

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.10

汞离子微波钟及其研究进展

颜碧波^{1,2,3}, 陈义和^{1,2}, 柳浩^{1,2}, 余磊^{1,2*}

(1.中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 湖北武汉 430071;
2.中国科学院原子频标重点实验室, 湖北武汉 430071; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 汞离子微波钟是下一代星载原子钟、地面守时原子钟的有力候选者。文章介绍了本团队在汞离子微波钟的离子囚禁、缓冲气体冷却、微波综合器、汞光谱灯等关键技术取得的突破和进展, 在此基础上, 研制出了小型化汞离子钟整机, 其频率稳定度达到了 $2.3 \times 10^{-15}/10^5$ s, 同时开展了分区式线形阱汞离子微波钟的技术研究, 实现了离子的高效梭动及系统的闭环锁定, 测得频率稳定度 $3.45 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ($\tau = 10 \sim 10\,000$ s), 为汞离子微波钟技术的应用奠定了重要基础。

关键词: 原子钟; 汞离子; 离子阱; 微波综合器; 缓冲气体冷却; 汞光谱灯

中图分类号: TB939 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795(2023)03-0107-09

Mercury ion microwave clock and its research progress

YAN Bibo^{1,2,3}, CHEN Yihe^{1,2}, LIU Hao^{1,2}, SHE Lei^{1,2*}

(1.Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2.Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Mercury ion microwave clock is an ideal candidate for the next generation spaceborne atomic clock and ground-based timekeeping atomic clock. This paper briefly introduces the operation procedure and research status of mercury ion microwave clock, especially the latest research progress made by our group in the key technologies, including the ion trapping, buffer gas cooling, microwave synthesizer and mercury discharge lamp. On this basis, a miniaturized prototype of mercury ion clock has been built using these technologies and demonstrated frequency stability of $2.3 \times 10^{-15}/10^5$ s. An extended linear ion trap mercury ion clock is also under development. The ions can be trapped and shuttled back and forth efficiently in the extended ion trap. Frequency stability of $3.45 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ ($\tau = 10 \sim 10\,000$ s) has been measured in preliminary close-loop operating. All these works lay an important foundation for the further application of mercury ion microwave clock technology.

Key words: atomic clock; mercury ion; ion trap; microwave synthesizer; buffer gas cooling; mercury discharge lamp

0 引言

原子频标作为迄今为止最精确的计量仪器,

远远超过其他物理量的测量精度。人们常常将其他物理量(如长度、温度和电压等)转换成时间频率的测量来提高测量精度, 使得原子频标成为

收稿日期: 2023-01-13; 修回日期: 2023-02-06

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3904002)

引用格式: 颜碧波, 陈义和, 柳浩, 等. 汞离子微波钟及其研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 107-115.

Citation: YAN B B, CHEN Y H, LIU H, et al. Mercury ion microwave clock and its research progress[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):107-115.



精密测量等研究和应用领域的重要工具。原子频标的本质是以原子跃迁谱线的频率（周期）为参考，输出高精度的时频信号。因此，获得中心频率稳定、不受外界干扰、线宽很窄的原子谱线是实现高精度原子频标的主要研究内容^[1]。

囚禁离子技术是一种获得窄线宽谱线的有效方法，通过在特定构型的阱电极上施加电磁场，使离子被长时间地约束在无扰动的超高真空区域内，量子态相干时间长且没有器壁碰撞，能够有效地克服渡越时间增宽和碰撞增宽^[2]。同时，离子阱的囚禁势将离子运动限制在很小的范围内，当与微波辐射场相互作用时容易满足 Lamb-Dicke 条件，一阶多普勒效应可忽略^[3]；再结合离子冷却方法来降低离子温度，可以进一步抑制二阶多普勒效应。因此，囚禁离子频标具有极窄的线宽^[4]。

汞 ($^{199}\text{Hg}^+$) 离子微波钟的钟跃迁频率约为 40.5 GHz，是现有微波频标中最大的，且钟跃迁谱线磁场频移系数小；同时由于离子质量大、谱线的多普勒增宽小，有利于获得 Q 值高、对环境因素不敏感的鉴频谱线。汞离子微波钟在技术上，可以利用光谱灯抽运和缓冲气体冷却，避免使用技术难度较大的深紫外激光技术，结构简单、可靠性好。因此，汞离子微波频标不仅具有优异的短期和长期频率稳定度预期，并且能够实现长期连续运行，易于小型化，是下一代星载原子钟、地面守时原子钟和微型超稳时钟的有力候选者^[5-7]。

文章介绍了汞离子微波钟的工作原理及国内外研究进展，重点介绍了在汞离子微波钟研制方面取得的关键技术突破和整机研制进展情况，最后对汞离子微波钟的研制工作进行了总结和展望。

