

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.03

基于囚禁离子的微波频标研究进展

秦浩然^{1,2}, 张建伟^{1,3*}, 王力军^{1,2,3*}

(1.精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084;

2.清华大学物理系, 北京 100084; 3.清华大学精密仪器系, 北京 100084)

摘要: 微波频标在卫星导航、精密计量、电力、通信等众多领域得到广泛应用, 发挥了不可或缺的重要作用。近些年, 国际上多家科研单位都在开展新型微波频标的研究, 其中基于囚禁离子的微波频标具有高性能和小型化等优势, 成为倍受关注的新一代微波频标。本文综述了离子阱微波频标的国内外研究现状, 介绍了 Penning 阱和 Paul 阱两种常见离子阱的工作原理, 以及 $^{199}\text{Hg}^+$, $^{113}\text{Cd}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$ 等离子微波频标的研究动机、应用领域、技术方案和实现的技术指标。最后, 本文对离子阱微波钟在守时钟、星载钟等方面的应用前景进行了展望。

关键词: 量子精密测量; 原子钟; 微波频标; 离子阱

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0029-14

Research progress of microwave frequency standards based on trapped ions

QIN Haoran^{1,2}, ZHANG Jianwei^{1,3*}, WANG Lijun^{1,2,3*}

(1. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100084, China;

2. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Microwave frequency standards have been widely used and played an indispensable role in many fields such as satellite navigation, precision measurement, electric power and communication. In recent years, many scientific research institutes in the world have been carrying out research on new-type microwave frequency standards. Among them, the microwave frequency standards based on trapped ions have the advantages of high performance and miniaturization, and have become a new generation of microwave frequency standards of great concern. This paper reviews the research status of ion trap microwave frequency standards, introducing the working principle of Penning trap and Paul trap, and the research motivation, application fields, physical solutions and technical specifications of various ion trap microwave frequency standards, including frequency standards based on $^{199}\text{Hg}^+$, $^{113}\text{Cd}^+$, $^{171}\text{Yb}^+$ and so on. Finally, the application prospects of ion trap microwave clocks in timekeeping, deep space exploration and other fields are introduced.

Key words: quantum precision measurement; atomic clock; microwave frequency standard; ion trap

0 引言

时间是国际单位制中七个基本物理量之一,

也是其中最基础的物理量。从农业时代季节节气对于农耕播种的影响, 到大航海时代对于船只定位与确定航线的方式, 再到现代的基于全球卫星

收稿日期: 2022-12-28; 修回日期: 2023-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA1402100)

引用格式: 秦浩然, 张建伟, 王力军. 基于囚禁离子的微波频标研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 29-42.

Citation: QIN H R, ZHANG J W, WANG L J. Research progress of microwave frequency standards based on trapped ions[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3): 29-42.



导航系统的定位导航、全球授时,人们对于时间计量的精度要求也越来越高。时间计量的工具也经历了从传统天体运动、摆钟与机械钟、石英晶振到原子钟的不断演化过程。

原子钟是以原子或离子的跃迁频率为基准实现精密频率输出的仪器。原子两能级间的跃迁频率作为原子的固有属性,在无外场扰动下始终保持不变,而且在世界上任何地方都有着相同的跃迁频率。原子的量子化和全同性特点使其很适合成为高复现性、高稳定度的频率参考。

1955年,英国国家物理实验室^[1]研制出了第一台高精度原子钟,其工作原理建立在 ^{133}Cs 原子的基态超精细分裂之上。原子钟的出现推动了精密计时的发展,也使得时间频率成为目前测量精度最高的物理量。1967年的国际计量大会^[2]将秒定义在 ^{133}Cs 原子基态超精细分裂跃迁之上,并将这个定义保留至今,而且其他基本单位的确立也越来越离不开秒的定义^[3]。

根据原子钟的工作频率可以将其分为微波频标与光频标。由于微波频标的工作频率(10 GHz量级)远小于光频标(100 THz量级),因此通常微波频标的准确度与稳定度均逊色于光频标。但是因为微波频标结构更加简单,技术更为成熟,其应用范围要广于光频标。传统的基于中性原子的微波钟已经发展得比较完善,包括汽室型微波频标、束管型微波频标、原子喷泉钟、主动氢钟及被动氢钟等。

基于离子的微波频标因其在小型化和稳定性方面的优势,受到更广泛的关注,成为新一代实用微波频标的候选。离子阱中的离子在真空条件下能较好地隔绝外部环境扰动带来的影响,相比磁光阱或者光晶格囚禁的中性原子,离子阱拥有更深的势阱深度,更容易开展激光冷却实验。基于囚禁离子的微波频标因不需要微波腔、梯度磁场、原子喷泉等复杂结构,故物理系统结构更为简单。囚禁离子具有更长的相干寿命,可得到更窄的线宽,更有利于微波频标准确度与稳定度等性能的提升。

文章简单介绍了离子阱囚禁离子的原理,并对汞离子、镉离子、镱离子等常见离子微波频标的发展进行介绍,最后总结展望离子频标的未来。

1 离子阱与离子囚禁

相较于中性原子而言,离子具有电荷,故陷阱与囚禁也相对容易一些。从20世纪50年代开始,不同种类的离子阱逐渐被发明和投入使用^[4-6]。根据Earnshaw定理^[7],自由空间中静电场散度处处为零,而使用静势场囚禁离子需要离子的平衡位置任意力场线都指向该点,即散度为负,所以无法仅仅使用静电场对带电离子实施囚禁。因此,Hans Dehmelt^[5]提出用静磁场辅助静电场囚禁离子,即Penning阱;Wolfgang Paul^[4]提出采用交流电场和静电场来囚禁离子,即Paul阱。他们二人也因为“对离子电磁囚禁的贡献”而与Norman Ramsey分享了1989年的诺贝尔物理学奖^[8]。

1.1 Penning阱

Penning阱的典型结构如图1所示,包括环形双曲面电极与端电极形成四极静电场,外加一个较强的磁场(约0.1 T)来辅助离子的囚禁,此外,还有一对补偿电极用来产生电势补偿杂散电荷、阱电极设计与磁场非理想等对囚禁电势造成的影响。

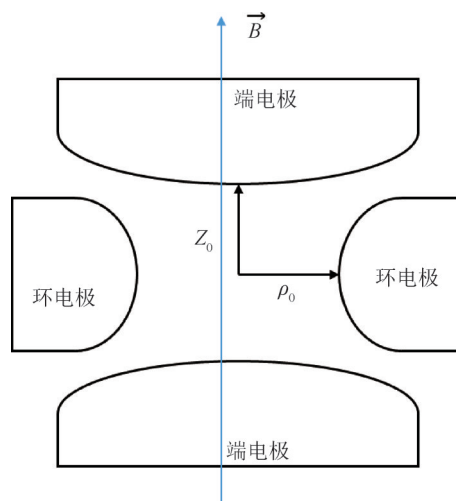


图1 Penning阱的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of Penning trap

对于一个电量为 Q ,质量为 m 的离子,在沿着 z 方向的均匀强磁场 B 中做频率为 ω_c 的回旋运动,公式为

$$\omega_c = \frac{|QB|}{mc} \hat{z} = \omega_c \hat{z} \quad (1)$$

式中: c 为光速。

带电粒子在Penning阱中受到磁场的径向束

缚,但未受到轴向束缚,故轴向的微扰会使离子沿着磁感线移动。因此Penning阱使用四极电势给出的静电恢复力对离子进行轴向约束,公式为

$$V = V_0 \frac{z^2 - \rho^2/2}{2d^2} \quad (2)$$

式中: ρ 和 z 分别为径向和轴向坐标; d 为Penning阱的尺寸特征参数, $d^2 = 1/2(z_0^2 + \rho_0^2/2)$; ρ_0 和 z_0 分别为径向和轴向的阱中心到阱电极的最小尺寸(如图1所示); V_0 为环形电极与端电极的电势差。

在理想Penning阱中,离子在轴向的运动遵循简谐运动方程为

$$\ddot{z} + \omega_z^2 z = 0 \quad (3)$$

频率为

$$\omega_z^2 = \frac{QV_0}{md^2} \quad (4)$$

同时考虑离子受到电场与磁场的作用,离子的径向的运动方程为

$$m\ddot{\rho} = q \left(E + \frac{\dot{\rho}}{c} \times B \right) \quad (5)$$

式中: $E = \frac{V_0}{2d^2} \rho$ 。

使用轴向和回旋频率 ω_z 与 ω_c 代入运动方程得到

$$\ddot{\rho} - \omega_c \times \dot{\rho} - \frac{1}{2} \omega_z^2 \rho = 0 \quad (6)$$

