

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.09

# 国产激光管在磁选态光检测铯原子钟中的应用研究

范利锋<sup>1</sup>, 李源昊<sup>1</sup>, 刘晨<sup>1</sup>, 冯晨<sup>1</sup>, 李超杰<sup>1</sup>, 王延辉<sup>1,2</sup>

(1.北京大学 电子学院, 北京 100871;

2.北京大学 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:** 在科学仪器国产化背景下, 为了改变磁选态-光检测型铯原子钟仍依赖进口激光管的现状, 进行国产DFB-LD激光管在磁选态-光检测铯束管上的应用和外差法拍频测试, 并分析其与国外TOPTICA Photonics DFB-LD激光管之间的差别。结果显示: 国产激光管线宽为 $1.999\text{ MHz} \pm 6\text{ kHz}$ , 频率稳定度为 $1 \times 10^{-11}@100\text{ s}$ , 采用国产激光管可以在国产铯束管上实现标准型应用指标( $1.45 \times 10^{-12}@100\text{ s}$ ), 这为进一步提升国产激光管的性能提供了思路和借鉴。未来需要进一步压窄国产激光管线宽, 以实现更高的小型铯束钟指标。

**关键词:** 国产激光管; 铯原子钟; 频率稳定度; 外差法拍频; 线宽

中图分类号: TB939; O456; TN365 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 03-0111-07

## Research on the application of domestic lasers in the optically detected magnetic-state-selection cesium atomic clock

FAN Lifeng<sup>1</sup>, LI Yuanhao<sup>1</sup>, LIU Chen<sup>1</sup>, FENG Chen<sup>1</sup>, LI Chaojie<sup>1</sup>, WANG Yanhui<sup>1,2</sup>

(1.School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Optical

Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Under the background of domestic scientific instruments, in order to change the situation that the optically detected magnetic-state-selection cesium atomic clock still depends on imported lasers, three domestic distributed-feedback laser (DFB-LD) tubes were applied to the optically detected magnetic-state-selection cesium atomic clock, and the heterodyne beat-note measurement were conducted. In addition, the differences between these lasers and TOPTICA Photonics DFB-LD were analyzed. The experiment results show that the linewidth of the domestic laser is  $1.999\text{ MHz} \pm 6\text{ kHz}$ , and its frequency stability is  $1 \times 10^{-11}@100\text{ s}$ ; the domestic lasers can achieve the standard specification ( $1.45 \times 10^{-12}@100\text{ s}$ ) on the domestic cesium beam tube, which provides ideas and references for further improving the performance of domestic lasers. Narrowing the domestic laser linewidth will be required in the future to achieve higher specifications of the compact cesium beam clock.

**Key words:** domestic laser; cesium clock; frequency stability; heterodyne beat-note; linewidth

收稿日期: 2024-05-12; 修回日期: 2024-05-26

基金项目: 教育部联合基金项目(8091B042103)

引用格式: 范利锋, 李源昊, 刘晨, 等. 国产激光管在磁选态光检测铯原子钟中的应用研究[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 111-117.

**Citation:** FAN L F, LI Y H, LIU C, et al. Research on the application of domestic lasers in the optically detected magnetic-state-selection cesium atomic clock [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 111-117.



## 0 引言

小型铯束原子钟是守时、授时的核心设备，自主研发全国产化的小型铯束原子钟对国计民生具有重大意义。小型铯束原子钟可以分为三个类型：磁选态-磁检测型(如 Microchip Technology H5071A/B、Oscilloquartz OSA 3235B、兰州空间技术物理研究所的 LIP Cs 3000、北京无线电计量测试研究所的 BM2103-6)，光抽运光检测型(如 Oscilloquartz OSA 3350、OSA 3300-HP、成都天奥 TA1000/1200)和磁选态-光检测型(如北京大学 BD1024 型)<sup>[1-8]</sup>。小型铯束原子钟的工作原理是通过微波与铯原子之间的相互作用，实现原子态到电信号的转化，从而使得量子系统可以对微波频率进行鉴频，其工作过程主要包括原子态制备、微波与原子相互作用(原子态演化)、原子态检测。其中，磁选态-光检测型铯束原子钟相比于磁检测型，避免了磁选态-磁检测铯束原子钟的电子倍增器寿命问题；相比于光抽运型，磁选态可以得到微波跃迁谱线(Ramsey 谱线)窄线宽，在检测区可以由循环跃迁线进一步压窄 Ramsey 谱线线宽。

