

引用格式:陈徐宗,贺轩,袁志超,等. 北京大学小型化光抽运热、冷铯束原子钟研究进展[J]. 时间频率学报, 2022,45(2):104-109.

北京大学小型化光抽运热、冷铯束原子钟研究进展

陈徐宗, 贺轩, 袁志超, 谢伟滨, 陈楠, 熊择正, 方声伟, 王青, 齐向晖

(北京大学 量子电子学研究所, 北京 100871)

摘要:北京大学光抽运铯束原子钟小组致力于发展连续式光抽运铯束原子钟的关键技术, 为长时间守时、导航定位等军事和科研领域的应用提供关键设备。本文总结了国内外守时型小铯钟的研究现状, 分析和比较了不同小组的磁选态、光抽运等小铯钟的方案、特点和结果。其中, 北京大学光抽运铯束原子钟小组所研制的小铯钟通过长达 90 d 的长期测试, 在保持了 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 短期稳定度的情况下, 进一步得到了 7×10^{-15} 的 5 d 稳定度, 准确度优于 3×10^{-13} 。另外, 本文还介绍基于二维磁光阱的冷原子铯束光抽运原子钟的研究结果, 我们得到了线宽为 40 Hz 的 Ramsey 信号, 这为下一步获得连续冷原子束原子钟奠定了基础。

关键词:小铯钟; 光抽运; 稳定度; Allan 标准偏差

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2022-02-0104-06

Development of compact optically pumped hot and cold cesium beam atomic clocks in Peking University

CHEN Xu-zong, HE Xuan, YUAN Zhi-chao, XIE Wei-bin, CHEN Nan, XIONG Ze-zheng, FANG Sheng-wei, WANG Qing, QI Xiang-hui

(Institute of Quantum Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The ACT (atomic clock technology) group of Peking University is committed to developing key technologies in continuous optically pumped cesium beam atomic clocks. We want to provide core equipments for long-time punctuality, navigation and positioning, and other military and scientific research applications. We summarized, analyzed and compared the schemes, characteristics and results of different compact cesium clocks domestic and abroad. Among them, the compact optically pumped cesium beam atomic clock developed by our group has passed 90 days test and maintained $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ Allan deviation. The 5-day stability of 7×10^{-15} is obtained and the accuracy is better than 3×10^{-13} . In addition, we also introduce the results of cold cesium beam optically pumped clock based on 2D-MOT. We get the Ramsey signal with 40 Hz linewidth, which lays the foundation for the next step to obtain continuous cold atomic beam atomic clock.

Key words: compact cesium beam clock; optically pumped; stability; Allan deviation

收稿日期:2021-10-16;接受日期:2021-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11920101004;11334001;61727819;61475007);国家重点基础研究发展计划资助项目(2021YFA1400900;2021YFA0718300)

0 引言

铯束原子钟是目前世界上最重要的守时型原子钟之一^[1]。1950年,N. Ramsey^[2]提出了分离振荡场技术,催生了铯束原子钟。自从诞生以来,它们广泛地应用在长期守时、导航定位以及军事和科研等领域^[3]。与铷钟、氢钟等其他商业化的原子钟相比,铯束原子钟的优势在于它的长期稳定度。小型化的铯束原子钟可以分为磁选态铯束原子钟、光抽运铯束原子钟和新型冷原子铯束原子钟。国内外很多科研小组和公司都致力于小型化铯束原子钟的研究,诞生了一系列的科研成果或产品。北京大学光抽运铯束原子钟小组一直致力于发展连续式的光抽运铯束原子钟的关键技术,近些年来也取得了良好的进展。本文将回顾国内外铯束原子钟研究的方向和进展,着重介绍北京大学光抽运铯束原子钟小组的研究进展,并将这些研究成果和产品进行比较。

1 国内外铯束原子钟进展回顾

最早发展的铯束原子钟是磁选态的铯束原子钟,而直至目前市面上最成功的铯束原子钟产品是 5071A,它是最经典的磁选态铯束原子钟产品,诞生于 1992 年,由 HP 公司开发。目前 5071A 优质管的短期稳定度为 $8.5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$,长期稳定度优于 1×10^{-14} ^[4]。