1 汞离子微波钟工作原理和研究现状

1.1 汞离子微波钟工作原理

汞离子微波钟是一种被动型频标，利用囚禁 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子的基态 $F = 0, m_F = 0$ 到 $F = 1, m_F = 0$ 的超精细能级跃迁谱线作为钟跃迁谱线，利用 ^{202}Hg 同位素光谱灯作为抽运光源。 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子和 $^{202}\text{Hg}^+$ 离子的能级示意图如图 1 所示，汞离子微波钟的原理示意图如图 2 所示。

首先利用离子阱实现 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子的囚禁，并利

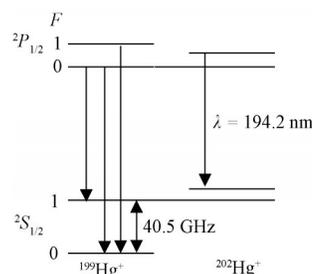


图 1 $^{199}\text{Hg}^+$ 和 $^{202}\text{Hg}^+$ 两种离子能级示意图

Fig.1 Energy level diagram of $^{199}\text{Hg}^+$ and $^{202}\text{Hg}^+$

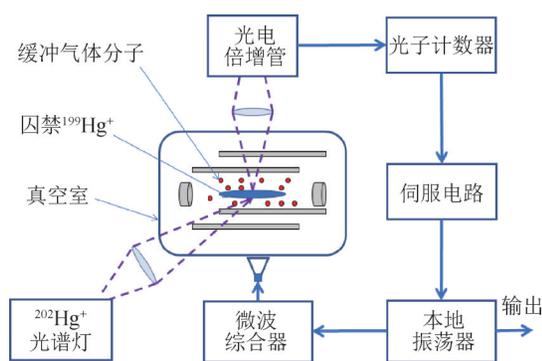


图 2 汞离子微波钟原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of mercury ion microwave clock

用缓冲气体与离子间的碰撞，实现囚禁 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子冷却。本地振荡器的输出信号经过微波综合器倍频为频率约 40.507 347 GHz 的微波信号，利用该微波信号去激励诱发囚禁 $^{199}\text{Hg}^+$ 基态超精细能级的钟跃迁，利用 ^{202}Hg 同位素光谱灯发出 194.2 nm 的谱线进行荧光检测，得到能够反映微波频率与钟跃迁频率偏差的荧光计数信号。通过伺服电路将该荧光计数值转换成频率纠偏信号，利用该纠偏信号对本地振荡器的输出频率进行反馈控制，实现钟跃迁频率对本地振荡器的锁定，从而得到稳定的频率输出。

1.2 汞离子微波钟研究现状

1981 年法国原子钟 (LHA) 实验室研制出世界上第一台双曲面型阱汞离子微波钟，10 ~ 3 500 s 的短期稳定度为 $3.6 \times 10^{-11} / \tau^{1/2}$ ^[8]。1987 年美国惠普公司研制的 3 台双曲面型阱的汞离子微波钟，在美国海军天文台连续运行了 8 年，其 1 天稳定度为 6.7×10^{-15} ，10 天稳定度为 4.7×10^{-15} ^[9]。

美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 从 20 世纪 80 年代末开始至今，始终致力于研究汞离子微波钟。JPL 先后开展了双曲面型

阱汞离子微波钟、线形阱汞离子微波钟和分区式线形阱汞离子微波钟的研制^[10-12]。2008年JPL报道其研制的汞离子微波钟的长期稳定度达到了 2×10^{-16} ，天漂移率优于 2.7×10^{-17} ，如图3所示^[7]。2019年6月JPL研制的汞离子微波钟（深空探测原子钟）发射升空，体积为17 L，质量为16 kg。其在轨运行的天稳定度为 3×10^{-15} ，天漂移率为 3×10^{-16} ，是目前长期稳定度最好的在轨星载钟，如图4所示^[13]。汞离子微波钟成为继铷原子钟、铯原子钟和被动氢原子钟之后的第四种星载原子钟^[6]。

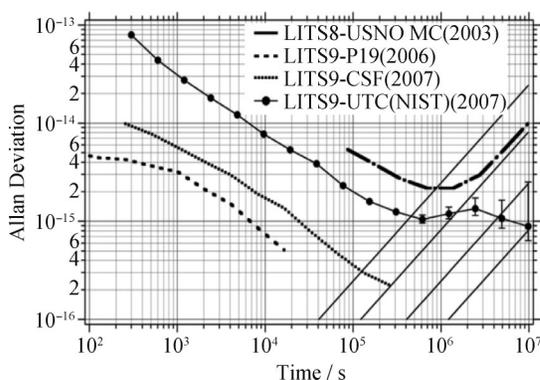


图3 JPL汞离子微波钟长期频率稳定度

Fig.3 Long term frequency stability of JPL mercury ion microwave clock



图4 JPL深空探测原子钟

Fig.4 Diagram of JPL atomic clock for deep space exploration

近年来，在美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）的原子钟稳定度增强（ACES）等计划的支持下，JPL正在开展微型汞离子微波钟的研究，目前已经取得了一定研究进展^[14-17]，研制出了低功耗、微型化的光谱灯，体积约30 mL的真空系统，如图5所示，并实现了原理样机的闭环锁定，短期稳定度约为 $1 \times 10^{-11} / \tau^{1/2[5]}$ 。