BD1024 型磁选态-光检测型铯束原子钟主要部件包括物理部分铯束管、电路部分、光学模块以及机械结构。目前物理部分铯束管、电路部分的部件均可以实现国产化，而光学模块中的激光管主要依赖进口。在铯原子钟中常用的激光管主要包括外腔调谐半导体激光管(External cavity tuned semiconductor laser, ECDL)和分布式反馈激光管(Distributed feedback laser, DFB-LD)，其中 ECDL 线宽较窄，在百千赫兹量级，其工作过程易受环境影响，长时间工作时容易发生跳模导致激光失锁；而 DFB-LD 线宽相对较大，在兆赫兹量级，其受环境因素影响小，不跳模范围大<sup>[9]</sup>。因此，在 BD1024 型磁选态-光检测铯束原子钟中使用 DFB-LD 作为检测光源。

由于以上原因，要实现小型铯束原子钟的全国产化，必须通过测试，分析掌握 DFB-LD 在铯束管上的真实应用情况并为进一步优化国产激光管的性能做准备。为此，本文首先介绍了磁选态-光检测铯束原子钟的基本工作原理，接着介绍了铯

束管结构、测试系统，并给出了激光管线宽的测试方法，然后针对国产的 852 nm DFB-LD(由中国电子科技集团公司第十三研究所研制)和德国 TOPTICA Photonics 的 852 nm DFB-LD 在铯束管上进行应用测试的结果进行分析讨论。

## 1 方法与实验

### 1.1 基本原理

在磁选态-光检测铯束原子钟中，由选态磁铁实现原子态制备过程，微波与原子相互作用采用 Ramsey 分离振荡场方法，原子态检测采用荧光检测方法。

在闭环条件下，原子钟系统的相位噪声模型如图 1 所示。

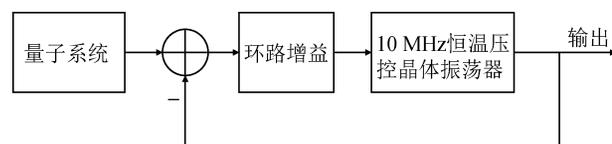


图1 原子钟闭环相噪模型

Fig.1 Model of Cs atomic clock closed-loop phase noise

假设  $\phi_{qs}$ 、 $\phi_{lo}$ 、 $\phi_o$  分别为量子系统相噪、10 MHz 恒温压控晶体振荡器相噪和输出相噪， $G$  为反馈环路增益，则原子钟系统输出相噪  $\phi_o$  和频率噪声功率谱密度  $S_y$  分别为

$$\phi_o = \frac{1}{1+G} \phi_{lo} + \frac{G}{1+G} \phi_{qs} \quad (1)$$

$$S_y = \left| \frac{1}{1+G} \right|^2 S_{lo} + \left| \frac{G}{1+G} \right|^2 S_{qs} \quad (2)$$

为了尽可能降低剩余频偏，本课题组采用比例积分(Proportional and Integral, PI)反馈环路，使得在低频处  $|G|$  通常远大于 1，因此在低频处原子钟系统输出频率噪声由量子系统决定。通常可以通过设置合适的环路带宽，使原子钟系统的输出频率同时表现出 10 MHz 恒温压控晶体振荡器的短期频率稳定度(10 s 内)和环路带宽内(即低频处)是量子系统的频率稳定度。原子钟的频率稳定度可以通过时域的 Allan 偏差  $\sigma_y$  表征，当频率噪声为白噪声时<sup>[10]</sup>， $\sigma_y$  的计算如式(3)所示。

$$\sigma_y \propto \frac{1}{S_{NR}} \cdot \frac{\Delta\nu}{\nu} \cdot \sqrt{\tau} \quad (3)$$