随着激光技术的发展,光抽运铯束原子钟的概念应运而生^[5]。利用激光抽运制备原子态的方法,可以提升铯原子束流的有效利用率,从而提升铯束原子钟的信噪比,得到更高的稳定度,更有效的原子利用率也会提升光抽运铯束原子钟的预期寿命。2001年,美国的 GPS-III 光抽运铯束原子钟^[6]得到了目前光抽运铯束原子钟最佳的短期稳定度 $1.4 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$,2007年欧洲的 OSCAR 计划光抽运铯束原子钟^[7]也得到了 $1.4 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 的短期稳定度,持平美国的成果。在提升铯束原子钟短期稳定度方面,优化激光噪声是一个很好的途径^[8]。使用 ECDL(外腔半导体激光器)之后,光抽运铯束原子钟的激光噪声得以下降,短期稳定度将会得到提升。2001年 GPS-III,2007年 OSCAR,2002年 Cs-4 原子钟^[9]以及 2020年北京大学^[10]都有实验证明了 ECDL 的优势。但是,在长期守时型原子钟应用场景下,相比于 DFB(distributed feedback)激光器来说,ECDL 可靠性和稳定性不足,原因在于难以长期维持激光频率的锁定。原理上,外腔激光器所使用的光栅的角度和位置,会受到外界环境影响等发生变化,超过反馈极限后系统无法维持入锁;技术上,外腔激光器抗干扰性能较差,受到环境变化更易失锁,并且外腔激光器的跳模点较多,在失锁之后相对难以重新定位谱线并入锁。目前能够进行长期测量获得长期稳定度的铯束原子钟使用的均为 DFB 半导体激光器。北京大学的 BD-1024^[11]磁选态-光检测原子钟是一种混合磁选态技术和激光技术的原子钟,使用了 DFB 半导体激光器,在短期稳定度方面达到 $4.1 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$,5 d 稳定度达到 7.7×10^{-15} 。成都天奥公司的 TA-1000 系列光抽运铯束原子钟^[12]是国内最先进的商品化光抽运铯束原子钟产品,其稳定度达到 5071A 优质管水平。Oscilloquartz 公司^[13]曾经推出过商品化的光抽运铯束原子钟 OSA-3300,其稳定度指标可以达到 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 水平,长期稳定度的测试结果未知,目前在 Oscilloquartz 的官网上,OSA-3300 也悄然下架。本文报道了北京大学光抽运铯原子钟小组所研制的小铯钟,在通过长达 90 d 的长期测试后,保持了 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 短期稳定度的情况下,得到了 7×10^{-15} 的 5 d 稳定度。

在保证铯束原子钟的长期稳定度的优势的前提下,提升铯束原子钟的短期稳定度是一个重要的探索方向。根据铯束原子钟的稳定度公式:

$$\sigma(\tau) = \frac{\Delta\omega}{\omega_0} \frac{1}{R} \frac{1}{\sqrt{\tau}}, \quad (1)$$

式(1)中, ω_0 表示铯束原子钟的中心频率,对应为 9 192 631 770 Hz, $\Delta\omega$ 是 Ramsey 谱线的线宽, R 是信噪比, τ 是平均时间。铯束原子钟的信噪比(SNR)在现有技术下已经难以获得本质上的提高,根据稳定度公式,在铯原子钟跃迁中心频率不变的情况下,只能通过压窄 Ramsey 信号的线宽来实现稳定度的提升,而:

