

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311937

# 镉离子微波钟研究进展\*

苗胜楠<sup>1,2,3</sup>, 张建伟<sup>1,2,3</sup>, 王力军<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 时空信息精密感知技术全国重点实验室 北京 100084; 2. 精密测试技术及仪器国家重点实验室 北京 100084;  
3. 清华大学精密仪器系 北京 100084; 4. 清华大学物理系 北京 100084)

**摘要:**基于囚禁离子的微波原子钟在小型化及可移动方面具有优势,因而受到广泛关注。其中,<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子因其所需激光数量少,基态超精细能级分裂大等优势,成为新一代实用离子微波钟的主要候选离子。近几十年来,国内外多个实验团队开展了镉离子微波钟的研究工作。本文按照时间顺序,详细介绍了国内外不同实验团队在镉离子微波钟研究方面采用的技术路线及最新进展。

**关键词:**镉离子微波钟;缓冲气体冷却;激光冷却;协同冷却

**中图分类号:** TH714 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Research on cadmium-ion microwave clock

Miao Shengnan<sup>1,2,3</sup>, Zhang Jianwei<sup>1,2,3</sup>, Wang Lijun<sup>1,2,3,4</sup>

(1. National Key Laboratory of High Precision Space-time Information Sensing Technology, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Beijing 100084, China; 3. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Microwave atomic clocks based on trapped ions have advantages in miniaturization and mobility. Therefore, they have attracted widespread attention. Among them, the <sup>113</sup>Cd<sup>+</sup> ion has become the main candidate ions for the new generation of practical ion microwave clocks due to its advantages of low laser requirements and large ground-state hyperfine splitting frequency. In recent decades, multiple experimental teams at home and abroad have conducted research on cadmium-ion microwave clocks. This article provides a detailed introduction in chronological order of the technical routes and the latest developments adopted by different experimental teams at home and abroad in the research of cadmium-ion microwave clocks.

**Keywords:** cadmium-ion microwave clock; buffer-gas cooling; laser cooling; sympathetic cooling

## 0 引 言

时间是国际单位制中 7 个基本物理量之一,基本单位是 s。在 1960 年之前,秒定义为一个平太阳日的 1/86 400,而平太阳日来自于天文学家对地球自转的观测。1960 年,在第 11 届国际计量大会上,秒被定义为一个回归年的 1/31 556 925. 974 7。随着人类对于时间精度需求的不断提高,新的精密计时工具——原子钟出现了。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,并且在世界上任何地方都保持相同的跃迁频率。1967 年,第 13 届国际计量大会宣布将秒定义在铯 133 原子基态超精细跃迁频率上,标志着时间计量进入了原子时代<sup>[1]</sup>。

根据工作频率的不同,原子钟可以划分为微波原子钟与光学原子钟两大类。微波原子钟工作在微波波段,使用原子或离子的超精细分裂跃迁;光学原子钟工作在光频段,使用原子或离子的电子跃迁。由于超精细分裂跃迁频率一般在 10 GHz 量级,而精细能级跃迁频率大

多在 100 THz 量级,因此微波原子钟的准确度低于光学原子钟。然而,受限于体积、造价等因素,目前光学原子钟主要应用于前沿科学的实验研究。微波原子钟的结构相对简单,各类微波原子钟可以面向不同的需求,仍是目前守时授时、导航定位中使用的主要频率标准。目前,绝大多数微波原子钟基于中性原子或离子的跃迁谱线而实现。相比于中性原子,基于囚禁离子的微波原子钟在小型化及稳定性方面具有优势,因而受到广泛研究,成为新一代商业化实用微波钟的候选。基于离子的微波钟通常采用  $^{199}\text{Hg}^+$ ,  $^{113}\text{Cd}^+$ ,  $^{171}\text{Yb}^+$  离子,其钟跃迁频率分别为 40.5、15.2、12.6 GHz,较大的钟跃迁频率对应较高的预期性能。

因基态超精细分裂值在所有常见的微波钟离子跃迁频率中最大,  $^{199}\text{Hg}^+$  成为了微波离子钟研究的热门离子。自 20 世纪 80 年代起,美国航空航天局喷气推进实验室 (National Aeronautics and Space Administration Jet Propulsion Laboratory, NASA JPL) 一直在研究基于灯泵浦和缓冲气体冷却的  $^{199}\text{Hg}^+$  离子微波钟。其最新一代的汞离子钟 LITS-10 的短期频率稳定度可以达到  $4.5 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ , 天稳优于  $2.4 \times 10^{-16}$  [2]。他们研制的深空星载钟 DSAC (deep space atomic clock) 兼具小体积 (17 L, 16 kg)、低功耗 (17 W)、高性能的优势,在地面和太空中的短期频率稳定度分别可以达到  $1.5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$  和  $7 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ , 在太空中连续运行 23 天的稳定度为  $3 \times 10^{-15}$  [3-4]。此外,美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 研制了基于激光冷却的汞离子微波钟 [5]。通过将 7 个  $^{199}\text{Hg}^+$  离子囚禁在超低温的真空环境中并维持 25 mK 的超低温,他们可以获取长达 100 s 自由演化时间的 Ramsey, 短期频率稳定度达到了  $3.3 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 。

在国内,航天 203 所 [6-7]、精测院 [8-9]、航天科技五院 504 所 [10] 和航天科技五院 510 所 [11] 也在研究发展基于缓冲气体冷却的汞离子微波钟。其中,精测院研制的基于四极阱与十二极阱离子穿梭的汞离子微波钟的短期频率稳定度根据散粒噪声估算约为  $7.29 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$ , 预期长期频率稳定度可达到  $10^{-16}$  水平 [9]。

$^{171}\text{Yb}^+$  离子冷却和探测所需的激光波长为 369 和 935 nm, 更容易获取,且抗干扰能力更强。因此,基于  $^{171}\text{Yb}^+$  的离子微波钟近几年成为了国内外的研究热点。2014 年,日本信息通讯技术院 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 研制了短期频率稳定度达到  $2.09 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$  的激光冷却镱离子微波钟,系统不确定度为  $1.1 \times 10^{-14}$  [12]。英国国家物理实验室 (National Physical Laboratory, NPL) 研制了可移动式激光冷却镱离子微波钟。整个微波钟系统被封装在 6U

的机箱内,其短期频率稳定度为  $3.6 \times 10^{-12}/\sqrt{\tau}$ , 频移不确定度为  $8 \times 10^{-12}$  [13-14]。相比而言,国内的激光冷却镱离子微波钟起步较晚,但进展迅速。2022 年,清华大学实验团队研制了激光冷却镱离子微波钟,实现了短期频率稳定度  $8.5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ , 是目前世界上短期稳定度最好的镱离子微波钟 [15]。

相比于  $^{199}\text{Hg}^+$  离子和  $^{171}\text{Yb}^+$  离子,对  $^{113}\text{Cd}^+$  离子的研究相对较少。 $^{113}\text{Cd}^+$  离子核自旋为 1/2,  $^{113}\text{Cd}^+$  离子上能级  $^2\text{P}_{3/2}$  超精细分裂为 800 MHz, 仅需要一台 214.5 nm 的激光器就可以完成离子的冷却、泵浦及探测过程。由于具有以上优势,国内外均积极开展了镉离子微波钟的相关研究工作。本文将按照时间顺序,分别详细介绍国内外镉离子微波钟的发展过程。

## 1 国外镉离子微波钟研究

### 1.1 日本关西先进技术研究中心

1996 年,日本关西先进技术研究中心首先将离子囚禁技术应用在镉离子的研究中 [16]。 $^{113}\text{Cd}^+$  相关能级结构如图 1 所示。实验中使用的装置如图 2 所示。

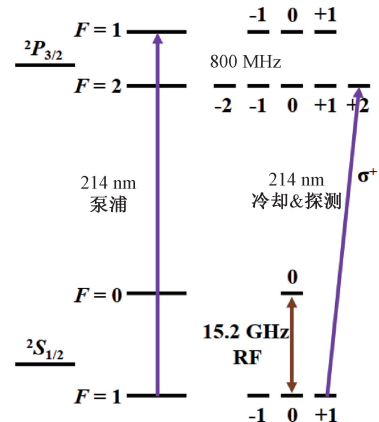
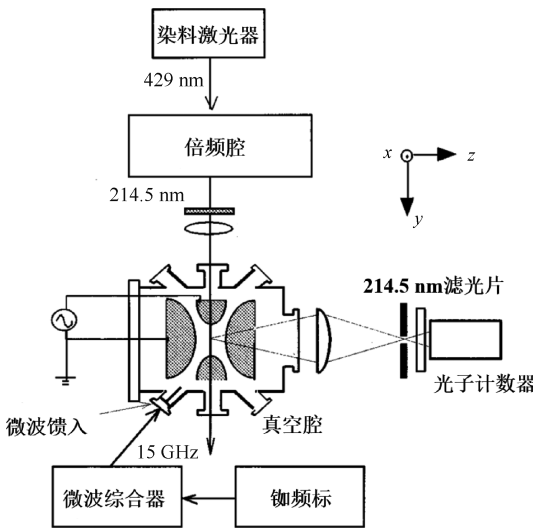


