

基于光纤激光放大倍频的冷原子钟光源

王新文^{1,2}, 项静峰^{1,2}, 彭向凯^{1,2}, 刘亢亢¹, 刘亮^{1**}, 吕德胜^{1,2*}

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中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 用于激光冷却与原子布居数探测的激光光源是冷原子钟的重要组成部分, 选用工业技术成熟的 1560 nm 光纤激光器和光纤放大器分别作为种子源和光放大器, 经非线性倍频晶体对放大后的激光进行倍频, 得到较大功率的 780 nm 的激光, 通过饱和吸收稳频得到冷却激光, 一部分冷却激光利用电光调制器和声光调制器移频 6.8 GHz 得到重泵浦激光, 对上述激光进行适当的功率分配后提供给冷原子钟。对该套激光装置关键器件进行了特性测试, 将稳频后的倍频激光与锁定在超稳激光上的光学频率梳进行拍频, 得到的激光的线宽在 74 kHz 左右, 其短期稳定度比外腔半导体激光器提高半个多数量级。将这样的激光光源应用于冷原子钟, 可以减小探测激光频率噪声对喷泉钟稳定度的限制。

关键词 激光器; 冷原子钟; 光纤激光器; 激光倍频; 频率稳定度

中图分类号 O437.1; O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0914002

Light Source of Rubidium Cold Atomic Clock Based on Fiber Laser Amplification and Frequency Doubling

Wang Xinwen^{1,2}, Xiang Jingfeng^{1,2}, Peng Xiangkai^{1,2}, Liu Kangkang¹,
Liu Liang^{1**}, Lü Desheng^{1,2*}

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

²College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese
Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The laser source is an important part of a cold atomic clock for laser cooling and atomic population detection. This study selects a 1560-nm fiber laser and a fiber amplifier as the seed laser and the amplifier laser, respectively, in a rubidium cold atomic clock system because of the technical maturity of the industrial products. The cooling laser is obtained at 780 nm by doubling the frequency of the amplified laser using a nonlinear frequency doubling crystal. Further, the laser frequency is locked to the rubidium transition line via the saturation absorption frequency stabilization technique. A part of the cooling laser passes through an electro-optic modulator and an acousto-optic modulator with a frequency shift of 6.8 GHz to obtain the repumping laser. The lasers are provided to the cold atomic clock after ensuring appropriate power distribution. The amplifying, frequency doubling, and noise characteristics of the key components in the laser device are verified. Subsequently, the beating signal between the cooling laser after frequency doubling and the optical frequency comb locked to an ultra-stable laser denotes that the line width of the cooling laser is approximately 74 kHz and that the short-term stability is half an order of magnitude higher than that of the external cavity semiconductor laser which is used in our laboratory. Furthermore, the application of such a laser light source to the cold atomic clock can reduce the limitation of fountain clock stability which can be attributed to the detection of the laser frequency noise.

Key words laser; cold atomic clock; fiber laser; laser frequency doubling; frequency stability

OCIS codes 140.3515; 120.3930; 190.4360; 020.3320; 140.3425

收稿日期: 2019-04-04; **修回日期:** 2019-05-01; **录用日期:** 2019-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(11034008)、中国科技部仪器项目(2013YQ09094304)

