

采用射频调制实现对单频激光器频率噪声的抑制

项静峰^{1,2}, 王利国¹, 任伟¹, 李唐¹, 吕德胜¹, 刘亮¹

¹中国科学院上海光学精密机械研究所量子光学重点实验室, 上海 201800;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 在使用铷原子饱和吸收谱线作为激光频率参考进行稳频的激光稳频系统中, 环路带宽是影响激光输出频率噪声的重要因素之一。对激光稳频系统中限制环路带宽的主要因素进行分析, 使用射频调制信号直接调制商用外腔半导体激光器的高速电流调制端来对激光稳频系统的环路带宽进行拓展。根据对稳频环路分析, 合理设置反馈电路, 实现激光稳频。使用低频谱分析仪对稳频后的鉴频信号进行分析, 发现带宽拓展后, 在傅里叶频率为 5 kHz 处对频率噪声的抑制度达到了 20 dB 以上。通过将该稳频激光器输出的激光与锁定在极稳恒温晶振上的飞秒光学频率梳进行拍频, 测量了该稳频激光相对光梳的频率噪声, 测量结果与直接分析鉴频信号的结果吻合。经过测量, 通过拓展带宽抑制频率噪声, 稳频激光器的短期频率稳定度得到改善。最后, 测量了稳频激光相对于锁定在恒温晶振上的飞秒光学频率梳的频率稳定度, Allan 方差在平均时间 1 s 时达到 4.52×10^{-12} , 在平均时间 20 s 时达到 1.65×10^{-12} 。

关键词 激光器; 激光稳频; 饱和吸收光谱; 射频调制; 频率噪声

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0501009

Frequency Noise Suppression of Single-Frequency Laser with Radio-Frequency Modulation

Xiang Jingfeng^{1,2}, Wang Liguo¹, Ren Wei¹, Li Tang¹, Lü Desheng¹, Liu Liang¹

¹Key Laboratory of Quantum Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract For the laser frequency stabilization system which uses rubidium saturated absorption spectroscopy as the laser frequency reference, the loop bandwidth is one of the important facts which influence the laser output frequency noise. The main factors which limit the loop bandwidth of the laser frequency stabilization system are analyzed. Then, the radio frequency modulation signal is used to directly modulate the high speed current modulation port of the commercial external cavity diode laser, and the loop bandwidth of the laser frequency stabilization system is expanded. According to the analysis of the frequency stabilization loop, the feedback circuit is set up to realize the laser frequency stabilization. After analyzing the error signal of stabilized laser by low frequency spectrum analyzer, it is found that the frequency noise suppression can be improved to be larger than 20 dB at the Fourier frequency of 5 kHz. The beat frequency is conduct between laser from stabilized frequency laser and femtosecond optical frequency comb locked on ultra-stable oven controlled crystal oscillator, and the frequency noise of stabilized laser is also measured. The results are consistent with the analyzing results of the error signal. The frequency noise is suppressed when we expand the bandwidth, and the short-term frequency stability of the stabilized laser is improved. Finally, the frequency stability of stabilized frequency laser relative to OCXO referenced femtosecond optical frequency comb is measured. It can reach to 4.52×10^{-12} at averaging time of 1 s and

收稿日期: 2016-12-26; 收到修改稿日期: 2017-02-21

基金项目: 中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)

作者简介: 项静峰(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事冷原子物理和原子频标方面的研究。E-mail: xiangjf@siom.ac.cn

导师简介: 刘亮(1963—), 男, 博士, 研究员, 主要从事冷原子物理和原子频标方面的研究。

E-mail: liang.liu@siom.ac.cn

reach to 1.65×10^{-12} at averaging time of 20 s.

Key words lasers; laser frequency stabilization; saturated absorption spectroscopy; radio-frequency modulation; frequency noise

OCIS codes 140.3425; 300.1030; 140.3518

1 引 言

可调谐半导体激光器是一种可靠的窄线宽光源,其线宽小于 1 MHz,同时,其相对于染料激光器和钛宝石激光器更为廉价,因此被广泛应用于原子物理领域^[1]。其中,光栅反馈外腔半导体激光器可以通过简单的方式实现大范围可调谐及窄线宽输出,被广泛应用于原子物理领域。然而,光栅反馈外腔半导体激光器的输出频率极易受外部环境的影响,如温度、气压、振动以及激光器驱动电流的噪声等都会影响其输出频率^[2]。由于在诸如冷原子物理^[3]、冷原子频标^[4-7]、冷原子干涉仪^[8-9]等应用中都需要稳定的频率,因此需要对激光输出频率进行主动反馈控制,以实现频率的稳定。