图 1  $^{113}\text{Cd}^+$  离子相关能级结构示意图

Fig. 1 Relevant energy level structure of  $^{113}\text{Cd}^+$

整个装置的核心为离子阱。目前,用于囚禁离子的离子阱主要有两种,分别为 Paul 离子阱和 Penning 离子阱。其中, Penning 离子阱使用磁场辅助囚禁离子,离子在其中的运动可以视作轴向的简谐运动,磁场中的洛伦兹力永远垂直于离子的运动方向,不对离子做功。因此, Penning 离子阱不存在额外的加热机制。然而, Penning 离子阱的局限性限制了其应用:阱中的离子处于亚稳态,受扰动的影响较大;引入较大的静磁场 (0.1 T 量级) 会对离子的能级引入较大的二阶塞曼频移,不利于原子钟这类对于磁场十分敏感的应用; Penning 离子阱往往采用双曲面电极构型,相对封闭的结构不利于激光的馈入与

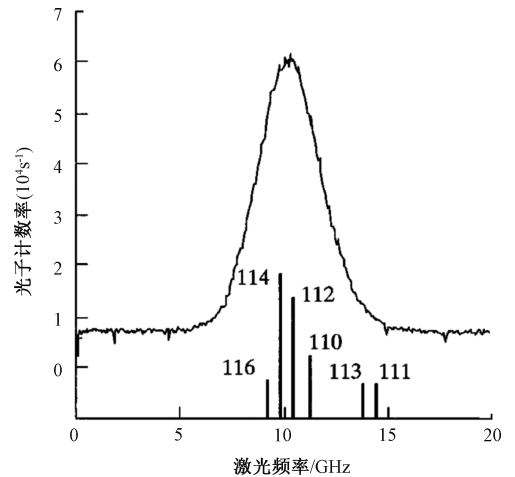
图2 实验装置<sup>[16]</sup>Fig. 2 Experimental setup<sup>[16]</sup>

探测。日本关西先进技术研究中心选用的是 Paul 离子阱的方案。Paul 离子阱由 Wolfgang Paul 于 1953 年发明,它不需要额外的磁场,而是采用静电场及射频电场囚禁离子,在原子钟应用中具备天然优势。图 2 中采用的即是典型的 Paul 离子阱:由两对双曲线型电极构成,内部圆环的直径为  $r_0 = 14 \text{ mm}$ ,两个端电极之间的间距为  $2z_0 = 20 \text{ mm}$ 。实验中,同时使用交变电场和直流电场实现镉离子的囚禁。其中,交变电压频率为  $570 \text{ kHz}$ ,幅度为  $240 \text{ V}$ ;端电压为  $5 \text{ V}$ 。

对于离子阱中囚禁的离子,其温度一般较高,须对其进行冷却,以获得分辨率更高的谱线。为了冷却镉离子,他们采用了缓冲气体冷却的方案,这是早期离子微波钟研究中常用的一种方法。缓冲气体冷却的基本原理为:温度较高的目标粒子与低温的缓冲气体在真空腔内不断发生弹性碰撞,从而实现能量的转移,最终达到热平衡状态。缓冲气体冷却技术原理上适用于任何原子、分子及离子的冷却,平衡温度由缓冲气体的平衡蒸气压决定。图 2 的实验装置中采用氦气作为缓冲气体,压强为  $5.3 \times 10^{-4} \text{ Pa}$ 。为了激发镉离子跃迁以便进行荧光探测,他们对  $429 \text{ nm}$  波长的染料激光器进行了倍频,从而获得了  $214.5 \text{ nm}$  波长的激光,输出的最大功率为  $3 \text{ mW}$ 。微波频率综合器选用 Wiltron 68359B,频率参考使用铷频标 (Hewlett-Packard 5065 A)。实验中,他们使用三对亥姆霍兹线圈补偿三个维度上的地磁场,可产生的最大磁场达  $900 \text{ mG}$ 。镉离子跃迁产生的荧光信号通过光电倍增管 (PMT) 进行收集。

通过扫描  $214.5 \text{ nm}$  激光器的频率,他们获得了镉离子的荧光信号,如图 3 所示。

由于采用自然丰度的镉元素,离子中包含多种镉同

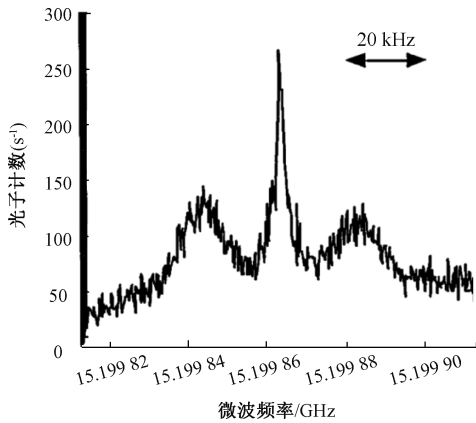
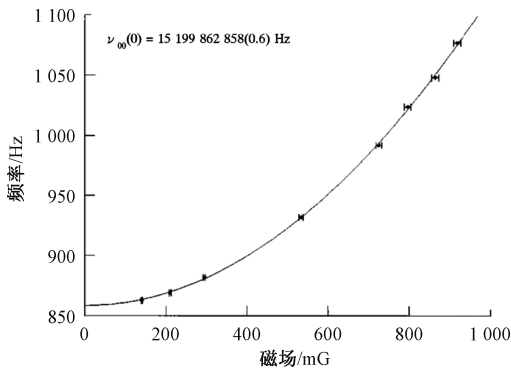
图3 观察到的自然丰度  $\text{Cd}^+$  离子云的荧光谱线Fig. 3 The observed fluorescence spectrum from the cloud of natural  $\text{Cd}^+$  ions

位素离子。图中竖线标明了偶数同位素离子及两种奇数同位素离子 ( $^{111}\text{Cd}^+$ 、 $^{113}\text{Cd}^+$ ) 的光谱位置,与之前的实验结果相一致<sup>[17]</sup>。由于 Cd 各个同位素之间的质量差异很小,故图 3 中不能明显区分出每种同位素。

为避免同位素离子的干扰,提升信噪比,他们将自然丰度的镉元素换为了  $^{113}\text{Cd}^+$  富集度高达 95% 的样本。为了获得  $^{113}\text{Cd}^+$  离子钟跃迁信号,需要使用微波对离子的超精细能级进行磁偶极跃迁探测,得到超精细能级分裂频率,主流的方法有两种:Rabi 共振谱和 Ramsey 分离振荡场。其中,Rabi 共振谱常用来得到离子跃迁频率的粗略数值,实验过程中需要将不同频率的微波  $\pi$  脉冲作用于离子,从而得到跃迁概率对微波脉冲频率的谱线,即 Rabi 共振谱。相比于 Rabi 共振谱方法,Ramsey 将微波  $\pi$  脉冲改为了两个间隔一定时间的  $\pi/2$  脉冲,因此被称为分离振荡场方法。Ramsey 分离振荡场方法进一步压窄了钟信号的线宽,可以实现更为精确的离子跃迁频率测量,但对信噪比也提出了更高的要求。实验团队选择了 Rabi 共振谱的方案,结果如图 4 所示。图 4 中包含了一个中心峰和两个由离子宏运动导致的边带,中心峰半高全宽约为  $3 \text{ kHz}$ ,且中心位置会随着磁场的变化发生轻微偏移。若采用更低的微波功率,则可以进一步压窄中心线宽。

图 4 (a) 展示了 0-0 跃迁的双共振信号,它包含了一个中心峰和两个由离子宏运动导致的边带。中心峰的位置会随着磁场的变化发生轻微偏移。图 4 (b) 展示了当阱中心磁场为  $260 \text{ mG}$  时钟信号中心峰的位置。其中,中心峰的线宽为  $4 \text{ Hz}$ 。

为了获得零磁场下  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态 0-0 跃迁的频率值,他们在实验中通过改变阱中心磁场的大小,测得了一系列的中心峰频率值,如图 5 所示。

图4  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态 0-0 跃迁的共振谱线<sup>[16]</sup>Fig. 4 Resonance spectrum of the ground-state 0-0 transition of  $^{113}\text{Cd}^+$ <sup>[16]</sup>图5 0-0 跃迁频率值与磁场大小的关系<sup>[16]</sup>Fig. 5 Magnetic-field dependence of the 0-0 transition frequency<sup>[16]</sup>

其中, 磁场大小通过测量两个磁敏跃迁频率值 ( $\Delta m_F = \pm 1$ ) 计算得到。图 5 中的抛物线通过拟合得到。根据 Breit-Rabi 公式:

$$v_{0,0}(B) = v_{0,0}(0) + 257.6B^2 \quad (1)$$

离子 0-0 跃迁频率值与磁场大小呈二次方的关系。因而, 根据图 5 中的拟合结果得到: 零磁场下,  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态 0-0 跃迁的频率值被确定为:

$$v_{0,0}(0) = 15\,199\,862\,858(2) \text{ Hz} \quad (2)$$

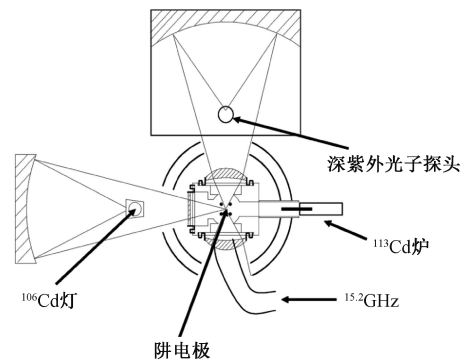
钟信号的信噪比限制了测量值的不确定度, 可通过提升磁屏蔽性能及降低微波功率进一步提升信噪比。