$$\Delta\omega \propto \frac{1}{T}, T \propto \frac{L}{v}, \quad (2)$$

式(2)中, T 是铯原子在两个微波腔之间自由演化的时间, L 是两个微波腔之间的距离, v 是铯原子束的飞行速度。对于小型化铯束原子钟来说, 受限于仪器体积, 现有的铯束管无法大幅度加长, 所以目前唯一可行的方式就是降低铯原子束流飞行的速度, 从而延长分离振荡场技术中自由演化的时间。瑞士小组 FOCS-2^[14] 率先提出并实现了连续式的冷铯束喷泉原子钟, 得到了 $6 \times 10^{-14} / \tau^{1/2}$ 的结果, 法国 PHARAO 小组^[15] 研制了空间冷铯束原子钟, 地面实验得到了 $3 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ 的运行结果, 在轨估计 $1.1 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ 。中国科学院上海光机所^[16] 实验验证了冷原子铷束空间原子钟可达到 $3 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ 的在轨频率稳定度。这些科研成果一定程度上证明了冷铯原子钟的可行性。同时, 激光冷却原子的 2D-MOT(二维磁光阱)技术在逐步成熟和小型化, 这将使得小型化的冷铯束原子钟的实现成为可能。

2 北京大学光抽运铯束原子钟进展

北京大学光抽运铯束原子钟小组从 20 世纪 90 年代开始就致力于发展光抽运铯束原子钟关键技术。近年来在传统的热铯束原子钟研究方面取得了突破性的进展, 同时在冷铯束原子钟研究方面进行摸索, 开展了一系列的实验, 目前取得了阶段性的成果。

2.1 热铯束原子钟研究进展

图 1 介绍了北京大学光抽运铯原子钟的基本结构, 它主要由铯炉、微波腔、C 场、激光系统、微波频率综合系统以及频率控制系统组成。

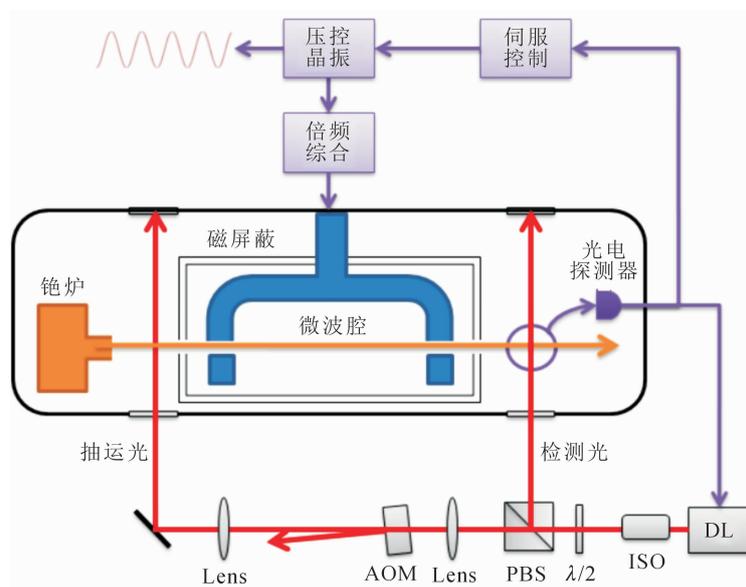


图 1 光抽运铯原子钟结构原理图

相比于其他小组和公司的光抽运铯束原子钟, 本小组的光抽运铯束原子钟的特点在于: ①使用了 DFB 半导体激光器; ②利用铯原子束荧光谱进行激光稳频; ③抽运激光使用铯原子 D2 跃迁 4-4 线, 检测激光使用铯原子 D2 跃迁 4-5 线; ④使用最大幅度进行微波功率的锁定; ⑤通过控制 Zeeman 频率锁定激光 C 场电流。国内外光抽运铯束原子钟的比较见表 1。

小型化光抽运铯束原子钟的主要指标可以分为短期稳定性和长期稳定性。根据近期测试结果, 本小组研制的光抽运小铯钟的短期稳定性最优化情况下可达到 $2.17 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ (DFB), 经过长达 90+ 天的测试, 本小组^[17] 的光抽运铯束原子钟在保证短期稳定性为 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 的情况下, 长期稳定性达到 7×10^{-15} 水平, 如图 2 所示。