* **E-mail:** dsly@siom.ac.cn; ** **E-mail:** liang.liu@siom.ac.cn

1 引 言

激光冷却技术^[1-4]是原子钟精度不断提高的一项关键技术,针对不同的原子,需要根据特定的能级结构选择合适的激光器。铷原子冷原子钟目前有多种类型,比如喷泉原子钟^[5-8]、积分球冷原子钟^[9-12]以及空间冷原子钟^[13-14],在俘获原子和探测原子过程中,需要冷却激光、重泵浦激光两种频率的激光。目前,用于铷原子冷原子钟的激光器有可调谐外腔半导体激光器(ECDL)^[15-16]、分布布拉格光栅反射式(DBR)半导体激光器和光纤倍频激光器,这三种激光器在性能和抗振性上各有优缺点。地面喷泉原子钟通常使用商业半导体外腔激光器,其优点是激光线宽较窄(≈ 100 kHz)且频率可大范围无跳模调谐,法国空间冷原子钟任务(ACES)^[14]中的铯空间冷原子钟(PHARAO)^[17]采用的激光器方案是干涉滤波部件加部分反射式外腔半导体激光器^[18],这种激光器结构工艺复杂,具有较高的实现难度;中国科学院上海光学精密机械研究所铷空间冷原子钟(CACES)的激光器方案^[19]是采用 DBR 半导体激光器,其优点是抗振性能十分优越,缺点是激光线宽较宽(≈ 1 MHz),在牺牲部分性能的情况下能保证其可靠性满足航天发射的需求。利用通信波段1560 nm 激光倍频得到 780 nm 激光用于铷原子激光冷却,是近年实现冷原子光源的另一个途径^[20-21],其优点是作为工业产品,1560 nm 波段激光容易获得,且具有较高的可靠性。本文采用工业技术成熟、可靠性有保障的 1560 nm 光纤激光器和光纤放大器,以 1560 nm 激光作为种子光,经过掺铒光纤放大器(EDFA)功率放大后,再经过非线性倍频晶体(PPLN)倍频,得到 780 nm 的激光,激光频率经饱和吸收稳频技术锁定到铷原子 D2 线的‘23’交叉共振峰上,分别与锁定在超稳激光^[22]和氢钟上的光学频率梳拍频测量倍频后的激光线宽和频率稳定度,测得的拍频信号线宽(74 kHz)优于 DBR^[23]激光器,频率稳定度(秒稳 2.3×10^{-12})优于 ECDL^[24],且可靠性较好。可见,该方案有应用于高精度空间铷冷原子微波钟及其他地面搬运喷泉钟的潜力。

2 光路设计

铷原子冷原子钟的激光冷却需要两束不同频率的激光,其中用于激发铷原子 D2 线 $|F=2\rangle \rightarrow |F'=3\rangle$ 跃迁(F_{22})的一束称为冷却激光,另一束用于激发 D2 线 $|F=1\rangle \rightarrow |F'=2\rangle$ 跃迁(F_{23}),称为

重泵浦激光(f_{AOM} 表示声光调制器 AOM 的移频量)。两束激光的频率差为 6.622 GHz,如图 1 所示。在原子钟运行过程中,锁频后的激光在声光调制器(AOM)和电光调制器(EOM)的作用下移频,可满足不同阶段的激光频率需求。