日本关西先进技术研究中心首先将离子囚禁技术应用于镉离子微波钟中, 在  $^{113}\text{Cd}^+$  离子微波钟的研究中迈出了重要一步。他们采用双曲线型 Paul 阱囚禁、缓冲气体冷却以及 Rabi 共振谱探测法初步确定了  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态 0-0 跃迁的频率值, 为 15 199 862 858(2) Hz。受限于离子温度较高、微波源噪声较大等因素, 实验中获取的钟信号信噪比较低, 导致最终评估的基态 0-0 超精细跃迁频

率值的不确定度较大。令人遗憾的是, 该团队未开展闭环锁定实验, 系统的短期稳定度性能未知。

## 1.2 美国喷气推进实验室

2006 年, 美国喷气推进实验室开展了  $^{113}\text{Cd}^+$  离子微波钟的研究<sup>[18]</sup>。不同于日本关西先进技术研究中心, 他们选用了线型 Paul 阱囚禁镉离子, 如图 6 所示。相比于传统的双曲线型 Paul 阱, 线型 Paul 阱构型简单、加工方便, 也便于通光调控离子, 属于 Paul 阱在实际应用中的改进型。实验中, 在两组长电极上分别施加射频电压 (1.05 MHz, 峰峰值 150 V) 以及接地, 在径向方向上囚禁离子; 两端的端电极上施加直流电压 (12 V), 轴向囚禁离子。离子阱被放置在超高真空的不锈钢真空腔中, 背景气体压力低于  $10^{-8}$  Pa。为冷却镉离子, 他们同样采用冲入氦缓冲气体的方案, 缓冲气体的压强在  $3 \times 10^{-3}$  Pa 和  $1 \times 10^{-2}$  Pa 之间可调。图 6 中的  $^{106}\text{Cd}$  谱灯用来产生泵浦光, 用于将  $^{113}\text{Cd}^+$  离子通过 D1 和 D2 线跃迁抽运至  $F=0$  基态能级, 以便进一步进行态制备, 离子跃迁发出的荧光通过光子探测器进行收集。实验中, 将  $^{113}\text{Cd}$  原子炉加热至  $60^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$  即可产生  $^{113}\text{Cd}$  原子。

图6 光路, 荧光探测及射频离子阱示意图<sup>[18]</sup>Fig. 6 Diagram of the optics, light detection, and rf ion trap<sup>[18]</sup>

实现了  $^{113}\text{Cd}^+$  离子的囚禁之后, 他们对离子的囚禁寿命进行了测量。测量过程分为 2 个阶段, 首先是离子装载过程, 持续时间为 5 min。关闭原子炉后, 锁定激光器频率, 并持续测量收集到的离子荧光一段时间, 结果如图 7 所示: 关闭原子炉后, 离子数随时间延长不断减少。通过指数拟合, 得到时间常数为 5 200 s, 即  $^{113}\text{Cd}^+$  离子的囚禁寿命约为 1.5 h。离子囚禁寿命较短, 推测主要原因为背景气体的碰撞加热效应, 导致镉离子不断逃逸出囚禁势场, 最终吸附在电极上。可行的解决方案有两种: 一是冲入温度更低的缓冲气体, 以降低对镉离子的碰撞加热作用; 二是改用激光冷却的方法。

为了获得  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态 0-0 超精细跃迁频率, 他们首先采用 Rabi 共振谱方法进行粗略测量。同时, 为了估计离子阱中心的磁场大小, 他们分别测量了  $^{113}\text{Cd}^+$  离子的



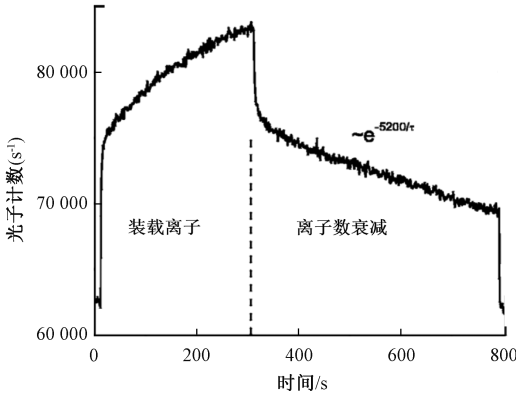


图 7 离子荧光的衰减时间<sup>[18]</sup>

Fig. 7 Decay time of fluorescence from ions<sup>[18]</sup>

两个磁敏跃迁频率值, 结果如图 8 所示。图 8 (a) 为<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子基态 0-0 跃迁中心峰及两个磁敏跃迁的中心峰( $\Delta m_F = 0, \pm 1$ )。对两个磁敏跃迁中心峰进行拟合, 得到它们之间的频率差值约为 1 250 Hz, 从而根据 Breit-Rabi 公式计算出阱中心的磁场大小为 435 mG; 图 8 (b) 为其中一个磁敏跃迁中心峰的放大显示。由图可知, JPL 实验团队获取的钟信号信噪比明显优于日本关西先进技术研究中心的实验结果。

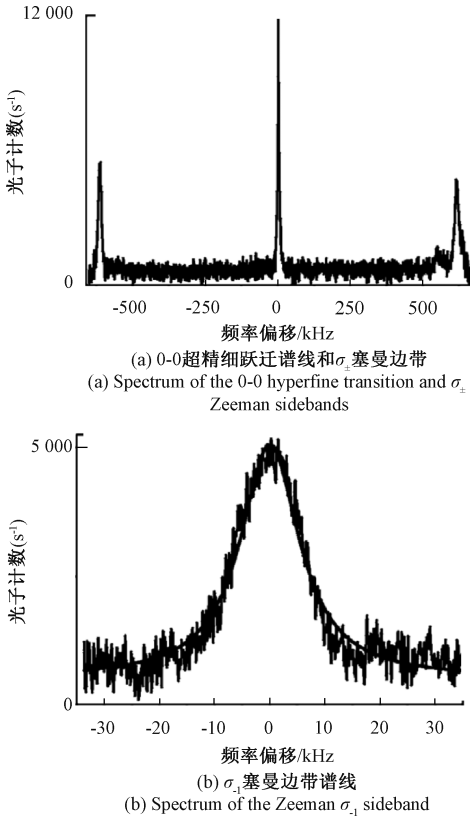


图 8 <sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>超精细跃迁谱线和塞曼边带<sup>[18]</sup>

Fig. 8 Spectrum of hyperfine transition and Zeeman sidebands of <sup>113</sup>Cd<sup>+</sup><sup>[18]</sup>

由于获取了高信噪比的钟信号, 他们采用 Ramsey 分离振荡场方法进一步压窄了钟信号的线宽, 如图 9 所示。图 9 (a) 为实验获得的 Rabi 图样, 微波脉冲的宽度为 5 s, 测量得到信号半高全宽为 0.17 Hz, 与理论公式  $\Delta f = 0.8/T_M$  的计算结果一致, 其中  $T_M$  代表微波脉冲宽度。图 9 (b) 和 (c) 为实验获得的 Ramsey 图样, 微波脉宽均为 0.3 s。其中, 图 9 (b) 的自由演化时间为 3 s, 图 9 (c) 的自由演化时间为 6 s。根据 Ramsey 信号中心峰半高全宽的计算公式  $\Delta f = 1/2T_f$  ( $T_f$  代表自由演化时间), 图 9 (c) 获得的 Ramsey 信号线宽更窄, 与实验结果相符合。

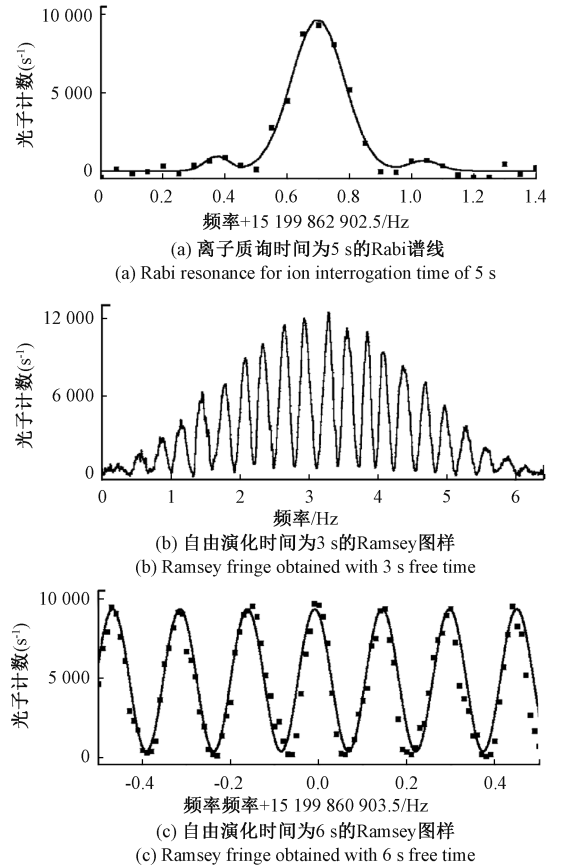


图 9 <sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子 0-0 基态超精细共振光谱<sup>[18]</sup>

Fig. 9 Resonance spectra of a 0-0 ground-state hyperfine of <sup>113</sup>Cd<sup>+</sup><sup>[18]</sup>