当 $\omega_z \rightarrow 0$ 时,方程简化为角频率为 ω_c 的匀速圆周运动; $-\frac{1}{2} \omega_z^2 \rho$ 来自于四极排斥势的径向项。四极排斥势,一方面因为排斥势使离心力降低,故离子回旋运动的频率从 ω_c 减少到了 ω_c' ; 另一方面,离子的快速回旋运动叠加在一个半径更大、运动更慢的磁控圆周运动轨道上,运动方向与回旋运动相同,其角速度为 $\omega_m \approx \omega_z^2/2\omega_c$ 。总运动可以视为轴向简谐运动、径向回旋运动与磁控运动的叠加,这三种运动频率满足

$$\omega_m \ll \omega_z \ll \omega_c \quad (7)$$

与其他种类离子阱相比, Penning阱不存在额外的加热机制(例如Paul阱中的射频加热效应),但是Penning阱的缺点在于阱中的离子处于亚稳定的平衡状态,且引入较大磁场(0.1 T量级)可能会对离子能级引入较大的频移。对此,可以选择某些特定种类的离子^[10-11],比如核自旋大于等于3/2,这些离子在某些能级对之间的跃迁与一阶磁场无关,可以减小磁场带来的影响。除此之外,

Penning阱受限于其囚禁电场的限制,结构单一且过于封闭,不利于激光的馈入与探测,限制了其在原子分子光学实验中的应用。

除了应用于离子微波钟, Penning阱还应用于各种精密测量的场合,如囚禁geonium原子进行g因子、质子电子质量比的高精度测量^[9],囚禁分子离子的高精度质谱测量^[12],单粒子层面上进行标准模型的检验等^[13-14]。

1.2 Paul阱

对于静电场而言,其散度处处为零,自由空间内不存在电势的最小值点,故不存在能稳定囚禁带电粒子的势阱。Paul阱引入了交流电场,可在自由空间产生三维回复力。Paul阱通常有双曲面电极、环形电极、线形电极、端帽电极等不同的形式,但其本质是在一组电极上加射频四极场进行径向囚禁,在另一组电极上加端电势进行轴向囚禁。为方便讨论,分析离子在线型四极阱中的运动,离子阱的结构如图2所示。

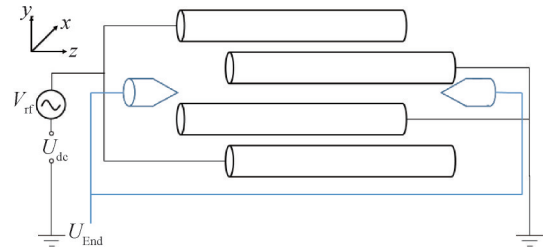


图2 线型Paul阱的结构示意图

Fig.2 Structure diagram of linear Paul trap

对于离子的径向囚禁,假设其受到的是理想的四极势,公式为

$$\Phi_{\text{rf}}(x, y, t) = \frac{U_{\text{dc}} - V_{\text{rf}} \cos \Omega t}{2r_0^2} (x^2 - y^2) \quad (8)$$

式中: U_{dc} 和 V_{rf} 分别为加在电极上的径向直流和射频电压; Ω 为离子射频驱动频率; r_0 为离子阱的尺寸特征参数,表示电极到阱中心的最短距离。

离子在势场中的运动方程为

$$\ddot{x} + \frac{Q}{mr_0^2} (U_{\text{dc}} - V_{\text{rf}} \cos \Omega t) x = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{y} - \frac{Q}{mr_0^2} (U_{\text{dc}} - V_{\text{rf}} \cos \Omega t) y = 0 \quad (10)$$

将其中参数进行无量纲归一化,得到离子运动的Mathieu方程

$$\frac{d^2 u}{d\tau^2} + (a_u - 2q_u \cos 2\tau) u = 0 \quad (u = x, y) \quad (11)$$

$$a_x = -a_y = \frac{4QU_{dc}}{m\Omega^2 r_0^2} \quad (12)$$

$$q_x = -q_y = \frac{2QV_{rf}}{m\Omega^2 r_0^2} \quad (13)$$

$$\tau = \frac{\Omega t}{2} \quad (14)$$

对于稳定区中的离子, 运动轨迹可写为

$$x(t) = x_0 \cos \sqrt{a + \frac{q^2}{2}} \tau \cdot (1 + \frac{q}{2} \cos 2\tau) \quad (15)$$

由式(15)可以看出, 离子的运动可以分成两部分: 第一部分是频率较低、振幅较大的宏运动, 频率为 $\frac{\Omega}{2} \sqrt{a + \frac{q^2}{2}}$; 第二部分是频率较高、振幅较小的微运动, 运动频率与离子阱射频电压的驱动频率一致。

与 Penning 阱中相似, 离子在轴向会受到端电压静电势的约束, 离子在轴向做简谐运动, 轴向谐振频率为

$$\omega_z = \sqrt{\frac{2Q\kappa U_{End}}{mz_0^2}} \quad (16)$$

式中: U_{End} 为轴向直流电压; 无量纲量 κ 为离子阱的一个几何因子, 与端电极的几何形状和端电极间距 z_0 有关。

Paul 阱存在一个无可避免的问题是射频加热引起的微运动, 对于偏离阱中心的离子会因为静电场产生额外的微运动^[16], 与以上介绍的运动不同, 这种微运动是无法被激光冷却的, 因此对准确度要求较高的微波频标, 都要想方设法减小额外微运动带来的频移并尽可能精确评估其大小^[17]。

与 Penning 阱相比, Paul 阱的优势在于没有强磁场, 可以得到更加准确的频率测量结果。除了微波频标, Paul 阱还在光频标^[18]、量子计算^[19]、量子模拟^[20]、分子离子^[21]与高带电离子^[22]的光谱精密测量等方向有着重要应用。

2 常见离子微波频标进展

2.1 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子频标

$^{199}\text{Hg}^+$ 的相关能级示意图如图 3 所示, 其基态超精细分裂高达 40.5 GHz, 较高的钟跃迁频率提供了较高的预期稳定度性能, 因此成为了离子微波频标的研究热点。

1981 年, 惠普实验室首先实现了基于双曲型 Paul 阱的缓冲气体冷却汞离子微波频标, 离子阱中

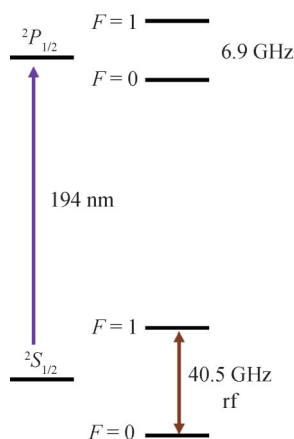


图 3 $^{199}\text{Hg}^+$ 部分关联能级示意图

Fig.3 Partial correlated energy level diagram of $^{199}\text{Hg}^+$

囚禁了 10^6 个 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子, 使用同位素谱灯对其进行泵浦与探测, 使缓冲气体汞离子微波频标在组成原理与物理结构上与现在水平基本一致, 其短期稳定度达到了 $2 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$, 频率漂移率则低于 $7.6 \times 10^{-15}/\text{day}$ ^[24]。限制其短期稳定度的主要原因是谱灯泵浦与探测的信噪比相对较低, 所以, 高性能谱灯也是当前汞离子微波频标的研究重点之一。

1998 年, 美国国家标准技术研究所(NIST)^[23]研制了激光冷却的汞离子微波频标。实验中将 7 个 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子囚禁在线型 Paul 阱中, 通过液氮冷却实验装置获得超低温的真空环境, 使用电光调制器将 194 nm 的冷却激光进行调制, 可以使离子在被探测时温度保持在 25 mK, 并获取长达 100 s 的 Ramsey 自由演化时间。尽管离子数限制了量子投影噪声的信噪比, 但是得益于低温和窄线宽, 微波频标可以达到 $3.3 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ 的短期稳定度(与同时代铯喷泉钟水平相近)和 3.4×10^{-15} 的系统频移不确定度, 测量得到 $^{199}\text{Hg}^+$ 基态超精细分裂的测量结果为 40 507 347 996. 841 59(14)(41) Hz, 这是目前对汞离子最精确的测量结果。

