

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.03.11

# 不确定度和稳定度达 $10^{-18}$ 量级的钙离子光频标

黄焱<sup>1</sup>, 管桦<sup>1\*</sup>, 高克林<sup>1\*</sup>

(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. 武汉量子技术研究院, 湖北 武汉 430206)

**摘要:** 主要回顾了中国科学院精密测量科学与技术创新研究院在液氮低温钙离子光频标的物理系统设计、不确定度评估与稳定度的优化与测量等方面的工作。液氮低温系统为钙离子创造了液氮的温度环境 (~ 80 K), 极大降低了钙离子光频标的黑体辐射频移, 使钙离子光频标的系统不确定度降至  $3.0 \times 10^{-18}$ , 成为第五种不确定度进入  $10^{-18}$  的原子/离子光频标体系。为了优化钙离子光频标的稳定度, 将钟激光频率参考在 Ramsey 条纹上, 并引入了参考条纹判定算法及自动寻峰算法, 使钙离子光频标可长期稳定运行, 长期稳定度达到  $6.3 \times 10^{-18} @ 524\,000$  s。

**关键词:** 光频标; 液氮低温光频标; 不确定度; 稳定度

中图分类号: TB939

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795(2023)03-0116-13

## Ca<sup>+</sup> optical frequency standard with systematic uncertainty and stability at the $10^{-18}$ level

HUANG Yao<sup>1</sup>, GUAN Hua<sup>1\*</sup>, GAO Kelin<sup>1\*</sup>

(1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences,

Wuhan 430071, China; 2. Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China)

**Abstract:** This paper mainly reviews the work on the physical system design of the liquid-nitrogen-cooled <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clock, the evaluation of its uncertainty and the optimization of the stability for the <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clocks in the Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology of the Chinese Academy of Sciences. The liquid-nitrogen-cooled system creates a liquid-nitrogen temperature environment (~ 80 K) for the <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup>, which greatly reduces the blackbody radiation (BBR) frequency shift of the <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clock, and improve its systematic uncertainty to  $3.0 \times 10^{-18}$ , becoming the fifth type of atomic/ion optical clocks with uncertainty reaching to the  $10^{-18}$  level. In order to optimize the stability of the <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clock, the clock laser frequency was referenced to the Ramsey fringe, and the reference fringe determination algorithm and the automatic peak-finding algorithm were introduced, making the <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clocks run stably for a long time and reach a stability of  $6.3 \times 10^{-18}$  with an averaging time of 524 000 s.

**Key words:** optical frequency standard; liquid-nitrogen-cooled optical frequency standard; frequency uncertainty; frequency stability

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(2022YFB3904001, 2018YFA0307500, 2021YFB3900701, 2021YFF0603802, 2021YFF0600102); 国家自然科学基金(12022414, 12121004); 中国科学院青年创新促进会项目(Y201963, Y2022099); 中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划(YsBR-055); 湖北省创新群体项目(2022CFA013); 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院交叉培育项目(S21S2201)

引用格式: 黄焱, 管桦, 高克林. 不确定度和稳定度达  $10^{-18}$  量级的钙离子光频标[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 116-128.

Citation: HUANG Y, GUAN H, GAO K L. Ca<sup>+</sup> optical frequency standard with systematic uncertainty and stability at the  $10^{-18}$  level[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(3):116-128.



## 0 引言

近二十年来,随着激光器、超稳腔、光学频率梳等的不断发展,原子/离子囚禁技术的不断进步,光频标得到了迅速发展。得益于光学频率约为微波频率的 $10^4\sim 10^5$ 倍,目前光频标的不确定度与稳定度都已远超当前的时间定义标准——铯原子喷泉钟<sup>[1]</sup>。鉴于光频标的优秀性能,国际计量局下属的国际计量委员会已将包括钙离子光频标在内的9种光频标推荐为次级秒定义参考体系,未来可能会基于光频标组成的网络来重新定义国际单位制秒<sup>[2-3]</sup>。光频标的超高精度使光学频率成为目前精度最高的可直接测量物理量<sup>[1]</sup>,故可基于高精度光频标开展一系列精密测量实验。如通过测量两种不同钟跃迁频率间的比值随时间的长期变化来测量 $\alpha$ 常数是否随时间变化<sup>[4]</sup>、通过测量两台光频标间的频率差来测量它们之间的高程差<sup>[3]</sup>、通过钟跃迁频率与外部电磁场间的关系测量朗德g因子<sup>[5]</sup>、静态极化率<sup>[6]</sup>、二阶Zeeman频移因子<sup>[7]</sup>及其他原子常数等。未来,高精度光频标将会在生产生活、科研、国防等领域发挥重要作用。

本文主要总结了近年来中国科学院精密测量与技术创新研究院(简称精密测量院)在液氮低温钙离子光频标研究方面的工作及在优化钙离子光频标稳定度方面取得的进展。全文分为四部分:第一部分概括了国内外光频标的进展情况及对钙离子光频标的介绍;第二部分介绍了液氮低温钙离子光频标的系统结构;第三部分介绍了液氮低温钙离子光频标的系统不确定度评估;第四部分介绍了钙离子光频标稳定度优化方法及结果。

## 1 国内外光频标进展概述

国际上诸多单位都进行了光频标的研究,几种被广泛研究的光频标的不确定度和稳定度指标见表1,一些光频标的不确定度都已进入 $10^{-18}$ 量级甚至更低<sup>[5, 8-13]</sup>。按种类不同,光频标可分为单离子光频标与中性原子光晶格光频标。在单离子光频标中,单个离子被囚禁于Pauli阱中,离子的宏运动通过多普勒冷却或边带冷却降低,微运动通过外加补偿电压抑制<sup>[8-9]</sup>。单离子光频标的优点是离子囚禁简单、性能稳定、受外界影响小、能得到较好的不确定度;缺点是每次只有一个离子被钟激光探测、量子投影噪声大、稳定度低于多原子光频标<sup>[14]</sup>。在中性原子光频标中,原子被囚禁于光晶格中,由于中性原子不带电,可同时囚禁大量原子进行实验,但用于囚禁原子的激光功率一般较大,囚禁光会造成较大的交流斯塔克频移及其不确定度。直到2003年,Katori等人提出用魔幻波长的激光囚禁原子来解决该问题,此后光晶格原子光频标进入飞速发展期<sup>[15-16]</sup>。中性原子光频标最显著的优点是大量原子( $10^4\sim 10^5$ 个)可以同时激光探测,其频率稳定度一般比单离子光频标好1~2个量级<sup>[17-18]</sup>;缺点是光晶格原子光频标需要光晶格囚禁原子,且晶格激光需要的功率较大。

## 2 钙离子光频标

钙离子光频标中用到的能级与跃迁如图1所示,其中,电四极跃迁 $S_{1/2}-D_{5/2}$ 为钟跃迁,对应波长为729 nm,上能级 $D_{5/2}$ 态的寿命约为1.16 s<sup>[25]</sup>,对应的钟跃迁自然线宽小于1 Hz。电偶极跃迁 $S_{1/2}-P_{1/2}$ 的对应波长为397 nm的被用作激光冷却与

表1 几种被广泛研究的光频标的不确定度和稳定度指标<sup>[19]</sup>

Tab.1 Uncertainty and stability of several widely studied optical clocks<sup>[19]</sup>

光频标种类	钟跃迁	波长 / nm	不确定度	稳定度
$^{27}\text{Al}^+$	$3s^2\ ^1S_0-3s3p\ ^3P_0$	267	$9.4 \times 10^{-19}$ <sup>[9]</sup>	$1.5 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ <sup>[9]</sup>
$^{87}\text{Sr}$	$5s^2\ ^1S_0 (F=9/2)-5s5p\ ^3P_0 (F=9/2)$	698	$2.0 \times 10^{-18}$ <sup>[18]</sup>	$4.8 \times 10^{-17}/\sqrt{\tau}$ <sup>[17]</sup>
$^{171}\text{Yb}$	$6s^2\ ^1S_0 (F=1/2)-6s6p\ ^3P_0 (F=1/2)$	578	$1.4 \times 10^{-18}$ <sup>[20]</sup>	$1.5 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ <sup>[20]</sup>
$^{171}\text{Yb}^+ (\text{E3})$	$6s\ ^2S_{1/2} (F=0)-4f^36s^2\ ^2F_{7/2} (F=3)$	467	$2.7 \times 10^{-18}$ <sup>[21]</sup>	$1.0 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ <sup>[21]</sup>
$^{88}\text{Sr}^+$	$5s\ ^2S_{1/2}-4d\ ^2D_{5/2}$	674	$2.3 \times 10^{-17}$ <sup>[10]</sup>	$3.0 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ <sup>[22]</sup>
$^{40}\text{Ca}^+$	$4s\ ^2S_{1/2}-3d\ ^2D_{5/2}$	729	$3.0 \times 10^{-18}$ <sup>[23]</sup>	$2.5 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ <sup>[24]</sup>