通过拟合 Ramsey 图样中心峰, 可以获得磁场环境下离子基态 0-0 跃迁频率值, 结合获得的阱中心磁场以及式(1), 计算得到零磁场下<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子的基态 0-0 跃迁频率值为:

$$\nu_{0,0}(0) = 15\,199\,862\,855(0.2) \text{ Hz} \quad (3)$$

该实验结果与 Tanaka 等的测量结果相差 3 Hz, 推测为二阶多普勒频移的影响, 解释如下: 实验中, 囚禁的镉离子数约为  $1-5 \times 10^6$ , 导致的二阶多普勒频移的量级为  $1 \times 10^{-12}$ , 与 3 Hz 的频移偏差结果相吻合。此外, 他们评

估了 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子微波钟的短期稳定度,给出了 $2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ 的结果,但并未提供相应的数据支持。

总体而言,在 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子微波钟的研究中,美国喷气推进实验室相比于日本关西先进技术研究中心主要做了以下改进:将双曲线型 Paul 离子阱改为线型 Paul 离子阱,使得实验装置更加紧凑,囚禁的镉离子数增多;采用 Ramsey 分离振荡场方法进一步压窄了钟信号的线宽,使得基态 0-0 跃迁频率值的测量更加精确;采用了噪声更低、分辨率更高的微波频率综合器,使得测量过程中引入的噪声更低。由于以上方面的提升,他们将零磁场下 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子基态 0-0 跃迁频率值的测量不确定度提升了一个量级,并评估了 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子微波钟的短期稳定度,但未开展闭环锁定实验研究。未来,他们可以通过提升磁屏蔽装置的屏蔽效果以及降低微波功率进一步提升信号的信噪比。

## 2 国内镉离子微波钟研究

与国外相比,国内开展镉离子微波钟的研究相对较晚。目前,国内只有清华大学王力军教授的团队在开展相关的研究。考虑到缓冲气体冷却引入的碰撞频移不可避免且限制了微波钟性能的进一步提升,清华大学研究团队摒弃了缓冲气体冷却的方案,改为采用更高效的激光冷却方案。使用激光冷却微观粒子的方案最早在 20 世纪 70 年代被提出,并很快就在囚禁离子实验中得到实现,其原理如图 10 所示:1) 处于基态的离子与一个和它运动方向相反的红失谐光子相互作用;2) 离子吸收光子,跃迁到上能级;3) 离子自发辐射光子,速度方向随机分布。从动量角度来看,离子在过程 1) 中获得了入射光子的反冲动量,而在过程 3) 中,因为辐射光子的方向是随

机的,因此多次循环跃迁平均下过程 3) 不改变离子的动量,离子速度降低;从能量角度来看,离子吸收的光子能量小于自发辐射光子的能量,离子能量降低。此外,对于离子阱中囚禁的离子而言,其不同维度的运动存在耦合,因而一束激光就可以使离子冷却下来。然而,由于辐射出的光子对离子存在反冲加热,多普勒冷却存在冷却极限。对于 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子,多普勒冷却极限温度为 1.4 mK。实验中,采用激光冷却能将离子冷却至 100 mK 以下,相比于缓冲气体冷却方案提升 2~3 个数量级,降低了由二阶多普勒频移带来的频率不确定度。

除了激光冷却的方案外,为了进一步提升镉离子微波钟的性能,他们最近又将协同冷却方案引入到了镉离子微波钟的研究中,并开展了镉离子微波钟闭环锁定的相关研究,下面将分别进行介绍。

### 2.1 激光冷却镉离子微波钟

2011 年,他们报道了搭建的第 1 代镉离子微波钟系统,系统整体构造如图 11 所示,主要由离子阱与真空系统、激光与荧光探测系统、微波系统和控制系统组成<sup>[19]</sup>。为囚禁大数目镉离子,他们对线型离子阱进行了改造。新设计的离子阱采用三段式分离结构,中间的 4 根电极用作射频电极,在径向上囚禁离子;两端的 8 根电极用作端电极,在轴向上囚禁离子。相比于传统的线型阱,新设计的离子阱有如下优势:一是通光孔径增大,便于激光调控;二是分段式设计使得电场调节更加精细,可通过在每根电极上施加不同的电压精确调控阱内电场的分布。如图 12 所示,阱内径  $r_0$  为 6.2 mm,阱电极直径  $r_e$  为 14.2 mm,材料为无氧铜,以降低材料放气和剩磁对真空和磁场的影响。其中,阱内径与电极直径的比值经过了优化设计,目的是使得离子阱内的电势分布更加接近简谐势场,从而降低射频加热效应。

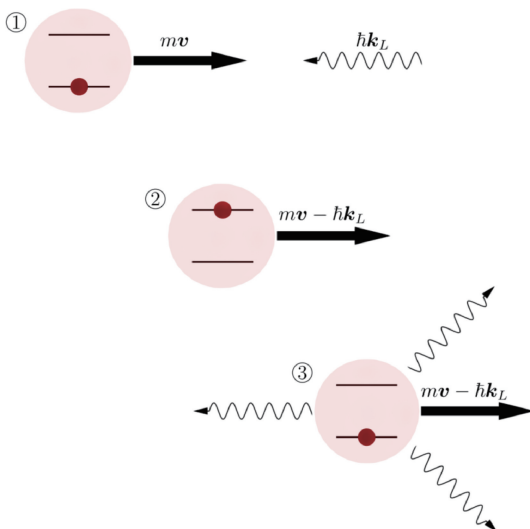


图 10 多普勒冷却原理示意图

Fig. 10 Schematic diagram of Doppler cooling

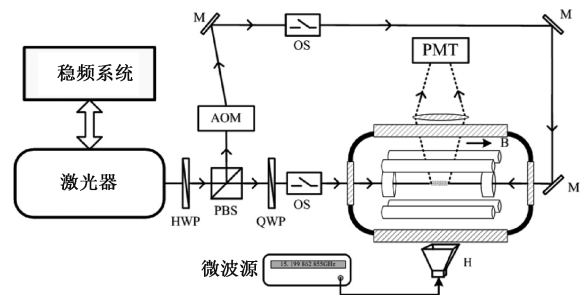


图 11 镉离子微波钟实验系统示意图<sup>[19]</sup>

Fig. 11 Diagram of the cadmium-ion microwave clock experimental system<sup>[19]</sup>

实验中囚禁的 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子如图 13 所示。随着冷却激光频率从红失谐逐渐调至近共振,镉离子系综的温度持续降低,最终在近共振区域离子发生相变,形成离子“晶

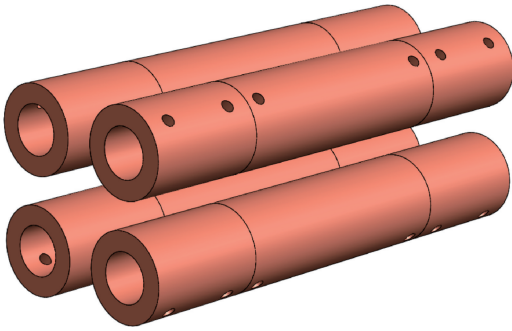


图 12 四极线性保罗离子阱<sup>[19]</sup>

Fig. 12 Quadrupole linear Paul ion trap<sup>[19]</sup>

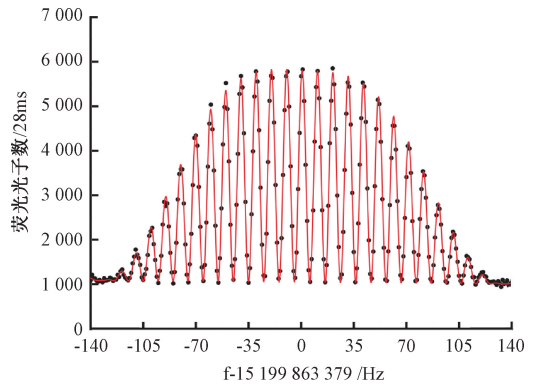


图 14 Ramsey 共振谱<sup>[19]</sup>

Fig. 14 Ramsey resonance spectrum<sup>[19]</sup>

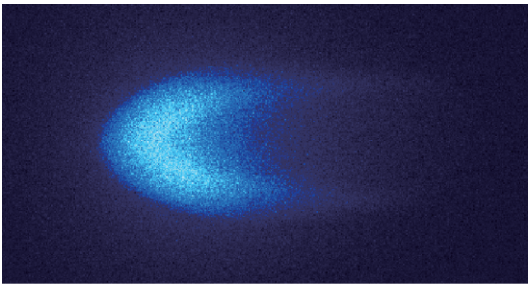


图 13 镉离子照片<sup>[19]</sup>

Fig. 13 Picture of the cadmium ions<sup>[19]</sup>

体”或“液体”。图中镉离子云呈现明显的不对称现象,主要原因如下:一是实验中采用单向 214 nm 激光对离子进行冷却,<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子会受到沿光入射方向的光压力;二是实验中使用的是自然丰度的镉元素,会产生部分镉同位素离子,这些离子不能被冷却光照亮,称为“暗离子”。

2012 年,采用 Ramsey 分离振荡场方法,他们获取了<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子的钟信号,如图 14 所示,信噪比约为 30。根据实验结果,他们计算得到镉离子微波钟系统理论的短期稳定性为  $3.5 \times 10^{-12} / \sqrt{\tau}$ 。主要考虑二阶塞曼频移及其不确定度,最终得到<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子基态跃迁频率为 15 199 862 854.96(12) Hz,与之前的测量结果相一致,且准确度有所提高。