从 20 世纪 80 年代起, 美国宇航局喷气推进实验室(NASA JPL)^[25]一直致力于基于灯泵浦和缓冲气体冷却的 $^{199}\text{Hg}^+$ 微波频标的发展, 主要有三个专攻方向: ①高性能原子钟, 主要是强调极限稳定度的地面应用守时钟^[26-29]; ②用于深空探测的对于尺寸、重量和功率都有要求的星载钟^[30-33]; ③微型化原子钟^[34-37]。JPL 在前两者上引用了四极阱与多极阱相结合的技术, 可以有效降低离子阱射

频加热引起的多普勒频移。对于高性能守时钟,通过补偿离子数目涨落、高性能磁屏蔽和温控等技术,最新一代汞离子守时钟 LITS-10 的短期稳定度可以达到 $4.5 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$, 经过两周的测量,每天的稳定度可以优于 2.4×10^{-16} [29], 前代守时钟 LITS-9 经过连续九个月的测量试验,漂移约为 $2.7 \times 10^{-17}/\text{day}$ [28], 而 LITS-10 的日漂移预计在升级真空系统后将低于 1×10^{-17} [29]。JPL 的深空星载钟 DSAC 则具小体积 (17 L, 16 kg)、低功耗 (17 W)、高性能的优势。在地面上, DSAC 的短期稳定度可以达到 $1.5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, 已于 2019 年 6 月发射成功, 在太空中的短期稳定度是 $7 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, 每天的稳定度可以达到 $3 \times 10^{-15} \sim 5 \times 10^{-15}$, 23 天的稳定度为 3×10^{-15} (未去除漂移), 相当于时间偏差小于 4 ns, 漂移约为 $3.0 \times 10^{-16}/\text{day}$ [32], 预计可以在轨工作 10 年或者更长的时间, 基于此的深空单向定位精度在某些情况下甚至优于双向定位, 使深空探测器的近实时导航成为可能。JPL 的小型化汞离子微波钟原型机 M2TIC 的物理系统仅为 100 cm^3 , 其中离子阱真空管系统则只有 30 cm^3 , 整个原子钟可以集成进一个 4 L 的 μ 合金的双层磁屏蔽箱 ($13 \text{ cm} \times 16 \text{ cm} \times 19 \text{ cm}$), 原型机能够实现 $1 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ 的频率短期稳定度, 并且可以在数小时后稳定度达到 5×10^{-14} [36], 为之后研制开发具有长期稳定性的微型化离子微波钟奠定了基础。

国内, 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) [38-41]、北京无线电计量测试研究所 (简称 203 所) [42-43]、航天科技五院西安分院 (简称 504 所) [44] 和航天科技五院 510 所 [45-47] 也致力于发展缓冲气体冷却的汞离子微波钟。目前, 精密测量院的集成汞离子微波钟可以实现汞离子的长时间囚禁 (寿命约 73 h) 和闭环锁定, 短期稳定度达到 $4.2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ [38]; 同时精密测量院也研制了一种基于四极阱与十二极阱离子穿梭的微波钟, 即使经过 50 次离子穿梭, 离子穿梭效率依然接近 100%, 微波钟的短期稳定度根据散粒噪声估算可以达到 $7.29 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$, 未来预期实现长期稳定度达到 10^{-16} 水平 [41]。203 所研制了一款高性能汞光谱灯 [42], 基于其的汞离子微波钟的取得了频率稳定度在 1 s 时为 4×10^{-13} , 在

1000 s 时为 4×10^{-14} 的初步成果 [43]。

2.2 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子频标

$^{113}\text{Cd}^+$ 的相关能级示意图如图 4 所示, 其基态超精细能级分裂为 15.2 GHz, 在常见的微波钟跃迁能级中位居第二, 仅次于 $^{199}\text{Hg}^+$ 。冷却能级使用 $|^2S_{1/2}, F=1\rangle \rightarrow |^2P_{3/2}, F=2\rangle$, 仅用一束圆偏振光就可实现冷却过程的循环跃迁, 冷却过程中不存在任何中间电子态暗态或者超精细暗态。此外, 冷却上能级 $^2P_{3/2}$ 的超精细能级分裂仅为 800 MHz, 因此, 使用 AOM 将冷却光移频即可实现光泵浦的钟跃迁初态制备。 $^{111}\text{Cd}^+$ 与 $^{113}\text{Cd}^+$ 的核自旋相同均为 1/2, 其能级结构与 $^{113}\text{Cd}^+$ 相似, 但基态超精细能级分裂为 14.5 GHz, 略小于 $^{113}\text{Cd}^+$, 故受到关注相对较少。

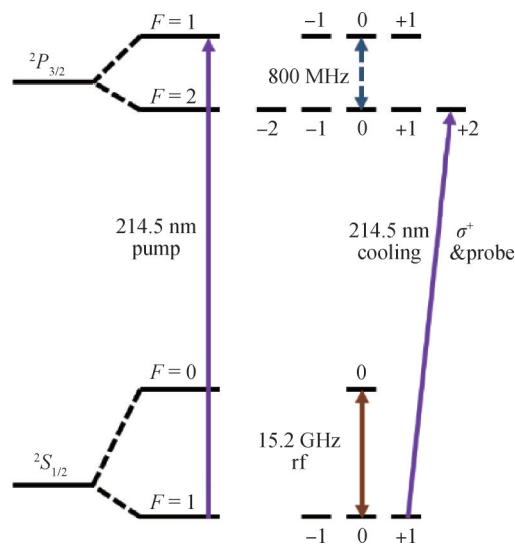


图 4 $^{113}\text{Cd}^+$ 部分关联能级示意图

Fig.4 Partial correlated energy level diagram of $^{113}\text{Cd}^+$

清华大学研究团队从 2010 年起一直致力于研究镉离子微波钟; 2012 年, 使用高分辨微波-光学双共振谱的方法测量了 $^{113}\text{Cd}^+$ 与 $^{111}\text{Cd}^+$ 离子的基态超精细能级分裂 [48]。其中, $^{113}\text{Cd}^+$ 的测量结果与前人所测得的结果相符, 而 $^{111}\text{Cd}^+$ 的测量结果为 $14\,530\,507\,349.9(1.1) \text{ Hz}$, 将测量精度较之前提升了 7 个数量级。之后, 清华大学团队首次实现了 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子微波钟的闭环锁定 [49], 并首次将 $^{113}\text{Cd}^+$ 基态超精细能级分裂的测量精度提高到了 mHz 量级 [50]。随着系统的不断优化升级 [51-52], 激光冷却镉离子微波钟的短期稳定度的修正阿伦方差可达到 $4.2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, 频率不确定度达到 1.8×10^{-14} , 测

得 $^{113}\text{Cd}^+$ 基态超精细分裂的测量结果为 $15\,199\,862\,855.027\,99(27)\,\text{Hz}$ [52], 也是目前对镉离子最精确的测量结果。

为了进一步提高镉离子微波钟的性能, 清华大学研究团队又引入了协同冷却的方法 [53–55], 即使用激光冷却一种离子 (冷却剂离子), 使用这种离子通过库伦相互作用冷却钟跃迁离子, 该方法的优势在于可以减少环路的冷却时间、延长自由演化时间、降低离子温度、减小死区时间造成的 Dick 效应、提高微波频标性能。清华大学团队使用 $^{24}\text{Mg}^+$ 离子做冷却剂, 可以将 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子冷却到 $31\,\text{mK}$ [53]。但是 Mg^+ 冷却激光是波长较短的 $280\,\text{nm}$ 激光, 只能通过较复杂的四倍频激光器获得, 且 Mg^+ 易于真空背景气体中的氢反应, 生成 MgH^+ 暗离子, 不利于长期冷却, 因此之后清华大学小组使用 $^{40}\text{Ca}^+$ 作为冷却剂离子, 克服了上述困难 [54], 并于 2022 年首次实现了协同冷却镉离子微波钟的闭环锁定 [55], 也是 Paul 阱中首次实现的协同冷却微波钟。协同冷却镉离子微波钟可以将 Ramsey 的自由演化时间延长到数十秒甚至一百秒, 使用 $5\,\text{s}$ 自由演化时间的短期稳定度的阿伦方差可以达到 $3.48 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, 与激光冷却汞离子微波频标相近 (尽管 $^{113}\text{Cd}^+$ 的钟跃迁能级仅为 $^{199}\text{Hg}^+$ 的约 $1/3$), 频率不确定度达到 1.5×10^{-14} , 优于激光直接冷却镉离子微波频标。若将自由演化时间延长到 $50\,\text{s}$, 将镉离子微波钟与氢钟比对进行开环测量, 短期稳定度则可以达到 $1.36 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ [55]。