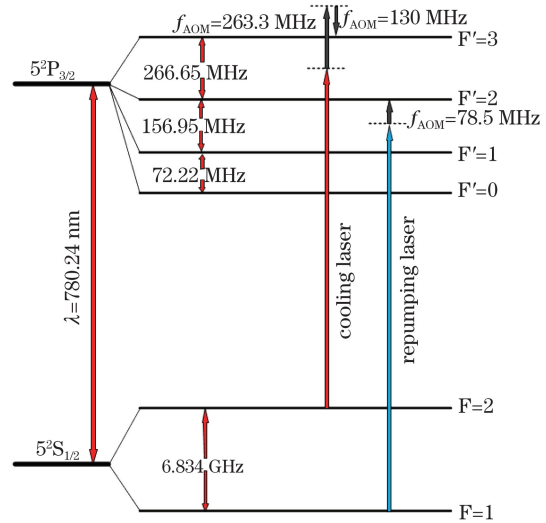


图 1 铷原子 D2 线超精细能级结构图

Fig. 1 Hyperfine level structure of ^{87}Rb D2 transition

图 2 是一套可以用于铷冷原子钟的激光光路设计方案,其中:LD 为 1560 nm 光纤激光器,FS 为光纤分束器,PS 为移相器,RF 为射频源,PD 为光探测器,Rb 表示铷蒸气泡。其核心是一套 1560 nm 光纤激光器,其频率依靠温度和内置压电陶瓷(PZT)来调节,可以实现 30 GHz 无跳模调谐范围和 50 mW 的功率输出。1560 nm 的激光经过一个 EDFA 后能够得到输出功率 2 W 的激光,光纤激光器和放大器后都接有光隔离器(OI),用以防止反射光损伤激光器。经过 PPLN 得到 780 nm 的激光,分束后的 5% 用于饱和吸收稳频,通过 EOM 对激光频率进行调制,调制后的光两次经过铷蒸气泡照在光电管上得到吸收信号,吸收信号解调后获得鉴频曲线,将激光频率锁定到铷原子 D2 超精细谱线 F_{22} 、 F_{23} 的交叉共振峰(即‘23’交叉峰)上^[25],此时激光频率相对于 F_{23} 红失谐 133 MHz。另外大部分光作为冷却光输出,先两次经过 AOM1 移频 260 MHz 左右,使激光频率相对于 F_{23} 跃迁蓝失谐 130 MHz,通过改变 AOM1 的工作频率,即可扫描冷却激光的频率,用于偏振梯度冷却。再经过分束器,5% 功率的激光经 AOM2 移频到 F_{23} 上作为探测激光,另一束光等分为 6 束激光,其中 3 束作为方向朝上的冷却激光,另外 3 束作为方向朝下的冷却激光,在原子俘获阶段,通过 AOM 移频使冷却光红失谐 18 MHz

用于俘获铷原子。光纤分束的其中一束激光经过 EOM 和 AOM5, 移频 6.8 GHz, 得到重泵浦光, 一部分与冷却光合束后参与激光冷却过程中的原子循环跃迁过程, 另一部分用于探测阶段将 $|F=1\rangle$ 的原子抽运到 $|F=2\rangle$ 能级上, 进而使用探测光间接测得 $|F=1\rangle$ 能级上的原子数。在原子钟运行周期内, 需要通过对各个 AOM 射频的频率和功率进行时序控制, 对进入物理系统的激光实施精确的操控, 以完成各阶段复杂的光与原子相互作用过程。

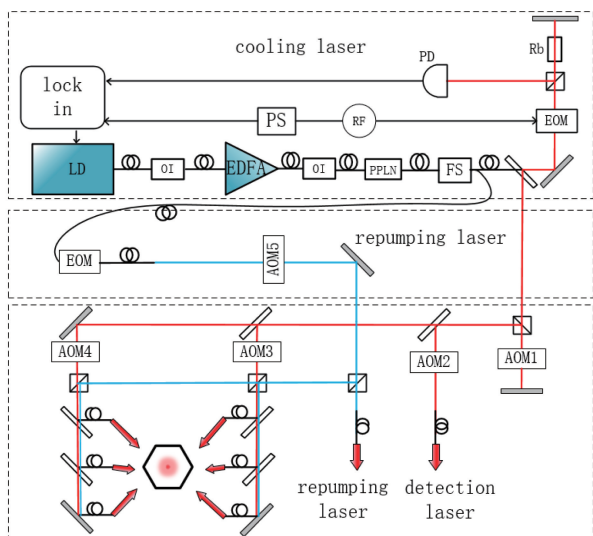


图 2 用于冷原子钟的光路设计方案
Fig. 2 Optical setup for cold atomic clock

3 激光放大与倍频特性

一般情况下, 1560 nm 的光纤激光器的输出功率只能达到几十毫瓦量级, 而冷原子钟需要 6 束冷却光对原子进行冷却, 再加上光路损耗, 至少需要 400 mW 的冷却光功率输出才能满足激光冷却和探测的需求。选用美国 NP Photonics 公司的 RFLM-50-3-1560.48-0-S-0 型光纤激光器。激光器电流用户无法通过控制接口进行调整, 因此固定功率输出 50 mW。内部使用通信级热电制冷器 (TEC) 控温的单模激光二极管作为泵浦源来激发一段掺铒光纤, 掺铒光纤两端分别是一段窄带和宽带的布拉格反射光栅 (作为激光谐振腔), 泵浦光从宽带布拉格光栅入射, 谐振后从窄带布拉格光栅端输出激光。激光输出端贴有 PZT, 可以通过改变温度和 PZT 电压来对激光频率进行调节。经过光隔离器后用法国 Keopsys 公司的 1560 nm 波段的 EDFA 对 1560 nm 的激光进行放大, 这种放大器使用掺铒光纤作为增益介质, 通过改变放大器的工作电流, 使用大功率光探测器得到了 EDFA 增益与电流的关系, 如图 3 所