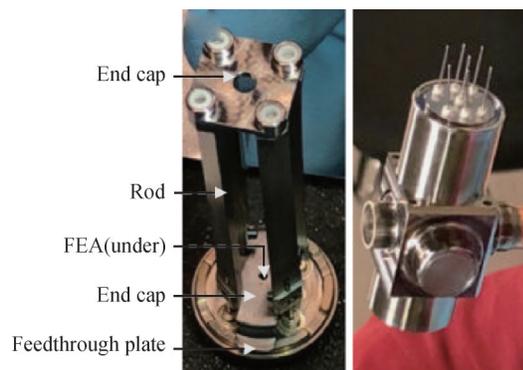


图5 JPL微型汞离子微波钟真空系统实物图
Fig.5 Photograph of vacuum tube of JPL micro mercury ion microwave clock

国内开展汞离子微波钟研究工作的单位有中国科学院精密测量科学与技术创新研究院（简称精密测量院）^[18]、北京无线电计量测试研究所（简称航天203所）^[19]、中国空间技术研究院西安分院（简称航天504所）^[20]、兰州空间技术物理研究所（简称航天510所）^[21]等。其中，精密测量院是国内最早开始研究汞离子微波钟的单位，取得了多项关键技术的突破，并研制出了小型化的汞离子微波钟整机^[22-25]。

2 中科院精密测量院汞离子微波钟研究进展

2.1 关键技术攻关情况

汞离子微波钟研制过程中涉及离子阱囚禁及操控技术、缓冲气体冷却技术、微波综合器和汞光谱灯等关键技术。

2.1.1 离子囚禁及操控技术

离子囚禁及操控技术是汞离子微波钟的核心技术，通过在特定构型的阱电极上施加射频和直流电场，在超高真空区域产生随时间变化的势阱，能够将离子的运动尺度限制在很小的范围内，从而实现离子的囚禁。被囚禁的汞离子不与真空器壁发生碰撞，能够有效地克服器壁碰撞增宽并且运动尺度小，与汞离子的钟跃迁微波辐射场相互作用时，能够消除一阶多普勒展宽，这是汞离子微波钟能够实现优异频率稳定度的关键。

线形四极阱由四根长直形电极杆（简称四极杆）和两个帽电极组成，在四极杆之间和两个帽电极上施加特定的电场，就能将离子囚禁在四极

杆的中心轴线位置处。线形四极阱具有结构简单、易小型化等优点, 适合应用于小型化汞离子微波钟和微型汞离子微波钟。

离子能否稳定囚禁在线形阱中是影响频率稳定度的重要因素。一方面, 囚禁离子数的多少直接决定了系统的信号强度和短期稳定度; 另一方面, 囚禁离子数的变化所引起的二阶多普勒频移也会导致原子钟长期稳定性的恶化^[11]。精密测量院经过多年的技术攻关, 采用理论分析和实验相结合的研究方法^[26], 逐步改良离子阱几何结构、优化和稳定囚禁场参数, 能够在四极阱中实现汞离子的稳定囚禁。通过测量离子荧光信号随时间的变化, 如图6所示, 计算得到离子囚禁时间长达73 h^[25]。

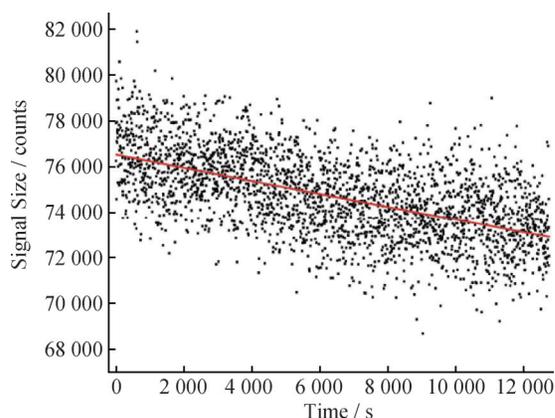


图6 离子荧光信号随时间的变化

Fig.6 Ion fluorescence signal over time

二阶多普勒频移是汞离子微波钟的主要频移之一。JPL研究发现, 二阶多普勒频移与囚禁的离子的密度有关^[27-29]。为了减小二阶多普勒频移, 进一步提高汞离子微波钟的长期稳定度, 可以采用分区式线形阱。分区式线形阱将光抽运/检测区和微波共振区分开, 在光抽运/检测区进行离子装载, 光抽运选态和光检测, 在微波共振区进行微波作用。光抽运/检测区使用线形四极阱, 微波共振区使用线形多极阱。多极阱一般采用12根或者16根电极杆, 对应的分区式线形离子阱分别被称为分区式四极-十二极阱或者分区式四极-十六极阱。通过调节两个阱的直流电势差来操控离子的运动, 使离子在两个阱区之间往复梭动, 使得光抽运选态和微波共振过程在空间上分离, 消除了光频移, 并且微波共振区没有光学窗口, 有利于缩小磁屏