式中： $S_{NR}$  为 Ramsey 谱线的信噪比(即 Ramsey 谱线

信号幅度与调制频率点处噪声功率谱密度的1/2次方的比值),  $\Delta\nu$ 为跃迁谱线线宽,  $\nu$ 为中心频率,  $\nu = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$ 。因此,在环路带宽内(即低频处),铯钟频率稳定度主要取决于Ramsey谱线线宽和信噪比,本课题组之前的研究表明,决定Ramsey谱线信噪比的噪声源主要是原子散粒

噪声和激光频率噪声<sup>[11]</sup>。

### 1.2 铯束管和激光管

图2为实验中使用的磁选态光检测型铯束管的基本结构,主要包括铯炉、选态磁铁、微波腔和荧光收集器等物理部件。图2中,  $m$ 为磁量子数,  $F$ 为总角动量。

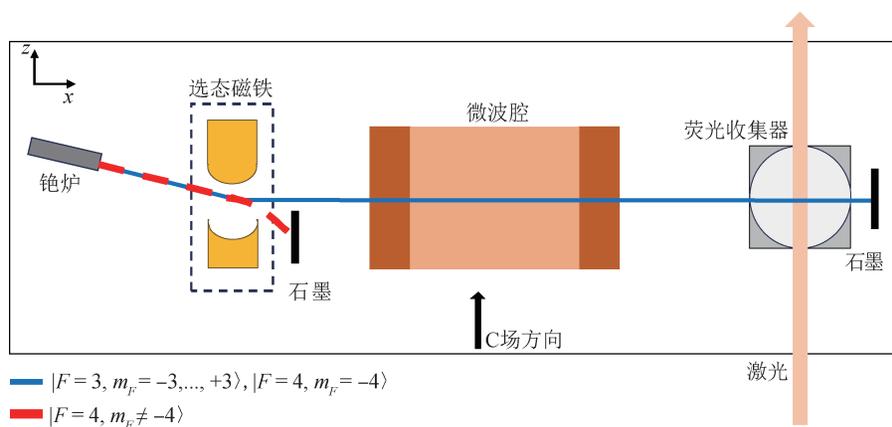


图2 磁选态光检测型铯束管结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optically detected magnetic-state-selection cesium beam tube structure

实验中采用正向选态铯束管,该型铯束管的Ramsey谱线线宽 $\Delta\nu = 500\text{ Hz}$ ,炉温设置为 $116\text{ }^\circ\text{C}$ 。正向选态为铯炉准直器指向选态磁铁凹极头,磁选态选择 $|F = 3\rangle$ 态原子;852 nm激光管通过循环跃迁线 $|F = 4\rangle \rightarrow |F = 5'\rangle$ 检测 $|F = 4\rangle$ 态原子。

激光管和铯束管的测试系统示意图如图3所示,主要包括物理部件束管、光学部分和电路模块。其中,微波模块由10 MHz恒温压控晶体振荡

器倍频锁相和取样介质振荡器综合产生9.192 GHz的超低相噪微波信号( $-95\text{ dBc/Hz @100 Hz}$ );伺服模块实现激光管工作参数的设定和频率锁定、炉温锁定、C场锁定、微波模块频率调制、功率锁定以及荧光信号解调。通过解调荧光信号可以得到误差信号,经过PI反馈对10 MHz恒温压控晶体振荡器的压控电压进行调节,实现微波频率的闭环锁定。