同年,在囚禁了 10<sup>4</sup> 量级的<sup>113</sup>Cd<sup>+</sup>离子基础上,他们首次对镉离子微波钟系统开展了闭环锁定工作。闭环锁定的原理如图 15 所示<sup>[20]</sup>。

微波频率综合器 8257D 向离子发出微波信号,微波频率在 Ramsey 中心波谱半高宽位置所对应的两个频率间进行跳变,通过 Ramsey 中心波谱半高宽位置的光子数差来进行鉴频。在闭环锁定实验中,8257D 内部的晶振锁定在本地晶振 8607-BE 上。同时,8607-BE 输出一路 10 MHz 的微波信号到相位噪声分析仪 5120A 上,用以测量其频率稳定性。图 16 和 17 分别为闭环锁定前后 8607-BE 晶振输出频率的阿伦偏差,结果由 Stable32 软

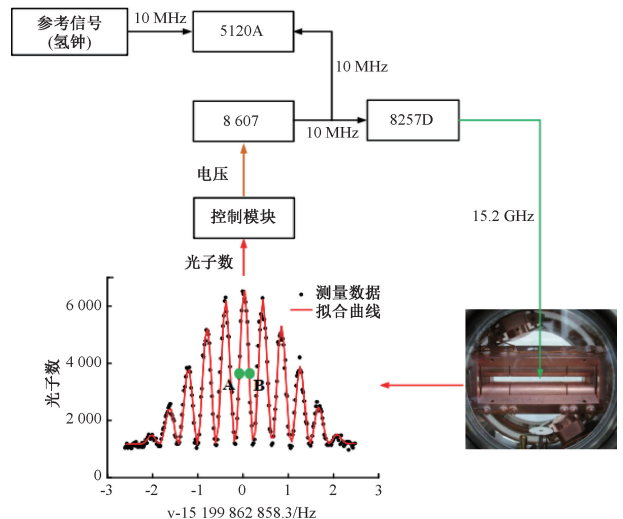


图 15 闭环锁定原理示意图<sup>[20]</sup>

Fig. 15 Schematic diagram of closed-loop locking principle<sup>[20]</sup>

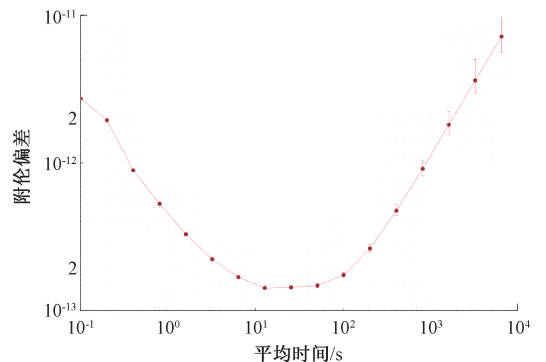


图 16 8607-BE 晶振自由运转输出频率的阿伦偏差<sup>[20]</sup>

Fig. 16 Allan deviation of free-running 8607-BE crystal oscillator<sup>[20]</sup>

件给出。由图可知,自由运转状态下,晶振 8607-BE 在 1 s 内的稳定性为  $2.8 \times 10^{-12}$ 。闭环锁定后,由于离子微

波钟信号的反馈控制,晶振的阿伦偏差曲线随时间下降,千秒稳定度为  $6 \times 10^{-14}$ 。主要考虑二阶塞曼频移和二阶普勒频移,他们对  $^{113}\text{Cd}^+$  基态超精细分裂频率进行了评估,结果为  $15\ 199\ 862\ 855.012\ 5(87)$  Hz,频率不确定度比美国喷气推进实验室的结果提高了 2 个数量级<sup>[21]</sup>。

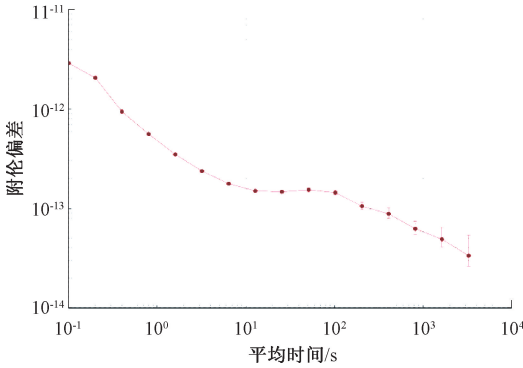


图 17 闭环锁定后,8607-BE 晶振输出频率的阿伦偏差<sup>[20]</sup>

Fig. 17 Allan deviation of 8607-BE oscillator after closed-loop locking<sup>[20]</sup>

2014 年,在已经初步实现闭环锁定的系统基础上,实验团队对第 1 代镉离子微波钟系统进行了全面优化,即镉离子微波钟第 2 代系统。鉴于二阶塞曼频移及其不确定度是限制上一代系统性能最主要的因素,新系统重点对磁场进行了优化,如图 18 所示<sup>[22]</sup>。

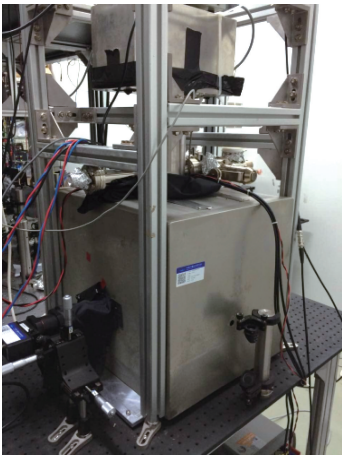


图 18 坡莫合金磁屏蔽实物图<sup>[22]</sup>

Fig. 18 Physical image of permalloy magnetic shielding<sup>[22]</sup>

新系统在真空腔外加装了磁屏蔽装置,以最大限度地屏蔽地磁场及其波动对实验的干扰。新设计的磁屏蔽装置由两层坡莫合金组成,并使用亥姆霍兹线圈提供更加稳定的 C 场。经测量,加装磁屏蔽装置后,离子阱中心磁场的波动减小到 5 nT 以内,1 s 内磁场波动标准差为 1.2 nT,磁场的稳定性得到提高,如图 19 所示。

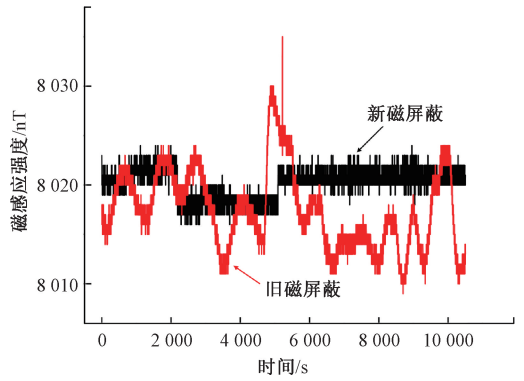


图 19 磁屏蔽效果对比图<sup>[22]</sup>

Fig. 19 Comparison of magnetic shielding effects<sup>[22]</sup>

由于激光器的输出功率随工作时间的增长存在波动和衰减等现象,会影响探测信号的稳定性,他们对探测光的功率进行了稳定。将通过 AOM 的探测光利用 PD 探测器转换为电信号,然后通过自制的 PID 控制模块驱动一个压控衰减器,而压控衰减器控制着 AOM 功率的输出,从而实现了闭环控制,保证探测光功率的稳定。图 20 为运转 3 000 s 时间内激光功率变化对比效果图。自由运转状态下,功率抖动的相对不确定度为  $8.1 \times 10^{-3}$ ,稳定后功率抖动的相对不确定度为  $5.4 \times 10^{-4}$ ,激光的功率抖动被缩小了 15 倍,有效降低了由此引入的噪声。

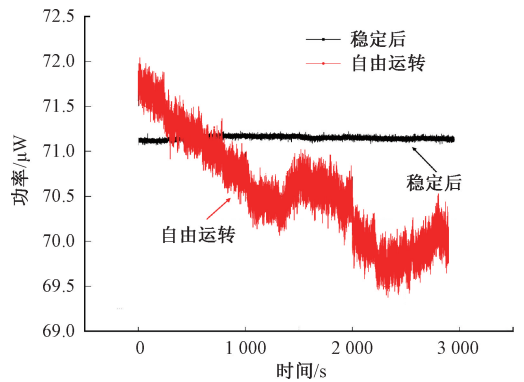


图 20 功率稳定效果图<sup>[22]</sup>

Fig. 20 Power stability rendering<sup>[22]</sup>

最后,对闭环锁定的时序进行了优化。为了保证时间控制的准确性,整个系统的开关时序都由一个 FPGA 芯片产生。FPGA 芯片型号为 Cyclone IV 型,其自带时钟输出频率为 50 MHz,足以保证时间输出的精度。对于闭环锁定的 PID 参数,他们采用了先仿真后实验的方法,即先通过 MATLAB Simulink 模块对系统建模,仿真得到一组 PID 参数,然后将参数输入实际系统中进行精细调节,这缩短了调节 PID 参数花费的时间。



