

引用格式: 王宣健, 袁金波, 舒华林, 等. 基于电四极跃迁的单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 261-269.

基于电四极跃迁的单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟研究

王宣健^{1,2,3}, 袁金波^{1,2}, 舒华林^{1,2}, 曹健^{1,2,*},

崔凯枫^{1,2}, 袁易^{1,2,3}, 晁思嘉^{1,2}, 黄学人^{1,2,4,*}

- 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 波谱与原子分子物理国家重点实验室, 武汉 430071;
- 中国科学院 精密测量科学与技术创新研究院, 原子频标重点实验室(中国科学院), 武汉 430071;
- 中国科学院大学, 北京 100049;
- 武汉量子技术研究院, 武汉 430206

摘要: 高精度光钟在时间频率计量, 相对论大地测量和基本物理规律检验方面有着重要的科学意义和应用前景。在众多的光钟参考体系中, $^{171}\text{Yb}^+$ 离子拥有两条已成为次级秒定义的非磁敏跃迁谱线, 其中电八极跃迁谱线的自然线宽低至 n Hz 水平。同时, $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的囚禁时间长, 相关激光器方案简单紧凑, 因而在研制高精度, 小型化的离子光钟方面具有独特的优势。本文主要介绍基于单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子电四极跃迁的光钟研究进展, 包括相应的激光稳频, 离子囚禁与冷却实验。利用窄线宽的 435.5 nm 激光探测 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的 $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ 跃迁, 在 20 ms 的 Rabi 探测时间下获得接近 Fourier 极限的 41 Hz 线宽钟跃迁参考谱线。在此基础上实现国内首台 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟的闭环锁定, 并利用自比对的方法评估出该光钟的频率稳定度约为 $1.3 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau/s}$, 为研制精度在 10^{-18} 水平的小型化可搬运 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟奠定基础。

关键词: 光钟; 镱离子; 离子阱; 激光稳频

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0261-09

Progress of single $^{171}\text{Yb}^+$ ion optical clock based on quadrupole transition

WANG Xuan-jian^{1,2,3}, YUAN Jin-bo^{1,2}, SHU Hua-lin^{1,2}, CAO Jian^{1,2,*},

CUI Kai-feng^{1,2}, YUAN Yi^{1,2,3}, CHAO Si-jia^{1,2}, HUANG Xue-ren^{1,2,4,*}

- State Key Laboratory of Magnetic Resonance and Atomic and Molecular Physics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
- Key Laboratory of Atomic Frequency Standards, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;
- University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
- Wuhan Institute of Quantum Technology, Wuhan 430206, China

Abstract: Optical clocks with high precision have important scientific significance and applications in metrology of time and frequency, relativistic geodesy, and test of fundamental physical laws. In the various

optical clock references, $^{171}\text{Yb}^+$ ion has two magnetic insensitive transition spectral lines that have become the secondary definitions of the second, among which the natural linewidth of the electric octupole transition is as low as n Hz. Moreover, the $^{171}\text{Yb}^+$ ion enables long trapping lifetime, and the related laser system is simple and compact. These give it significant advantages in developing high precision and compact optical clocks. This article mainly introduces the progress of an optical clock based on the electric quadrupole transition of a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion, including the corresponding experiments on laser frequency stabilization, ion trapping and cooling. A Fourier limited spectrum of 41 Hz linewidth is observed with 20 ms Rabi interrogation time using a narrow linewidth 435.5 nm laser for the $^2S_{1/2}(F=0, m_F=0) \rightarrow ^2D_{3/2}(F=2, m_F=0)$ transition. After that, the closed-loop operation of the first $^{171}\text{Yb}^+$ ion optical clock in China is realized, and the frequency instability is estimated to be $1.3 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau/s}$ with a self-comparison method. Therefore, it lays a foundation for the development of compact transportable $^{171}\text{Yb}^+$ ion optical clock with precision at the level of 10^{-18} .

Key words: optical clock; $^{171}\text{Yb}^+$ ion; ion trap; laser frequency stabilization

0 引言

最近 20 年来,由于冷原子物理、激光稳频和飞秒光梳技术的飞速发展,基于原子光学频率标准(即光钟)的研究取得了令人瞩目的成就,其频率不确定度和稳定度相继达到 $10^{-18} \sim 10^{-19}$ 水平^[1-5]。这个精度已远超目前国际秒定义的实现方式,即铯喷泉原子钟,使得光钟成为下一代秒定义的最有力候选者。同时,光钟在高精度时频体系建设,相对论大地测量和基本物理规律检验等方面具有广阔的应用前景。