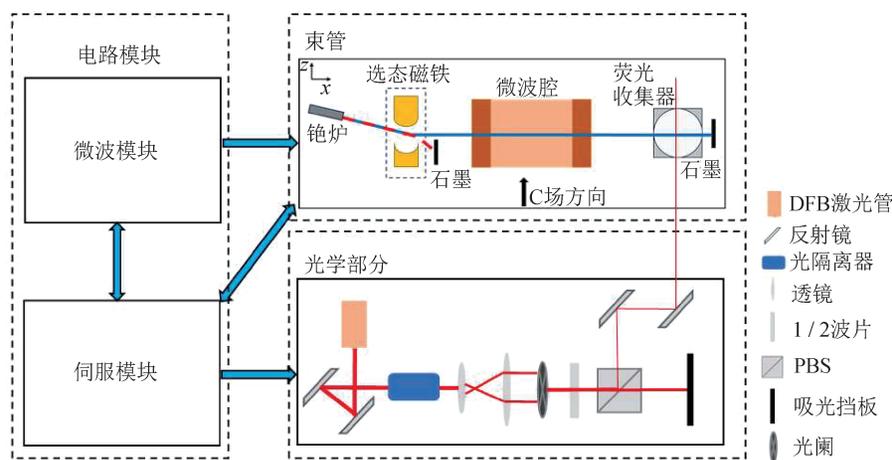


图3 激光管和铯束管的测试系统示意图

Fig.3 The overall measurement system of the lasers and the cesium beam tube

实验中使用的国产DFB-LD激光管(编号为#1、#2、#3)与TOPTICA Photonics DFB-LD激光管(编号为GF-02572)工作参数如表1所示,激光管输出功率均设置为1.5 mW,光斑束腰半径设置为约3 mm。测试不同DFB激光管在铯原子束光谱稳频条件下,铯钟输出10 MHz信号时的频率稳定度,短稳测试仪为多通道比相仪STT-PC(成都同相科技生产),参考为10 MHz的氢钟信号(VCH1003M,稳定度指标为1 s时,小于等于 $1.5 \times 10^{-13}$ ,100 s时,小于等于 $6 \times 10^{-15}$ ),测试时间不少于72 h。

表1 激光管工作参数

编号	工作点温度/°C	工作点电流/mA
#1	37.3	70
#2	33.1	54
#3	34.3	83
GF-02572	43.0	80

### 1.3 激光管线宽

激光管线宽可以通过拍频信号频率功率谱或者相位噪声谱获得<sup>[12-13]</sup>。本课题组采用外差法拍频对激光管线宽进行测试,基本原理是利用2束激光形成干涉信号,信号被光电探测器检测。假设待测激光管的光频率为 $\nu_1$ ,初始相位为 $\varphi_1$ ,参考激光管的输出光频率为 $\nu_2$ ,初始相位为 $\varphi_2$ ,则拍频后得到的光电流 $I$ 表达式为<sup>[14]</sup>

$$I = S [ P_1(t) + P_2(t) + 2\sqrt{P_1 P_2} \cos(2\pi \cdot \Delta\nu \cdot t + \Delta\varphi) ] \quad (4)$$

式中: $S$ 为光电探测器的灵敏度, $P_1$ 和 $P_2$ 分别为待测激光管和参考激光管的输出功率, $t$ 为时间变量, $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$ , $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ 。假定待测激光管和参考激光管的光谱均为洛伦兹线型,则拍频后得到的频谱亦为洛伦兹线型,光电流谱密度函数 $S(\nu)$ 可以表示为

$$S(\nu) = \frac{\delta\nu}{2\pi [ (\nu - \Delta\nu)^2 + (\delta\nu/2)^2 ]} \quad (5)$$

式中: $\delta\nu$ 为拍频功率谱的线宽(即半高全宽,full width at half-maximum, FWHM), $\delta\nu = \delta\nu_1 + \delta\nu_2$ , $\delta\nu_1$ 、 $\delta\nu_2$ 分别为待测激光管和参考激光管的线宽。