在众多稳定频率的方法中,最为常用的方法是将法布里-珀罗(F-P)腔或原子分子能级作为频率参考,通过调制解调技术获得激光频率与参考频率频差的鉴频信号。除此之外,也可利用偏振光谱^[10]、原子双向色性稳频技术(DAVLL)^[11]等无调制的方法获得鉴频信号。张靖等^[12]以消本底的饱和吸收信号作为参考,使用 56 kHz 的调制信号获得误差信号,稳频后的激光器在 10 s 内的频率漂移小于 1 MHz。赵建明等^[13]采用射频频率调制实现半导体激光器的稳频,伺服信号反馈控制激光器压电陶瓷(PZT)端口,10 s 内的典型频率起伏小于 1 MHz。江晓等^[14]采用调制频率为 21.1 MHz 的调制信号,检测出激光频率快速变化的部分,反馈控制激光器的 PZT 端口,提高了系统的锁频性能。王婧等^[15]采用偏振光谱的方法获得鉴频信号,同时对电流调制端和 PZT 调制端进行反馈控制,拓展了激光稳频系统环路的带宽,改善了频率稳定度。胡永奇等^[16]利用全光纤环形谐振器对单频激光进行噪声抑制,实现了饱和吸收光谱与光纤环形谐振腔双回路锁定,在 1 Hz 处对频率噪声的抑制度达到了 60 dB,在 100 Hz 处超过了 40 dB。

在通过调制解调技术获得鉴频信号的激光稳频系统中,使用较低频率的调制信号时,稳频环路的带宽很大程度上受限于调制解调部分的低通滤波,稳频环路对于较高频率的频率噪声抑制能力有限。若只反馈激光的 PZT 调制端实现稳频,则激光稳频系统的环路带宽将受限于 PZT 的频率响应能力。所使用的激光器在 5 kHz 附近存在明显的噪声,为了获得对 5 kHz 附近噪声的有效抑制能力,在采用射频调制频率提高调制解调部分带宽的同时,需要同时反馈激光器的电流调制端口。利用商用外腔式半导体激光器(ECDL, TLB6813)的高速电流调制端,使用 20 MHz 的调制信号直接调制注入电流,使用高速光电管接收被调制后的饱和吸收信号,与移相后的调制信号混频后经 1.9 MHz 低通滤波获得鉴频信号,相比采用低频的调制信号可以大幅拓展激光稳频系统带宽,同时合理设置模拟 PI 电路反馈激光器电流调制端,可以实现对激光高频频率噪声及扰动的抑制,在傅里叶频率 5 kHz 左右获得了大于 20 dB 的频率噪声抑制能力。同时,由于拓展了稳频环路的带宽,稳频环路带宽内频率噪声被进一步抑制,激光器的短期稳定度也得到改善。

2 实验装置与基本原理

实验中以 780 nm 商用外腔半导体激光器(型号 TLB6813, New Focus, 美国)作为光源,以铷 87 原子 D2 线的饱和吸收信号作为频率参考,使用频率调制技术获得鉴频信号。激光稳频系统示意图如图 1 所示,激光稳频系统所需的扫描信号由数字信号处理器(DSP)芯片控制数模转换器(DAC)产生,调制信号分为两路:一路直接输入到 TLB6813 的高速调制端口;另一路经过移相后与被调制的饱和吸收信号进行混频,经过低通滤波后得到鉴频信号。其中,鉴频信号又被分为两路:一路经过比例积分(PI)电路输入到 TLB6813 的电流调制端;另一路经模数转换器(ADC)以离散数字量的形式被 DSP 芯片接收,经过数字信号处理得到相应的反馈量,该反馈量与扫描控制量相加,再经 DAC 输出到 TLB6813 的频率调制端(PZT 端)。

图 1 所示的激光稳频系统可以简化为图 2 所示的环路模型。激光器及其驱动,是一个从反馈电压到激光二极管电流,再到激光输出频率的转化过程,可以等效为一个被反馈电压控制的光学振荡器, $K_{V \rightarrow \nu}$ 为电压到频率的转化系数。ECDL 驱动的电调端口及频率调制端口有各自的带宽限制 K_{BW} 。频率参考部分