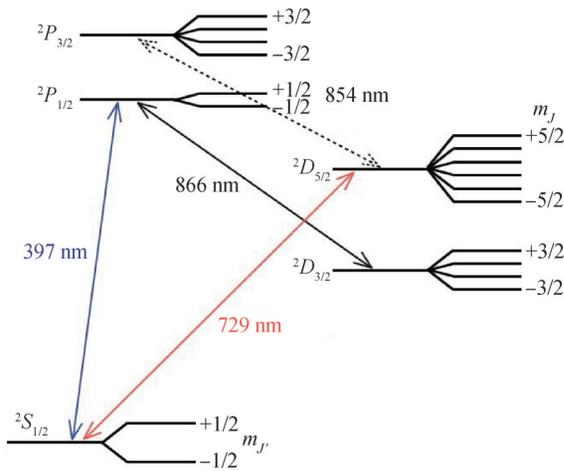


图1 钙离子光频标用到的能级与跃迁及对应频率<sup>[19]</sup>

Fig.1 Energy levels, transitions and corresponding frequencies used in <sup>40</sup>Ca<sup>+</sup> optical clocks<sup>[19]</sup>

荧光探测，对应波长为 866 nm 与 854 nm 激光分别作离子从亚稳态  $D_{3/2}$  和  $D_{5/2}$  回到基态的回泵，从而维持激光冷却循环的进行或为下一次钟激光探测做准备。

钙离子光频标的突出优点是所需的激光相对较少，且用到的激光均可以采用半导体激光器直接产生。在不确定度评估方面，钙离子光频标的一个显著优势是其钟跃迁上下能级的静态极化率差值  $\Delta\alpha_0$  为负，存在魔幻囚禁频率使得离子微运动造成的二阶多普勒频移与射频引起的斯塔克频移相互抵消<sup>[6]</sup>。以一台光频标作为频率基准，测量钙离子钟跃迁频移与囚禁射频频率之间的关系可得到魔幻囚禁频率，同时也精准测量了钙离子钟跃迁上下能级的静态极化率差值  $\Delta\alpha_0$ ，从而极大降低该项引起的黑体辐射（Black Body Radiation, BBR）频移不确定度。

BBR 对光频标的频移可表示为<sup>[26-27]</sup>

$$\Delta\nu_{\text{BBR}} = -\frac{1}{2h} (831.9 \text{ Vm}^{-1})^2 \left( \frac{T(K)}{300} \right)^4 \Delta\alpha_0 (1 + \eta) \quad (1)$$

式中： $h$  为普朗克常数； $T(K)$  为环境温度，K； $\eta$  为修正因子，是小量。

钙离子钟跃迁的  $\Delta\alpha_0$  相对较大，其 BBR 频移对环境温度较敏感，这是钙离子光频标的主要劣势。为此，经过多年的努力，精密测量院掌握了在液氮低温环境下实现离子光频标的关键技术。液氮低温下，钙离子钟跃迁的 BBR 频移对温度的敏感程度极大降低，优于大多数光频标。液氮低温光

频标的实现将钙离子光频标的系统不确定度显著降低至  $3.0 \times 10^{-18}$ ，成为国际上第五种不确定度进入  $10^{-18}$  的光频标<sup>[23]</sup>。

离子光频标的系统结构主要包括离子囚禁系统、低温真空系统、激光系统、荧光采集系统与时序控制系统。离子囚禁系统包含离子阱、帽电极与补偿电极，用于将离子稳定囚禁于离子阱中心；真空与低温系统包含液氮容器、内部 BBR 屏蔽腔体、外部真空腔体及复合泵，用于为离子创造液氮低温的高真空环境；荧光采集系统包含成像镜头组合、CCD 相机、光电倍增管（PhotoMultiplier Tube, PMT）及计数器，用于离子成像与荧光信号计数；激光系统包含钙离子光频标运行用到的各种激光器及相应光路，用于对激光的频率、功率、开关等进行控制；时序控制系统包含 FPGA 控制单元、信号源、电压源等硬件及时序控制硬件的程序，用于产生作用于离子激光时序及对激光进行频率反馈等。

### 2.1 离子囚禁系统

带电的离子能被电场囚禁，但根据高斯定理，无源的静电场不可能使离子在三维方向上同时受到向心的推力，故只能选择交变的射频场来囚禁离子，即用 Paul 离子阱来囚禁离子。钙离子光频标用到的线性 Paul 离子阱及相关电极如图 2 所示。图 2 (a) 为离子阱，其基底材质为金刚石，电极通过在金刚石基底上镀金得到，左边两个是射频电极，右边一个是补偿电极。图 2 (b) 为离子阱与帽电极装配图，两帽电极将离子阱夹在中间，钙靶装于其中一个帽电极上<sup>[23]</sup>。

离子阱与帽电极用于囚禁离子，补偿电极用于抵消离子阱中心处的杂散电场，优化离子的附

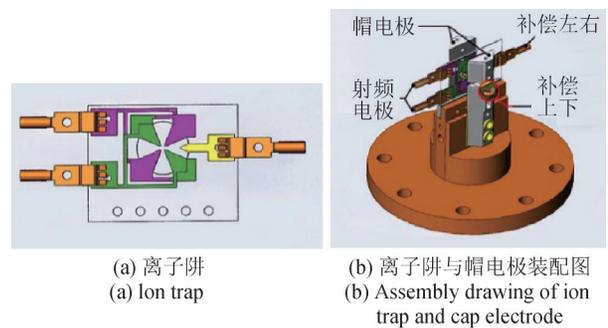


图2 离子阱及其底座示意图

Fig.2 Schematic diagram of ion trap and its support

加微运动。线性 Paul 离子阱最大的优点是对离子的加热率低，能显著降低钙离子光频标的二阶多普勒频移及其不确定度。

## 2.2 低温真空系统

背景气体与被囚禁离子间的碰撞会造成离子的钟跃迁频移，甚至造成离子丢失，故钙光频标要在超高真空下运行，系统内部真空度一般需优于  $10^{-8}$  Pa。抽真空过程中需要对系统整体烘烤，抽完真空后也需用离子泵来维持高真空。液氮低温钙离子光频标的系统设计原理图如图 3 所示，装有液氮的容器通过高真空与外腔隔绝，为下部的离子阱提供低温环境。离子阱及支架、铜制帽电极、铜制镀金热屏蔽腔等均被安装在液氮容器下方，并与液氮容器紧密接触，BBR 屏蔽腔与外层真空腔体四周均有 8 个玻窗用以透光，它们的下方均有一较大的玻窗用来收集离子的荧光信号。铜具有良好导热性，可以使离子阱内部所有真空部件温度均匀，且与液氮容器温度保持一致。

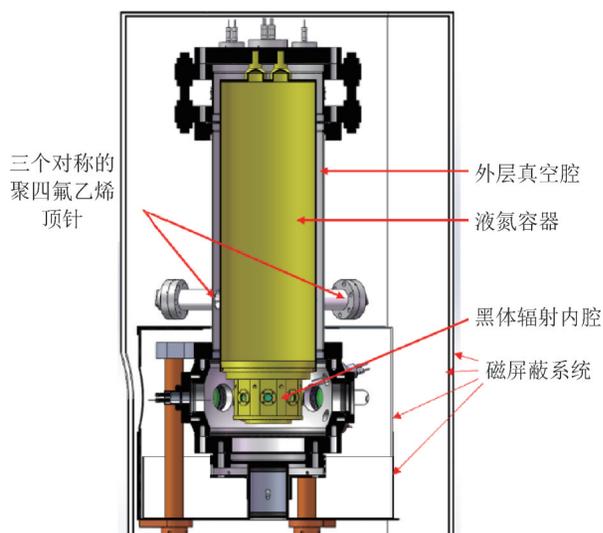


图3 液氮低温系统的设计原理图<sup>[23]</sup>

Fig.3 Design schematic diagram of liquid nitrogen cryogenic system<sup>[23]</sup>