如图4所示,参考激光管为TOPTICA Photonics的微型可调谐外腔激光器(mini external cavity tuned laser, ECL),其线宽由2支ECL拍频得到,待测激光管、参考激光管的频率分别锁在铯原子的 $|F = 4\rangle \rightarrow |F = 5'\rangle$ 线和 $|F = 4\rangle \rightarrow |F = 4'\rangle$ 线,激光管的工作参数设定与频率锁定均由Toptica DL-Cpro控制器实现<sup>[15]</sup>。其中,PBS为宽带偏振分光棱镜,BS为宽带分光棱镜,PD2为高速光电探测器(型号为DET10A2,由Thorlabs生产),PD1、PD3为放大探测器(型号为DH-GDT-D020V,由大恒光电生产),功率放大器为mini circuit的ZFL-500LNB。通过信号分析仪(型号为N9020A,由是德科技生产)采集拍频信号频谱数据,其中,分辨率带宽

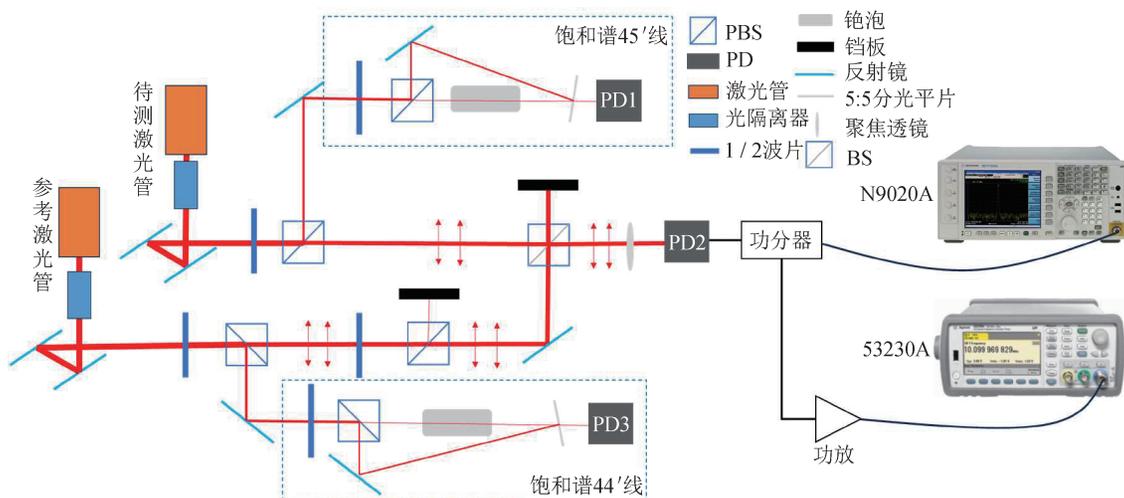


图4 外差法拍频测量激光管线宽及频率稳定度

Fig.4 Heterodyne beat-note measurement set-up of laser linewidth and frequency stability

(Resolution Bandwidth, RBW)为 100 kHz, 视频带宽 (Video Bandwidth, VBW)为 1 kHz, 设置信号分析仪为 100 次平均采样频谱数据, 并用 Origin 2021 中洛伦兹函数拟合得到拍频线宽。采用频率计数器 (型号为 53230A, 由是德科技生产) 测量拍频信号的频率稳定度, 其中门控时间设置为 0.1 s, 测试时间不少于 3 h。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铯钟频率稳定度

在不同 DFB 激光管束谱锁定条件下, 铯钟输出信号的频率稳定度结果如图 5 所示。在图 5 中, 1 ~ 10 s 内铯钟的频率稳定度主要取决于微波模块中的 10 MHz 恒温压控晶体振荡器的频率稳定度, 其可以通过 PI 反馈环路的带宽进行调整。显然, 国产激光管在束谱锁定条件下, 均可以实现标准管指标 ( $< 2.7 \times 10^{-12}$ @100 s), 其中国产激光管 #2 ( $1.45 \times 10^{-12}$ @100 s) 与 GF-02572 ( $8.05 \times 10^{-13}$ @100 s) 相比, 束谱锁定下铯钟指标相差约 1 倍。在束管 Ramsey 谱线线宽、炉温、激光管功率、光斑大小一致的情况下, 决定 Ramsey 谱线信噪比的噪声源主要是激光频率噪声, 因此更窄线宽的激光管可以得到更好的铯钟频率稳定度。