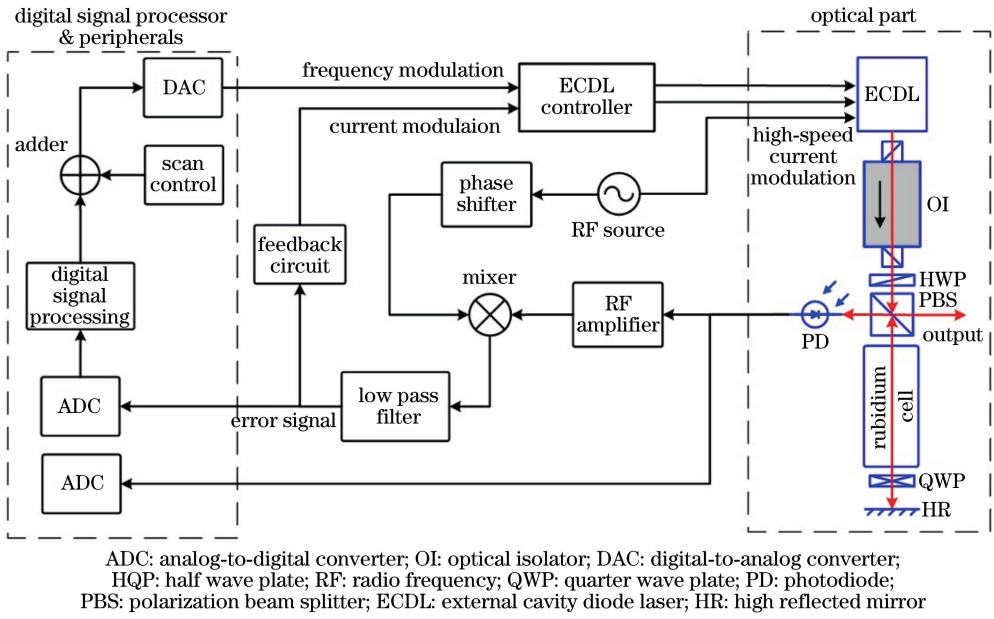


图 1 激光稳频系统示意图

Fig. 1 Schematic of laser frequency stabilization system

(以铷 87 原子 D2 线的饱和吸收信号作为参考)经光电探测器将光信号转化为电信号, K_{PD} 为光信号到电信号的转化系数。该电信号经过调制解调后,在参考频率附近将 ECDL 的输出频率与参考频率的差转化为鉴频信号, K_{v-v} 为频率到电压的转化系数。该过程可等效为由相对参考频率的频差到电压的转化过程,可认为所得到的电压信号在一定范围内与 ECDL 频率相对于参考频率的频差近似呈线性关系。由于采用调制解调技术,环路中会存在一个低通滤波的带宽限制 K_{LP} 。鉴频信号经过反馈电路 K_{PI} 再反馈到激光器上,构成一个完整的环路。

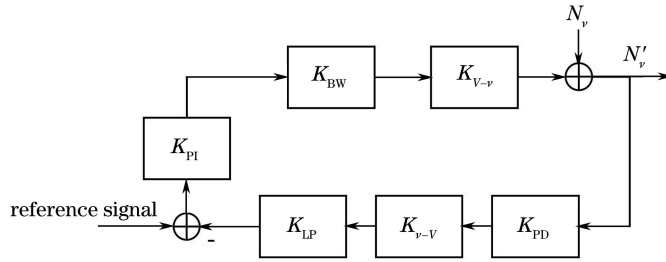


图 2 激光稳频系统环路模型

Fig. 2 Loop model of laser frequency stabilization system

图 2 中,假设频率噪声 N_v 叠加在激光器输出的激光上, N'_v 为出射的激光的频率噪声。则开环状态下有

$$N'_v = N_v \quad (1)$$

根据反馈控制原理,环路闭合后,环路对激光频率噪声的抑制可以表示为

$$\frac{N'_v}{N_v} = \frac{1}{1 + G \cdot H} \quad (2)$$

式中

$$G = K_{BW} \cdot K_{v-v} \cdot K_{PD} \cdot K_{v-v} \cdot K_{LP} \quad (3)$$

$$H = K_{PI} \quad (4)$$

从(2)式可以看出,环路对激光频率的噪声抑制能力主要由 $G \cdot H$ 决定,环路稳定的条件可以简单地理解为 $G \cdot H$ 的幅值为1时其相位不为 180° 。为满足上述条件, G 与 $1/H$ 的幅频曲线需要相交于相位稳定且远离 180° 的区域。