示, 当电流增加到 3.9 A 时, 放大率饱和。当光纤激光器输出功率为 50 mW 时, 经隔离器传输后有大概 40 mW 进入 EDFA, 放大 50 倍后的输出光功率可达 2 W。

该放大器有恒电流 (ACC) 和恒功率 (APC) 两种工作模式, 为了使输出功率稳定, 使用 APC 模式运行放大器。实测的功率波动以及平台温度波动情况如图 4 所示, 光功率的涨落周期与温度的波动周期吻合, 为 3 h 左右, 功率波动在 $\pm 1.3\%$ 以内。功率随温度变化发生涨落可能是因为温度变化导致掺铒光纤长度变化, 进而对增益产生影响。这个量级的功率波动对冷却光来说已经能够满足激光冷却的要求, 但是对探测光来说会给原子探测过程带来额外的探测噪声, 可以利用声光调制器来对探测光实施主动功率稳定。

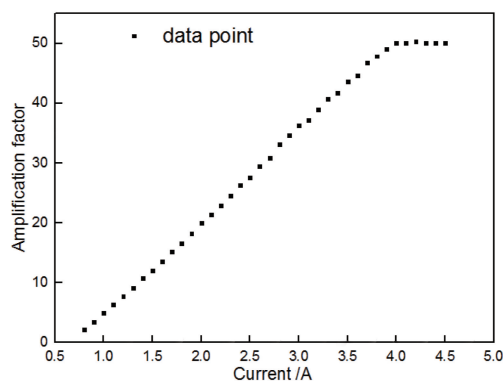


图 3 EDFA 放大系数与电流关系图
Fig. 3 Amplification factor versus current of EDFA

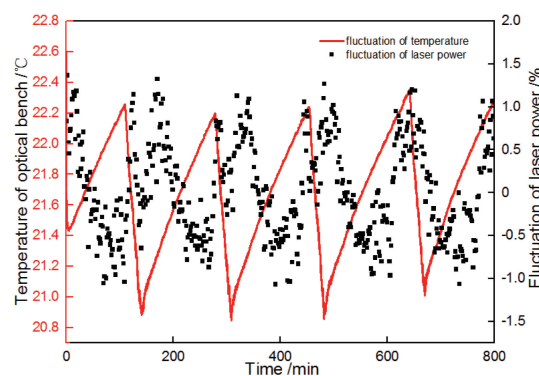


图 4 EDFA 输出功率和光学平台温度与时间的关系曲线
Fig. 4 Output power and optical bench temperature versus time of EDFA

图 5 所示为实测的日本 NTT electronic 公司的 780 nm 波长转换模块的倍频效率与温度的关系图, 该波长转换模块配有 TEC、PPLN 和热敏电阻。1560 nm 激光通过 FC/APC 连接器与该模块连接, 因为激光非线性倍频转换过程中需要设置合适的晶

体温度以满足激光倍频的相位匹配条件,故通过TEC改变PPLN晶体波导的温度,得到不同温度下780 nm激光的功率。当1560 nm输入光功率为140 mW时,由倍频转化效率公式 $\eta (\%/W) = \frac{P_{out}(W)}{P_{in}^2(W^2)} \times 100^{[26]}$ 作图得到图5,由图可知当温度为62.3 °C时,倍频转化效率最高可到270 %/W,该温度点即为PPLN倍频转换的最佳相位匹配温度点。 P_{in} 为输入功率, P_{out} 为输出倍频光功率。