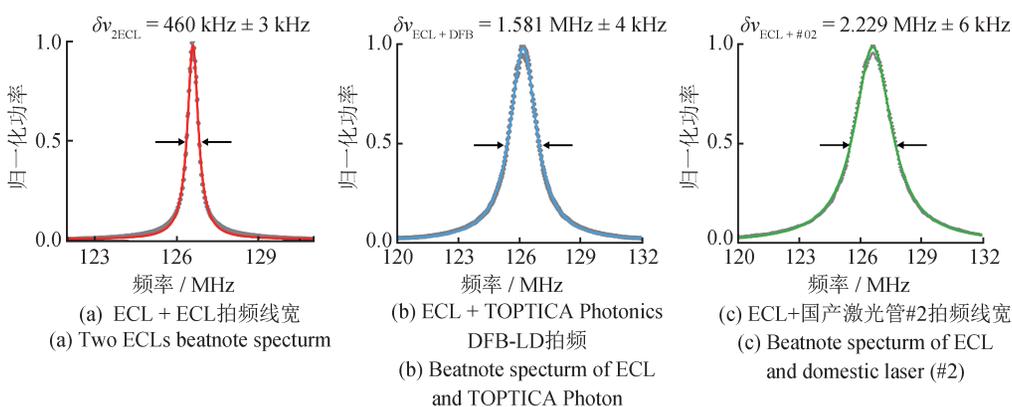


图6 拍频线宽结果

国产激光管 #2 线宽约为 GF-02572 的 1.5 倍, 在束谱锁定条件下, 相对应的铯钟输出信号频率稳定度约为 1.8 倍 (见图 5)。由公式 (3) 可知, 在束管谱线线形变化不大的情况下, 铯原子钟的短期

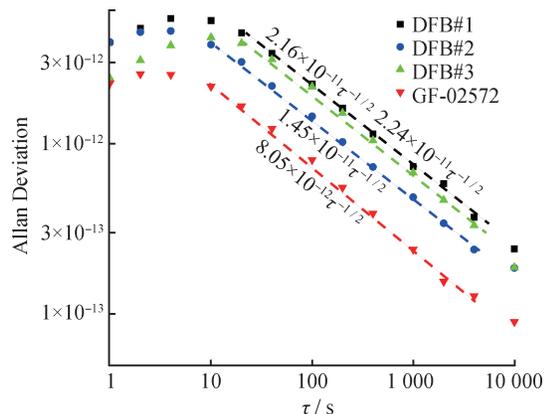


图5 不同 DFB 激光管锁定下的铯钟输出信号频率稳定度  
Fig.5 The Allan standard deviation of the optically detected magnetic-state-selection cesium clock under different DFB lasers

### 2.2 激光管线宽及频率稳定度

拍频信号线宽拟合结果直方图如图 6 所示, 其中  $\delta\nu_{2ECL}$ 、 $\delta\nu_{ECL+DFB}$ 、 $\delta\nu_{ECL+\#2}$  分别表示 2 个 ECL 的拍频线宽、ECL 和 GF-02572 的拍频线宽、ECL 和国产激光管 #2 的拍频线宽 (选择 #2 激光管是因为其铯原子钟在国产激光管测试中指标最好, 详见图 5), 拍频信号中心频率的偏差是由于测试平台磁场不均匀而导致吸收峰频率的绝对值有差异, 但不影响激光管线宽测试, 后续激光管测试实验可以采用文献 [16] 中使用的铯泡方案。根据洛伦兹拟合拍频线宽得到激光管线宽的测试结果, 如表 2 所示。

频率稳定度取决于谱线线宽和信噪比。对于磁选态-光检测铯原子钟, 噪声主要为原子散粒噪声、激光频率噪声、荧光检测噪声等, 且在束管中, 这几类噪声之间是相互独立的, 因此整钟信噪比