研制高精度、高可靠性的小型化可搬运光钟是推动光钟从实验室的原理演示走向实际应用的重要前提。目前,基于离子阱囚禁单个离子或光晶格囚禁中性原子的可搬运光钟研究都取得了良好的进展,并逐步走出实验室开展应用探索^[6-9]。在众多的光钟参考体系中, $^{171}\text{Yb}^+$ 离子有着独特的优势:第一,它有着 $^2S_{1/2}(F=0) \rightarrow ^2D_{3/2}(F=2)$ (电四极)和 $^2S_{1/2}(F=0) \rightarrow ^2F_{7/2}(F=3)$ (电八极)两种钟跃迁参考谱线,可互为“探针”开展某些物理规律的检验和光钟频移的高精度评估,而且这两条谱线目前都已成为次级秒定义^[10];第二,这两条谱线都属于 $m_F=0 \rightarrow m_F=0$ 类型的磁场不敏感跃迁,尤其是电八极跃迁的钟态寿命长达 1.6 年^[11],在一些精密测量实验中物理体系几乎不受外界磁场和自身寿命导致退相干的限制,这是未来利用量子关联测量方法提高光钟比对测量稳定度的关键条件^[12];第三, $^{171}\text{Yb}^+$ 离子具有较大的原子质量,同时其冷却激光波长和 YbH^+ 离子(与真空背景气体反应生成)的解离波长十分接近^[13],因而具有较长的离子存储时间^[14];第四,操控 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子所需的激光器易于获得且简单紧凑。因此, $^{171}\text{Yb}^+$ 离子是研制高精度、高可靠性的小型化可搬运光钟的最佳选择之一。

目前,国际上 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟方面的研究已取得了良好的进展^[15-16]。其中,德国联邦物理技术研究院(PTB)和英国国家物理实验室(NPL)走在前列,前者研制的 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟系统频移不确定度达 2.7×10^{-18} ^[17]。最近几年,PTB 联合多家德国企业,以及俄罗斯列别捷夫物理研究所(LPI)等机构各自研制了一套基于电四极跃迁的可搬运 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟样机^[18-19],它们都集成在标准 19 英寸机柜内,并已初步展现出较好的用户可操作性。目前,国内有中国计量科学研究院^[20]和中国科学院精密测量科学与技术创新研究院等多家单位在开展 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟的研究,其中,后者在囚禁离子光钟方面有着多年的研究基础,其研制的小型化可搬运 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子光钟系统频移不确定度达 1.1×10^{-17} ,并于 2019 年实现距离长达 1 200 km 的快速搬运和快速恢复运行^[6],为研制 10^{-18} 量级小型化可搬运 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟奠定基础。

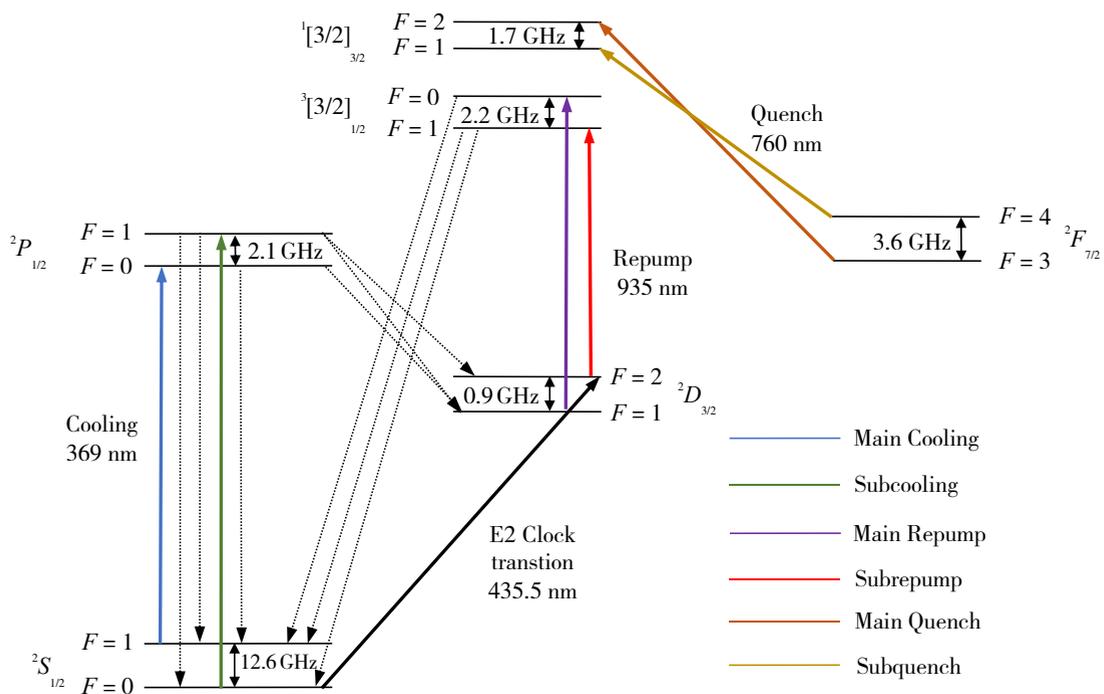
本研究计划同时针对 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟的电四极和电八极跃迁,但考虑到实验的复杂度,我们首先从电四极跃迁开展相关工作,因此本文主要介绍这一部分的研究进展。首先,利用线形离子阱实现了 $^{171}\text{Yb}^+$