此外, 清华大学还在探索镉离子微波钟的交替锁定方案。交替锁定是一种零死区时间的探测方案, 由斯坦福大学的 Kasevich [56] 与清华大学的王力军 [57] 各自独立提出, 指使用两套完全相同系统, 当一套系统处于死区时间 (如冷却、探测等) 时, 另一套系统处于微波质询状态, 从而可以实现零死区时间, 短期稳定度演化沿 τ^{-1} 下降而非白频率噪声限制的 $\tau^{-1/2}$, 已经在光学频标 [58]、CPT 原子钟 [59–60]、冷原子喷泉钟 [61] 等实现。清华大学也已完成了首个离子微波钟的交替锁定结果, 基于 $^{113}\text{Cd}^+$ 交替锁定微波频标可以实现短期稳定度演化的 $\tau^{-0.95}$ 结果, 接近关联极限 τ^{-1} 的理论值 [62]。

2.3 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子频标

$^{171}\text{Yb}^+$ 的相关能级图如图 5 所示, 其基态超精

细能级分裂为 $12.6\,\text{GHz}$, 理论上与汞和镉同量级的性能指标。此外, 镱离子冷却和探测所需激光器 ($369, 935\,\text{nm}$) 仅需半导体激光器, 易获得、造价低且抗干扰能力强, 因此, 镱离子微波钟更具有小型化前景, 也成为了世界各国的研究热点。

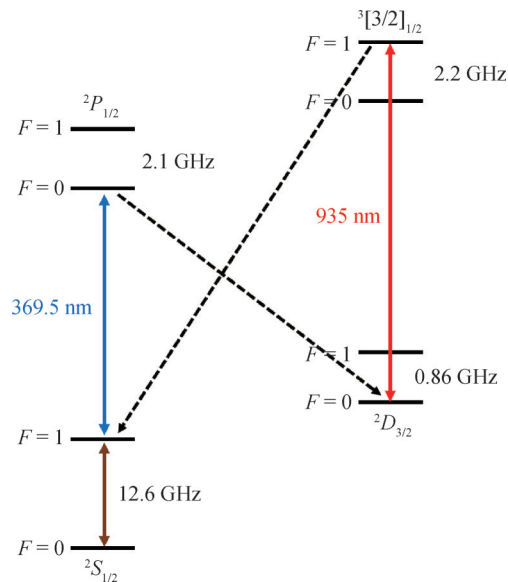


图 5 $^{171}\text{Yb}^+$ 部分关联能级示意图

Fig.5 Partial correlated energy level diagram of $^{171}\text{Yb}^+$

细离子微波频标与汞离子微波频标类似, 分为缓冲气体冷却和激光冷却两种技术路线。

对于缓冲气体冷却路线, 1982 年德国的 Mainz 大学首次使用微波-光学双共振的方法, 将缓冲气体冷却 $^{171}\text{Yb}^+$ 的基态超精细分裂的测量精度进入 Hz 量级 [63–64]。1995 年, 德国联邦物理技术研究院 (PTB) 在其基础上, 将精度进一步提高了超过 2 个数量级 [65], 为之后微波频标闭环锁定奠定了基础。与此同时, 澳大利亚国家测量研究所 (NMI) 的研究小组也一直在发展缓冲气体冷却的镱离子微波频标, 1995 报道的镱离子微波钟的短期稳定度可以达到 $2.9 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ [66], 并可以将自由演化时间延长至 $600\,\text{s}$, 得到 1.5×10^{13} 的超高 Q 值 [67]。之后报道的微波钟 IT-2, 则进一步将短期稳定度提高到了 $6 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ [68], 超精细分裂测量精度达到了 $2\,\text{mHz}$ [69]。

美国 Sandia 国家实验室一直致力于基于缓冲气体冷却的小型镱离子微波钟的研制 [70–73], 其研制的高度小型化镱离子微波钟的真空部分大小仅有 $1\,\text{cm}^3$, 包括一个线型四极离子阱、一个自制微型

镱原子源和一个非蒸发型吸气泵。系统使用氦气作为缓冲气体冷却离子,短期稳定度可以达到 $2 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$ [72]。根据该实验室最新报告,高度小型化镱离子微波钟 mini-ACES 的真空部分约 3 cm^3 ,短期稳定度可达到 $6(2) \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 。Sandia 实验室还将微波-光学双共振方法引入小型化镱离子微波钟,当平均时间为 100 s 时,得到连续模式微波钟的稳定度可以优于 10^{-12} [74]。除此之外, Sandia 实验室还在研制改善长期稳定性的微波钟 IMPACT 和改善环境稳定性的微波钟 ACES,与超稳晶振 (UXO) 比对,短期稳定度分别达到了 $4(1) \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 与 $2.0(1) \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$, IMPACT 与 ACES 比对则得到了 $5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 的结果 [75]。

基于 Sandia 实验室的研究成果,美国 Microchip 公司一直致力发展镱离子微波钟的商品化 [76-78]。当前,整个系统的物理部分可以装在一个 2U 的机箱中,在缓冲气体冷却下,离子在阱中的储存寿命则超过了 95 天,微波钟的短期稳定度可以达到 $6 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$,当 $\tau = 2 \times 10^5 \text{ s}$ 时,阿伦方差可以降低至 4×10^{-15} [78]。

对于激光冷却路线,早在 20 世纪 90 年代初期,德国 Hamburg 大学 [79] 就实现了激光冷却离子数为 10^6 的镱离子云,且短期稳定度达到了 $2 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$,其对超精细能级分裂的测量精度也比同时期的缓冲气体路线提高了 1 个数量级。此外,他们也进行了关于单离子囚禁的研究,通过微波-光学双共振谱的测量,估算单离子的频率准确度可以达到了 10^{-16} 量级,为后面单离子光钟与基于离子阱的量子计算奠定了基础 [80]。

澳大利亚 NMI 的研究小组也同时进行着激光冷却镱离子微波钟的研究,1993 年观察到了激光冷却镱离子中的相变现象 [81],并在 1999 年报道了钟信号的获取,短期稳定度预计可以达到 $5 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ [82],离子阱中囚禁了约 10^4 个离子,并将其冷却至低于 1 K ,此时的二阶 Doppler 频移较缓冲气体冷却小了 180 倍 [83],微波频标的频移不确定度被评估到 4×10^{-15} ,超精细分裂能级的测量则进入亚 mHz 量级 [84]。

日本 NICT 小组实现了镱离子微波频标的短期稳定度达 $2.09 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$,系统频移不确定度则在 1.1×10^{-14} ,镱离子的基态超精细分裂测量结果

为 $12\,642\,812\,118.468\,2(4) \text{ Hz}$ [85],这也是目前对镱离子精度最高的测量。此外, NICT 小组 [86-87] 还提出了一种基于部分投影测量的原子相位锁定技术 [86-87],并以镱离子频标为例进行了部分实验与仿真工作。该技术主要应用于技术噪声大于本振噪声的情形,与前文中的交替锁定方法类似,原子相位锁定技术也可以通过关联测量使微波钟的短期稳定度遵循 τ^{-1} 演化,此外还可以将短期稳定度极限降低为原来的 $1/\sqrt{n_{cp}}$, n_{cp} 为部分投影测量的次数。

英国 NPL 研究小组 [88-89] 一直致力于集成化可移动式激光冷却镱离子频标,并为其设计了一套集成化激光系统 [90]。整个频标系统可以封装在 6U 的机箱内 ($51 \text{ cm} \times 49 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$),在 $30 \sim 1500 \text{ s}$ 内短期稳定度可以达到 $3.6 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$, NPL 小组评估了各项因素对于频移和稳定度的影响,系统频移不确定度为 8×10^{-12} ,受限于磁场的二阶 Zeeman 效应,短期稳定度主要受限于散粒噪声与离子损失 [89]。