与液氮的循环压缩制冷方式不同，液氮采用蒸发方式制冷，即在液氮蒸发完毕之前需要向液氮容器中重新补充液氮。液氮蒸发制冷不需要使用压缩机，造价相对较低且不会因压缩机的运行对系统造成振动。但在液氮的蒸发过程中，重力效应、热胀冷缩、排气方式变化等因素会导致液氮容器的形变，进而带动安装在下方的离子阱发

生位移，使激光或者成像系统无法精确聚焦在离子上，同时，离子位置的移动也能造成显著的一阶多普勒频移。为了抑制液氮蒸发过程中与补充后造成容器发生形变，在系统的真空外腔与液氮容器间设置了三个对称的聚四氟乙烯顶针，以固定液氮容器与外腔的间距，极大降低了离子在水平方向的位移<sup>[23]</sup>。通过 CCD 对离子位置的实时监测，在液氮蒸发的过程中，未明显观测到离子的位置的变化 (CCD 的分辨率  $< 1 \mu\text{m}$ )，当液氮重新补充后约 1.5 h，离子就能回到液氮补充前的位置。竖直方向上，由于液氮容器的材料为无氧铜，其导热系数极高为  $401 \text{ W/mK}$ ，保证了液氮补充前后或蒸发过程中液氮容器的温度均匀性与一致性，对液氮容器的热胀冷缩效应起到了很好的抑制作用。上述措施抑制了液氮蒸发与补充过程中的液氮容器的形变，解决了离子阱的位移问题。低温的液氮容器与室温的真空外腔间的真空度极高，大幅减小了液氮的消耗量，4 L 容积的液氮可使离子阱系统维持约 30 h 的低温环境。

## 2.3 荧光采集系统

离子在 397 nm 与 866 nm 激光的作用下，连续发生  $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$  的电偶极跃迁，并辐射出大量波长为 397 nm 的荧光信号。自发辐射的光子方向随机，荧光信号的强弱与收集的立体角成正比。

探测阶段，荧光被 1:9 的分光镜分为两束，离子在 CCD 上成像与 PMT 上计数可同时进行。10% 的荧光用于 CCD 的成像，90% 的荧光被 PMT 接收，转化为电脉冲信号并被脉冲计数器计数。与 CCD 成像相比，光电倍增管计数更敏感，如图 4 所示，3 ms 的探测时间即可区离子处于 S 或 D 态，通过

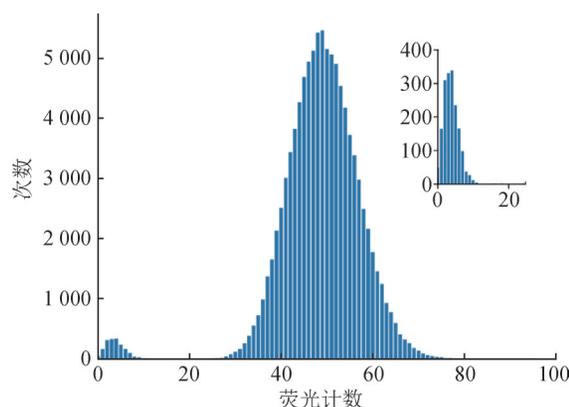


图4 离子处于亮态时的荧光信号分布

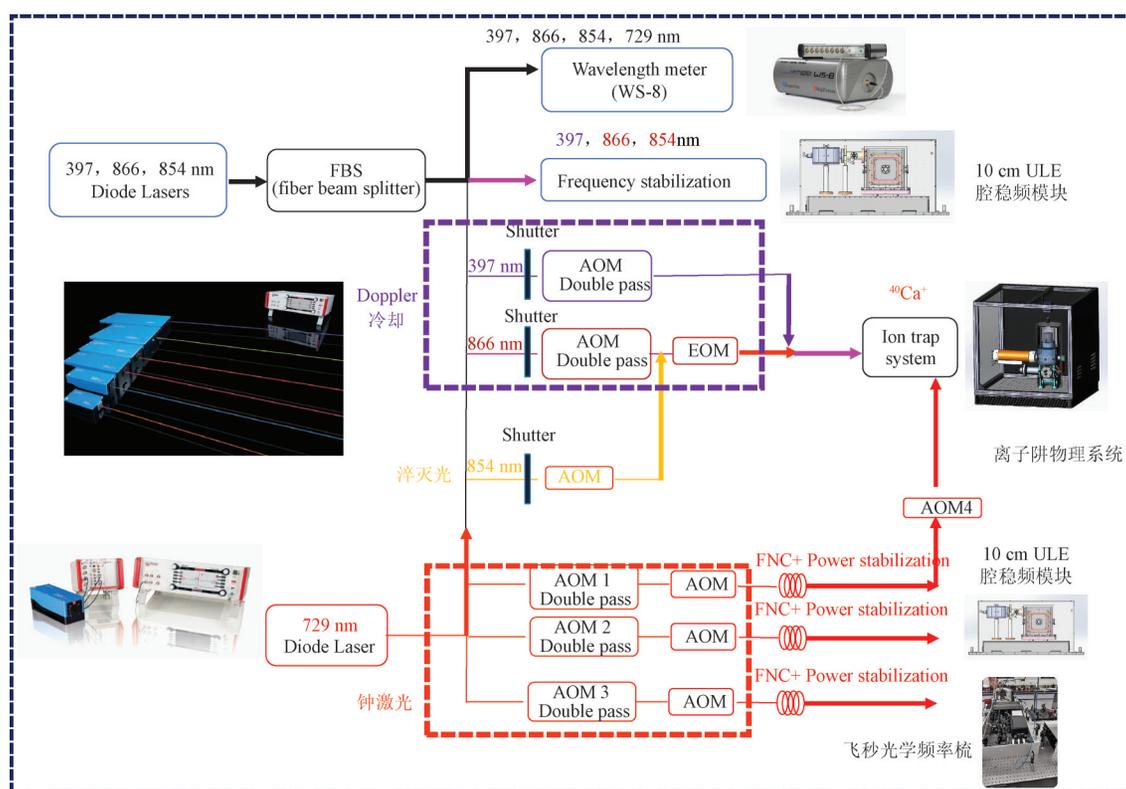
Fig.4 Fluorescence signal distributions at the ion's bright state

CCD成像区分离子的亮态与暗态则需要秒量级的曝光时间。

### 2.4 激光系统

钙离子光频标的激光光路分配模块如图5所示，分为397 nm的多普勒冷却激光、866 nm的回泵光，854 nm淬灭光、729 nm钟激光。激光光路与离子阱的物理系统放置在不同的平台上，激光通过光纤传输，激光的频率与功率调制通过

double-pass光路（往返两次通过声光调制器（AOM））或single-pass光路（单次通过AOM）实现。double-pass光路调制激光频率，具有不改变激光光路的优点，故397，866，729 nm激光均选用double-pass光路；由于钙离子 $D_{5/2}-P_{3/2}$ 的跃迁对854 nm激光的频率不敏感，实验中不需要调制854 nm激光的频率，只需调节其功率和开关，故854 nm激光选择single-pass光路。



注：Diode Lasers-半导体激光器；fiber beam splitter-光纤分光器；Wavelength meter-波长计；Frequency Stabilization-频率稳定；AOM Double Pass-激光两次通过AOM；Shutter-机械快门；FNC-光纤噪声消除；Power stabilization-激光功率稳定；Ion trap system-离子阱系统。

图5 钙离子光频标激光模块分配示意图

Fig.5 Schematic diagram of laser module distribution of  $^{40}\text{Ca}^+$  optical clock

为了得到最优的冷却效率与最大的荧光信号，需要精确调节397 nm与866 nm两束参与离子冷却与荧光探测激光的频率，将397 nm与866 nm激光的频率参考在波长计或超稳腔上。729 nm钟激光为光频标最关键的激光，需要将其参考至超稳腔上，并搭建光纤噪声消除的光路来抑制光纤传递过程中的噪声<sup>[28]</sup>，若需要使用钙离子光频标输出的频率进行频率比对或绝对频率测量，还需要将参考在钙离子钟跃迁谱线之后的钟激光输出至光学频率疏转化为微波信号再读出<sup>[3-4]</sup>。虽然AOM