单离子的囚禁与激光冷却；在完成离子激光冷却参数的初步优化和附加微运动补偿后进行了电四极谱线的探询，在 20 ms 的 Rabi 探询时间下获得极限线宽约 41 Hz 的钟跃迁参考谱线并实现光钟闭环锁定；最后，采用分时自比对的方式进行光钟频率稳定度的初步评估，获得的稳定度约为 $1.3 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau/s}$ 。

1 离子囚禁与冷却

1.1 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟相关能级结构

$^{171}\text{Yb}^+$ 离子的能级结构如图 1 所示，由于其核自旋为 1/2，所有能级均具有超精细结构。波长为 369.5 nm 的电偶极跃迁 $^2S_{1/2} (F=1) \rightarrow ^2P_{1/2} (F=0)$ 对应自然线宽约 19.6 MHz，非常适合于离子的激光 Doppler 冷却和荧光探测。处在 $^2P_{1/2}$ 态的离子有约 0.7% 的概率跃迁到自然寿命约 52 ms 的 $^2D_{3/2}$ 亚稳态，因此采用波长为 935 nm 的回泵光以维持冷却循环。但由于非共振激发的影响，处在 $^2S_{1/2} (F=1)$ 态的离子有可能跃迁至 $^2P_{1/2} (F=1)$ 态，再通过自发辐射至基态 $^2S_{1/2} (F=0)$ ，为此有必要在主冷却光的基础上加入移频量为 14.7 GHz 的次冷却光，与 $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2P_{1/2} (F=1)$ 跃迁共振，及时将离子从基态 $^2S_{1/2} (F=0)$ 清除以维持冷却循环。类似的，回泵光中也有必要加入移频量为 3.1 GHz 的次回泵光成份。另外，背景气体的碰撞会导致离子跃迁到自然寿命长达 1.6 年的 $^2F_{7/2}$ 态，因此采用 760 nm 的淬灭光以维持冷却循环。435.5 nm 激光则用于 $^2S_{1/2} (F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2)$ 的电四极钟跃迁探询及光钟闭环锁定。



注：单箭头实线表示实验可能用到的激光，虚线表示自发辐射通道

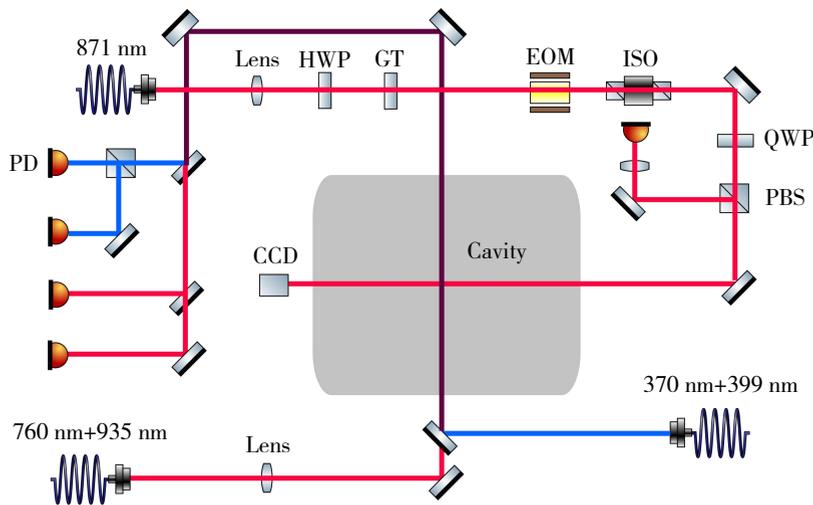
图 1 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟相关能级结构

1.2 激光稳频系统

在上述各个波长的激光系统中，除了电四极钟跃迁探询所需的 435.5 nm 激光由 871 nm 激光倍频获得以外，其余全部由半导体激光器直接获得，且均采用 Fabry-Pérot (F-P) 腔作为激光稳频参考以抑制长期频率漂移。871 nm 激光使用商用外腔半导体激光器作为种子源，经过锥形放大器放大后由光纤耦合输出，