国内的镱离子微波频标虽然起步较晚,但是发展迅速。清华大学团队 [91] 于 2022 年实现了激光冷却镱离子微波频标的闭环锁定,系统的短期稳定度为 $8.5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$,是短期稳定度最好的激光冷却镱离子微波钟。清华大学团队还完成了频率准确度的评估与超精细分裂结果的测量,系统频移不确定度为 5.6×10^{-14} ,总不确定度为 6.33×10^{-14} [92],与 NICT 团队处于同一量级。不同小组激光冷却镱离子微波钟短期稳定度演化如图 6 所示。

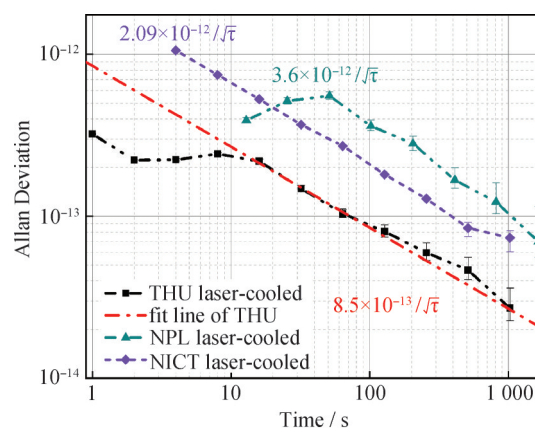


图6 不同小组激光冷却镱离子微波钟短期稳定度演化
Fig.6 Short-term stability of laser-cooled ytterbium ion microwave clock of different groups

2.4 其他离子频标

2.4.1 Be^+ 离子频标

1983年,美国NBS(NIST的前身)的Bollinger小组^[10, 93]搭建了基于Penning阱中的激光冷却 $^9\text{Be}^+$ 的微波频标,这是第一个基于激光冷却的离子频标。该小组通过选择 $B = 0.8194\text{ T}$ 的魔幻磁场强度与合适的钟跃迁能级,使钟跃迁能级在这种情况下对磁场强度的一阶微扰不敏感,克服了Penning阱强磁场作用下Zeeman频移影响微波钟性能的弊端。 $^9\text{Be}^+$ 离子微波钟的短期稳定度在 $400 \sim 3200\text{ s}$ 为 $2 \times 10^{-11}/\sqrt{\tau}$,系统频移不确定度为 9.4×10^{-14} ,主要受限于二阶多普勒频移,总频率不确定度为 1.5×10^{-13} ,钟跃迁频率的高精度测量结果为 $303\,016\,377.265\,070(57)\text{ Hz}$ ^[93]。此外,该小组高精度测量了 $^9\text{Be}^+$ 的基态超精细跃迁为 $1\,250\,017\,674.10(1)\text{ Hz}$,并利用 $^9\text{Be}^+$ 频标测量了质子、电子质量比, $^9\text{Be}^+$ 的Lande g因子等参数^[10]。

为了克服二阶多普勒效应对离子微波频标的影响,Bollinger小组引入 $^{26}\text{Mg}^+$ 作为冷却剂离子,于1991年搭建了首个基于协同冷却的 $^9\text{Be}^+$ 离子微波钟^[94]。协同冷却使自由演化时间延长到 550 s ,对应的线宽仅为 $900\text{ }\mu\text{Hz}$,但是短期稳定度受限于较小的钟跃迁能级,为 $3 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$,长期稳定度则受限于残余背景气体压力,为 3×10^{-14} ,二阶多普勒频移则有效降低了超过1个数量级,不确定度仅为 5×10^{-15} 。

2013年,荷兰和德国的研究小组报道了使用二倍频激光器可产生 313 nm 的激光,大大简化了 $^9\text{Be}^+$ 的激光冷却方式,成功将Paul阱中600个 $^9\text{Be}^+$ 冷却至约 10 mK 的低温^[95]。该系统可用于开发基于低磁场,使用超精细分裂 1.25 GHz 为钟跃迁频率的 $^9\text{Be}^+$ 微波钟^[96]。

2.4.2 Ba^+ 离子频标

相较于其他离子, Ba^+ 离子的 $S_{1/2} - P_{1/2}$ 和 $S_{1/2} - P_{3/2}$ 的两条共振线分别为 493 nm 和 455 nm ,激光容易获得与调谐,离子的荧光则通过 $P_{1/2}$ 到中间亚稳态 $D_{3/2}$ 的 649.6 nm 的红光进行探测^[97]。德国Mainz大学的研究团队使用微波-光学双共振方法,分别测量了双曲型Paul阱中囚禁的缓冲气体冷却的 $^{135}\text{Ba}^+$ 与 $^{137}\text{Ba}^+$ 基态超精细分裂频率,分别为 $7\,183\,340\,234.90(57)\text{ Hz}$ ^[98], $8\,037\,741\,667.69(36)\text{ Hz}$ ^[99],

频率不确定度分别为 7.9×10^{-11} 和 4.6×10^{-11} 。随后于1985年实现了微波频标的测量,在 5.5 h 的锁定测量周期内,频率稳定达到了 2×10^{-12} ^[100]。

2.4.3 $^{201}\text{Hg}^+$ 离子频标

除了传统的 $^{199}\text{Hg}^+$ 离子频标, $^{201}\text{Hg}^+$ 离子频标因其较大的基态超精细分裂能级(约 30 GHz),技术较为成熟,成为了近年的研究热点。

美国NBS的研究小组于1981年首先提出了Penning阱中的 $^{201}\text{Hg}^+$ 离子频标的方案^[11],与 $^9\text{Be}^+$ 离子频标类似,挑选特定的强磁场强度(0.29 T)可以使离子在某特定跃迁下对一阶磁场不敏感,此时的钟跃迁频率为 25.9 GHz ,预期激光冷却状态下微波钟的频率准确度可以达到 10^{-15} ,频率稳定度达到 10^{-16} 。

2008年,JPL小组提出了基于线型Paul阱 $^{201}\text{Hg}^+$ 离子频标的方案^[101],该频标使用同位素灯泵浦、缓冲气体冷却,通过高精度光谱测量得到其基态超精细分裂为 $29\,954\,365\,821.1(2)\text{ Hz}$ ^[102],并评估了压力频移的影响^[103]。与 $^{199}\text{Hg}^+$ 相比, $^{201}\text{Hg}^+$ 离子的谱线与泵浦的同位素离子谱线重叠更多,泵浦效率提高了3倍,将死区时间减少为原来的 $1/3$,有利于减少本振相位噪声的Dick效应。此外,通过Zeeman跃迁更精确的测量离子磁场,使微波钟更适应磁场波动较大的环境,或者可以因此适当减小磁屏蔽的资源(如深空探测)等。提出了基于 $^{199}\text{Hg}^+$, $^{201}\text{Hg}^+$ 的联合离子微波钟方案^[104],一方面,可以利用 $^{201}\text{Hg}^+$ 做离子磁强计,能在不增加死区时间的情况下高效修正磁场对 $^{199}\text{Hg}^+$ 频标的影响;另一方面,两种离子的异同特性也可以高效地做一些基本常数是否恒定的新物理研究^[101]。

2.4.4 $^{25}\text{Mg}^+$ 离子频标

$^{25}\text{Mg}^+$ 离子频标与 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子相似,不具备暗态且激发态超精细分裂能级较低,因此使用一台激光器就可以实现冷却、泵浦与探测过程^[105]。对 $^{25}\text{Mg}^+$ 的研究源于美国NBS小组^[106],该小组使用激光-微波双共振方法,对Penning阱中的 $^{25}\text{Mg}^+$ 的基态超精细分裂进行了高精度测频,并获得了自由演化实验长达 41.4 s 的Ramsey条纹。2017年,俄罗斯的研究小组提出了基于Paul阱的激光冷却 $^{25}\text{Mg}^+$ 频标方案,其预期短期稳定度可达到 $1.3 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$,预期频率不确定度为 3×10^{-14} ^[107-108]。

2017年,中国华中科技大学的研究小组通过Rabi方法实现先 $^{25}\text{Mg}^+$ 基态超精细分裂的高精度测频,其频率为 $178\,876\,276\,5(12)\,\text{Hz}$,相对不确定度为 7×10^{-9} ^[109],较美国NBS小组的结果提高了1个数量级。

3 总结与展望

作为下一代实用微波频标的候选,基于囚禁离子的微波频标已经在众多研究中开始崭露头角,展现了其高性能、受外界干扰小、具有小型化前景的优点,也在商品化的道路上迈出了坚实的一步。尽管如此,大部分对于离子微波频标的研究仍处于实验室阶段,距实用化仍有一定距离。

