系

Fig. 3 Frequency deviation versus T_{VCSEL}

3.2 激光频率失谐对光频移影响

在激光频率锁定点附近,激光频率失谐为 0 时激光频率伺服负反馈量为 0,且负反馈量与激光频率失谐成正比。通过扫描负反馈量从 -190 MHz 变化到 190 MHz,每 120 s 步进 19 MHz 来扫描激光频率失谐,研究激光频率失谐 $\Delta f_{\text{detuning}}$ 对光频移的影响。图 4 是在正交解调积分时间设置为 200 ms 的条件下获得的微波频率偏移与激光失谐的关系曲线。从图 4 可以看出在激光频率失谐小于 80 MHz 时,微波频率起伏较小,随激光频率失谐量的变化也较小,而当失谐量超过 80 MHz 时,微波频率起伏明显增大,随激光频率失谐量的变化也较大,这应该与 VCSEL

的调制特性有关。理论上,激光频率近失谐时,±1阶边带光引起的光频移近似与 $\Delta_0(\omega_{1R}^2 - \omega_{2R}^2)$ 成正比,其中 ω_{1R}, ω_{2R} 为±1阶边带光对应的拉比频率。实验中 VCSEL 的±1阶边带光强往往不同, ω_{1R}, ω_{2R} 也不同,因此它们引起的光频移与激光频率失谐几乎呈线性关系。非±1阶边带光的总光频移则与光失谐近似呈二次函数关系,总光频移是所有边带的光频移之和^[4]。图4所示特性应主要与激光频率失谐相对应,研究结果说明保持激光频率失谐量不超过80 MHz时原子钟输出频率稳定度较高。

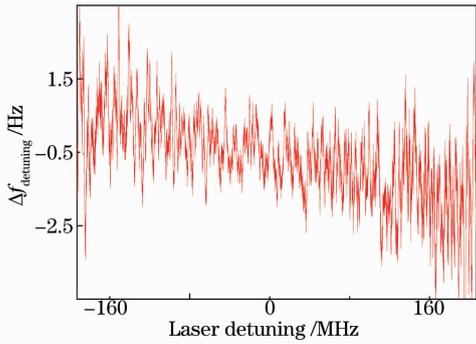


图4 频率偏移与激光失谐关系

Fig. 4 Frequency deviation versus laser detuning

根据上述结果,VCSEL 温度在 31 °C~33 °C 之间,激光频率失谐在 80 MHz 之内原子钟会有较好表现。图5是采用3组参数所获得的频率稳定度测量曲线,测量结果支持了前面的研究结论。图5中对应 VCSEL 温度 30.5 °C,激光频率失谐为 0 附近的频率稳定度在 500 s 之内较好,源于实验中所采用的调制深度在 30.5 °C 附近时±1阶边带光强较强。

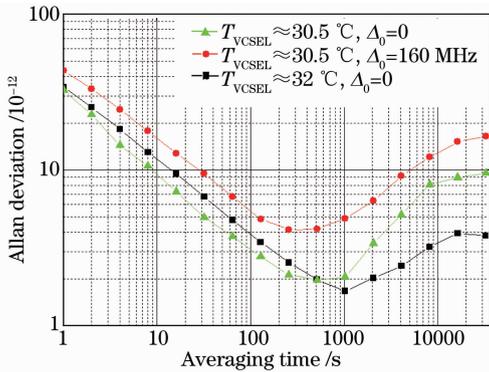


图5 频率稳定度测试结果

Fig. 5 Measured results of frequency stability

4 结 论

影响 CPT 原子钟光频移的参数主要有激光光强、微波调制指数、激光频率失谐等。采用坐标旋转数字计算方法,利用 FPGA 硬件实现了一种表征光

频移的相干数字正交解调方法,并通过一款 CPT 原子钟开展了光频移实验研究,实验得到了 VCSEL 温度、激光频率失谐与正交解调结果的关系,从而得到较优参数。对优化前后的 CPT 原子钟进行了频率稳定度对比测试,优化后频率稳定度得到一定的改善。采用之前的方法优化光频移需要几十小时,而采用现在的办法仅需 2 h,因此该方法应用于原子钟生产可大大节省产品出厂调试周期和工作量。

参 考 文 献

- 1 H R Gray, R M Whitley, C R Stroud. Coherent trapping of atomic population[J]. Opt Lett, 1978, 3(6): 218-220.
- 2 E Arimondo. Coherent population trapping in laser spectroscopy [J]. Progress in Optics, 1996, 35: 259-288.
- 3 Du Runchang, Liu Guobin, Chen Jiehua, *et al.*. Realization and investigation of relative experimental parameter of coherent population trapping frequency standard [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2008, 28(8): 1697-1700.
杜润昌, 刘国宾, 陈杰华, 等. 相干布居数囚禁原子频标的实现及相关实验参数研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, 28(8): 1697-1700.
- 4 J Vanier. Coherent population trapping for the realization of a small, stable, atomic clock[C]. IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, 2002, 424-434.
- 5 D Natale, J F Borwick, R L Tsai, *et al.*. Compact, low-power chip-scale atomic clock[C]. Position, Location and Navigation Symposium, 2008. 67-70.
- 6 Zhang Yi, Gu Shihong, Ye Chaohui. The algorithm and implementation of digital quadrature demodulation in CPT atomic clock system[J]. Acta Metrologica Sinica, 2010, 31(2): 145-149.
张奕, 顾思洪, 叶朝辉. CPT 原子钟系统的数字正交解调算法及实现[J]. 计量学报, 2010, 31(2): 145-149.
- 7 Chen Jiehua, Du Runchang, Zhao Jiecheng, *et al.*. The characteristics of vertical cavity surface emitting laser by laser spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(10): 2515-2519.
陈杰华, 杜润昌, 赵劫成, 等. 激光光谱研究垂直腔面发射激光器的特性[J]. 中国激光, 2010, 37(10): 2515-2519.
- 8 Yu Zhenzhen, Hou Xia, Zhou Qunli, *et al.*. VCSEL pumped compact wide-temperature Nd:YAG laser and grazing-incidence amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602003.
于真真, 侯霞, 周群立, 等. 垂直腔面发射激光器抽运小型宽温 Nd:YAG 激光器及掠入射式放大器的研究[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602003.
- 9 Zhang Peng, Dai Teli, Liang Yiping, *et al.*. Optimization of pump pulses in a vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402001.
张鹏, 戴特力, 梁一平, 等. 垂直外腔面发射激光器抽运脉冲的优化设计[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402001.
- 10 Wang Wei, Ning Yongqiang, Zhang Jinlong, *et al.*. Polarization properties of high-power vertical-cavity bottom-emitting lasers [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302002.
王伟, 宁永强, 张金龙, 等. 高功率垂直腔底发射激光器的偏振特性[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302002.
- 11 F Levi, A Godone, J Vanier. The light shift effect in the coherent population trapping cesium maser [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control, 2000, 47(2): 466-470.
- 12 Y Hu. CORDIC-based VLSI architectures for digital signal processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(3): 16-35.
- 13 B H McGuyer, Y Y Jau, W Happer. Simple method of light-shift suppression in optical pumping system [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(25): 251110.