可快速实现激光的开关，但关光后仍可能存在残留，由于残留激光对应钙离子的电偶极跃迁，即使激光功率很低也会造成较大的交流斯塔克频移，影响光频标的精度。故在钟激光以外的光路上，补充了机械快门用作光开关以确保在钟探测阶段，其他激光均被完全关闭<sup>[29]</sup>。

### 2.5 时序控制系统

光频标运行中的激光时序脉冲通过控制加在AOM上的射频来实现。FPGA及其外设能产生射频、电平、数模电压转换等信号，且具有响应时

间短、集成度高,性能稳定度等优点。钙离子光频标的运行时序如图6所示,主要分为激光冷却与荧光探测、离子初态制备、钟激光探测三部分。激光冷却阶段,为了得到较好的冷却效果,将钙离子的多普勒冷却分为两步:第一步先调制397 nm激光的频率至远红失谐,以提高其对较热离子的冷却效率,第二步将397 nm激光频率调制近红失谐,以得到较低的离子温度。荧光探测阶段,将397 nm激光频率调制到 $S_{1/2}-P_{1/2}$ 跃迁

谱线的共振处,这样可得到最大的离子荧光信号,增加离子荧光信噪比<sup>[29]</sup>。离子荧光信号经D1, D2两次探测, D1探测是为了得到上一钟探测过程中,离子是否被激发至上能级, D2探测是为了确保进入下一钟探测阶段前离子处于S态<sup>[29]</sup>。两次荧光探测作用于一个854 nm激光脉冲,目的是清空 $^2D_{5/2}$ 态。整个时序的周期为99.6 ms,包含自由钟探测阶段的自由演化时间80 ms和近20 ms的死时间。

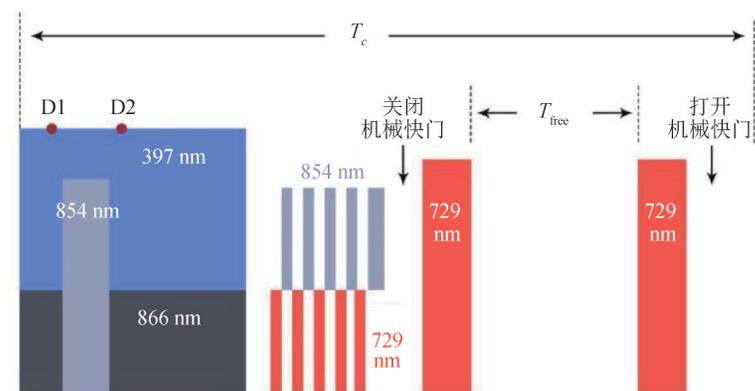


图6 钙离子光频标一个钟探测周期时序图

Fig.6 Pulse sequence for one interrogation cycle of  $^{40}\text{Ca}^+$  optical clock

钟探测阶段,态制备可使离子的最大跃迁几率从0.5提升至接近1,能显著提高光频标的稳定度。对离子/原子的态制备一般有两种方案:第一种是用调制偏振的冷却光做激光抽运,具有态制备效率高,花费时间短(微秒量级)等优点,但需要额外两路(左旋与右旋)的圆偏振397 nm激光,光路更复杂;第二种是通过调制频率的钟激光做激光抽运,其态制备效率也可到95%以上,但花费时间较长(毫秒量级),优点是不需要额外激光。为了简化实验装置,选择了第二种方案,通过多个729 nm钟激光与854 nm淬灭光的脉冲系列实现。为了将钙离子制备到 $^2S_{1/2}(m = -1/2)$ 态,首先,将钟激光频率调制 $^2S_{1/2}(m = +1/2)-^2D_{5/2}(m = +1/2)$ 跃迁的共振处,钙离子被729 nm的钟激光从基态 $^2S_{1/2}(m = +1/2)$ 激发至亚稳态 $^2D_{5/2}(m = +1/2)$ ,然后通过854 nm激光的作用,将亚稳态的离子激发至 $^2P_{3/2}$ 态,再以相同的几率自发辐射至两个基态。上述激光抽运过程使离子处于子能级 $^2S_{1/2}(m = +1/2)$ 态的几率变低,经过多次抽运,最终实现了将离子初态制备到 $^2S_{1/2}(m = -1/2)$ 上<sup>[29]</sup>。

光频标的目的是将钟激光频率参考到离子的跃迁频率上并输出,光频标的参考跃迁谱线越窄,光频标的稳定度越好。增加钟激光的脉冲时间可降低钟跃迁谱线线宽,但线宽也受限于钟激光的频率稳定度与磁场噪声影响。钟激光对离子的探测方式可分为Rabi探测、Ramsey探测<sup>[30]</sup>与hyper-Ramsey探测,相同探测时间下,Ramsey探测得到的谱线线宽更窄,hyper-Ramsey探测可极大抑制钟激光造成的交流斯塔克频移<sup>[31-32]</sup>。

### 3 钙离子光频标系统误差评估

#### 3.1 宏运动频移

离子在离子阱中会以宏运动频率做简谐运动,其造成的频移可表示为<sup>[10, 19]</sup>

$$\begin{aligned} \frac{\Delta v_S}{v_0} &= \sum_{x,y,z} \frac{-k_B T_i}{2mc^2} \left[ 1 + \frac{\Delta\alpha_0}{h\nu_0} \left( \frac{m\omega_i c}{e} \right)^2 \right] \\ &\approx \sum_{x,y,z} \frac{-k_B T_i}{2mc^2} = -\frac{3k_B T}{2mc^2} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $T_i$ 为每一维的离子温度, $i = x, y, z$ ;  $T$ 为平均离子温度; $h$ 为普朗克常数; $v_0$ 为钟跃迁频

率； $c$ 为光速； $k_B$ 为玻尔兹曼常数； $\Delta\alpha_0$ 为钟跃迁上下能级的静态极化率之差。

实验中，通过测量边带与载波强度比来测量离子温度，离子的平均温度与三维方向边带载波比的关系可表示为<sup>[9-10]</sup>

$$T = \frac{2mc^2}{3k_B\omega_0^2} \sum_{i=x,y,z} \frac{\omega_i^2 R_i}{\cos^2\theta_i} \quad (3)$$

式中： $\theta_i$ 为激光方向与三维宏运动方向间的夹角； $\omega_0$ 为宏运动频率； $R_i$ 为在三维方向上测得的边带与载波强度比。

由于钟探测时间较长为80 ms，在评估温度时，还要考虑离子阱对离子的加热效应，为此，测量了多普勒冷却后再等待80 ms后的离子温度。离子平均温度的测量结果如图7所示，离子的平均温度每天被测量一次，测量考虑了离子阱的加热率<sup>[23]</sup>。由图可知，对离子温度的多次测量结果在0.63~1.10 mK之间，接近钙离子的多普勒冷却极限~0.5 mK。基于测量结果，钙离子三维宏运动温度的平均值被评估为0.87(24) mK，对应的宏运动频移为 $-3.0(9) \times 10^{-18}$ 。

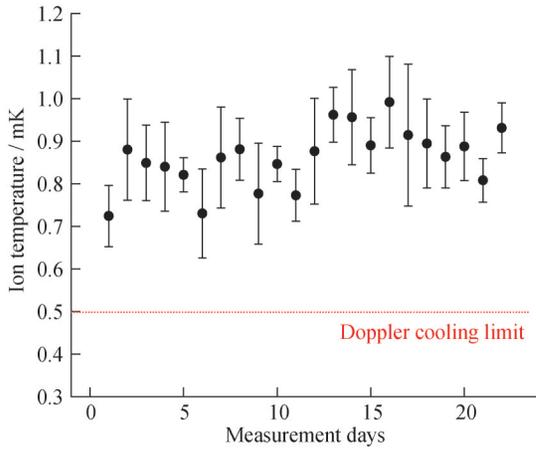


图7 离子平均温度的测量结果

Fig.7 Measurement results of average ion temperature

### 3.2 附加微运动频移

离子阱电极的非对称性使离子阱中心处存在剩余杂散电场，将离子推离离子阱中心，使离子做射频频率的附加微运动。与宏运动相似，附加微运动也会造成钟跃迁的二阶多普勒频移与斯塔克频移，总频移可表示为<sup>[19]</sup>

$$\frac{\Delta v_{EMM}}{v_0} = -\frac{1}{2c^2} \left[ 1 + \frac{\Delta\alpha_0}{hv_0} \left( \frac{m\Omega c}{e} \right)^2 \right] \langle v_{SMM}^2 \rangle \quad (4)$$