当前离子微波钟的主要定位方向有:

1) 兼具高准确度与高稳定度的二级频标

激光冷却的微波频标因其高准确度与无频率漂移的优势,可以成为不需定期校准的实用次级频率基准。通过激光冷却、协同冷却等手段,离子微波频标已经具有较高的 Q 值,主要研究方向是提高其信噪比:①增加离子数量,提高量子投影噪声信噪比,但要注意离子数量增多对温度和Doppler频移的影响,以及长期测量中的离子数损失补偿;②提高荧光收集效率,提高散粒噪声的信噪比;③通过磁屏蔽、温控、激光稳频稳功率等方式降低技术噪声。此外,激光冷却的离子微波钟目前还没有报道较好的长期稳定度,也是其未来的研究重点。

2) 具有高稳定度的守时钟

这一点上基于缓冲气体的汞离子微波钟已经取得了较好的成果,稳定度已经可以比肩主动氢钟。当前的研究方向主要包括继续提高其性能与通过集成化实现小型化、可搬运。协同冷却镱离子微波钟、激光冷却镱离子微波钟也具有成为可搬运守时钟的潜能,但仍需进一步研究。使用交替锁定、原子锁相等方式,使短期稳定度遵循 τ^{-1} 演化也是重点研究方向。

3) 兼具性能与体积功耗控制的星载钟

美国JPL的星载钟DSAC已经取得了较好的成果。除了传统的星载铷钟,中国也已经发射了空间冷原子钟^[110]、空间主动氢钟与空间镱原子光钟^[111],而星载离子微波钟的性能虽然不及后者,

但是体积功耗远小于它们,因此比起空间实验,星载离子钟可以应用到深空探测、导航定位等系统之中,因此其发展方向则是在不影响其性能的情况下进一步减小其体积,例如引入 $^{201}\text{Hg}^+$ 实现联合离子钟等。

4) 微型化离子微波钟

在这一方向上,主要的竞争对手是小型CPT汽室钟。离子微波钟与小型CPT汽室钟的短期稳定度均可以达到 $10^{-10} \sim 10^{-11}/\sqrt{\tau}$,研究重点是在不影响其体积功耗的情况下进一步提高其性能,或者进一步减小其体积,实现离子微波钟的芯片化。

随着离子光频标的发展,人们对离子阱中离子运动也有了更多的认识,也将会有更多的新技术被引入离子微波频标,离子频标在未来会有着更好的发展,拥有更高的性能,以及实现更广泛的应用。

参考文献

- [1] ESSEN L, PARRY J V. An atomic standard of frequency and time interval: a Cesium resonator[J]. Nature, 1955, 176(4476): 280.
- [2] BIPM. Resolution 1 of the 13th CGPM(1967)[EB/OL]. [2022-12-16]. <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/13-1967/resolution-1>
- [3] BIPM. The international system of units (SI): base units [EB/OL]. [2022-12-16]. <https://www.bipm.org/en/measurement-units/si-base-units>
- [4] PAUL W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles[J]. Reviews of Modern Physics, 1990, 62(3): 531.
- [5] DEHMELT H G. Radiofrequency spectroscopy of stored ions I: Storage [C]//Advances in atomic and molecular physics. Academic Press, 1968, 3: 53 - 72.
- [6] GHOSH P K. Ion traps [J]. Oxford: Oxford University-Press, 1995.
- [7] EARNSHAW S. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether [J]. Cambridge: Transactions of the Cambridge Philosophical Society, 1848, 7: 97.
- [8] NOBELPRIZE. ORG. The Nobel prize in physics 1989 [EB/OL]. [2022-12-16]. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1989/summary/>
- [9] BROWN L S, GABRIELSE G. Geonium theory: physics of a single electron or ion in a Penning trap[J]. Reviews of Modern Physics, 1986, 58(1): 233.

- [10] BOLLINGER J J, WINELAND D J, ITANO W M, et al. Precision Measurements of Laser Cooled $^9\text{Be}^+$ Ions[C]//Laser Spectroscopy VI: Proceedings of the Sixth International Conference, Interlaken, Switzerland, June 27–July 1, 1983. Springer, 1983, 40: 168.
- [11] WINELAND D J, ITANO W M, BERGQUIST J C, et al. Proposed stored $^{201}\text{Hg}^+$ ion frequency standards[C]//Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium. IEEE, 1981: 602 – 611.
- [12] RAU S, HEIBE F, KÖHLER-LANGES F, et al. Penning trap mass measurements of the deuteron and the HD^+ molecular ion[J]. *Nature*, 2020, 585(7823): 43 – 47.
- [13] BLAUM K, ELISEEV S, STURM S. Perspectives on testing fundamental physics with highly charged ions in Penning traps[J]. *Quantum Science and Technology*, 2020, 6(1): 014002.
- [14] NIEMANN M, MEINERS T, MIELKE J, et al. Cryogenic $^9\text{Be}^+$ Penning trap for precision measurements with (anti-) protons[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 31(3): 035003.
- [15] BROWNNUTT M, KUMPH M, RABL P, et al. Ion-trap measurements of electric-field noise near surfaces[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(4): 1419.
- [16] BERKELAND D J, MILLER J D, BERGQUIST J C, et al. Minimization of ion micromotion in a Paul trap[J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 83(10): 5025 – 5033.
- [17] MIAO S N, ZHANG J W, ZHENG Y, et al. Second-order Doppler frequency shifts of trapped ions in a linear Paul trap[J]. *Physical Review A*, 2022, 106(3): 033121.
- [18] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637.
- [19] BRUZEWICZ C D, CHIAVERINI J, MCCONNELL R, et al. Trapped-ion quantum computing: progress and challenges[J]. *Applied Physics Reviews*, 2019, 6(2): 021314.
- [20] DAVOUDI Z, HAFEZI M, MONROE C, et al. Towards analog quantum simulations of lattice gauge theories with trapped ions[J]. *Physical Review Research*, 2020, 2(2): 023015.
- [21] WILLITSCH S. Coulomb - crystallised molecular ions in traps: methods, applications, prospects[J]. *International Reviews in Physical Chemistry*, 2012, 31(2): 175 – 199.
- [22] SCHMÖGER L, VERSOLATO O O, SCHWARZ M, et al. Coulomb crystallization of highly charged ions [J]. *Science*, 2015, 347(6227): 1233 – 1236.
- [23] BERKELAND D J, MILLER J D, BERGQUIST J C, et al. Laser - cooled mercury ion frequency standard [J]. *Physical Review Letters*, 1998, 80(10): 2089.
- [24] CUTLER L S, GIFFARD R P, MCGUIRE M D. A trapped mercury 199 ion frequency standard[C]//Proceedings of the 13th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 1981: 563 – 578.
- [25] PRESTAGE J D, DICK G J, MALEKI L. Linear ion trap based atomic frequency standard[C]//44th Annual Symposium on Frequency Control. IEEE, 1990: 82 – 88.
- [26] BURT E A, TJOELKER R L. Sub- 10^{-16} frequency stability in multi-pole linear ion trap standards: reduction of number-dependent sensitivity [J]. *Interplanetary Network Progress Report*, 2006, 42: 166.
- [27] 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, and Frequency Control*, 2008, 55(12): 2586 – 2595.
- [28] BURT E, TUCKER B, LARSEN K, et al. Next generation JPL ultra-stable trapped ion atomic clocks [C]//Proceedings of the 45th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2013: 55 – 61.
- [29] BURT E A, YI L, TUCKER B, et al. JPL ultrastable trapped ion atomic frequency standards [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1013 – 1021.
- [30] TJOELKER R L, PRESTAGE J D, BURT E A, et al. Mercury ion clock for a NASA technology demonstration mission [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2016, 63(7): 1034 – 1043.
- [31] ELY T A, BURT E A, PRESTAGE J D, et al. Using the deep space atomic clock for navigation and science [J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2018, 65(6): 950 – 961.
- [32] BURT E A, PRESTAGE J D, TJOELKER R L, et al. Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space [J]. *Nature*, 2021, 595(7865): 43 – 47.
- [33] ELY T, PRESTAGE J, TJOELKER R, et al. Deep space atomic clock technology demonstration mission results [C]//2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). IEEE, 2022: 1 – 20.
- [34] GULATI G K, CHUNG S, LE T, et al. Miniatured and low power mercury microwave ion clock [C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). IEEE, 2018: 1 – 2.