表2 激光管线宽测试结果

Table 2 Measurement results of the laser linewidth

编号	线宽
ECL	230 kHz ± 2 kHz
GF-02572	1.351 MHz ± 3 kHz
#2	1.999 MHz ± 6 kHz

注: ECL激光管的拍频线宽大于数据手册给定的典型值100 kHz, 可能是受激光频率锁定的调制深度的展宽影响。

由其中信噪比最低的噪声决定。如上文所述, 实验中铯炉温度控制为116°C, 此时原子束强足够大, 原子散粒噪声小于激光频率噪声, 决定Ramsey谱线信噪比的噪声源主要是激光频率噪声, 即铯钟输出信号频率稳定度主要由激光频率噪声决定, 其中激光频率噪声信噪比 $S_{NR, LF}$ 可由式(6)估算<sup>[17]</sup>

$$S_{NR, LF} = \frac{1}{0.5 + C^{-1}} \cdot \frac{1}{2} w \sqrt{\frac{2\Omega_L^2 + \Gamma(\Gamma + \gamma_L)}{3\Gamma + \gamma_L}} \quad (6)$$

式中:  $\Omega_L$ 为激光跃迁的Rabi频率,  $\Gamma$ 为原子的自发辐射速率,  $\gamma_L$ 为激光管的线宽,  $C$ 为Ramsey信号的对比值,

$$w = \frac{1}{\gamma_L \sqrt{\Gamma}} \sqrt{\Omega_L^2(3\Gamma + 4\gamma_L) + \frac{\Gamma(3\Gamma + \gamma_L)(\Gamma + 2\gamma_L)}{2}}$$

计算得到国产激光管#2、GF-02572的频率噪声信噪比分别约2 300、3 200, 与铯钟频率稳定度实验结果一致。拍频信号及激光管频率稳定度结果如图7所示。

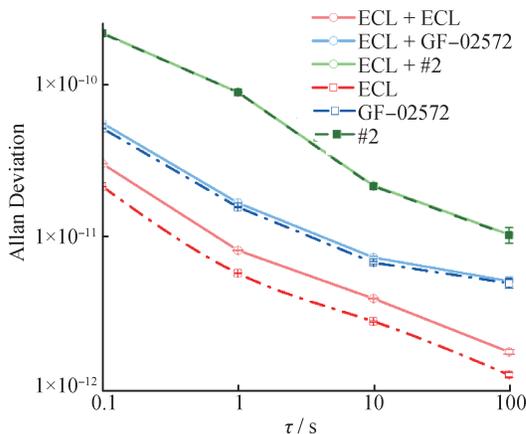


图7 饱和谱锁定下拍频信号频率稳定度及激光管频率稳定度  
Fig.7 The Allan deviations of the beat frequencies between three lasers and the Allan deviation of the individual laser

其中, 激光管频率稳定度可由式(7)、式(8)、式(9)计算得到。

$$\sigma_{ECL} = \frac{\sigma_{2ECL}}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

$$\sigma_{GF-02572} = \sqrt{\sigma_{ECL + GF-02572}^2 - \sigma_{ECL}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{\#2} = \sqrt{\sigma_{ECL + \#2}^2 - \sigma_{ECL}^2} \quad (9)$$

### 3 结论

磁选态-光检测型铯原子钟的短期频率稳定度主要取决于Ramsey谱线线宽、原子散粒噪声和激光频率噪声。受限于国产激光管的激光频率噪声, 目前采用国产激光管在国产铯束管上实现了标准型指标 ( $1.45 \times 10^{-12}@100\text{ s}$ ), 为磁选态-光检测型铯原子钟中激光管选型提供了测试方法; 由于小型铯原子钟主要用于守时, 需要长期稳定运行, 国产激光管的长期稳定性需要后续更长时间的测试验证。在未来需要进一步压窄国产激光管线宽, 以实现更高的小型铯束钟指标。