其中大部分激光经过周期极化钽酸锂晶体单次倍频获得约 20 mW 的蓝光输出，其余则通过单模保偏光纤传输至超稳 F-P 腔进行激光稳频。

本实验采用自主研发的集成化多通道 F-P 腔进行激光稳频。该 F-P 腔采用超低热膨胀系数（ultra-low-expansion, ULE）的玻璃材料加工而成，其主体形状为边长 75 mm 的立方体，并采用一种对振动不敏感的支撑方式^[21]。如图 2 所示，腔体具有两个相互垂直的水平通光方向，分别光胶合一一对单波长和一对宽带反射镜以构成两个独立的 F-P 腔^[22]。其中，单波长（高精度度约 15 万）的反射镜构成的 F-P 腔用于 871 nm 激光的窄线宽激光稳频，宽带反射镜构成的 F-P 腔则用于 370/399/760/935 nm 激光的长期漂移抑制。该立方体及其镀金热屏蔽层被封装在一个小型真空室内，并进行 mK 水平的精密温控，真空系统和稳频光路一起搭建在小型隔振平台上。该设计方案一方面同时满足了 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟系统中多个波长的激光稳频需求，另一方面最大限度地共享真空、温控、隔振等硬件资源，为将来研制小型化、高可靠的可搬运 $^{171}\text{Yb}^+$ 光钟做好准备。激光稳频光路中，除了 871 nm 激光采用 Pound-Drever-Hall (PDH) 稳频方式外，其余激光则利用透射峰或反射峰进行简单的锁相放大稳频。由于暂时还只研制成一套稳频系统，所以无法通过拍频比对的方式对各稳频激光的线宽和稳定度等参数进行测试，但能够满足当前离子冷却和电四极跃迁谱线探测的需求，将来还需研制类似的稳频系统以便进行详细的测试和优化。



注：PBS 为偏振分光片，QWP 为 1/4 波片，HWP 为 1/2 波片，Lens 为透镜，CCD 为电荷耦合器件，PD 为光电探测器，EOM 为电光调制器，ISO 为空间隔离器，GT 为格利泰棱镜