- [35] HOANG T M, CHUNG S K, 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). IEEE, 2019: 1 – 2.
- [36] HOANG T M, CHUNG S K, LE T, 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). IEEE, 2021: 1 – 4.
- [37] HOANG T M, CHUNG S K, LE T, et al. Integrated physics package of micro - mercury trapped ion clock with 10^{-14} level frequency stability [J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(4): 044001.
- [38] LIU H, YANG Y N, HE Y H, et al. Microwave - optical double-resonance spectroscopy experiment of $^{199}\text{Hg}^+$ ground state hyperfine splitting in a linear ion trap [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(6): 063201.
- [39] 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.
- [40] LIU H, CHEN Y, YAN B, et al. Progress towards a miniaturized mercury ion clock for space application [C]//China Satellite Navigation Conference. Springer, Singapore, 2020: 557 – 561.
- [41] YAN B, LIU H, CHEN Y, et al. Research progress on mercury ion microwave clock for time keeping [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC 2022) Proceedings. Springer, Singapore, 2022: 345 – 352.
- [42] 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)
- [43] XUE X, ZHOU T, WANG N, et al. Recent progress on quantum frequency standards at BIRMM [J]. Frontiers in Physics, 2022: 936.
- [44] 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.
- 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. (in Chinese)
- [45] 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)
- [46] 杨军, 朱宏伟, 刘志栋. 分区式线型阱设计及其离子囚禁性能分析[J]. 宇航计测技术, 2022, 42(3): 1–6.
- YANG J, ZHU H W, LIU Z D. Design and performance analysis of a segmented linear ion trap [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2022, 42(3): 1–6. (in Chinese)
- [47] 杨军, 朱宏伟, 刘志栋. 多极阱中汞离子数密度分布对二阶多普勒频移的影响[J]. 时间频率学报, 2022, 45 (2): 134 – 142.
- YANG J, ZHU H W, LIU Z D. Effect of mercury ion number density distribution in multipole trap on second-order Doppler shift [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(2): 134 – 142. (in Chinese)
- [48] ZHANG J W, WANG Z B, WANG S G, et al. High-resolution laser microwave double-resonance spectroscopy of hyperfine splitting of trapped $^{113}\text{Cd}^+$ and $^{111}\text{Cd}^+$ ions [J]. Physical Review A, 2012, 86(2): 022523.
- [49] ZHANG J W, WANG S G, MIAO K, et al. Toward a transportable microwave frequency standard based on laser-cooled $^{113}\text{Cd}^+$ ions [J]. Applied Physics B, 2014, 114(1): 183 – 187.
- [50] WANG S G, ZHANG J W, MIAO K, et al. High-accuracy measurement of the $^{113}\text{Cd}^+$ ground-state hyperfine splitting at the milli - Hertz level [J]. Optics Express, 2013, 21(10): 12434 – 12442.
- [51] MIAO K, ZHANG J W, SUN X L, et al. High accuracy measurement of the ground-state hyperfine splitting in a $^{113}\text{Cd}^+$ microwave clock [J]. Optics Letters, 2015, 40 (18): 4249 – 4252.
- [52] MIAO S N, ZHANG J W, QIN H R, et al. Precision determination of the ground-state hyperfine splitting of trapped $^{113}\text{Cd}^+$ ions [J]. Optics Letters, 2021, 46 (23): 5882 – 5885.
- [53] ZUO Y N, HAN J Z, ZHANG J W, et al. Direct temperature determination of a sympathetically cooled large $^{113}\text{Cd}^+$ ion crystal for a microwave clock [J]. Applied Physics Letters

- ters, 2019, 115(6): 061103.
- [54] HAN J Z, QIN H R, XIN N C, et al. Toward a high-performance transportable microwave frequency standard based on sympathetically cooled $^{113}\text{Cd}^+$ ions [J]. Applied Physics Letters, 2021, 118(10): 101103.
- [55] QIN H R, MIAO S N, HAN J Z, et al. High-performance microwave frequency standard based on sympathetically cooled ions [J]. Physical Review Applied, 2022, 18(2): 024023.
- [56] BIEDERMANN G W, TAKASE K, WU X, et al. Zero-dead-time operation of interleaved atomic clocks [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(17): 170802.
- [57] WANG L J. On a new class of self-referencing, $1/\tau$ atomic clocks [J]. Chinese Physics Letters, 2014, 31(8): 080601.
- [58] SCHIOPPO M, BROWN R C, MCGREW W F, et al. Ultrastable optical clock with two cold-atom ensembles [J]. Nature Photonics, 2017, 11(1): 48 – 52.
- [59] SUN X L, ZHANG J W, CHENG P F, et al. Theoretical analysis of suppressing dick effect in Ramsey-CPT atomic clock by interleaving lock [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(2): 023101.
- [60] CHENG P, SUN X, ZHANG J, et al. Suppression of dick effect in Ramsey-CPT atomic clock by interleaving lock [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2018, 65(11): 2195 – 2200.
- [61] MEUNIER M, DUTTA I, GEIGER R, et al. Stability enhancement by joint phase measurements in a single cold atomic fountain [J]. Physical Review A, 2014, 90(6): 063633.
- [62] QINHR, ZHENG Y, XIN N C, et al. Progress on ion microwave frequency standards at Tsinghua university [C]//2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). IEEE, 2023.
- [63] BLATT R, SCHNATZ H, WERTH G. Ultrahigh-resolution microwave spectroscopy on trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions [J]. Physical Review Letters, 1982, 48(23): 1601.
- [64] BLATT R, SCHNATZ H, WERTH G. Precise determination of the $^{171}\text{Yb}^+$ ground state Hyperfine separation [J]. Zeitschrift für Physik A Atoms and Nuclei, 1983, 312(3): 143 – 147.
- [65] TAMM C, SCHNIER D, BAUCH A. Radio-frequency laser double-resonance spectroscopy of trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions and determination of line shifts of the ground-state hyperfine resonance [J]. Applied Physics B, 1995, 60(1): 19 – 29.
- [66] FISK P T H, SELLARS M J, LAWN M A, et al. Performance of a prototype microwave frequency standard based on laser-detected, trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions [J]. Applied Physics B, 1995, 60(6): 519 – 527.
- [67] FISK P T H, SELLARS M J, LAWN M A, et al. Very high Q microwave spectroscopy on trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions: application as a frequency standard [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2): 113 – 116.
- [68] FISK P T H, SELLARS M J, LAWN M A, et al. A microwave frequency standard based on trapped, buffer gas-cooled $^{171}\text{Yb}^+$ ions - some accuracy issues [J]. European Frequency Time Forum, 1996, 418: 212 – 217.
- [69] FISK P T H, SELLARS M J, LAWN M A, et al. Accurate measurement of the 12.6 GHz "clock" transition in trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 1997, 44(2): 344 – 354.
- [70] SCHWINDT P D D, JAU Y Y, PARTNER H, et al. Micro ion frequency standard [C]//Micro- and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications III. SPIE, 2011, 8031: 191 – 200.
- [71] JAU Y Y, PARTNER H, SCHWINDT P D D, et al. Low-power, miniature $^{171}\text{Yb}^+$ ion clock using an ultra-small vacuum package [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(25): 253518.
- [72] SCHWINDT P D D, JAU Y Y, PARTNER H L, et al. Miniature trapped-ion frequency standard with $^{171}\text{Yb}^+$ [C]//2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and the European Frequency and Time Forum. IEEE, 2015: 752 – 757.
- [73] SCHWINDT P D D, JAU Y Y, PARTNER H, et al. A highly miniaturized vacuum package for a trapped ion atomic clock [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(5): 053112.
- [74] SCHWINDT P D D, HOANG T M, JAU Y Y, et al. Operating a $^{171}\text{Yb}^+$ microwave ion clock in a continuous mode [C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). IEEE, 2018: 1 – 4.
- [75] THRASHER D. Microwave ion clock technologies [R]. Sandia National Lab (SNL-NM), Albuquerque, NM (United States), 2021.
- [76] SCHERER D R, BOSCHEN C D, NOBLE J, et al. Analysis of short-term stability of miniature $^{171}\text{Yb}^+$ buffer gas cooled trapped ion clock [C]//Proceedings of the 49th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. 2018: 95 – 99.