实验中,使用的射频调制信号为 20 MHz,使用的高速 PD(型号 PD10A-EC, Thorlabs, 美国)的带宽约为 150 MHz,选用的低通滤波器转折频率约为 1.9 MHz, ECDL(型号 TLB6813)的电流调制端带宽约为 1 MHz, PZT 带宽约为 2 kHz。因此,在只反馈 PZT 的激光稳频系统中,受限于 PZT 的带宽,系统对 100 Hz 以上的频率噪声的抑制能力有限。在上述激光稳频系统中,对 PZT 和电流同时进行反馈,由于电流调制端的带宽高达约 1 MHz,环路的整体带宽可以得到有效提高。此时, G 的频率特性主要受限于 ECDL 电流调制带宽和低通滤波频率特性,可以通过整体增大 H (模拟 PI 电路)的增益来增大对频率噪声的抑制能力,同时保证环路稳定。

3 实验结果与分析

实验中将稳频后的激光器与飞秒光学频率梳(型号 FC1500-250-WG, Menlo Systems, 德国)进行拍频,测量激光频率噪声与频率稳定度,拍频光路及激光器频率噪声的测量如图 3 所示。ECDL 稳频后的激光和飞秒光学频率梳的激光通过非偏振分束立方体(BS)进行合束,合束后的光束耦合进入单模保偏光纤(PMF),该光纤出射的激光被高速 PD(型号 PD10A-EC, Thorlabs, 美国)接收。