式中： $\langle v_{SMM}^2 \rangle$ 为离子附加微运动平方对时间的平均，体现了附加微运动的强度，可通过调节离子阱中补偿电极上的电压来抑制附加微运动。

由于钙离子钟跃迁的上下能级静态极化率之差 $\Delta\alpha_0$ 为负，为了进一步抑制附加微运动造成的频移，钙离子光频标的射频囚禁频率调被制到魔幻囚禁频率 $\Omega_0 = 24.801(2)$  MHz附近， $\Omega_0$ 满足 $1 + \frac{\Delta\alpha_0}{hv_0} \left( \frac{m\Omega c}{e} \right)^2 = 0$ 。在附加微运动未被显著抑制的情况下， $\Delta\alpha_0$ 造成的钟跃迁频移也非常小。

与宏运动相似，离子附加微运动幅度也通过边带载波比的方法测量。但与宏运动不同的是，离子附加微运动方向与离子阱的轴向无关，微运动频率为射频频率。故需要在三个相互垂直的方向上测量微运动的边带载波比，设三维方向上的边带载波比分别为 $R_i (i = 1, 2, 3)$ ，则由离子附加微运动造成的频移为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\Delta v_{MM}}{v_0} = -\left( \frac{\Omega}{2\pi v_0} \right)^2 \left[ 1 + \frac{\Delta\alpha_0}{hv_0} \left( \frac{m\Omega c}{e} \right)^2 \right] \sum_{i=1,2,3} R_i^2 \quad (5)$$

对边带载波比的测量，微运动边带存在明显Rabi振荡，故边带载波比 $R_i$ 可通过在相同激光功率下测量微运动与载波的 $\pi$ 脉冲时间得到

$$R_i = \left( \frac{T_c}{T_{EMM}} \right)^2 \quad (6)$$

式中： $T_c$ 、 $T_{EMM}$ 分别为相同激光功率下，载波与边带的 $\pi$ 脉冲时间。测得的 $R_i$ 也作为优化微运动的依据<sup>[6, 23]</sup>。

在光频标的运行过程中，附加微运动每天被优化一次。同时，为了评估附加微运动造成频移的稳定性，在不调节补偿电压的情况下，多次测量了钙离子光频标附加微运动造成的频移，结果如图8所示。由于魔幻囚禁频率的引入，附加微运动造成的频移被极大抑制，其不确定度被评估为 $2 \times 10^{-19}$ 。

### 3.3 电四极频移

电四极频移是原子的电四极矩与外电场梯度作用造成的，对于钙离子的 $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ 跃迁， $^2S_{1/2}$ 态的电四极矩为零，故钟跃迁的电四极频移全由 $^2D_{5/2}$ 态的电四极矩与离子阱中的电场梯度作用造成。 $^2D_{5/2}$ 态的电四极矩的大小与其子能级 $m_j$ 有关，钟跃迁的电四极频移与 $^2D_{5/2}$ 态各子能级的关系为<sup>[10, 33]</sup>

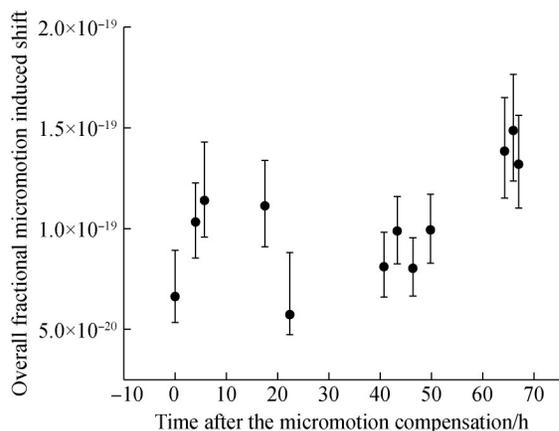


图8 优化补偿电压后, 附加微运动频移的连续测量结果  
Fig.8 Continuous measurement results of overall micromotion-induced shift with no adjustments to compensation voltagesages

$$\begin{aligned} \Delta f_Q \left( m_J = \pm \frac{1}{2} \right) &= 4\Delta v_Q \\ \Delta f_Q \left( m_J = \pm \frac{3}{2} \right) &= \Delta v_Q \\ \Delta f_Q \left( m_J = \pm \frac{5}{2} \right) &= -5\Delta v_Q \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\Delta v_Q$  为电四极频移的比例因子, 与电场梯度、 $^2D_{5/2}$  态的电四极矩张量及主磁场与电场梯度间的夹角  $\beta$  有关。

由式(18)可知, 包含  $^2D_{5/2}$  态  $m_J = 1/2, 3/2, 5/2$  三个能级的 Zeeman 峰的电四极频移之和为零, 即

$$\Delta f_Q(m_J = \pm \frac{1}{2}) + \Delta f_Q(m_J = \pm \frac{3}{2}) + \Delta f_Q(m_J = \pm \frac{5}{2}) = 0 \quad (8)$$

故在钙离子光频标中, 通过同时锁定 3 对 Zeeman 峰能将电四极频移消掉。

### 3.4 黑体辐射(BBR)频移

BBR 频移是指周围环境的辐射场对原子/离子钟跃迁造成的交流斯塔克频移。BBR 场的谱密度为 [26, 34]

$$E^2(\omega) d\omega = \frac{8\alpha^3}{\pi} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp\left(\frac{\omega}{k_B T}\right) - 1} \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为辐射场的频率;  $k_B$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为环境温度。

当辐射场频率与电偶极跃迁远失谐时, 其造成的交流斯塔克频移为 [34]

$$\Delta v_{BB} = -\frac{\Delta\alpha_0}{2h} \langle E^2(t) \rangle \quad (10)$$

式中:  $\langle E^2(t) \rangle$  为场强平方对时间的平均;  $\Delta\alpha_0$  为钟跃迁上下能级静态极化率之差, 钙离子  $\Delta\alpha_0 = -7.2677(21) \times 10^{-40} \text{ Jm}^2\text{V}^{-2}$ 。

钟跃迁的 BBR 频移是对 BBR 场中所有频率部分造成频移的积分, 总 BBR 频移可由式 (1) 表示。BBR 频移与温度的四次方成正比, 对温度非常敏感, 为了降低钙离子光频标的 BBR 频移, 将离子阱置于液氮低温环境中, 环境温度从 ~293 K 降至 ~80 K, 极大降低了 BBR 频移及其不确定度。

离子阱系统的内部结构示意图如图 9 所示, 离子的周围环境由离子阱及其底座、帽电极、补偿电极导线、包围离子阱的铜质 BBR 内腔组成, 材质均为无氧铜或导热性更高的钻石, 使温度接近液氮温度, 并具有良好的温度均匀性。

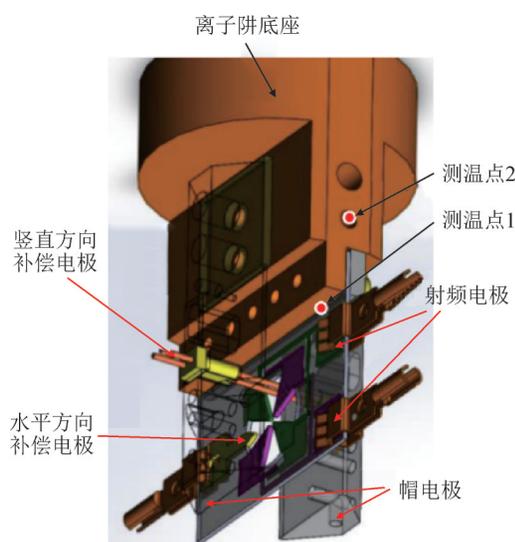


图9 液氮低温光频标中离子阱的装配图<sup>[23]</sup>

Fig.9 Assembly diagram of ion trap used in the liquid-nitrogen clock<sup>[23]</sup>

为了精确评估离子的环境温度, 在离子阱底座、离子阱底部、BBR 内腔上安装了 PT100 热敏电阻, 并通过有限元方法评估了离子阱内部的温度。同时, 也计算了离子周围环境各部分对离子阱中心的立体角, 将得出的立体角与占总立体角的比例作为对 BBR 频移贡献的百分比 [18], 温度与立体角的评估结果见表 2, 离子周围的环境温度均在  $82 \pm 5 \text{ K}$  范围内。还需要考虑 BBR 腔上用于通气的 8 个小孔, 室温的真空腔产生的辐射场可通过这些小孔作用于离子。虽然离子感受小孔的立体角很