蔽体积、提高磁屏蔽效率。此外, 由于微波共振区阱的长度较光抽运/检测区长, 离子梭动到微波共振区后密度降低, 二阶多普勒频移进一步减小。

稳定地操控离子的运动使其在四极阱和多极阱之间往复梭动过程中不出现损失, 是实现分区式线形阱汞离子微波钟的关键。通过数值模拟和实验研究, 突破了离子梭动技术; 通过测量离子荧光信号的变化判断离子梭动过程中的损失, 成功实现了连续梭动, 离子数几乎没有损失^[30]。

2.1.2 缓冲气体冷却技术

离子阱技术能够消除一阶多普勒增宽, 但射频加热效应使得离子温度升高, 引起了显著的二阶多普勒频移, 因此, 必须采取适当的冷却措施来降低囚禁离子的温度, 减小二阶多普勒频移。

缓冲气体碰撞冷却具有简单易行、不受离子种类和能级结构限制、冷却的离子数目多等特点, 广泛应用于离子阱频标中。同时, 这一技术摒弃了复杂的激光冷却系统, 有利于汞离子微波钟的小型化和工程化。缓冲气体冷却的基本原理是利用化学性质稳定的轻质缓冲气体分子与离子的频繁碰撞, 引起离子运动的粘滞阻尼。在该效应的作用下, 经过多次碰撞离子的宏运动幅度减小, 离子云向阱中心坍塌, 由于阱中心区域离子受到的非谐势减小, 加热效应会因宏运动幅度的衰减而减弱, 使得离子温度降低从而实现冷却。汞离子微波钟一般采用惰性气体作为缓冲气体, 实现缓冲气体冷却的关键是向真空系统中馈入缓冲气体。精密测量院提出了具有自主知识产权的气体馈入装置^[31]。

2.1.3 微波综合器

微波综合器是汞离子微波钟关键部件之一。汞离子微波钟的钟跃迁频率为40.5 GHz, 谱线线宽可达MHz量级, 因此, 需要微波综合器把压控振荡器输出的10 MHz频率变频至40.5 GHz, 并且频率分辨率应优于MHz。微波综合器的相位噪声通过Dick效应影响汞离子微波钟的长期稳定度^[32-33]。

针对汞离子微波钟的微波综合器输出频率高、分辨率高的特点, 研制的微波综合器采用了模拟锁相技术和直接数字频率综合技术相结合的方法。模拟锁相技术有利于实现高频率信号的合成, 并且能

够降低微波综合器的相位噪声；直接数字频率合成技术合成的信号具有分辨力高的特点。研制的微波综合器的频率分辨力约为 $10 \mu\text{Hz}$ ，使用 OCXO8607 作为参考源，测得绝对相位噪声约为 $-47 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ Hz}$ ， $-67 \text{ dBc/Hz}@10 \text{ Hz}$ ， $-70 \text{ dBc/Hz}@100 \text{ Hz}$ ， $-89 \text{ dBc/Hz}@1 \text{ kHz}$ ，如图 7 所示。