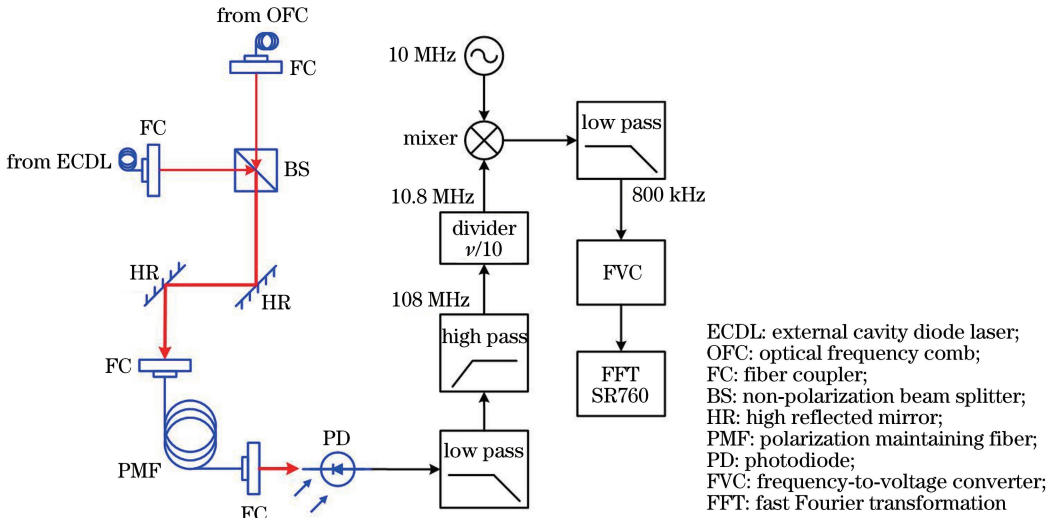


图 3 拍频及激光器频率噪声测量示意图

Fig. 3 Schematic of beat frequency and laser frequency noise measurement

实验中,将 ECDL 锁定在铷原子 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=1\rangle$ 与 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 交叉峰上,飞秒光学频率梳锁定在极稳恒温(OCXO)晶振上,稳频后激光器输出频率与飞秒光学频率梳最相邻梳齿的频差约为 108 MHz。通过选用适当的低通与高通滤波器得到 108 MHz 的拍频信号,对得到的拍频信号进行十分频,相应的拍频信号的频率噪声也缩小 10 倍。由于激光器的频率噪声远大于一般射频信号的噪声,使用信号发生器(型号 AFG3252C, Tektronix, 美国)产生 10 MHz 信号与拍频信号进行混频,经过低通滤波,得到频率约为 800 kHz 的信号,采用亚德诺半导体公司 AD650 芯片的频率到电压转换(FVC)电路将频率信号转换为电压信号,最后使用低频谱分析仪(型号 SR760, 美国)对该电压信号进行分析。根据十分频及频率到电压转换的系数对所得的结果进行修正,最后得到拍频信号的频率噪声。测量获得的结果如图 4 所示。黑线表示激光器自由运转时与光梳拍频信号频率噪声,蓝线表示仅反馈激光器 PZT 控制端时与光梳拍频信号测得的频率噪声,红线表示数字 PI 与模拟 PI 电路同时打开时与光梳拍频信号测得的频率噪声 3 条曲线。比较黑线与蓝线可见,在只反馈激光器 PZT 控制端时,由于 PZT 频率响应能力的限制,在 100 Hz 以后,稳频环路对频率噪声基本没有控制能力。比较蓝线与红线可见,在模拟 PI 电路反馈激光器的电流控制端后,环路在傅里叶频率为 5 kHz 处具有约 25 dB 的噪声抑制能力。由于所测结果是 ECDL 与飞秒光学频率梳拍频信号的频率噪声,不可避免地可以看到飞秒光学频率梳的频率噪声,从 100 Hz 到 1000 Hz 的噪声水平基本不受 ECDL 激光稳频系统的影响,应为飞秒光学频率梳贡献的频率噪声。此外,由于飞秒光学频率梳通过 PZT 锁定在 OCXO 晶振上,同样会受限于 PZT 的响应带宽,但约 100 Hz 以上的噪声特性不会跟随 OCXO 晶振。

此外,与飞秒光学频率梳拍频的拍频信号不仅包含 TLB6813 的频率噪声,还包含了飞秒光学频率梳的频率噪声,因此又使用低频谱分析仪(型号 SR760,美国)对稳频后的鉴频信号直接进行分析,根据激光稳频系统鉴频部分的频率到电压的转换特性得到了稳频后激光器的频率噪声如图 5 所示。蓝线表示仅使用数字 PI 时的频率噪声,红线表示数字 PI 与模拟 PI 电路同时打开时的频率噪声。由红线与黑线可以看出,模拟 PI 电路反馈激光器电流调制端时,激光稳频系统在傅里叶频率为 5 kHz 处具有约 25 dB 的噪声抑制能力,与飞秒光学频率梳拍频信号的测量结果相对应。同时,在高速模拟 PI 反馈电流调制端后,激光稳频系统的环路带宽大于 20 kHz,符合预期。