将PPLN温度设置到最佳相位匹配温度点上,通过改变EDFA工作电流改变输入到PPLN的1560 nm激光功率,得到如图6所示的780 nm激光输出功率随1560 nm输入激光功率的变化曲线。可见,当输入功率接近1.6 W时,转化后功率接近饱和,可以得到接近900 mW的780 nm激光输出,能够满足冷原子钟的使用需求。

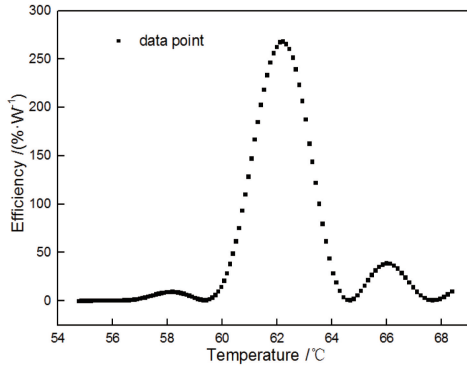


图5 PPLN倍频转化效率与温度关系图

Fig. 5 Conversion efficiency versus temperature of PPLN

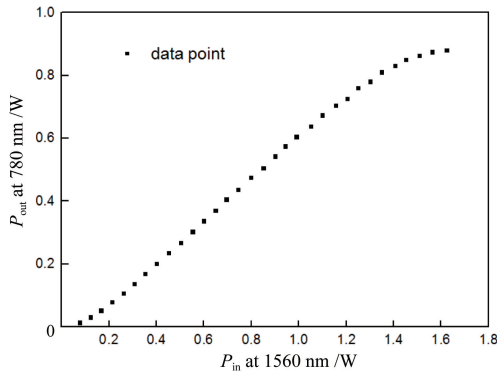


图6 PPLN输出功率与输入功率关系图

Fig. 6 Output power versus input power of PPLN

4 稳频与频率特性测试

激光装置各组件按图2光路搭建完成后,激光进入饱和吸收光路之前,先经过一个英国Photonics technologies公司的谐振型EOM,对激光频率进行

外调制,调制频率为12.5 MHz,调制激光作为泵浦光经过铷蒸气泡,经0°反射镜反射后作为探测光进入光电管,得到饱和吸收信号,再利用一个基于DDS(Direct Digital Synthesizer)的调制解调器进行解调,获得鉴频信号,如图7所示,利用鉴频信号和比例积分(PI)电路反馈光纤激光器的PZT控制电压,使倍频后的激光频率锁定在铷原子D2线饱和吸收‘23’交叉共振峰上。

为了测试倍频后的激光线宽,当锁定在线宽小于1 Hz的超稳激光上的飞秒光学频率梳(FOFC)与稳频后的光纤倍频激光(FDL)合束后,使用高速光电探测器探测拍频信号,使用频谱仪测量拍频信号的线宽。因为光学频率梳的线宽远小于倍频激光,所以拍频信号的线宽主要取决于FDL,结果如图8所示,洛伦兹线型拟合的线宽为74 kHz。从美国NP photinics公司光纤激光器的出厂数据得知,1560 nm光纤激光器的标称线宽为3 kHz,经EDFA功率放大再倍频锁定到铷原子D2线的‘23’交叉共振峰上,线宽比标称线宽大了二十几倍,这可能是稳频电路带来的展宽和EDFA放大引起的展宽。