经过上述优化,闭环锁定后,系统的短期稳定度由  $1.0 \sim 1.7 \times 10^{-12} / \sqrt{\tau}$  提升至  $6.1 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ 。经过与氢钟的长期比对,并考虑了二阶塞曼频移、二阶多普勒频移、碰撞频移、光频移、黑体辐射塞曼频移、黑体辐射 Stark 频移、频率参考源频移以及引力红移项后,得到  $^{113}\text{Cd}^+$  基态超精细分裂频率为  $15\,199\,862\,855.019\,2(10)$  Hz, 频率相对不确定度达到  $6.6 \times 10^{-14}$ <sup>[23]</sup>。该结果与之前的测量结果符合较好,测量准确度进一步提升。相比于上一代系统,最主要的频移不确定度贡献项(二阶塞曼频移、二阶多普勒频移)均得到了一定程度的降低,也是第二代镉离子微波钟系统性能提升的关键。

2020年,他们设计搭建了一套全新的镉离子微波钟系统,即第3代镉离子微波钟系统,如图21所示。

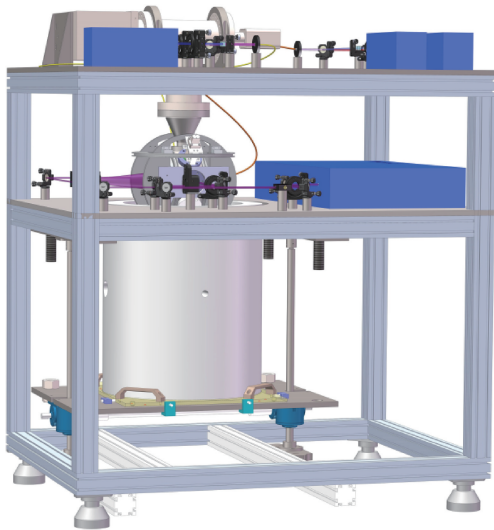


图21 高性能镉离子微波钟系统

Fig. 21 High performance cadmium-ion microwave clock system

整个系统分为3层,上层的平板用于支撑离子泵和搭建实验光路;中间层用于放置核心的真空腔;下层为可升降位移台,其上有着新设计的高性能磁屏蔽桶。相比于上一代系统,最新设计的系统主要做了以下方面的改进:1)对磁屏蔽装置进行了重新设计,磁屏蔽性能进一步提升。新设计的磁屏蔽装置由5层坡莫合金和1层软铁组成,在实验室环境下可将外磁场波动降低到  $0.1$  nT 以下,相较于上一代系统,磁屏蔽效果提升了50倍。此外,为磁屏蔽系统设计了可升降位移台,整个系统位于手摇升降位移台上,当升至指定位置时可用螺丝锁紧加以固定,为后续实验的调试提供了极大的便利。2)不同于上一代系统放置在实验平台上的亥姆霍兹线圈的设计,新设计的三对线圈固定在真空腔上,减少了真空腔和线圈之间的相对移动对C场的影响。线圈框架采用聚四氟乙烯材料,具有机械强度高、耐高温等优点。3)采用高精度

电流源提供更加稳定的C场,电流源的短期稳定度可达  $4.6 \times 10^{-6} \text{ A} / \sqrt{\tau}$ 。

总体而言,整个物理装置的结构更加紧凑,并且整个系统被设计在有着4个万向轮的铝型材框架钟,以应对车载的需求。对新系统进行闭环锁定,得到新一代  $^{113}\text{Cd}^+$  离子微波钟的短期稳定度为  $4.2 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ , 相比于上一代系统提升近一倍。对各项系统频移仔细评估后(如表1所示),  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态超精细能级分裂值确定为  $15\,199\,862\,855.027\,99(27)$  Hz, 相对频率不确定度为  $1.8 \times 10^{-14}$ , 相比上一代系统提升4倍<sup>[24]</sup>。表2列出了目前为止对  $^{113}\text{Cd}^+$  离子基态超精细能级分裂值的测量结果,可知清华大学实验团队的测量精度最高。

表1 系统频移及其不确定度<sup>[24]</sup>

Table 1 Systematic frequency shifts and uncertainties<sup>[24]</sup>

频移	频移幅度 ( $10^{-15}$ )	不确定度 ( $10^{-15}$ )
二阶塞曼频移	105 720	3
二阶多普勒频移	-65.9	3.6
黑体辐射斯塔克频移	-0.181 5	<0.1
黑体辐射塞曼频移	-0.009 81	<0.01
引力红移	4.7	0.1
压力频移	0	<0.1
光频移	0	0
总和	105 658.6	4.6

表2 不同测量结果比对<sup>[24]</sup>

Table 2 Comparison of different measurement results<sup>[24]</sup>

来源	测量结果/Hz	不确定度
Tanaka U (Japan)	15 199 862 858(2)	$1.3 \times 10^{-10}$
Jelenkovic B (JPL)	15 199 862 855.0(2)	$1.3 \times 10^{-11}$
Zhang J W (Tsinghua University)	15 199 862 854.96(12)	$7.9 \times 10^{-12}$
Wang S G (Tsinghua University)	15 199 862 855.012 5(87)	$5.7 \times 10^{-13}$
Miao K (Tsinghua University)	15 199 862 855.028 7(10)	$6.6 \times 10^{-14}$
Miao S N (Tsinghua University)	15 199 862 855.027 99(27)	$1.8 \times 10^{-14}$

## 2.2 协同冷却镉离子微波钟

实验发现,激光冷却镉离子微波钟的方案存在一些系统性问题:一是在微波质询过程中,镉离子不能得到有效冷却,导致离子温度上升,系统性能下降;二是冷却过程属于系统死区时间,不能避免,限制了微波钟性

能的进一步提升。为此,清华大学实验团队开展了基于协同冷却的镱离子微波钟的研究。协同冷却离子的基本原理是利用离子间的库仑相互作用,实现一种离子(冷却剂离子,激光冷却)对另一种离子(钟跃迁离子,协同冷却)的持续冷却。相比于激光冷却离子微波钟,协同冷却离子微波钟具有以下优势:1)系统环路中不需要引入额外的激光冷却过程,缩短了环路的死区时间,可以有效降低 Dick 效应,提高离子微波钟的稳定性;2)持续的冷却延长了离子的相干寿命,使得微波质询过程可以延长,从而压窄钟跃迁谱线的线宽,提高离子微波钟的稳定性;3)持续维持钟跃迁离子的低温状态,可以减小离子的 Doppler 频移及其不确定度,降低离子微波钟的 B 类不确定度。

2018 年,实验团队首次开展了基于协同冷却镱离子微波钟的研究。实验选取的冷却剂为 $^{24}\text{Mg}^+$ 离子,利用离子间库仑相互作用冷却 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子。实验团队首次在线型 Paul 离子阱中实现了质量数比为 4.71 含约  $3.3 \times 10^5$  个离子的大型混合离子晶体的协同冷却,如图 22 所示<sup>[25]</sup>。实验中,通过 12 张 EMCCD (electron multiplying charge coupled device) 图片合成了 $^{113}\text{Cd}^+ - ^{24}\text{Mg}^+$ 双组分离子晶体图像。图 22(b)和(c)分别为使用滤光片时记录的 $^{24}\text{Mg}^+$ 和 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子图像。图 22(a)为两种晶体的叠加,其中图 22(d)最左侧为扫动激光位置 10 次测量的平均结果,离子晶体的外轮廓如虚线所示。由于冷却光单向入射,产生的辐射压力导致两种离子在轴向完全分离。通过测量镱离子  $\text{D}_2$  线的多普勒展宽,得到 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子的温度低于 200 mK,对应的离子二阶多普勒频移为  $6.26 \times$

$10^{-16}$ 。然而, $^{24}\text{Mg}^+$ 离子容易和背景气体中的氢气发生反应,生成  $\text{MgH}^+$  暗离子,不能长期对 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子进行冷却,实验中获得钟跃迁信号信噪比较低,因而未开展闭环锁定工作。

2019 年,实验团队将冷却剂改为了相对稳定的 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子,并且 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子所需的激光器均为半导体激光器,使得系统可靠性提升<sup>[26]</sup>。图 23 为实验获得的 $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 双组分离子晶体<sup>[27]</sup>。其中,图 23(a)是没有滤光片下的图像;图 23(b)是在两种离子所对应滤光片下分别进行拍照,后期合成得到的图片,并进行了简单的消色差处理;图 23(c)是分子动力学仿真 MD (molecular dynamics) 得到的结果,与实验结果符合较好<sup>[28]</sup>。由图可知,在协同冷却双组分离子晶体中,较轻的 $^{40}\text{Ca}^+$ 呈椭球状结构,位于中心位置,而较重的 $^{113}\text{Cd}^+$ 则包围在 $^{40}\text{Ca}^+$ 椭球外侧,呈空心套筒状结构。经 214.5 nm 探测光扫描测量,得到在协同冷却条件下, $^{113}\text{Cd}^+$ 离子云的典型温度为 80 mK。考虑到电场对离子温度的影响,他们对不同射频电压  $V_{\text{RF}}$  和端电压  $U_{\text{end}}$  下的离子温度进行了测量和比较,结果如图 24(a)和(b)所示:随着端电压  $U_{\text{end}}$  的升高,离子会被更多地向中间挤压,使得 $^{113}\text{Cd}^+$ 更加远离离子阱的中心轴线,离子受到射频加热的作用更加显著,因此离子温度升高。射频电压  $V_{\text{RF}}$  则存在一个最优值,在本实验中为  $V_{\text{RF}} = 168 \text{ V}$ 。原因分析如下:当射频电压  $V_{\text{RF}} > 168 \text{ V}$  时,随着射频电压的升高,射频加热作用更加显著,导致离子温度升高;当射频电压  $V_{\text{RF}} < 168 \text{ V}$  时,随着射频电压的