表 1 国内外光抽运铯束原子钟

| 单位或型号 | 数据时间 | 类型 | 线宽 | Allan 标准偏差 | 特征 |
|----------------------------|------|------------|---------|------------------------------------|---|
| 5071A ^[4] | 1992 | 热束-磁选态-磁检测 | 未知 | $8.5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | |
| PKU-OMCC ^[11] | 2021 | 热束-磁选态-光检测 | 450 Hz | $4.1 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | DFB-束谱稳频 |
| TA-1000 ^[12] | 2021 | 热束-光抽运-光检测 | 未知 | $8.5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | 饱和吸收谱稳频 |
| LIP-CS3000 ^[18] | 2018 | 热束-磁选态-磁检测 | 未知 | $5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | |
| OSA-3300 ^[13] | 2017 | 热束-光抽运-光检测 | 未知 | $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | 官网下架、未知 |
| PKU-ACT | 2021 | 热束-光抽运-光检测 | 580 Hz | $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | DFB-束谱稳频 |
| OSCAR ^[7] | 2007 | 热束-光抽运-光检测 | 858 Hz | $1.1 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | ECDL 或 DBR($1.5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$) 束谱稳频-三相互作用区 |
| GPS-III ^[6] | 2001 | 热束-光抽运-光检测 | 750 Hz | $1.4 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | ECDL 或 DBR($3.8 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$) |
| Cs-4 ^[9] | 2002 | 热束-光抽运-光检测 | 660 Hz | $1.5 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | ECDL 或 DBR($2.8 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$) 饱和吸收谱稳频 |
| PKU-MTS ^[10] | 2020 | 热束-光抽运-光检测 | 600 Hz | $2 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ | ECDL-调制转移谱 |
| PKU-ACT | 2021 | 冷束-光抽运-光检测 | 40 Hz | - | ECDL-饱和吸收谱-双光抽运(连续) |
| FOCS-2 ^[14] | 2012 | 冷束-光抽运-光检测 | 0.96 Hz | $6 \times 10^{-14} / \tau^{1/2}$ | 高抛物线型(连续) |
| PHARAO ^[15] | 2020 | 冷束-光抽运-光检测 | 5.6 Hz | $3 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ | 光学黏团(脉冲) |
| 天宫二号 ^[16] | 2018 | 冷束-光抽运-光检测 | 0.9 Hz | $3 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ | Rb 束,在轨运行(脉冲) |

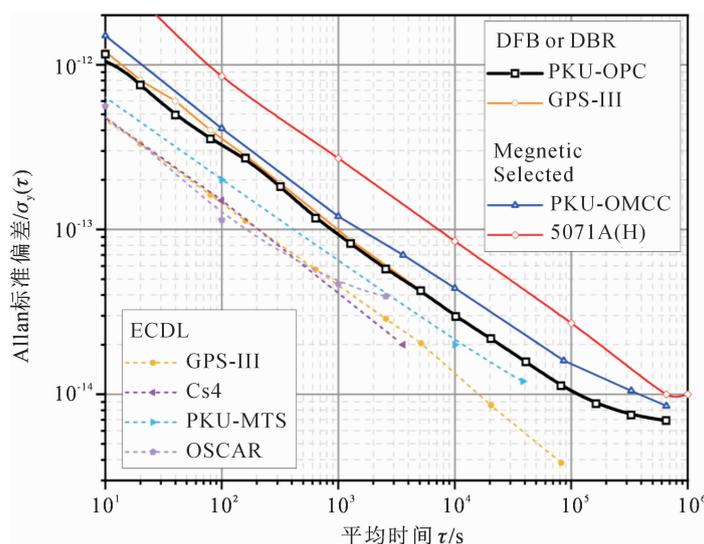


图 2 国内外各类小型化的铯束原子钟 Allan 标准偏差比较(数据、参考文献,见表 1)