图 2 多通道激光稳频方案

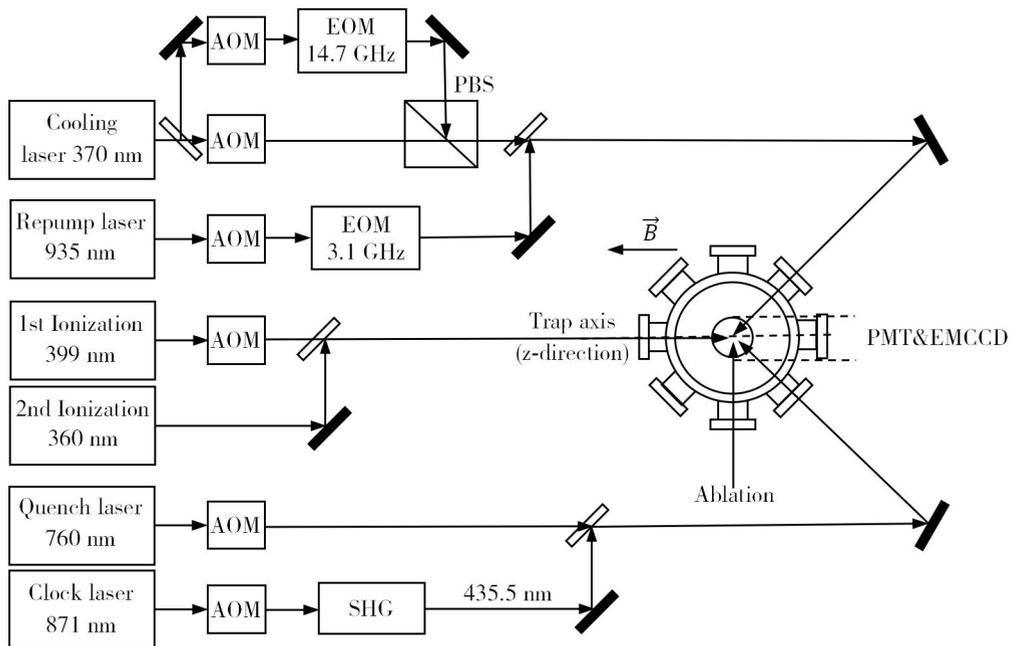
1.3 离子囚禁、冷却与荧光探测

本实验采用刀片线形阱^[23]，其对角刀片电极间距 $2r_0$ 约 1.0 mm，帽电极间距 $2z_0$ 约 6.0 mm，阱的射频驱动频率为 $\Omega = 2\pi \times 26.8$ MHz，螺旋谐振器的品质因子 Q 约 220。定义线形阱的两对刀片电极方向分别为 x 、 y 方向，一对帽电极轴线方向为 z 方向，在射频驱动功率约 5 W，帽电压约 30 V 时，利用囚禁的单个离子测得其宏运动频率为 $\{f_x, f_y, f_z\} = 2\pi \times \{0.8, 0.8, 0.44\}$ MHz。利用数值孔径 0.38 的成像透镜组收集 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子自发辐射的 370 nm 荧光，并通过电子倍增 CCD (EMCCD) 和光电倍增管 (PMT) 对离子成像和荧光计数进行分析。

镱的天然同位素较多，其中 ^{171}Yb 的自然丰度约 14%，在使用未经同位素提纯的金属单质来产生离子时，极易获得质量数非 171 的杂质离子，因此我们采用基于共振双光子激发的选择性电离方案以获得

$^{171}\text{Yb}^+$ 离子。实验中,通过电流加热 Yb 金属,所产生的原子束穿越离子阱中心区域并被垂直方向的 399 nm 一级电离光照射,通过调节该激光的频率和 ^{171}Yb 原子的 $^2S_0 \rightarrow ^1P_1$ 跃迁形成共振激发,再辅助 360 nm 的二级电离激光实现 ^{171}Yb 原子的电离,最终被离子阱捕获囚禁。目前,利用该方案可选择性电离 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子,并实现除 $^{173}\text{Yb}^+$ 以外的 6 种同位素离子的囚禁和冷却,包括丰度只有 0.13% 的 $^{168}\text{Yb}^+$ 离子。其中,核自旋为 5/2 的 $^{173}\text{Yb}^+$ 离子具有特定的超精细能级劈裂,进行离子冷却与探测需要多个特定频率的电光调制器,故未专门开展相关选择性电离实验。

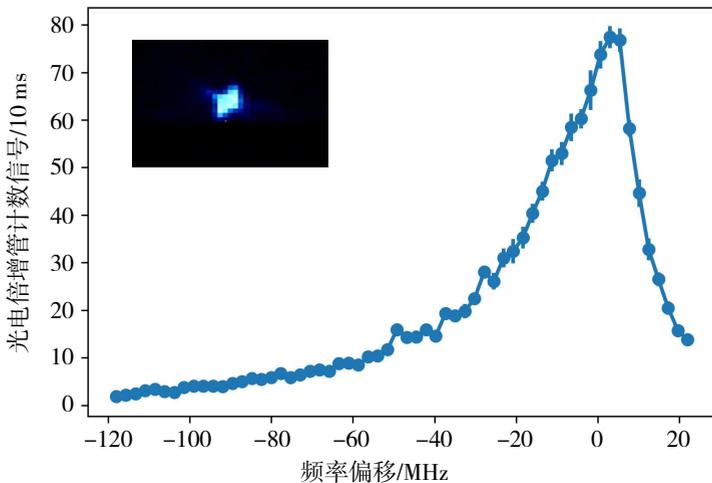
$^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟实验的主体装置如图 3 所示。偏置磁场和电离光都沿着线形阱的帽轴方向,溅射光垂直于该方向,其他激光则沿着与帽轴呈 45° 或 135° 的方向入射。370 nm 次冷却光经过电光调制器产生 14.7 GHz 的边带成份,并和主冷却光经同一光纤合光,再与 935 nm 回泵光在自由空间合光后进阱,760 nm 淬灭光与倍频后的 435.5 nm 钟激光合光进阱。其中,370 和 935 nm 激光在阱中心分别聚焦至 60 和 100 μm ,总进阱功率分别为 3.2 和 300 μW 。为了获得尽可能高的 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子荧光计数和激光冷却效率,其激光冷却和荧光探测阶段需要提供 5 G 左右的偏置磁场^[24],且磁场方向应与与冷却光偏振方向呈 55° 夹角^[25];同时,光钟探测阶段为了获得最大钟跃迁谱线激发概率,磁场方向应与 435.5 nm 钟激光呈 45° 夹角^[26]。实验中,偏置磁场大小约为 2.6 G,方向与冷却光呈 45° 夹角,由此导致荧光计数下降约 20%,未来需调整磁场参数设计,并在光钟时序控制系统中增加磁场大小和方向的快速切换功能以解决该问题。