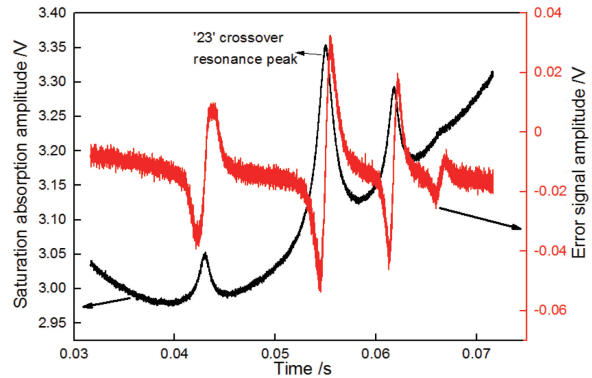


图7 铷饱和吸收信号和鉴频信号

Fig. 7 Saturated absorption signal and frequency discrimination signal of ⁸⁷Rb

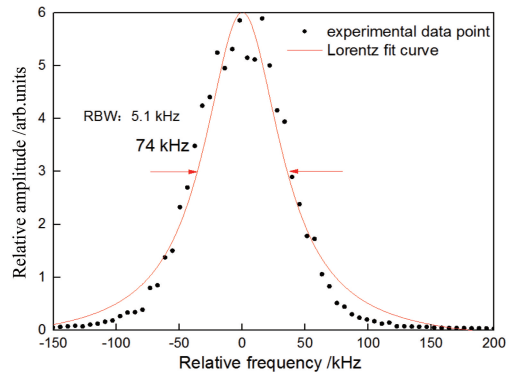


图8 FDL与FOFC拍频后激光信号

Fig. 8 Beat signal between FDL and FOFC

为了确定线宽展宽来源,对激光器在各环路节点处的激光线宽进行了测量。在激光器自由运转情况下,对光纤放大器出来的种子光和经过 EDFA 放大后的放大光分别进行自拍频,其中一路拍频光使用 AOM 移频 80 MHz,另一路拍频光使用 100 km 光纤延迟线消相干,拍频后的测试线宽如图 9(a)和 (b)所示。可见,洛伦兹拟合后种子激光和放大激光的拟合线宽都为 11 kHz,根据自拍频洛伦兹线型的特点,种子光和放大激光自身的线宽需要除以 2,即都为 5.5 kHz,与标称线宽 3 kHz 基本相符。由此可知,EDFA 光纤对种子激光的光放大对激光线宽的展宽并没有贡献。另外,激光器稳频后,通过调节稳频环路的 PI 反馈的比例增益大小,发现放大后的 1560 nm 激光线宽会随之改变,增益大时 1560 nm 线宽可达 100 kHz,增益较小时 1560 nm 线宽为 8 kHz,说明稳频回路会使激光器线宽展宽,但是小增益情况下激光稳频效果不好。综合考虑稳频效果,在选择正常工作的稳频增益情况下,倍频后 780 nm 线宽如图 8 所示,为 74 kHz。

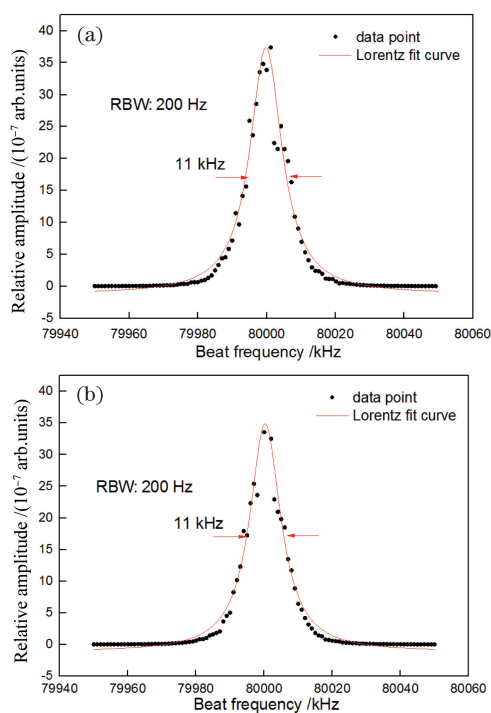


图 9 1560 nm 激光未稳频时自拍频的拍频信号。
(a) 种子激光;(b) 放大激光

Fig. 9 1560-nm laser signals after self-beating without frequency stabilization. (a) Seed laser; (b) amplified laser

一般应用于冷原子钟的 DBR 半导体激光器和 ECDL 的线宽分别为 1 MHz 和几百 kHz 量级,对激光冷却原子过程的影响可忽略,但是在探测冷原

子能级布居数时,激光器线宽是探测噪声的来源之一^[27]。对荧光探测来讲,探测激光的功率和频率噪声均会影响散射光子的数量,进而影响双能级探测跃迁几率的值;当激光频率失谐较小、探测光较强时,对线宽要求较小。尽管如此,为了使原子钟噪声以原子数的量子投影噪声为主,激光线宽也应小于 100 kHz^[27]。目前 FDL 的线宽 74 kHz 已经能满足冷原子钟的探测噪声需求。