表2 低温钙离子光钟各组件立体角占比、温度及造成的BBR频移的不确定度<sup>[23]</sup>Tab.2 Solid angle, evaluated temperature, and contributions to the uncertainty in BBR-shift evaluation for different parts of the cryogenic Ca<sup>+</sup> optical clock

BBR 环境	立体角占比/%	温度/K	BBR 频移不确定度 / (10 <sup>-18</sup> )
BBR 屏蔽腔	33.64	82(5)	0.43
BBR 屏蔽腔(BK7玻璃)	5.45	82(5)	0.07
离子阱(包括补偿电极导线)	14.19	82(5)	0.18
帽电极	46.63	82(5)	0.59
屏蔽腔上的通气孔	0.09	293.0(1.5)	1.46
系统	100.00		2.70

小,但是室温环境的BBR频移很大,小孔造成的BBR频移不可忽略。

除此之外,也考虑了室温环境的辐射场通过BBR腔的石英玻窗作用于离子。石英玻窗只透0~3000 nm波长的电磁场,在室温为300 K时,0~3000 nm波段占辐射场的能量比例很小,仅约0.0087%。根据文献[34]及室温下BBR的谱密度,对0~3000 nm范围内的辐射谱造成的频移进行积分,得到总的斯塔克频移为 $-3.15 \times 10^{-5}$  mHz,相对频移为 $-8.2 \times 10^{-23}$ ,可忽略。最终液氮低温光频标的相对BBR频移及不确定度分别被评估至 $7.5 \times 10^{-18}$ 与 $2.9 \times 10^{-18}$ 。

### 3.5 伺服误差

光频标是将钟激光频率参考至原子跃迁谱线的装置。两点锁定算法可得到钟激光频率与跃迁谱线中心的差值,再通过调制加在声光调制器频率使光频标的输出频率与原子跃迁谱线中心保持一致。具体为:设当前光频标的输出频率为 $f$ ,所参考的钟跃迁谱线线宽为 $\delta$ ,将钟激光的频率设为 $f_+ = f + \delta/2$ 与 $f_- = f - \delta/2$ ,在两个频率点对用钟激光对离子探测 $N$ 次,若测得离子被成功激发至激发态的次数分别为 $n_+$ 和 $n_-$ ,则误差信号表示为<sup>[14, 35]</sup>

$$e = g\delta \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-} \quad (11)$$

式中: $g$ 为增益系数。

下一次探测前,激光的频率被调制为

$$f \leftarrow f + e \quad (12)$$

理想情况下,若激光没有频率漂移,两点锁定的频率反馈算法输出的激光频率经过足够多次平均后会无限接近原子跃迁谱线的中心。但光频

标的反馈周期一般长达几秒甚至几十秒,若在此过程中,激光频率单向漂移,则两点锁定算法中两个频率探测点对应的激光频率差不再是设定值,而是设定值加漂移量,造成伺服误差。实验条件下,钟激光的漂移不可避免,故需要对伺服误差进行抑制与评估。

二阶积分算法来抑制可抑制伺服误差,即在上述误差信号的基础上,再加上积分误差项<sup>[14]</sup>

$$e' = g_1 \cdot \sum e \quad (13)$$

式中: $g_1$ 为二阶积分增益系数。

经过一个探测周期后,钟激光的频率变为

$$f \leftarrow f + e + e' \quad (14)$$

二阶积分算法可极大降低伺服误差,为了精确评估伺服误差,通过后处理数据得到了激光的漂移率,并取其中最大的部分作为激光漂移率的参数带入基于蒙特卡洛方法的光频标的模拟锁定过程,最终得到钟跃迁的伺服误差小于 $4 \times 10^{-19}$ 。

### 3.6 其他频移项

除上述分析过的频移项外,也对其他能造成钟跃迁频率的因素进行了分析。一阶Zeeman频移通过同时锁定一对Zeeman峰被抵消<sup>[17]</sup>。钙离子钟跃迁的二阶Zeeman频移对磁场极不敏感,仅为 $3.5 \times 10^{-20}/\mu\text{T}^2$ ,考虑到钙离子光频标在小磁场下( $\sim 1.5 \mu\text{T}$ )运行,可忽略<sup>[7]</sup>。除钟激光外其他激光同时使用AOM和机械快门进行开关,其他激光造成的交流斯塔克频移可忽略;由于钙离子的钟跃迁是电四极跃迁,在80 ms钟探测脉冲下,钟激光造成的频移在 $10^{-18}$ 甚至 $10^{-19}$ 量级,在引入hyper-Ramsey的锁定方案后<sup>[36]</sup>,该项频移小于 $1.0 \times 10^{-19}$ 。背景气体造成的碰撞频移与系统的真空度有

关,液氮低温光频标的内真空为  $4 \times 10^{-9}$  Pa,依据之前的评估方法,背景气体造成的钙离子光频标的频移小于  $1.0 \times 10^{-19}$ 。一阶多普勒频移由离子的单向运动造成,在液氮蒸发过程中,通过 CCD 连续测量了离子位置,得到由液氮容器形变引起离子阱移动造成的一阶多普勒频移在  $10^{-20}$  量级。同时,也测量了两束相向钟激光的频率差,受限于离子光频标的稳定度,在  $10^{-18}$  量级未观测到一阶多普勒频移,故钙离子不存在被激光调制的单向运动<sup>[9]</sup>。表3列出了液氮低温钙离子光频标的主要系统误差项,得到总的系统频移为  $4.4 \times 10^{-18}$ ,不确定度为  $3.2 \times 10^{-18}$ 。

表3 液氮低温钙离子光频标的系统误差表

Tab.3 Systematic uncertainty budget for the liquid-nitrogen low temperature clock

频移贡献项	频移/( $10^{-18}$ )	不确定度/( $10^{-18}$ )
BBR 频移(温度)	7.3	2.7
BBR 系数( $\Delta\alpha_0$ )	0	0.3
附加微运动	0	0.2
二阶多普勒频移(宏运动)	-3.1	0.9
剩余电四极频移	0	0.4
伺服误差	0	0.4
交流 Zeeman 效应	0	0.3
系统	4.2	3.0

### 4 钙离子光频标的稳定度

由 2.5 中的锁定原理,光频标的输出频率并非固定在原子的钟跃迁谱线中心不变,光频标的锁定是不断调制激光频率至跃迁谱线中心的过程。在离子光频标中,量子投影噪声(QPN)造成了误差信号的不确定度,是光频标输出频率抖动的主要来源。由 QPN 引起的光频标稳定度表示为<sup>[14, 17]</sup>

$$\sigma_{QPN}(\tau) = \chi \frac{\Delta\nu}{\nu_0} \sqrt{\frac{t_c}{N\tau}} \quad (15)$$

式中:  $\sigma_{QPN}(\tau)$  为输出频率的稳定度;  $\tau$  为平均时间;  $\chi$  为系数,与锁定时跃迁谱线的线型有关;  $\Delta\nu$  为谱线的线宽;  $\nu_0$  为钟跃迁频率;  $t_c$  为单个周期的时间,包含钟激光探测时间与死时间;  $N$  为原子数量,对单离子光频标,  $N = 1$ 。

### 4.1 钙离子光频标稳定度的优化

相同探测时间下, Ramsey 谱线比 Rabi 谱线的线宽更窄,能得到更好的稳定度。但 Ramsey 谱线由许多连续条纹组成,在光频标锁定过程中,若磁场或钟激光频率的抖动超出一定范围,易造成钟激光的频率参考从一个条纹中心变到另外一个,使光频标的输出频率错误。

为此,引入了参考条纹的实时监测算法。钙离子光频标中,钟激光的跃迁频率需要同时参考在三对 Zeeman 峰上以消除一阶 Zeeman 频移、张量斯塔克频移与电四极频移。同时,由两对 Zeeman 峰间的频率关系也可得到钙离子钟跃迁上下能级间朗德因子的比值  $g_D/g_S$ , 可表示为<sup>[5, 24]</sup>

$$\frac{g_D}{g_S} = \frac{f_{-C_1} - f_{+C_1} + f_{-C_2} - f_{+C_2}}{3(f_{-C_1} - f_{+C_1}) + f_{-C_2} - f_{+C_2}} \quad (16)$$

$$\frac{g_D}{g_S} = \frac{f_{-C_1} - f_{+C_1} + f_{-C_3} - f_{+C_3}}{5(f_{-C_1} - f_{+C_1}) + f_{-C_3} - f_{+C_3}}$$