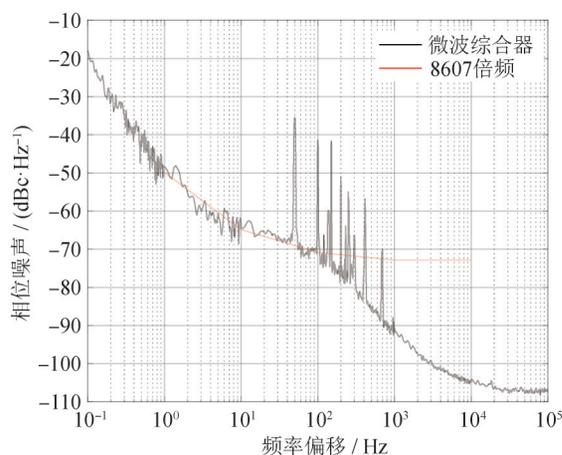


图 7 微波综合器的绝对相位噪声

Fig.7 Absolute phase noise of microwave synthesizer

2.1.4 汞光谱灯技术

汞光谱灯用于囚禁离子的光抽运和光检测，汞光谱灯一方面影响原子钟的性能，另一方面它的寿命很大程度上决定了汞离子微波钟的寿命。

汞光谱灯的发光泡内充有同位素 ^{202}Hg 和启辉气体，放置在高频振荡源的耦合线圈中，受高频信号激励发出的光谱包含 $^{202}\text{Hg}^+$ 离子的 194.2 nm 谱线，可以对囚禁离子进行光抽运和光检测。其作用原理可以结合图 1 说明。 $^{202}\text{Hg}^+$ 离子的核自旋为零，基态没有子能级，基态到第一激发态的跃迁谱线波长约为 194.2 nm ，与 $^{199}\text{Hg}^+$ 基态 $F=1$ 态到激发态跃迁谱线波长相近。多普勒效应引起的谱线增宽使得两个谱线产生交叠，因此，可以利用 $^{202}\text{Hg}^+$ 离子发出的 194 nm 谱线激发 $^{199}\text{Hg}^+$ 的基态子能级 $F=1$ 到第一激发态的能级跃迁。汞离子微波钟在一个探测周期内，需要进行光抽运、微波探测和光检测三个过程。光抽运选态时， 194.2 nm 离子谱线使囚禁的 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子布居数集中到基态超精细能级 $F=0$ ， $m_F=0$ 上。进行光检测时， 194.2 nm 离子谱线激励囚禁的 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子基态 $^2S_{1/2}(F=1)$ 到激发态 P 态的跃迁，进而产生 P 态到 S 态的荧光信

号，该荧光信号的大小正比于钟跃迁几率的大小，反映了微波频率与钟跃迁频率的偏差。光谱灯产生 194.2 nm 的离子谱线的强度、稳定性和抽运效率直接影响谱线信号的信噪比。

研究团队通过技术攻关，打破国外技术垄断，实现了汞发光泡制造工艺的自主知识产权，设计光谱灯的激励电路和热结构，研制出了小型化的汞光谱灯，如图 8 所示。利用光谱仪测量了小型化汞光谱灯的光谱，得到了 194.2 nm 的离子谱线，如图 9 所示。目前正在开展长寿命发光泡的技术研究，预期能够将汞光谱灯寿命提高 $2 \sim 3$ 倍。



图 8 小型化光谱灯实物图

Fig.8 Photograph of miniaturized mercury discharged lamp

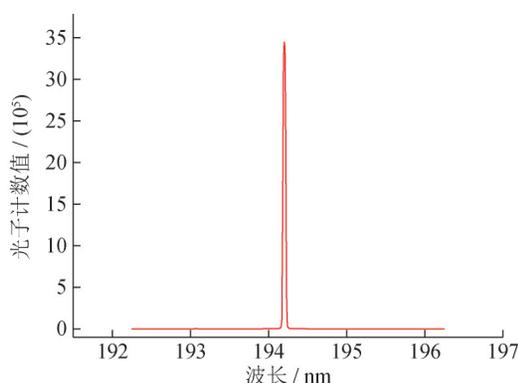


图 9 汞光谱灯的 194.2 nm 离子谱线

Fig.9 194.2 nm ion spectral line of mercury discharged lamp

2.2 汞离子微波钟整机研究进展

在实现汞离子微波钟各项关键技术的突破后，开展了面向星载应用的小型化样机和面向守时应用的高性能样机的研制。

2.2.1 面向星载应用的小型化汞离子微波钟进展

小型化汞离子微波钟利用四极阱线形囚禁离

子，物理系统使用吸气剂实现长时间、无能耗的真空维持，真空系统的体积也得到大幅度缩小（约15 L）。利用Ramsey方法获得线宽0.24 Hz的钟跃迁谱线。通过优化离子阱结构及其囚禁参数，提高囚禁离子数的稳定性，优化样机的热结构和温控精度，抑制环境因素对稳定度的影响，使得小型化汞离子微波钟在大气环境下长期稳定度达到了 $2.3 \times 10^{-15}/10^5$ s，如图10所示。

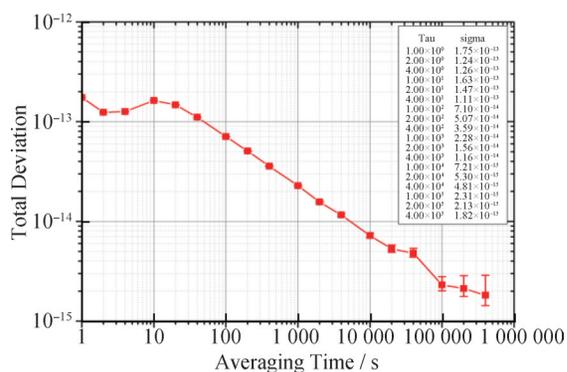


图10 小型化汞离子微波钟稳定度

Fig.10 Stability of miniaturized mercury ion microwave clock prototype

此外，还建立了真空环境模拟装置，开展了小型化样机关键部件真空适应性研究。通过优化光谱灯结构和电路设计，解决了光谱灯在真空环境下工作的适应性问题，如图11所示。在此基础上，进一步提高了整机集成度，结合真空环境进行了热结构再设计，开展了小型化星载样机研制，如图12所示，目前已初步实现了真空环境下的闭环锁定。