为了得到 FDL 的激光频率稳定性,将 FOPC 锁定在氢钟上与 FDL 倍频激光拍频,经过低通高通滤波后,使用计数器记录频率偏差的稳定性^[24]。因为氢钟在 1 s 内的稳定度优于 1×10^{-13} ,所得频率偏差的稳定度即可反映光纤倍频激光器的频率稳定度,图 10 所示曲线分别为 FDL 与光学频率梳拍频后测得的频率稳定度,以及实验室另一台商用外腔半导体激光器^[24]与锁定在超稳晶振上的光学频率梳拍频后测得的频率稳定度。可以看出,FDL 秒稳可达 2.3×10^{-12} ,优于 ECDL 秒稳 4 倍左右,1 s 平均时间之后稳定度变差是因为测试时激光器的稳频频率受实验室环境因素影响,但是从冷原子钟的探测激光频率噪声来说,研究人员一般更关注激光在 10~200 Hz (5~100 ms) 范围内的噪声^[28]

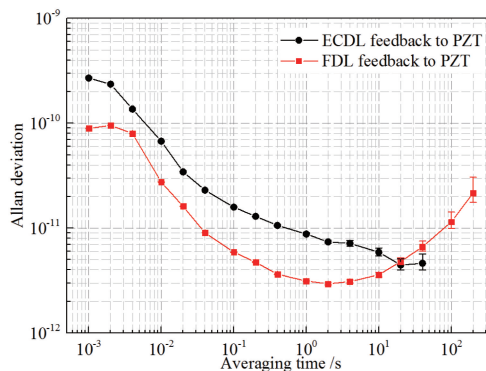


图 10 光纤倍频激光器与 ECDL 激光频率的阿兰方差
Fig. 10 Allan deviation of laser frequency between fiber frequency doubling laser and ECDL

由上述频谱仪测得的线宽结果和计数器测得的频率稳定度结果可以看出,本研究的光纤激光放大倍频方案的频率噪声性能优于 DBR 半导体激光器和 ECDL。

5 结 论

根据以上实验结果和分析可知,光纤激光放大倍频装置在输出光功率、激光器线宽和激光频率稳定度上都能满足高精度冷原子钟的要求,相比于目前常用的 DBR 半导体激光器和 ECDL,所提出的基

于光纤激光放大倍频的冷原子钟激光装置光源有明显优势:对比 DBR 激光器来说,在可靠性和抗振性差不多的情况下,光纤倍频激光器的线宽性能得到极大提升,减小了冷原子钟原子荧光探测过程中的探测噪声,有利于实现稳定度优于 1×10^{-16} 的高精度冷原子钟;对比 ECDL 来说,光纤倍频激光器的线宽性能有一定程度提升,抗振性和可靠性更有极大改善。另外该装置后续还可以通过力学振动测试和环境模拟实验来验证其可靠性和抗振性。由此可见,将该光纤激光放大倍频装置用于冷原子钟领域时,其在频谱噪声以及产品可靠性上有自身优势,将来可应用于空间或地面高可靠冷原子相关装备。