2.2 冷铯束原子钟研究进展

为了进一步提升光抽运铯束原子钟的稳定度,我们开展了冷铯束原子钟的相关实验。在实验阶段,我们使用了 ECDL 激光器来验证冷原子铯束原子钟的可行性。实验原理如图 3 所示。我们使用 $2D^+$ -MOT (二维磁光阱)来形成二维的束型铯原子 MOT,利用一束推送激光将原子束推出 MOT 区域,使其依次经过抽运区,分离振荡场和检测区。与热铯束原子钟不同的是:①使用了两台外腔半导体激光器,一台锥形激光放大器;②使用铯原子的饱和吸收谱稳频,分别对两台激光器进行稳频^[19];③在抽运区,我们使用了双光抽运的方法,在原来单光抽运的基础上再进一步提升原子束的有效利用率。如图所示,我们实现 4 级的 $2D^+$ -MOT,

每一个的冷却光功率为 15 mW, 这些冷却光(4-5, 红失谐)中, 反抽运光(3-3)占比 10%, 纵向推射光(4-5, 零失谐)为 $120 \mu\text{W}$ 。检测光(4-5)功率为 3 mW 驻波场, 抽运光 1(4-3 抽运)的功率为 4 mW 驻波场, 抽运光 2(3-3 反抽运)的功率为 1 mW。最终, 我们获得了 1×10^{10} atoms/s 强度的原子束流量, 并通过双光抽运将原子的有效利用率提升到了 50% 左右, 原子的飞行速度约为 20 m/s, 最终获得的 Ramsey 条纹线宽为 40 Hz, 符合理论预期。相比于 FOCS-2 和 PHARAO, 我们的冷铯束原子钟还维持了近似直线的原子束流路径, 为方便之后进一步小型化, 整体微波腔结构继承了原有热铯束原子束管的设计。

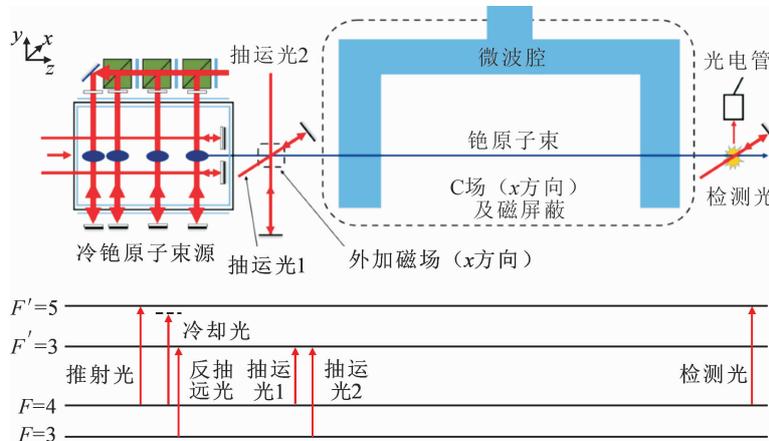


图 3 冷铯束原子钟的基本结构

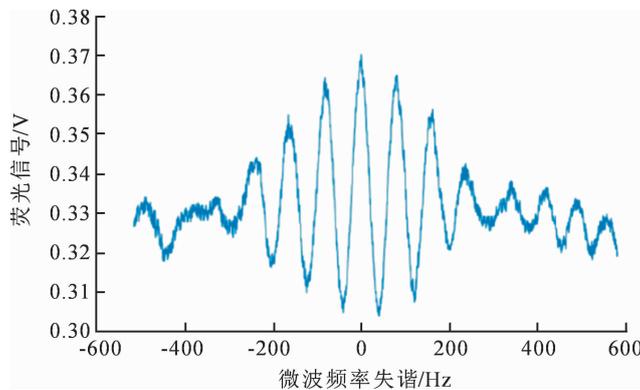


图 4 PKU-ACT 冷铯束光抽运铯束原子钟 Ramsey 花样

目前冷原子铯束原子钟的信噪比约为 300, 本小组下一步的研究方向为提高 2D^+ -MOT 所形成的原子束流强度提升信噪比, 然后缩小系统体积提升系统的稳定性。本小组的目标为最终实现商品化的冷铯束原子钟。