注: AOM 为声光调制器, EOM 为电光调制器, SHG 表示二次谐波, PMT 为光电倍增管, EMCCD 为电子倍增 CCD

图 3 离子囚禁、冷却与探测装置

由于离子阱的加工和装配过程中存在不可避免的对称性缺陷,以及离子载入阶段会有部分 Yb 原子沉积在阱电极表面造成的接触势,此外还存在一些其他杂散电场的影响,囚禁离子的平衡位置会偏离射频囚禁场的鞍点,最终引起离子的附加微运动。严重的附加微运动效应会影响离子的激光冷却效率,最终影响到钟跃迁谱线的耦合强度和运动频移,因此需要降低该效应。我们以 EMCCD 上离子位置的变化^[27], PMT 上的荧光线形以及参量激发信号为观测手段^[28-29],通过调节离子阱装置中补偿电极和帽电极的驱动电压实现附加微运动的补偿,经过附加微运动补偿的单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子荧光信号如图 4 所示。

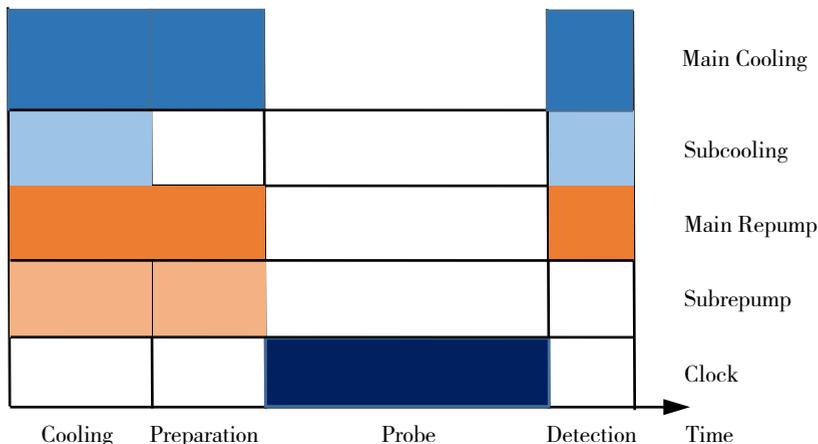


注：插图为 EMCCD 上的单离子成像
图 4 单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的 370 nm 荧光信号

2 电四极谱线的探询与光钟锁定

2.1 电四极谱线的探询

$^{171}\text{Yb}^+$ 离子电四极跃迁谱线的探测采用电子搁置法^[30]。相关的激光时序方案如图 5 所示，分为冷却、态制备、钟探询和荧光探测 4 个阶段。冷却阶段开启所有冷却和回泵光以维持激光冷却循环，持续时间约 10 ms；态制备阶段关闭次冷却光，离子将通过非共振跃迁至 $^2P_{1/2}$ ($F = 1$) 态并自发辐射至基态 $^2S_{1/2}$ ($F = 0$)，持续时间约 8 ms；钟探询阶段，关闭所有冷却和回泵光，然后开启钟激光以激发离子的电四极跃迁，持续时间根据实验需求而调整；荧光探测阶段需关闭钟激光，开启主冷却光、次冷却光和主回泵光以收集荧光计数。若在钟探询阶段离子从基态激发至 $^2D_{3/2}$ ($F = 2$) 能级上，则探测阶段的荧光为本底计数，即暗态；反之则为亮态。多次重复上述时序过程，统计亮态和暗态的发生几率，即可获得离子电四极跃迁发生的概率。由于 $^2D_{3/2}$ ($F = 2$) 态寿命较短，PMT 的探测时间需尽可能的短，实验中结合亮态和暗态计数的统计分布情况，通常将其设置为 6 ms，由自发辐射导致的退相干因素将使得钟跃迁谱线的激发概率下降约 10%，未来需要提高系统的荧光探测效率以解决该问题。