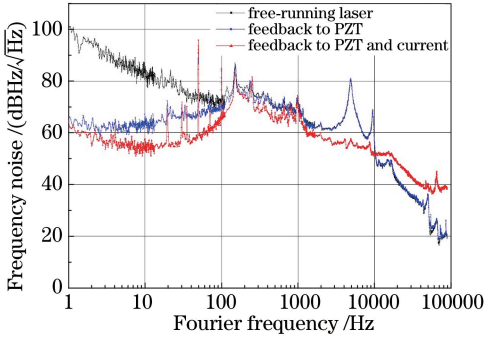


图 4 激光频率噪声测量结果

Fig. 4 Measurement results of laser frequency noise

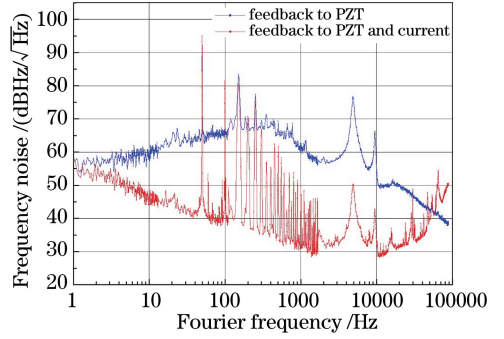


图 5 稳频后的激光频率噪声

Fig. 5 Laser frequency noise after frequency stabilization

为了测量稳频后激光器的频率稳定性,对图 3 中经过滤波后的拍频信号适当放大,使用频率计数器(型号 53220A, Agilent, 美国)测量该信号的频率稳定性。由于飞秒光学频率梳锁定在 OCXO 晶振上,OCXO 晶振的短期稳定度在 10^{-13} 水平,故该飞秒光学频率梳稳定度在短期优于一般以饱和和吸收作为频率参考的稳频激光^[17]。对加入模拟 PI 电路反馈激光器电流抑制频率噪声和只反馈 PZT 两种激光稳频系统的频率稳定度分别进行测量,测量结果如图 6 所示。蓝线为只反馈激光器 PZT 控制端的结果,红线为反馈激光器 PZT 控制端的同时加入模拟 PI 电路反馈激光器电流调制端的结果。由图 6 可以看出,由于环路的拓宽及高频率噪声的抑制,激光频率的短期频率稳定度得到了明显改善。稳频激光相对于锁定在 OCXO 晶振飞秒光学频率梳的长期频率稳定度如图 7 所示。阿伦方差在平均时间 1 s 时达到 4.52×10^{-12} ,在平均时间 20 s 时达到了 1.65×10^{-12} ,平均时间 40 s 后开始上翘。经过分析,造成阿伦方差上翘的主要原因是实验室环境温度存在周期约为 1000 s 的起伏,温度对稳频后的激光频率的影响在接近温度起伏周期处变小,即在 1000 s 附近阿伦方差变小。

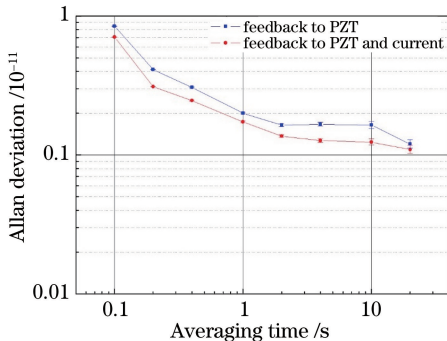


图 6 稳频激光相对于锁定在 OCXO 晶振的飞秒光学频率梳的短期频率稳定度

Fig. 6 Short-term frequency stability of frequency stabilized laser relative to OCXO-referenced femtosecond optical frequency comb

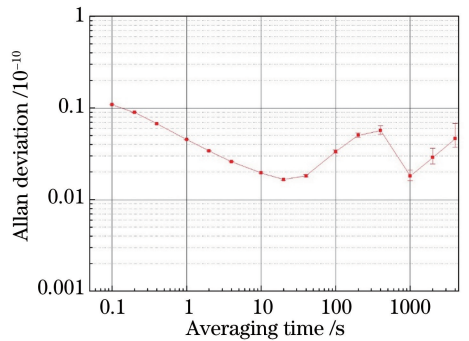


图 7 稳频激光相对于锁定在 OCXO 晶振飞秒光学频率梳的长期频率稳定度

Fig. 7 Long-term frequency stability of frequency stabilized laser relative to OCXO-referenced femtosecond optical frequency comb

4 结 论

构建了一套以铷原子饱和吸收信号作为参考频率的激光稳频系统,针对所使用的激光器在 5 kHz 附近存在明显的噪声问题,根据激光稳频系统的环路模型分析限制环路带宽的主要因素,使用 20 MHz 的射频信号直接调制 ECDL 的高速电流调制端,提高了调制解调部分带宽;合理设置模拟 PI 电路反馈激光器电流调制端,相比采用低频的调制信号,可以大幅拓展激光稳频系统带宽。直接对稳频后的鉴频信号进行分析所得的结果以及激光器与飞秒光学频率梳拍频测量激光器频率噪声所得的结果都表明,激光稳频系统在傅里叶频率约 5 kHz 处具有大于 20 dB 的频率噪声的抑制能力。同时,激光器与锁定在 OCXO 晶振的飞秒光学频率梳拍频测量激光器频率稳定度的结果表明,由于拓宽了稳频环路的带宽,稳频环路带宽内频率噪声被进一步抑制,激光器的短期稳定度也得到改善。最后,对频率噪声被抑制的稳频激光和锁定在 OCXO 晶振的飞秒光学频率梳的拍频信号进行了测量,结果表明稳频激光相对于锁定在 OCXO 晶振的飞秒光学频率梳频率稳定度更高,阿伦方差在平均时间 1 s 时达到 4.52×10^{-12} ,在平均时间 20 s 时达到了 1.65×10^{-12} 。进一步提高稳频激光的长期稳定性,可以从以下几方面进行改进:1)改善实验环境温度的周期性起伏;2)改善频率参考部分与环境温度起伏的隔离措施;3)通过电光调制器实现对激光频率的高速调制,避免直接调制激光器电流时引入对激光器光功率的调制,消除该调制可能对稳频激光频率稳定性产生的影响。