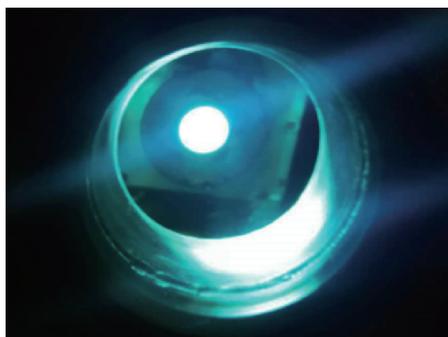


图11 真空中工作的汞光谱灯

Fig.11 Photograph of mercury discharged lamp operating in vacuum

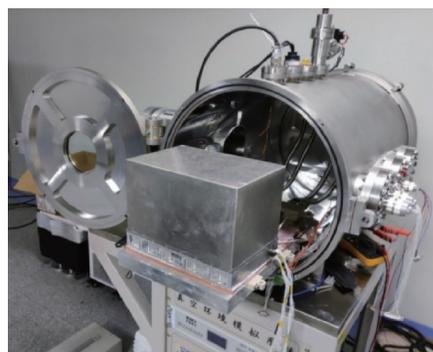


图12 小型化星载样机及其真空环境模拟系统

Fig.12 Photograph of miniaturized prototype of spaceborne atomic clock and its vacuum environment simulation system

2.2.2 面向守时应用的高性能样机进展

针对守时、授时等地面应用对长期稳定度和漂移率的更高要求，面向守时应用的高性能样机采用在长期稳定度方面更具优势分区式线形阱架构。如图13所示，样机采用吸气剂维持真空的方案，其长宽高尺寸约为900 mm × 600 mm × 300 mm，有利于提高本底真空度和整机集成度，便于进行整机温控和后期的搬运比对。



图13 分区式线形阱样机物理系统实物照片

Fig.13 Photograph of the physics packages of prototype of extended linear ion trap atomic clock

在十二极阱区域采用三层圆柱形磁屏蔽，屏蔽效率相比单一四极阱系统得到了极大提升，径向屏蔽因子达到 1×10^6 ，轴向的屏蔽因子约为 5×10^4 。C场线圈是以螺线管为主线圈并在两端增加了补偿线圈，进一步提高了十二极阱区域的磁场均匀度。样机的长期稳定度预期能够达到 10^{-16} 量级。目前该样机已经实现了离子的高效梭动，并成功在多极阱中探测到了线宽约0.135 Hz的钟跃迁谱线，如图14所示

根据测量获得的谱线，利用稳定度和散弹噪

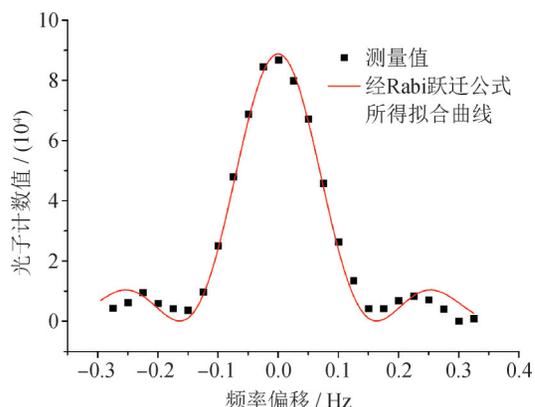


图 14 分区式线形阱汞离子微波钟的钟跃迁谱线

Fig.14 Spectrum of the clock transition of extended linear ion trap mercury ion microwave clock

声关系式 (1) [34], 计算得到理论上的稳定度为 $7.8 \times 10^{-14} / \tau^{1/2}$ 。

$$\sigma = \frac{1}{\pi \times SNR \times Q} \sqrt{\frac{T}{\tau}} \quad (1)$$

式中: SNR 为谱线的信噪比; Q 为谱线的品质因数; T 为钟周期, 即完成一次测量的时间, 包括光检测时间、光抽运时间、离子装载时间、离子核动时间和微波作用时间。

目前, 正在开展分区式线形阱汞离子微波钟的闭环锁定实验。将压控振荡器的输出信号锁定到钟跃迁谱线的中心峰处, 从而输出标准频率。输出的频率值与氢原子钟进行比对, 实验初步测得的频率稳定度为 $3.45 \times 10^{-13} / \tau^{1/2}$ ($\tau = 10 \sim 10\,000$ s), 测量时间为 1.6×10^5 s, 如图 15 所示。目前稳定度的测量结果与散弹噪声存在一定的差距, 这主要是受 Dick 效应的影响。根据前期的研究工

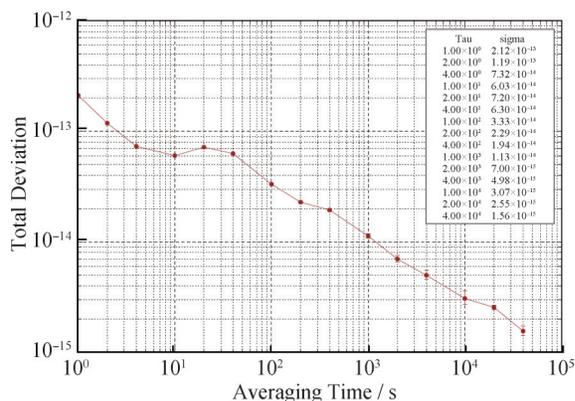


图 15 分区式汞离子微波钟初测稳定度

Fig.15 Measured stability of the extended mercury ion microwave clock prototype

作[35], Dick效应对频率稳定度的影响在 10^{-13} 量级, 是目前限制系统频率稳定度的主要因素。此外, 光电倍增管的暗电流噪声、压控振荡器压控电路噪声等也会对系统的频率稳定度产生影响。评估和抑制系统的 Dick 效应和电路噪声是进一步提高系统稳定度的关键。