式中:  $\pm C_1, \pm C_2, \pm C_3$  分别为 Zeeman 子跃迁  $^2S_{1/2}(m = \pm 1/2) \rightarrow ^2D_{5/2}(m = \pm 1/2), ^2S_{1/2}(m = \pm 1/2) \rightarrow ^2D_{5/2}(m = \pm 3/2), ^2S_{1/2}(m = \pm 1/2) \rightarrow ^2D_{5/2}(m = \pm 5/2)$ 。该值为常数,且对 Ramsey 锁定中钟激光参考条纹的中心频率很敏感,可通过实时计算  $g_D/g_S$  的值来判断所参考的条纹是否正确。

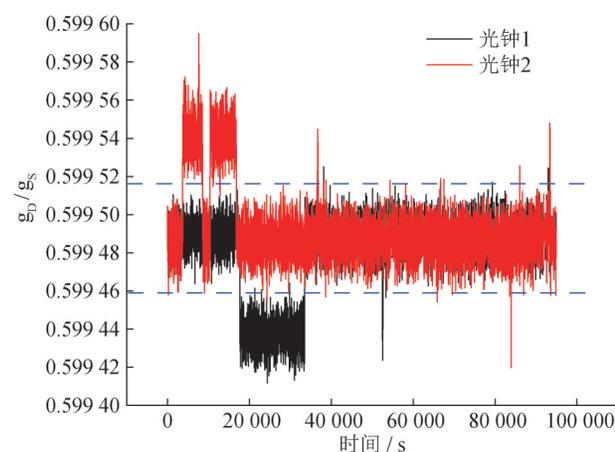


图10 光频标的 Ramsey 锁定过程中计算得到的  $g_D/g_S$ <sup>[24]</sup>  
Fig.10 Values of  $g_D/g_S$  calculated during Ramsey locking process of optical frequency standards<sup>[24]</sup>

图10为 Ramsey 锁定过程中实验计算得到的两台光频标的  $g_D/g_S$  值,其跳变表示 Ramsey 的参考条纹发生了变化,且它们的跳变台阶明显,通过设定相应朗德因子  $g_D/g_S$  的阈值来判断钟激光是否参

考在正确的 Ramsey 条纹上。

除此之外，为了提高光频标的连续运行率，在参考条纹发生错误时，引入了自动寻峰算法，让程序能自动找到正确的 Ramsey 条纹，并重新锁定。Rabi 谱线是单峰结构，自动寻峰算法以 Rabi 方式运行，且锁定线宽由宽变窄。设置 Rabi 寻峰的线宽序列依次为 1.14 kHz, 200 Hz, 40 Hz, 6.7 Hz, 对应的探测时间分别为 0.7, 4, 20, 120 ms。为了节省自动寻峰花费的时间，只有最中间的一对 Zeeman 峰  $\pm C_1$  的频率才通过 Rabi 锁定得到，另外两对 Zeeman 峰的频率由  $f_{-c_1}$  与  $f_{+c_1}$  求得，之间的关系为

$$\begin{aligned} f_{-c_2} &= f_{+c_1} - \frac{g_D}{g_S - g_D} (f_{+c_1} - f_{-c_1}) - 3\Delta\nu_Q \\ f_{+c_2} &= f_1 + \frac{g_D}{g_S - g_D} (f_{+c_1} - f_{-c_1}) - 3\Delta\nu_Q \quad (17) \\ f_{-c_3} &= f_2 - 2\frac{g_D}{g_S - g_D} (f_{+c_1} - f_{-c_1}) - 9\Delta\nu_Q \\ f_{+c_3} &= f_1 + 2\frac{g_D}{g_S - g_D} (f_{+c_1} - f_{-c_1}) - 9\Delta\nu_Q \end{aligned}$$

#### 4.2 钙离子光频标稳定度测量

引入 Ramsey 锁定后，钙离子光频标的稳定度有了较大提高。由于光频标的精度远超微波频标，光频标的频率稳定度只能通过光频标间的频率比对得到，为此，设计了两台钙离子光频标的频率比对实验。两台钙离子光频标的物理系统完全独立，且除钟激光外其他激光也均独立。两台光频标时序完全同步且共用钟激光，它们的输出频率之差等于调制钟激光频率的两个 AOM 上加的射频频率之差，这两个 AOM 上的频率值在锁定中被实时记录<sup>[37]</sup>。

两台钙离子光频标均采用 Ramsey 探测方式锁定，自由演化时间为 80 ms<sup>[24, 37]</sup>。经过长达一个多月的连续运行，钙离子光频标的长期稳定度进入了  $10^{-18}$  量级<sup>[37]</sup>。两台光频标被认为有相同的稳定度，故单台光频标的稳定度为它们间频率差的稳定度的  $1/\sqrt{2}$ ，如图 11 所示，平均时间为 524 000 s 时得到的总阿伦偏差为  $6.3 \times 10^{-18}$ ，为了得到单台光频标的稳定度，两台光频标的频率比对数据被除了  $\sqrt{2}$ ，红色虚线是  $1/\sqrt{\tau}$  的拟合结果，拟合得到钙离子光频标的稳定度为  $4.9 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ 。增加 Rabi 的探测时间与 Ramsey 探测方式下的自由演化时间均

可使钟跃迁谱线线宽更窄，提高光频标的稳定度，但这需要更好的钟激光性能及更小的磁场噪声。由于两台光频标共用钟激光，相比非同步测量，同步测量过程中钟激光造成的 Dick 效应被抵消，一般可得到更好的稳定度。根据参考文献[14]，实验中钟激光的 Dick 效应对光频标稳定度的贡献约为  $1.2 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$ ，相较目前离子光频标稳定度的主要贡献项—量子投影噪声（秒稳在  $10^{-15}$  量级）可忽略。

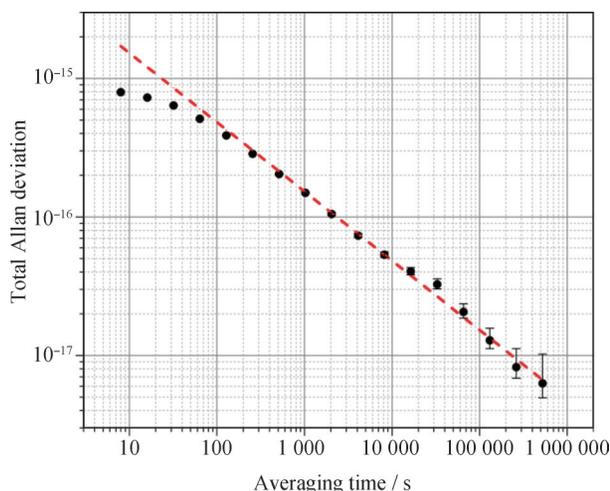


图 11 测量得到的总阿伦偏差<sup>[37]</sup>

Fig.11 Total Allan deviation measured for a single clock<sup>[37]</sup>

## 5 总结与展望

对液氮低温钙离子光频标的离子阱系统、低温真空系统、荧光采集系统、激光系统、时序控制系统等进行综述，并对其系统不确定度和稳定度进行了详细评估。得益于液氮的低温环境，将钙离子光频标的系统不确定度由  $1.3 \times 10^{-17}$  降至  $3.0 \times 10^{-18}$ ，使钙离子光频标成为国际上第五种不确定度进入  $10^{-18}$  的原子/离子体系。同时，在光频标的锁定中引入了 Ramsey 探测方案及自动寻峰算法，将钙离子光频标的长期稳定度也提升至  $6.3 \times 10^{-18}$ ，进入国际前列。

目前，限制钙离子光频标不确定度进一步降低的主要因素为 BBR 频移与二阶多普勒频移，为此，拟优化液氮低温光频标中的温度评估方案来降低 BBR 频移不确定度<sup>[18]</sup>，通过引入三维边带冷却来降低二阶多普勒频移及其不确定度<sup>[38]</sup>。并进

一步优化其他频移项, 未来钙离子光频标的系统不确定度将进入  $10^{-19}$  量级。光频标稳定度方面, 拟通过研制稳定度更好的钟激光与设计主动磁场补偿方案与优化被动的磁屏蔽系统得到更窄的钟跃迁谱线, 进而将钙离子光频标的稳定度提升至  $1 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$  水平。