- [77] TALLANT J, NOBLE J, GUAN D, et al. Progress towards a commercial $^{171}\text{Yb}^+$ microwave atomic frequency standard [C]//2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC). IEEE, 2019: 1 – 6.
- [78] PARK H, TALLANT J, ZHANG X, et al. $^{171}\text{Yb}^+$ microwave clock for military and commercial applications [C]//2020 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and International Symposium on Applications of Ferroelectrics (IFCS - ISAF). IEEE, 2020: 1 – 4.
- [79] CASDORFF R, ENDERS V, BLATT R, et al. A 12 GHz standard clock on trapped ytterbium ions [J]. *Annalen der Physik*, 1991, 503(1-3): 41–55.
- [80] ENDERS V, COURTEILLE P, HUESMANN R, et al. Microwave-optical double resonance on a single laser-cooled $^{171}\text{Yb}^+$ ion [J]. *EPL (Europhysics Letters)*, 1993, 24(5): 325.
- [81] FISK P T H, LAWN M A, COLES C. Laser cooling of $^{171}\text{Yb}^+$ ions in a linear paul trap [J]. *Applied Physics B*, 1993, 57(4): 287 – 291.
- [82] WARRINGTON R B, FISK P T H, WOUTERS M J, et al. The CSIRO trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ion clock: improved accuracy through laser - cooled operation [C]//Proceedings of the 1999 Joint Meeting of the European Frequency and Time Forum and the IEEE International Frequency Control Symposium (Cat. No. 99CH36313. IEEE, 1999, 1: 125 – 128.
- [83] WARRINGTON R B, FISK P T H, WOUTERS M J, et al. Development of a $^{171}\text{Yb}^+$ microwave frequency standard at the National Measurement Institute, Australia [C]//Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, 2005. IEEE, 2005: 611 – 615.
- [84] PARK S J, MANSON P J, WOUTERS M J, et al. $^{171}\text{Yb}^+$ microwave frequency standard [C]//2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum. IEEE, 2007: 613 – 616.
- [85] PHOONTHONG P, MIZUNO M, KIDO K, et al. Determination of the absolute microwave frequency of laser-cooled $^{171}\text{Yb}^+$ [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 673 – 680.
- [86] SHIGA N, TAKEUCHI M. Locking the local oscillator phase to the atomic phase via weak measurement [J]. *New Journal of Physics*, 2012, 14(2): 023034.
- [87] SHIGA N, MIZUNO M, KIDO K, et al. Accelerating the averaging rate of atomic ensemble clock stability using atomic phase lock [J]. *New Journal of Physics*, 2014, 16(7): 073029.
- [88] MULHOLLAND S, DONNELLAN S, BARWOOD G P, et al. A portable microwave clock using laser-cooled trapped $^{171}\text{Yb}^+$ Ions [C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium (IFCS). IEEE, 2018: 1 – 2.
- [89] MULHOLLAND S, KLEIN H A, BARWOOD G P, et al. Laser-cooled ytterbium-ion microwave frequency standard [J]. *Applied Physics B*, 2019, 125(11): 1 – 12.
- [90] MULHOLLAND S, KLEIN H A, BARWOOD G P, et al. Compact laser system for a laser-cooled ytterbium ion microwave frequency standard [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90(3): 033105.
- [91] XIN N C, QIN H R, MIAO S N et al. Laser - cooled $^{171}\text{Yb}^+$ microwave frequency standard with a short-term frequency instability of $8.5 \times 10^{-13}/\tau^{1/2}$ [J]. *Optics Express*, 2022, 30(9): 14574 – 14585.
- [92] XIN N C, ZHANG J W, MIAO S N, et al. A microwave clock based on laser - cooled $^{171}\text{Yb}^+$ ions [C]//2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). IEEE, 2022: 1 – 3.
- [93] BOLLINGER J J, PRESTAGE J D, ITANO W M, et al. Laser-cooled-atomic frequency standard [J]. *Physical Review Letters*, 1985, 54(10): 1000.
- [94] BOLLINGER J J, HEINZEN J. A 303 MHz frequency standard based on trapped [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1991, 40(2): 264 – 265.
- [95] COZIEN F M J, BIESHEUVEL J, FLORES A S, et al. Laser cooling of beryllium ions using a frequency - doubled 626 nm diode laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(13): 2370 – 2372.
- [96] VANIER J, TOMESCU C. The quantum physics of atomic frequency standards: recent developments [M]. Boca Raton: CRC Press 2015.
- [97] BECKER W, BLATT R, WERTH G. Precise determination of $^{135}\text{Ba}^+$ and $^{137}\text{Ba}^+$ hyperfine structure [J]. *Le Journal De Physique Colloques*, 1981, 42(C8): 339 – 346.
- [98] BECKER W, WERTH G. Precise determination of the ground state hyperfine splitting of $^{135}\text{Ba}^+$ [J]. *Zeitschrift fur Physik A Atoms and Nuclei*, 1983, 311(1): 41 – 47.
- [99] BLATT R, WERTH G. Precision determination of the ground-state hyperfine splitting in $^{137}\text{Ba}^+$ using the ion-storage technique [J]. *Physical Review A*, 1982, 25(3): 1476.
- [100] KNAB H, NIEBLING K D, WERTH G. Ion trap as a frequency standard measurement of Ba^+ HFS frequency fluctuation

- tutions [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1985(2): 242 – 245.
- [101] BURT E A, TAGHAVI-LARIGANI S, LEA S N, et al. Experiments with a new $^{201}\text{Hg}^+$ ion clock [M]//Frequency Standards and Metrology. 2009: 358 – 362.
- [102] TAGHAVI-LARIGANI S, BURT E A, LEA S N, et al. A new trapped ion clock based on $^{201}\text{Hg}^+$ [C]//2009 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 22nd European Frequency and Time forum. IEEE, 2009: 774 – 777.
- [103] BURT E A, TAGHAVI-LARIGANI S, TJOELKER R L. A new trapped ion atomic clock based on $^{201}\text{Hg}^+$ [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2010, 57(3): 629 – 635.
- [104] YI L, TAGHAVI-LARIGANI S, BURT E A, et al. Progress towards a dual-isotope trapped mercury ion atomic clock: Further studies of background gas collision shifts [C]//2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. IEEE, 2012: 1 – 5.
- [105] HEMMERLING B, GEBERT F, WAN Y, et al. A single laser system for ground-state cooling of $^{25}\text{Mg}^+$ [J]. Applied Physics B, 2011, 104(3): 583 – 590.
- [106] ITANO W M, WINELAND D J. Precision measurement of the ground-state hyperfine constant of $^{25}\text{Mg}^+$ [J]. Physical Review A, 1981, 24(3): 1364.
- [107] ZALIVAKO I V, SEMERIKOV I A, BORISENKO A S, et al. Microwave frequency standard on $^{25}\text{Mg}^+$ ions: expected characteristics and prospects [J]. Quantum Electronics, 2017, 47(5): 426.
- [108] ZALIVAKO I, SEMERIKOV I, BORISENKO A, et al. Microwave frequency standard based on $^{25}\text{Mg}^+$ ions [C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2017, 941(1): 012113.
- [109] XU Z T, DENG K, CHE H, et al. Precision measurement of the $^{25}\text{Mg}^+$ ground-state hyperfine constant [J]. Physical Review A, 2017, 96(5): 052507.
- [110] 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(1): 1 – 8.
- [111] 钱童心. 全球首个光钟系统升空更精准“拿捏”时间 [N]. 第一财经日报, 2022-11-02 (A01). http://www.yicai.com/epaper/pc/202211/02/node_A01.html
- QIAN T X. The world's first light clock system is launched to more accurately "hold" the time [N]. China business news, 2022-11-02 (A01). http://www.yicai.com/epaper/pc/202211/02/node_A01.html (in Chinese)

(本文编辑: 朱俊真)



第一作者: 秦浩然 (1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为离子阱微波原子钟、激光冷却与协同冷却。



通讯作者: 张建伟 (1979—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为离子阱微波原子钟、Ramsey—CPT 频标、精密光谱、时频同步与比对等。中国计量测试学会时频专业委员会委员, 全国电力系统管理及其信息交换标准化技术委员会工作组成员。



通讯作者: 王力军 (1966—), 男, 教授, 博士, 中国计量科学研究院首席研究员, 中国人民解放军国防科学技术大学兼职特聘教授, 主要研究方向为光学/精密测量物理及应用、激光与物质相互作用等基础科学、超高精度原子钟、精密时间频率信号同步、超高精度绝对重力测量。