3 结论

汞离子微波钟有望在未来卫星导航系统和综合 PNT 系统的建设中发挥重要作用。精密测量院经过多年的技术攻关, 已经完全突破了汞离子微波钟的各项关键技术, 研制出了小型化的汞离子微波钟样机, 实现了分区式线形阱汞离子微波钟的闭环锁定。未来将继续开展小型化汞离子微波钟的技术优化, 提高其技术成熟度等级, 力争实现小型化汞离子微波钟的星载和商品化应用。继续开展分区式线形阱汞离子微波钟的研究, 提高其性能指标, 满足新一代高性能守时钟的应用需求, 为国家综合 PNT 体系的建设提供技术储备。

参考文献

[1] 王义遒, 王庆吉. 量子频标与波谱谱线的频移和增宽 [J]. 物理, 1981.
WANG Y Q, WANG Q J. Quantum frequency standard and frequency shift and broadening of spectral lines [J]. Physics, 1981. (in Chinese)

[2] PAUL W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles [J]. Reviews of Modern Physics, 1990, 62: 531 - 540.

[3] DICKE R H. The effects of collisions upon the doppler width of spectral lines [J]. Physical Review, 1952, 89 (2): 472 - 473.

[4] 张首钢. 关于离子阱频标 [J]. 现代计量测试, 1998, 6 (3): 8 - 13.
ZHANG S G. Trapped ion frequency standard [J]. Modern Measurement and Test, 1998, 6(3): 8 - 13. (in Chinese)

[5] HOANG T M, CHUNG S K, LE T, et al. Integrated physics package of micromercury trapped ion clock with 10^{-14} level frequency stability [J]. Applied Physics Letters, 2021, 119: 044001.

[6] JADUSZLIWER B, CAMPARO J. Past, present and future of atomic clocks for GNSS [J]. GPS Solutions, 2021, 25 (27): 1 - 13.

- [7] BURT E A, DIENER W A, TJOELKER R L. A compensated multi-pole linear ion trap mercury frequency standard for ultra-stable timekeeping[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control*, 2008, 55(12): 2586 – 2595.
- [8] JARDINO M, DESAINTFUSCIEN M, BARILLET R, et al. Frequency stability of a mercury ion frequency standard [J]. *Applied Physics A*, 1981, 24(2): 107 – 112.
- [9] MATSALUS D N, KUBLK A J, DEYOUNG J A, et al. Eight years of experience with mercury stored ion devices [C]//*Proc. 49th Ann. Symp. Freq. Control*, 1995: 86–109.
- [10] PRESTAGE J D, DICK G J, MALEKI L. JPL trapped ion frequency standard development[C]//*41st Annual Symposium on Frequency Control*, 1987: 20 – 24.
- [11] PRESTAGE J D, DICK G J, MALEKI L. New ion trap for frequency standard applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 1989, 66(3): 1013 – 1017.
- [12] TJOELKER R, PRESTAGE J D, MALEKI L. Record atomic frequency standard stability with mercury in a linear ion trap[Z]. *Telecommunications and data acquisition progress report*, 1996.
- [13] BURT E A, PRESTAGE J D, TJOELKER R L, et al. Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space[J]. *Nature* 2021, 595: 43 – 47.
- [14] GULATI G K, CHUNG S, PRESTAGE J, et al. Miniatured and low power mercury microwave ion clock [C]//*2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS)*, 2018: 1 – 2.
- [15] HOANG T M, CHUNG S, PRESTAGE J, et al. Demonstration of a mercury trapped ion clock prototype [C]//*2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS)*, 2021: 1 – 4.
- [16] HOANG T M, CHUNG S, LE T, et al. Stability demonstration of a 15 cc mercury-ion vacuum trap tube[C]//*2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS-ISAF)*, 2020: 1 – 4.
- [17] HOANG T M, CHUNG S, LE T, et al. Performance of micro mercury trapped ion clock [C]//*2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC)*, 2019: 1 – 2.
- [18] SHE L, WANG W M, BAI L, et al. Fluorescence detection and buffer gas cooling of trapped mercury ions in paul trap[J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25: 1653.
- [19] 王暖让, 陈星, 赵环, 等. 汞离子微波频标汞光谱灯设计[J]. *宇航计测技术*, 2020, 40(3): 27 – 30.
- WANG N R, CHEN X, ZHAO H, et al. Design of mercury lamp for trapped ion frequency standards[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2020, 40(3): 27 – 30. (in Chinese)
- [20] 辛弄潮, 蒙艳松, 张荣彦, 等. 星载汞离子微波钟射频无极灯折射透镜仿真设计[J]. *空间电子技术*, 2018, 15(5): 22 – 26, 34.
- XIN N C, MENG Y S, ZHANG R Y, et al. Refractive lenses stimulation design for electrodeless lamp of Hg⁺ ion atomic clock[J]. *Space Electronic Technology*, 2018, 15(5): 22 – 26, 34. (in Chinese)
- [21] 王朝全, 涂建辉, 党文强, 等. 应用于微波钟的十六极线型阱中汞离子囚禁数值及仿真研究[J]. *时间频率学报*, 2019, 42(2): 115 – 127.
- WANG C Q, TU J H, DANG W Q, et al. Numerical analysis and simulation of trapping mercury ions in a linear trap with sixteen poles applied to microwave clock[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2019, 42(2): 115 – 127. (in Chinese)
- [22] LIU H, YANG Y N, HE Y H, et al. Microwave - optical double-resonance spectroscopy experiment of ¹⁹⁹Hg⁺ ground state hyperfine splitting in a linear ion trap [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31(6): 063201.
- [23] 邵辉丽, 朱燕舞, 李交美, 等. 线型离子阱中冷却离子所需高纯度氦气的渗透与实验[J]. *原子与分子物理学报*, 2004, 21(2): 199 – 202.
- SHAO H L, ZHU Y W, LI J M, et al. Diffusion experiment with high-purity helium gas for cooling ions in linear ion trap [J]. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2004, 21(2): 199 – 202. (in Chinese)
- [24] YANG Z H, LIU H, HE Y H, et al. Optimal microwave radiation field parameters for mercury Ion microwave frequency standards[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(6): 25 – 28.
- [25] LIU H, CHEN Y, YAN B, et al. Progress towards a miniaturized mercury ion clock for space application [C]//*China satellite navigation conference (CNSC) 2020 Pro-*