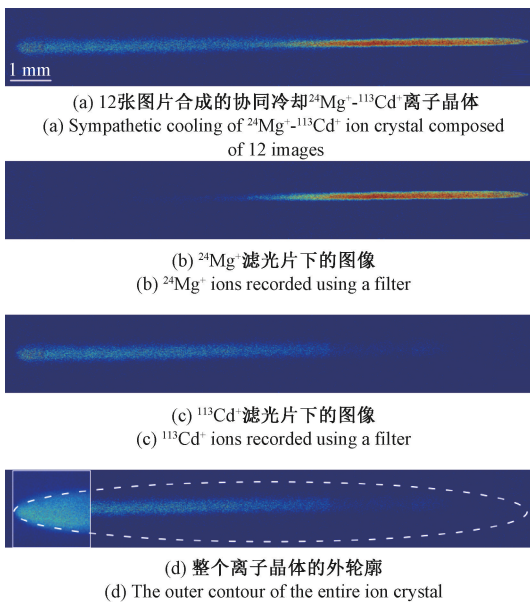


图 22 协同冷却 $^{24}\text{Mg}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 双组分离子晶体<sup>[25]</sup>

Fig. 22 Sympathetic cooling of  $^{24}\text{Mg}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$  bicomponent ion crystal<sup>[25]</sup>

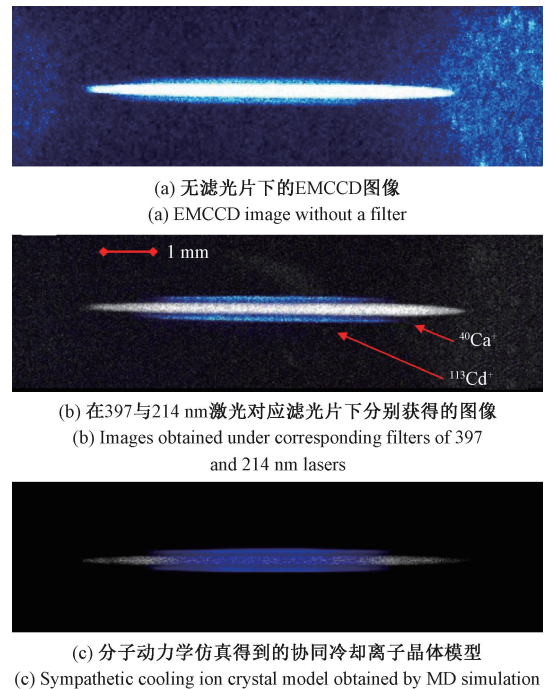
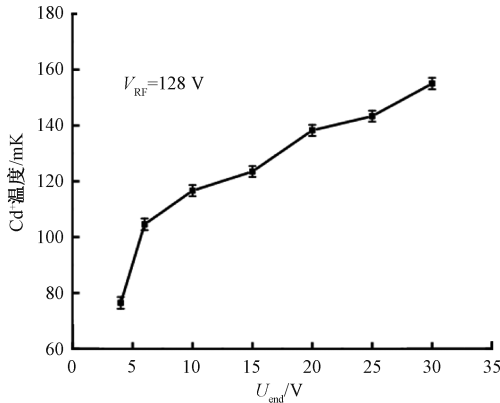


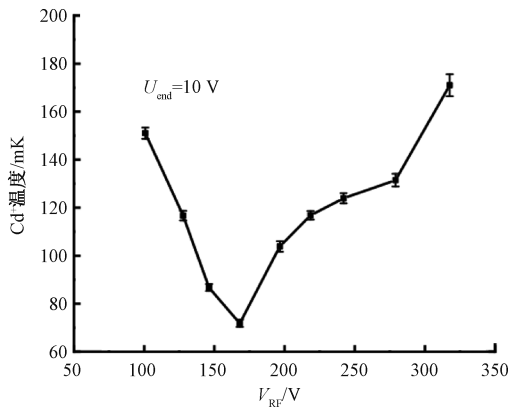
图 23 协同冷却 $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 双组分离子晶体<sup>[27]</sup>

Fig. 23 Sympathetic cooling of  $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$  bicomponent ion crystal<sup>[27]</sup>

降低,囚禁势阱逐渐变浅,更多的 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子位于离子阱中心轴线更远的位置上,也会受到更多的射频加热,因此离子温度也会升高。



(a) 不同端电压 $U_{\text{end}}$ 下离子温度测量  
(a) Measurement of ion temperature under different  $U_{\text{end}}$



(b) 不同射频电压 $U_{\text{RF}}$ 下离子温度测量  
(b) Measurement of ion temperature under different  $U_{\text{RF}}$

图24 不同射频电压 $V_{\text{RF}}$ 和端电压 $U_{\text{end}}$ 下离子温度测量<sup>[28]</sup>

Fig. 24 Measurement of ion temperature under different  $V_{\text{RF}}$  and  $U_{\text{end}}$  <sup>[28]</sup>

由于采用了协同冷却技术, $^{113}\text{Cd}^+$ 离子可以得到持续的冷却,包括微波质询过程,实验团队获得了最高长达100 s自由演化时间的Ramsey信号,如图25所示。此时信号的信噪比为7.4。理论上,增加自由演化时间可以压窄钟信号线宽,进而提升系统的短期稳定性性能,但实验发现,当自由演化时间增加到一定程度,继续增加自由演化时间反而会降低鉴频信号的信噪比,使得系统性能下降。原因如下:随着自由演化时间的增加,镱离子受到背景气体碰撞而退相干的概率增大,从而使得钟信号信噪比下降。综合考虑以上因素,实验中闭环锁定时设定的自由演化时间为5 s,最终得到 $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 协同冷却离子微波钟的短期频率稳定度为 $3.48 \times 10^{-13} / \sqrt{\tau}$ <sup>[27]</sup>,相比激光冷却镱离子微波钟最佳的短期频率稳定度提升了近1倍,展现了协同冷却离子微波钟优异的频率稳定性

能。然而, $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 协同冷却的方案存在一个弊端:在 $^{40}\text{Ca}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 双组分子晶体中, $^{113}\text{Cd}^+$ 离子受到 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的库仑排斥作用而位于双组分晶体的外侧,离子的额外微运动幅度增大,导致二阶多普勒频移及其不确定度增加,成为了限制镱离子微波钟性能进一步提升的主要因素。

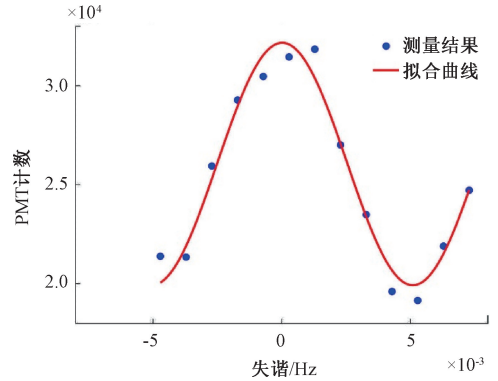


图25 自由演化时间为100 s的Ramsey信号

Fig. 25 Ramsey fringe with a free evolution time of 100 seconds

为突破二阶多普勒频移及其不确定度的限制,实验团队于2022年开始使用 $^{174}\text{Yb}^+$ 离子充当冷却剂离子<sup>[29-31]</sup>,其优势如下:首先, $^{174}\text{Yb}^+$ 与 $^{113}\text{Cd}^+$ 的质量差异更小,二者发生弹性碰撞时可以交换更多的能量,预期可以取得更好的协同冷却效果;其次, $^{174}\text{Yb}^+$ 的质量数大于 $^{113}\text{Cd}^+$ ,在形成的双组分子晶体中, $^{113}\text{Cd}^+$ 位于内侧,受到的射频加热和二阶Doppler频移相对较小。因此,使用 $^{174}\text{Yb}^+$ 作冷却剂离子预期可以进一步提升镱离子微波钟的性能。目前,他们已实验获得了 $^{174}\text{Yb}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 双组分子晶体,并初步测得 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子的温度约为100 mK,但未达到预期的效果,未来还需要对囚禁电势场和激光功率等参数进行进一步优化。

### 3 结 论

作为下一代实用微波钟的候选,基于离子的微波原子钟目前是各国原子钟领域的研究热点。 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子由于所需激光数量少以及超精细能级分裂大等优势,受到了国内外研究团队的广泛关注。其中,1996年,日本关西先进技术研究中心采用“双曲线型离子阱+缓冲气体冷却+Rabi共振谱”的方案,将 $^{113}\text{Cd}^+$ 离子基态超精细能级跃迁频率确定为 $15\,199\,862\,858(2)$  Hz,相对频率不确定度为 $1.3 \times 10^{-10}$ 。2006年,来自美国喷气推进实验室的研究团队对数据进行了更新,他们将双曲线型离子阱改为结构简单、通光孔径大、囚禁离子数目更多的线型离子阱,同时采用Ramsey分离振荡场方法进一步压窄了钟跃