### 参考文献

- [1] CHEN J, WANG J, GUO L, et al. Characteristics analysis of compact cesium atomic clock with magnetic state selection[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10.
- [2] HE X, YUAN Z, CHEN J B, et al. Improvement of the short- and long-term stability of high performance portable optically pumped cesium beam atomic clock[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10.
- [3] CHEN S F, LIU C, FAN L F, et al. An overview of the optically detected magnetic-state-selected cesium beam clock[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10.
- [4] 史丰丰, 程梦飞, 李国俊, 等. 国产守时型原子钟长期性能分析[J]. *时间频率学报*, 2023, 46(4): 279-288. SHI F F, CHENG M F, LI J G, et al. The long-term performances analysis of the domestic timekeeping atomic clocks [J]. *Journal of Time and Frequency*, 2023, 46(4): 279-288. (in Chinese)
- [5] 贺轩, 袁志超, 陈佳源, 等. 国产高性能光抽运小铯钟研制进展[J]. *计测技术*, 2023, 43(3): 99-106. HE X, YUAN Z C, CHEN J Y, et al. Progress of domestic high performance optically pumped compact cesium clocks[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(3): 99-106. (in Chinese)

- [6] 李源昊, 陈思飞, 刘晨, 等. 高性能磁选态光检测铯原子钟的研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(2): 112-119.  
LI Y H, CHEN S F, LIU C, et al. Research on high-performance compact cesium clock using magnetic state selection and optical detection. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(2): 112-119. (in Chinese)
- [7] 赵杏文, 韦强, 李东旭, 等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 1-8.  
ZHAO X W, WEI Q, LI D X, et al. Progress on optically pumped cesium beam frequency standard [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(1): 1-8. (in Chinese)
- [8] 陈江, 马沛, 王骥, 等. 小型磁选态铯原子钟产品化进展[J]. 宇航计测技术, 2020, 40(3): 12-16, 45.  
CHEN J, MA P, WAGN J, et al. Progress in commercialization of compact magnetically selected cesium atomic clocks[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2020, 40(3): 12-16, 45. (in Chinese)
- [9] 赵晓军. 用于原子钟的激光器件及发展现状[C]//2009全国时间频率学术会议论文集, 成都, 2009: 266-270.  
ZHAO X J. Laser devices for Atomic clocks and their development status [C]// Proceedings of the 2009 National Conference on Time and Frequency, Chengdu, 2009: 266-270. (in Chinese)
- [10] CHEN S F, LIU C, FAN L F, et al. A new magnetic state selection method in high-performance optically detected compact cesium beam clocks[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(4).
- [11] LIU C, CHEN S F, CHEN Z Y, et al. Improving the short-term frequency stability of a magnetic-state-selected cesium beam clock with optical detection[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(7).
- [12] CHEN J Q, CHEN C, SUN J J, et al. Linewidth measurement of a narrow-linewidth laser: principles, methods, and systems[J]. Sensors, 2024, 24(11).
- [13] BAI Z X, ZHAO Z A, QI Y Y, et al. Narrow-linewidth laser linewidth measurement technology [J]. Frontiers in Physics, 2021.
- [14] 崔明斌, 黄俊刚, 杨修伦. 激光线宽测量方法的研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 62-89.  
CUI M B, HUANG J G, YANG X L. Review on methods for laser linewidth measurement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 62-89. (in Chinese)
- [15] 张晓菁, 白金海, 胡栋. 激光器自动锁频方法研究综述[J]. 计测技术, 2024, 44(1): 60-72.  
ZHANG X J, BAI J H, HU D. Review of automatic frequency locking methods for lasers [J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(1): 60-72. (in Chinese)
- [16] SHI T, WEI Q, QIN X, et al. Dual-frequency optical-microwave atomic clocks based on cesium atoms [J]. ArXiv preprint arXiv:2024.
- [17] DIMARCQ N, GIORDANO V, CÉREZ P. Statistical properties of laser-induced fluorescence signals [J]. Applied Physics B - Lasers and Optics, 1994, 59(2): 135-145.

(本文编辑: 刘宇轩, 米若鑫)



**第一作者:** 范利锋(1989—), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为原子钟及其技术。



**通信作者:** 王延辉(1978—), 男, 长聘教授, 博士, 教育部长江学者, 入选国家重大人才计划, 长期从事铷原子钟、铯原子钟的研究。