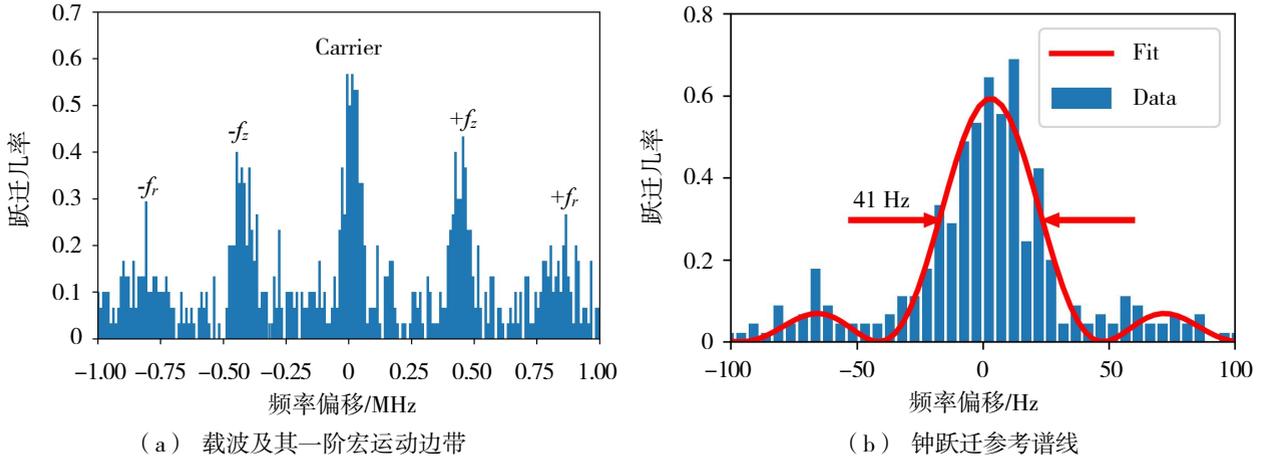


注：冷却/制备/探测三个阶段分别用时 10、8、6 ms，钟跃迁探询阶段的持续时间则随实验需求而调整

图 5 钟跃迁谱线探询的激光时序

435.5 nm 钟激光经过声光调制器 (AOM) 移频至 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的电四极钟跃迁共振频率附近，并围绕该

频率中心在一定范围内重复扫描可得到其 Zeeman 全谱。在当前磁场方向与冷却光呈 45° 夹角的条件下，选择 435.5 nm 激光的偏振为水平方向，可使其中 $\Delta m_F = 0$ 的 Zeeman 谱线具有相对较高的激发概率，此时钟跃迁谱线的载波及其一阶宏运动边带如图 6 (a) 所示。在此基础上，通过选择合适的激光功率和扫描步进，可以获得不同探测时间下钟跃迁谱线的单峰线形，其中 20 ms 的 Rabi 探测时间下的载波谱线如图 6 (b) 所示，其 41 Hz 的谱线半高全宽已非常接近 Fourier 极限。受限于钟激光自身可能存在未被充分抑制的噪声，以及传播过程中引入的相位噪声，目前的钟跃迁谱线的激发概率还未达到理想状态，将来还需要通过优化钟激光稳频系统的工作参数，以及增加光纤噪声消除等手段来解决该问题，同时进一步提高探测时间以获得更窄线宽的钟跃迁谱线。

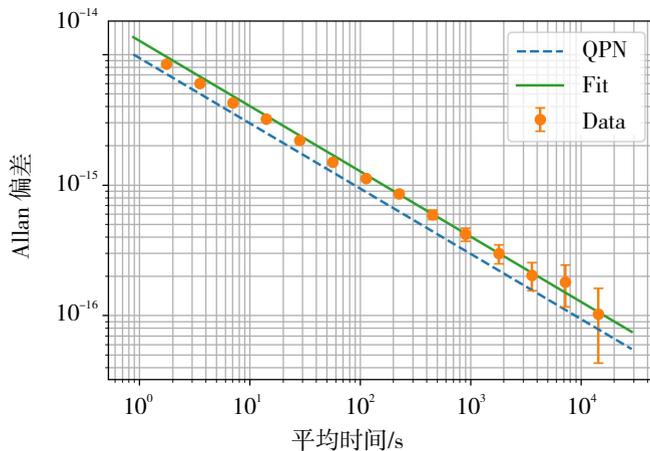


注：图 (a) 钟探测时间为 $20 \mu\text{s}$ ；图 (b) 钟探测时间为 20 ms，每个数据点均是重复 30 次的结果。红色实线为 Rabi 探测模式下的 sinc 函数拟合曲线

图 6 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的 $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ 磁子能级跃迁谱线

2.2 光钟的闭环锁定

不同于 $^{40}\text{Ca}^+$, $^{27}\text{Al}^+$ 离子等光钟系统中针对成对的参考谱线所采用的“四点锁定”方案^[31-32], $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟系统只选择 $\Delta m_F = 0$ 的一根谱线作为参考，因此采用更加简单的“两点锁定”方案^[33]。由于目前只研制了一台铯离子光钟系统，我们采用分时自比对的方式进行光钟稳定度的初步评估^[34-35]。如图 7 所示，在钟探测时间 20 ms 的条件下进行了约 1.7 万秒的光钟自比对实验，获得的相对不稳定性大小约 $1.3 \times 10^{-14} / \sqrt{\tau/s}$ 。按目前钟探测时间 20 ms、跃迁激发概率 0.6 等参数，理论计算^[36]的量子投影噪声极限 (QPN) 下的相对不稳定性约 $9.4 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau/s}$ ，二者比较接近。