参 考 文 献

- [1] MacAdam K B, Steinbach A, Wieman C. A narrow-band tunable diode laser system with grating feedback, and a saturated absorption spectrometer for Cs and Rb[J]. American Journal of Physics, 1992, 60(12): 1098-1111.
- [2] Talvitie H, Pietiläinen A, Ludvigsen H, *et al.* Passive frequency and intensity stabilization of extended-cavity diode lasers[J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(1): 1147810.
- [3] Xu Z, Zhou S Y, Zhou S Y, *et al.* Production and measurement of Bose-Einstein condensate of ^{87}Rb atomic gas[J]. Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy, 2008, 51(1): 22-28.
- [4] Zhou Z C, Wei R, Shi C Y, *et al.* Progress of the Rb fountain clock[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(12): 123201.
- [5] Liu P, Meng Y L, Wan J Y, *et al.* Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. Physical Review A, 2015, 92(6): 062101.
- [6] Tian Xiao, Xu Qinfang, Yin Mojuan, *et al.* Experiment study on optical lattice clock of strontium at NTSC[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s102001.
田 晓, 徐琴芳, 尹默娟, 等. 国家授时中心铷原子光钟的实验研制进展[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s102001.
- [7] Li Lin, Liu Peng, Ji Jingwei, *et al.* Probe laser power stabilization for integrated sphere cold atom clock[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0814004.
李 琳, 刘 鹏, 吉经纬, 等. 积分球冷原子钟探测光功率自动稳定实验研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0814004.
- [8] Peters A, Chung K Y, Chu S. High-precision gravity measurements using atom interferometry[J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [9] Gauguier A, Canuel B, Lèveque T, *et al.* Characterization and limits of a cold-atom Sagnac interferometer[J]. Physical Review A, 2009, 80(6): 063604.
- [10] Yoshikawa Y, Umeki T, Mukae T, *et al.* Frequency stabilization of a laser diode with use of light-induced birefringence in an atomic vapor[J]. Applied Optics, 2003, 42(33): 6645-6649.
- [11] Corwin K L, Lu Z T, Hand C F, *et al.* Frequency-stabilized diode laser with the Zeeman shift in an atomic vapor[J]. Applied Optics, 1998, 37(15): 3295-3298.
- [12] Zhang Jing, Tao Hua, Wei Dong, *et al.* A laser diode system stabilized on the saturated absorption lines of rubidium atoms[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(2): 197-201.
张 靖, 陶 桦, 卫 栋, 等. Rb 原子饱和吸收稳频半导体激光器系统[J]. 光学学报, 2003, 23(2): 197-201.
- [13] Zhao Jianming, Yin Wangbao, Zhao Yanting, *et al.* Frequency locking of a semiconductor laser via radio-frequency modulation spectrum[J]. Chinese J Lasers, 2004, 31(8): 935-938.
赵建明, 尹王保, 赵延霆, 等. 采用射频频率调制光谱实现半导体激光器的稳频[J]. 中国激光, 2004, 31(8): 935-938.
- [14] Jiang Xiao, Zhang Chen, Cai Wenqi, *et al.* Frequency stabilization system of diode laser for cold atom experiment[J].

Chinese J Lasers, 2010, 37(1): 82-86.

江 晓, 张 晨, 蔡文奇, 等. 冷原子实验用的半导体激光器稳频系统[J]. 中国激光, 2010, 37(1): 82-86.

- [15] Wang Jing, Yang Baodong, He Jun, *et al.* Influence of the bandwidth of feedback loop in frequency stabilization of external-cavity diode laser by polarization spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 425-430.

王 婧, 杨保东, 何 军, 等. 采用偏振光谱对外腔半导体激光器稳频时反馈环路带宽的影响[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 425-430.

- [16] Hu Yongqi, Dong Jing, Huang Junchao, *et al.* Frequency noise suppression of single-frequency laser by all-fiber ring resonator[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0802012.

胡永奇, 董 靖, 黄军超, 等. 利用全光纤环形谐振器实现对单频激光器频率噪声的抑制[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0802012.

- [17] Qi X H, Chen W L, Yi L, *et al.* Ultra-stable rubidium-stabilized external-cavity diode laser based on the modulation transfer spectroscopy technique[J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(4): 044205.