- ceedings. Singapore: Springer, 2020: 557 – 561.
- [26] YAN B, LI Y, WANG M, et al. Simulation of $^{199}\text{Hg}^+$ shuttling within an extended quadrupole linear ion trap [J]. International Journal of Mass Spectrometry, 2018, 430: 52 – 56.
- [27] PRESTAGE J D, TJOELKER R L, MALEKI L. Higher pole linear traps for atomic clock applications [C]//Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium (Cat. No. 99CH36313), 1999: 121 – 124.
- [28] BURT E A, YI L, TUCKER B, et al. JPL ultrastable trapped Ion atomic frequency standards [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics & Frequency Control, 2016, 63 (7): 1013 – 1021.
- [29] TJOELKER R L, PRESTAGE J D, MALEKI L. Improved timekeeping using advanced trapped-ion clocks [C]//Proceedings of the 31th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Dana Point, California, December 1999: 597 – 604.
- [30] YAN B, LIU H, CHEN Y, et al. Research progress on mercury ion microwave clock for time keeping [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC2022) Proceedings Vol III. Singapore: Springer, 2022: 345 – 352.
- [31] 朱燕舞, 邵辉丽, 李交美, 等. 过滤式温控氦气微漏阀: CN 03128287. 3B [P]. 2003-07-08.
ZHU Y W, SHAO H L, LI J M, et al. Filtered temperature-controlled helium micro-leakage valve: CN 03128287. 3B [P]. 2003-07-08.
- [32] DICK G J. Local oscillator induced instabilities in trapped ion frequency standards [C]// Proceedings of the 19th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Redondo Beach, California, December 1987: 133 – 147.
- [33] DICK G J, PRESTAGE J D, GREENHALL C A, et al. Local oscillator induced degradation of medium-term stability in passive atomic frequency standards [C]// Proceedings of the 22th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Vienna, Virginia, December 1990: 487 – 508.
- [34] PETER T H F. Trapped-ion and trapped-atom microwave frequency standards [J]. Reports on Progress in Physics, 1997, 60: 761 – 817.
- [35] CHEN Y H, SHE L, WANG M, et al. Evaluation of the frequency instability limited by Dick effect in the microwave $^{199}\text{Hg}^+$ trapped-ion clock [J]. Chinese Physics B, 2016(12): 189 – 193.

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 颜碧波 (1992—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为汞离子微波频标。



作者简介: 陈义和 (1983—), 男, 高级工程师, 硕士生导师, 主要负责汞离子微波钟电子线路及其相关技术研究。



作者简介: 柳浩 (1987—), 男, 工程师, 理学博士, 主要负责汞离子微波钟物理系统及其相关技术研究。



通讯作者: 余磊 (1979—), 男, 正高级工程师, 博士生导师, 主要研究方向为汞离子微波频标。中国科学院精密测量科学与技术创新研究院汞离子微波频标研究组负责人。