3 总结和展望

本文回顾和比较了国内外光抽运铯束原子钟的研究进展和现状, 介绍了北京大学小型化光抽运热、冷铯束原子钟的研究进展。北京大学的小型化光抽运热铯束原子钟获得了短期稳定性和长期稳定度的双重突破, 分别达到 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$ 和 7×10^{-15} , 两项指标均超越了 5071A 优质管, 商品化的小型化光抽运铯束原子钟将在近期推出。光抽运冷铯束原子钟获得了线宽约 40 Hz、信噪比约 300 的 Ramsey 信号, 如果其信噪比可以达到 10 000, 那么频率稳定度可达 $3 \times 10^{-12} / \tau^{1/2}$, 这是一种连续的, 具有高频率稳定度的原子钟。小型化的冷铯束原子钟将逐步研制并推出原理样机, 未来将发挥它的优势。

参考文献:

- [1] VANIER J, AUDOIN C. The classical caesium beam frequency standard: fifty years later[J]. *Metrologia*(S1681-7575), 2005, 42(3): 31-42.
- [2] RAMSEY N F. A molecular beam resonance method with separated oscillating fields[J]. *Physical Review*(S1079-7114), 1950, 78(6): 695-699.
- [3] VANIER J, AUDOIN C. The quantum physics of atomic frequency standards; Chapter 5[M]. Adam Hilger; IOP Publishing Limited, 1989.
- [4] Microsemi. HP5071A datasheet[Z]. 2017.
- [5] ARDITI M, PICQU E J L. A cesium beam atomic clock using laser optical pumping, preliminary tests[J]. *Journal of Physique Letters*(S1286-4854), 1980(41): 379-381.
- [6] LUTWAK R, EMMONS D, GARVEY R, et al. Optically pumped cesium-beam frequency standard for GPS-III[C]//Proceedings of the 33th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Long Beach; ION, 2001.
- [7] LECOMTE S, HALDIMANN M, RUFFIEUX R, et al. Performance demonstration of a compact, single optical frequency cesium beam clock for space applications[C]//IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva; IEEE, 2007.
- [8] DIMARCQ N, GIORDANO V, CERREZ P, et al. Analysis of the noise sources in an optically pumped cesium beam resonator[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*(S1557-9662), 1993, 42(2): 115-120.
- [9] GURANDELL S, HERMANN V, BARILLET R, et al. Operation of a compact cesium beam tube; how to improve the stability towards the $10^{-12} \tau^{-1/2}$ level[C]//Proceedings of the 2002 IEEE International Frequency Control Symposium and PDA Exhibition, New Orleans; IEEE, 2002.
- [10] SHANG H S, ZHANG T Y, MIAO J X, et al. Laser with 10^{-13} short-term instability for compact optically pumped cesium beam atomic clock[J]. *Optical Express*(S1094-4087), 2020, 28(5): 6868-6880.
- [11] LIU C, CHEN S, CHEN Z, et al. Improving the short-term frequency stability of a magnetic-state-selected cesium beam clock with optical detection[J]. *Review of Scientific Instruments*(S1089-7623), 2021, 92(7): 073302.
- [12] 成都天奥. TA-1000 datasheet[Z]. 2021.
- [13] Oscilloquartz. OSA-3300 datasheet[Z]. 2017.
- [14] DEVENOGES L, STEFANOV A, JOYET A, et al. Improvement of the frequency stability below the Dick limit with a continuous atomic fountain clock[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*(S1525-8955) 2012, 59(2): 211-216.
- [15] LAURENT P, ESNAUT, F X, GIBBLE K, et al. Qualification and frequency accuracy of the space-based primary frequency standard PHARAO[J]. *Metrologia*(S1681-7575), 2020, 57(5): 055005.
- [16] LIU L, LYU 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(1): 2760.
- [17] XIE W B, WANG Q, HE X, et al. Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard[J]. *Review of Scientific Instruments*(S1089-7623), 2020, 91(7): 074705.
- [18] 兰州空间技术物理研究所. LIP-CS3300 datasheet[Z]. 出版年不详.
- [19] XIE W B, WANG Q, HE X, et al. Optically pumped cold cesium beam atomic clock based on two-dimensional magneto-optical trap[C]//2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)[S. l.]; IEEE, 2020.