### 参考文献

- [1] LUDLOW A D, BOYD M M, YE J, et al. Optical atomic clocks [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2015, 87(2): 637–701.
- [2] RIEHLE F, GILL P, ARIAS F, et al. The CIPM list of recommended frequency standard values: guidelines and procedures [J]. *Metrologia*, 2018, 55(2): 188–200.
- [3] HUANG Y, ZHANG H, ZHANG B, et al. Geopotential measurement with a robust, transportable  $\text{Ca}^+$  optical clock [J]. *Physical Review A*, 2020, 102(5): 050802R.
- [4] BELOY K, BODINE M I, BOTHWELL T, et al. Frequency ratio measurements with 18-digit accuracy using a network of optical clocks [J]. *Nature*, 2021, 591:564–569.
- [5] ARNOLD K J, KAEWUAM R, CHANU S R, et al. Precision measurements of the  $^{138}\text{Ba}^+ 6s^2S_{1/2}-5d^2D_{5/2}$  clock transition [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 124(19):193001.
- [6] HUANG Y, GUAN H, ZENG M, et al.  $^{40}\text{Ca}^+$  ion optical clock with micromotion-induced shifts below  $1 \times 10^{-18}$  [J]. *Physical Review A*, 2019, 99(1):011401R.
- [7] BREWER S M, CHEN J S, BELOY K, et al. Measurements of  $^{27}\text{Al}^+$  and  $^{25}\text{Mg}^+$  magnetic constants for improved ion-clock accuracy [J]. *Physical Review A*, 2019, 100(1): 013409.
- [8] HUNTEMANN N, SANNER C, LIPPHARDT B, et al. Single-ion atomic clock with  $3 \times 10^{-18}$  systematic uncertainty [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063001.
- [9] BREWER S M, CHEN J S, HANKIN A M, et al.  $^{27}\text{Al}^+$  quantum-logic clock with a systematic uncertainty below  $10^{-18}$  [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(3):033201.
- [10] DUBÉ P, MADEJ A A, ZHOU Z, et al. Evaluation of systematic shifts of the  $^{88}\text{Sr}^+$  single-ion optical frequency standard at the  $10^{-17}$  level [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 023806.
- [11] HUANG Y, GUAN H, LIU P, et al. Frequency comparison of two  $^{40}\text{Ca}^+$  optical clocks with an uncertainty at the  $10^{-17}$  Level [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(1): 013001.
- [12] OSKAY W H, DIDDAMS S A, DONLEY E A, et al. Single-atom optical clock with high accuracy [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(2): 020801.
- [13] RAFAC R J, YOUNG B C, BEALL J A, et al. Sub-dekahertz ultraviolet spectroscopy of  $^{199}\text{Hg}^+$  [J], *Physical Review Letters*, 2000, 85(12): 2462–2465.
- [14] PEIK E, SCHNEIDER T, TAMM C. Laser frequency stabilization to a single ion [J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2005, 39:145–148.
- [15] KATORI H, TAKAMOTO M, PAL, CHIKOV V G, et al. Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(17):173005.
- [16] CAMPBELL S L, HUTSON R B, MARTI G E, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock [J]. *Science*, 2017, 358(6359):90–94.
- [17] OELKER E, HUTSON R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of  $4.8 \times 10^{-17}$  stability at 1 s for two independent optical clocks [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13:714–719.
- [18] BOTHWELL T, KEDAR D, OELKER E, et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of  $2.0 \times 10^{-18}$  [J]. *Metrologia*, 2019, 56(6): 065004.
- [19] GUAN H, ZHANG B, ZHANG H, et al.  $^{40}\text{Ca}^+$  optical clocks in China [J]. *AVS Quantum Science*, 2021, 3(4): 044701.
- [20] MCGREW W F, ZHANG X, FASANO R J, et al. Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level [J]. *Nature*, 2018, 564(7734): 87–90.
- [21] DÖRSCHER S, HUNTEMANN N, SCHWARZ R, et al. Optical frequency ratio of a  $^{171}\text{Yb}^+$  single-ion clock and a  $^{87}\text{Sr}$  lattice clock [J]. *Metrologia*, 2021, 58(1):015005.
- [22] DUBÉ P, MADEJ A A, SHINER A, et al.  $^{88}\text{Sr}^+$  single-ion optical clock with a stability approaching the quantum projection noise limit [J]. *Physical Review A*, 2015, 92(4): 042119.
- [23] HUANG Y, ZHANG B, ZENG M, et al. Liquid-nitrogen-cooled  $\text{Ca}^+$  optical clock with systematic uncertainty of  $3 \times 10^{-18}$  [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(3):034041.
- [24] ZHANG B, HUANG Y, HAO Y, et al. Improvement in the stability of a  $^{40}\text{Ca}^+$  ion optical clock using the Ramsey method [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(14): 143105.
- [25] GUAN H, SHAO H, QIAN Y, et al. Combined experimental and theoretical probe of the lifetime of the  $3d\ ^2D_{3/2}$  state in  $^{40}\text{Ca}^+$  [J]. *Physical Review A*, 2015, 91(2):

- 022511.
- [26] JIANG D, ARORA B, SAFRONOVA M S, et al. Blackbody-radiation shift in a  $^{88}\text{Sr}^+$  ion optical frequency standard[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2009, 42(15): 154020.
- [27] ARORA B, SAFRONOVA M S, CLARK C W. Blackbody-radiation shift in a  $^{43}\text{Ca}^+$  ion optical frequency standard [J]. *Physical Review A*, 2007, 76(6): 064501.
- [28] BIAN W, HUANG Y, GUAN H, et al. 1 Hz linewidth Ti: sapphire laser as local oscillator for  $^{40}\text{Ca}^+$  optical clocks [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87 (6) : 063121.
- [29] ZHANG B, HUANG Y, ZHANG H, et al. Progress on the  $^{40}\text{Ca}^+$  ion optical clock[J]. *Chin. Phys. B*, 2020, 29(7): 74209.
- [30] LETCHUMANAN V, GILL P, RIIS E, et al. Optical Ramsey spectroscopy of a single trapped  $^{88}\text{Sr}^+$  ion [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(3): 033419.
- [31] YUDIN V I, TAICHENACHEV A V, OATES C W, et al. Hyper-Ramsey spectroscopy of optical clock transitions [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(1): 011804.
- [32] SANNER C, HUNTEMANN N, LANGE R, et al. Auto-balanced Ramsey spectroscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(5): 053602.
- [33] DUBÉ P, MADEJ A A, BERNARD J E, et al. Electric quadrupole shift cancellation in single-ion optical frequency standards [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95 (3): 033001.
- [34] FARLEY J W, WING W H. Accurate calculation of dynamic Stark shifts and depopulation rates of Rydberg energy levels induced by blackbody radiation. Hydrogen, helium, and alkali-metal atoms [J]. *Physical Review A*, 1981, 23(5): 2397 – 2424.
- [35] AL-MASOUDI A, DÖRSCHER S, HÄFNER S, et al. Noise and instability of an optical lattice clock [J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 063814.
- [36] LANGE R, HUNTEMANN N, SANNER C, et al. Coherent suppression of tensor frequency shifts through magnetic field rotation [J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(14): 143201.
- [37] GAO K. The  $^{40}\text{Ca}^+$  ion optical clock [J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1799 – 1801.
- [38] CHEN J S, BREWER S M, CHOU C W, et al. Sympathetic ground state cooling and time-dilation shifts in an  $^{27}\text{Al}^+$  optical clock [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(5): 053002.

(本文编辑: 朱俊真)



**第一作者:** 黄焱 (1985—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为离子光频标及精密光谱、离子光频标不确定度评估、超稳激光、绝对频率测量等, 研制出我国首台光频标。



**通讯作者:** 管桦 (1979—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为离子光频标及精密光谱, 研制出我国首台光频标。中国计量测试学会时间频率专业委员会委员、中国科学院原子频标重点实验室学术委员会委员、《中国激光》杂志社青年编委、物理所四刊青年编委。



**通讯作者:** 高克林 (1958—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为离子光频标及精密光谱, 研制出我国首台光频标。中国计量测试学会时间频率专业委员会委员, 科技部973项目“原子频标物理与技术基础”、“光频标关键物理问题与技术实现”和国家重点研发计划项目“高精度原子光钟”首席科学家。