参 考 文 献

- [1] Hänsch T W, Schawlow A L. Cooling of gases by laser radiation[J]. *Optics Communications*, 1975, 13(1): 68-69.
- [2] Gordon J P, Ashkin A. Motion of atoms in a radiation trap[J]. *Physical Review A*, 1980, 21(5): 1606-1617.
- [3] Letokhov V S, Minogin V G, Pavlik B D. Cooling and trapping of atoms and molecules by a resonant laser field[J]. *Optics Communications*, 1976, 19(1): 72-75.
- [4] Wineland D J, Itano W M. Laser cooling of atoms[J]. *Physical Review A*, 1979, 20(4): 1521-1540.
- [5] Kasevich M A, Riis E, Chu S, *et al.* RF spectroscopy in an atomic fountain[J]. *Physical Review Letters*, 1989, 63(6): 612-615.
- [6] Clairon A, Salomon C, Guellati S, *et al.* Ramsey resonance in a Zacharias fountain[J]. *Europhysics Letters (EPL)*, 1991, 16(2): 165-170.
- [7] Guéna J, Abgrall M, Rovera D, *et al.* Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, 59(3): 391-409.
- [8] Ovchinnikov Y, Marra G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard [J]. *Metrologia*, 2011, 48(3): 87-100.
- [9] Cheng H D, Zhang W Z, Ma H Y, *et al.* Laser cooling of rubidium atoms from background vapor in diffuse light[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(2): 023407.
- [10] 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.
- [11] Meng Y L, Gao Y C, Zheng B C, *et al.* Design for the integration of integrating sphere and microwave cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(9): 0918001.
- [12] Wang X C, Cheng H D, Xiao L, *et al.* Laser cooling of rubidium 85 atoms in integrating sphere[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 080201.
- [13] Liu L, Lü D S, Chen W B, *et al.* In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 2760.
- [14] Laurent P, Massonnet D, Cacciapuoti L, *et al.* The ACES/PHARAO space mission[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16(5): 540-552.
- [15] 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): 1-7.
- [16] de Labacherie M, Passedat G. Mode-hop suppression of Littrow grating-tuned lasers[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(3): 269-274.
- [17] Laurent P, Abgrall M, Jentsch C, *et al.* Design of the cold atom PHARAO space clock and initial test results[J]. *Applied Physics B*, 2006, 84(4): 683-690.
- [18] Lévêque T, Faure B, Esnault F X, *et al.* PHARAO laser source flight model: design and performances[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(3): 033104.
- [19] Ren W, Sun Y G, Wang B, *et al.* Highly reliable optical system for a rubidium space cold atom clock[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3607-3614.
- [20] Lienhart F, Boussem S, Carraz O, *et al.* Compact and robust laser system for rubidium laser cooling based on the frequency doubling of a fiber bench at 1560 nm [J]. *Applied Physics B*, 2007, 89(2/3): 177-180.
- [21] Mahal V, Arbore M A, Fejer M M, *et al.* Quasi-phase-matched frequency doubling in a waveguide of a 1560-nm diode laser and locking to the rubidium D_2 absorption lines[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(16): 1217-1219.
- [22] Dong J, Hu Y Q, Huang J C, *et al.* Subhertz linewidth laser by locking to a fiber delay line[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(5): 1152-1156.
- [23] Verdiell J M, Lang R J, Koch T L, *et al.* Thermal compensators for waveguide DBR laser sources: US5870417 [P/OL]. 1999-02-09 [2019-03-15]. <https://patents.google.com/patent/US5870417>.
- [24] Xiang J F, Wang L G, Ren W, *et al.* Frequency noise suppression of single-frequency laser with radio-frequency modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501009.

项静峰, 王利国, 任伟, 等. 采用射频调制实现对单

- 频激光器频率噪声的抑制[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0501009.
- [25] Qu Q Z, Xia W B, Wang B, *et al.* Integrating design of a compact optical system for space laser cooling application[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0602003.
- 屈求智, 夏文兵, 汪斌, 等. 空间激光冷却原子集成光学平台设计[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0602003.
- [26] Lévêque T, Antoni-Micollier L, Faure B, *et al.* A laser setup for rubidium cooling dedicated to space applications[J]. Applied Physics B, 2014, 116(4): 997-1004.
- [27] Rocco E, Palmer N, Valenzuela T, *et al.* Fluorescence detection at the atom shot noise limit for atom interferometry[J]. New Journal of Physics, 2014, 16(9): 093046.
- [28] Santarelli G, Laurent P, Lemonde P, *et al.* Quantum projection noise in an atomic fountain: a high stability cesium frequency standard[J]. Physical Review Letters, 1999, 82(23): 4619-4622.