迁信号的线宽,将钟跃迁频率值更新为 15 199 862 855 (0.2) Hz,不确定度提升至  $1.3 \times 10^{-11}$ 。

相比而言,国内开展镱离子微波钟的研究相对较晚。2010年,清华大学王力军教授的实验团队在国内首先开展了相关的研究。为降低碰撞频移,他们摒弃了缓冲气体冷却的方案,采用更高效的激光冷却方案,获得了温度更低的镱离子系综。此外,他们将协同冷却技术引入了离子微波钟的研究中,进一步提升了镱离子微波钟的性能。2021年,该实验团队搭建的新一代激光冷却镱离子微波钟系统的短期稳定度为  $4.2 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ ,相对频率不确定度为  $1.8 \times 10^{-14}$ ,相对频率不确定度相比美国 JPL 的实验结果提升了近 3 个数量级。此外, $^{113}\text{Cd}^+$ 离子基态超精细能级的跃迁频率被确定为 15 199 862 855.027 99(27) Hz,是目前世界上最准确的测量结果。在协同冷却镱离子微波钟方面,他们用 $^{40}\text{Ca}^+$ 做冷却剂离子,将镱离子微波钟的短期稳定度提升至  $3.48 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$ ,超过了目前短期稳定度最好的激光冷却镱离子微波钟,展现了协同冷却技术的优势。此外,实验团队还在考虑进一步提升镱离子微波钟的性能,他们将冷却剂换为了预期效果更好的 $^{174}\text{Yb}^+$ 离子,相信在不久的将来可以看到相关报道。

综上,在镱离子微波钟研究方面,技术在不断迭代,系统也在不断升级。从缓冲气体冷却到激光冷却,从激光冷却再到协同冷却,目标离子的温度不断降低,系统性能也在不断提升。从最初的双曲线型离子阱到线型离子阱再到各种改进型的线型离子阱,离子阱朝着结构简单、通光孔径大、离子容量高的方向不断发展,目前在离子微波钟中的应用已经非常成熟。Ramsey 分离振荡场方法也已经逐渐取代 Rabi 共振谱方法,成为离子微波钟系统研究中主流的钟信号获取方案。到目前为止,二阶塞曼频移与二阶多普勒频移是限制各个团队镱离子微波钟系统性能的两大主要因素,也是限制其他离子微波钟系统性能的主要因素。对于二阶塞曼频移,主流的解决方案是设计磁屏蔽性能更好的磁屏蔽装置,以降低该项的贡献;对于二阶多普勒频移,解决方案有两种:一是采用少离子体系,例如一串离子,使所有离子均位于离子阱轴线上,最大程度降低额外微运动的贡献;二是采用协同冷却的方案,使用另外一种离子持续冷却目标离子,同时保证目标离子位于双组分子离子体系的内层(例如 $^{174}\text{Yb}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$ 方案),以降低微运动的影响。攻克了以上两大主要影响因素后,镱离子微波钟的性能将更上一个台阶。

总体而言,国内外实验团队在镱离子微波钟研究方面取得的成果丰富了离子微波钟的相关研究,推进了离子微波钟走向商业实用微波钟的进程。

## 致谢

衷心感谢李天初院士在本团队开展镱离子微波钟相关研究过程中给予的极大帮助,包括研究前期科研设备的支持、研究过程中的指导、取得阶段性进展时的肯定和鼓励。谨以此文纪念李天初院士。

## 参考文献

- [1] BIPM. Historical perspective: Unit of time, second[EB/OL]. [2023-01-10]. <https://www.bipm.org/en/history-si/second>.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] XUE X, ZHOU T, WANG N, et al. Recent progress on quantum frequency standards at BIRMM[J]. Frontiers in Physics, 2022: 936.
- [7] 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-ion microwave frequency standard mercury spectral lamp[J]. Aerospace Measurement Technology, 2020, 40(3): 27-30.
- [8] 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.
- [9] 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: Volume III. Springer, 2022: 345-352.

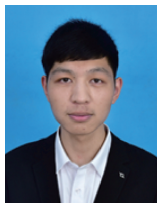


- [10] 辛弄潮, 蒙艳松, 张荣彦, 等. 星载汞离子微波钟射频频无极灯折射透镜仿真设计[J]. 空间电子技术, 2018, 15(5): 22-26+34.  
XIN N CH, MENG Y S, ZHANG R Y, et al. Simulation design of refractive lens for spaceborne mercury ion microwave clock RF electrodeless lamp [J]. Space Electronics Technology, 2018, 15 (5): 22-26+34.
- [11] 杨军, 朱宏伟, 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 ZH D. Design of a segmented linear trap and analysis of its ion trapping performance[J]. Aerospace Measurement Technology, 2022, 42 (3): 1-6.
- [12] 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: 673-680.
- [13] 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.
- [14] MULHOLLAND S, KLEIN H A, BARWOOD G P, et al. Laser-cooled ytterbium-ion microwave frequency standard[J]. Applied Physics B, 2019, 125(11): 198.
- [15] 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  $8.5 \times 10^{-13}/\sqrt{\tau}$  [J]. Optics Express, 2022, 30(9): 14574-14585.
- [16] TANAKA U, IMAJO H, HAYASAKA K, et al. Determination of the ground-state hyperfine splitting of trapped  $^{113}\text{Cd}^+$  ions [J]. Physical Review A, 1996, 53(6): 3982.
- [17] IMAJO H, HAYASAKA K, OHMUKAI R, et al. High-resolution ultraviolet spectra of sympathetically-laser-cooled  $\text{Cd}^+$  ions[J]. Physical Review A, 1996, 53(1): 122.
- [18] JELENKOVIC B M, et al. High-resolution microwave-optical double-resonance spectroscopy of hyperfine splitting of trapped  $^{113}\text{Cd}^+$  ions[J]. Physical Review A, 2006, 74(2): 022505.
- [19] 王正博. 北斗同步, 授时方案与激光冷却镉离子微波频标的研究[D]. 北京:清华大学, 2012.  
WANG ZH B. Research on Beidou synchronization, timing scheme and laser-cooled cadmium-ion microwave frequency standard [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [20] 王时光. 高精度镉离子原子钟[D]. 北京:清华大学, 2013.  
WANG SH G. High precision cadmium-ion microwave atomic clock[D]. Beijing:Tsinghua University, 2013.
- [21] 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.
- [22] 缪凯. 镉离子微波原子钟 [D]. 北京:清华大学, 2016.  
MIAO K. Cadmium-ion microwave atomic clock [D]. Beijing:Tsinghua University, 2016.
- [23] 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; Erratum [J]. Optics Letters, 2021, 46(20): 5207-5207.
- [24] 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.
- [25] 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, 2019, 115(6).
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] MIAO S N, QIN H R, XIN N C, et al. Sympathetic cooling of a large  $^{113}\text{Cd}^+$  ion crystal with  $^{40}\text{Ca}^+$  in a linear Paul trap [J]. Chinese Journal of Physics, 2023, 83: 242-252.
- [29] MIAO S N, ZHANG J W, XIN N C, et al. Research on

sympathetic cooling  $^{113}\text{Cd}^+ - ^{174}\text{Yb}^+$  system by molecular dynamics simulation [ C ]. 2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium ( EFTF/IFCS ). IEEE, 2021: 1-3.

- [30] MIAO S N, ZHANG J W, XIN N C, et al. Progress towards a microwave frequency standard based on sympathetically-cooled  $^{113}\text{Cd}^+$  ions [ C ]. 2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium ( EFTF/IFCS ). IEEE, 2022: 1-4.
- [31] ZHENG Y, QIN H R, MIAO S N, et al.  $^{174}\text{Yb}^+ - ^{113}\text{Cd}^+$  sympathetic-cooling bi-species Coulomb crystal applied to microwave frequency standard [ J ]. Applied Physics Letters, 2023, 123(8).

## 作者简介



**苗胜楠**, 2020 年于清华大学获得学士学位, 现为清华大学精密仪器系博士研究生, 主要研究方向为离子微波钟、激光冷却、分子动力学仿真及离子相变。

E-mail: msn20@mails.tsinghua.edu.cn

**Miao Shengnan** received his B. Sc. degree from Tsinghua University in 2020. He is currently a Ph. D. candidate in the Department of Precision Instruments at Tsinghua University. His main research interests include the ion microwave clocks, laser cooling, molecular dynamics simulation, and ion phase transition.



**张建伟**(通信作者), 2002 年于北京大学获得学士学位, 2007 年于北京大学获得博士学位, 现为清华大学精密仪器系副研究员, 主要研究方向为微波量子频标(原子钟)、时间频率测量、精密激光光谱。

E-mail: zhangjw@tsinghua.edu.cn

**Zhang Jianwei** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Peking University in 2002, and Ph. D. degree from Peking University in 2007. He is currently an associate researcher in the Department of Precision Instruments at Tsinghua University. His main research interests include the microwave quantum frequency standards (microwave atomic clocks), time frequency measurement, and precision laser spectroscopy.



**王力军**, 1986 年于中国科学技术大学获得学士学位, 1992 年于美国罗切斯特大学获得博士学位, 现为清华大学物理系、精密仪器系双聘教授, 主要研究方向为超高精度原子钟、精密时间频率信号同步、超高精度绝对重力测量。

E-mail: lwj@tsinghua.edu.cn

**Wang Lijun** received his B. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1986, and Ph. D. degree from the University of Rochester, USA, in 1992. He is currently a dual professor in the Department of Physics and the Department of Precision Instruments at Tsinghua University. His main research interests include the ultra-high precision atomic clocks, precise time-frequency signal synchronization, and ultra-high precision absolute gravity measurement.