注：钟跃迁探测的时序周期为 44 ms，光钟伺服环路的反馈周期约 1.77 s

图 7 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟自比对频率稳定度

3 结论

本文介绍了 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟的研究进展。利用线形阱囚禁单个 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子的 $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) \rightarrow ^2D_{3/2} (F=2, m_F=0)$ 电四极跃迁谱线实现光钟闭环锁定, 在 20 ms 钟探测时间下获得线宽约 41 Hz 的谱线, 相应的光钟分时自比对稳定度为 $1.3 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau/s}$ 。未来, 我们一方面需要从激光稳频, 离子囚禁, 激光冷却与探测等多个角度开展实验参数的优化, 进一步提高电四极跃迁谱线的钟探测时间以获得更好的光钟频率稳定度, 并开展相关的系统误差评估; 另一方面, 我们目前已在该系统上获得了 $^2S_{1/2} (F=0, m_F=0) \rightarrow ^2F_{7/2} (F=3, m_F=0)$ 电八极跃迁谱线, 接下来还需要对该谱线进行光钟闭环锁定, 并深入开展相关系统频移效应的研究。通过这些努力, 研制出高精度, 高可靠的小型化 $^{171}\text{Yb}^+$ 离子光钟, 为高精度时频体系建设, 相对论大地测量等领域的广泛应用提供关键技术储备, 同时也为基于 $^{171}\text{Yb}^+$ 和 $^{27}\text{Al}^+$ 离子等光钟的比开展精密物理测量研究提供良好的实验平台。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HUNTEMANN N, SANNER C, LIPPHARDT B, et al. Single-ion atomic clock with 3×10^{-18} systematic uncertainty[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063001.
- [3] 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.
- [4] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, DAS M, et al. Cryogenic optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 185-189.
- [5] NICHOLSON T L, CAMPBELL S L, HUTSON R B, et al. Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty[J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6896.
- [6] CAO J, YUAN J B, WANG S M, et al. A compact, transportable optical clock with 1×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120: 054003.
- [7] LIU D X, CAO J, YUAN J B, et al. Laboratory demonstration of geopotential measurement using transportable optical clocks[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 32(1): 010603.
- [8] GROTTI J, KOLLER S, VOGT S, et al. Geodesy and metrology with a transportable optical clock[J]. *Nature Physics*, 2018, 14(5): 437-441.
- [9] TAKAMOTO M, USHIJIMA I, OHMAE N, et al. Test of general relativity by a pair of transportable optical lattice clocks[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14(7): 411-415.
- [10] 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.
- [11] LANGE R, PESHKOV A A, HUNTEMANN N, et al. Lifetime of the $^2F_{7/2}$ level in Yb^+ for spontaneous emission of electric octupole radiation[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(21): 213001.
- [12] CLEMENTS E R, KIM M E, CUI K, et al. Lifetime-limited interrogation of two independent $^{27}\text{Al}^+$ clocks using correlation spectroscopy[J]. *Physical Review Letters*, 2020, 125(24): 243602.
- [13] SUGIYAMA K, YODA J. Production of YbH^+ by chemical reaction of Yb^+ in excited states with H_2 gas[J]. *Physical Review A*, 1997, 55(1): 133-136.
- [14] TAMM C, WEYERS S, LIPPHARDT B, et al. Stray-field-induced quadrupole shift and absolute frequency of the 688-THz $^{171}\text{Yb}^+$ single-ion optical frequency standard[J]. *Physical Review A*, 2009, 80(4): 043403.
- [15] HUNTEMANN N, LIPPHARDT B, TAMM C, et al. Improved limit on a temporal variation of mp/me from comparisons of Yb^+ and Cs atomic clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210802.

- [16] GODUN R M, NISBET-JONES P B, JONES J M, et al. Frequency ratio of two optical clock transitions in $^{171}\text{Yb}^+$ and constraints on the time variation of fundamental constants[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 113(21): 210801.
- [17] DÖRSCHER S, HUNTEMANN N, SCHWARZ R, et al. Optical frequency ratio of a $^{171}\text{Yb}^+$ single-ion clock and a ^{87}Sr lattice clock[J]. *Metrologia*, 2021, 58(1): 015005.
- [18] STUHLER J, ABDEL HAFIZ M, ARAR B, et al. Opticlock: Transportable and easy-to-operate optical single-ion clock[J]. *Measurement: Sensors*, 2021, 18100264.
- [19] KHABAROVA K, KRYUCHKOV D, BORISENKO A, et al. Toward a new generation of compact transportable Yb+ optical clocks[J]. *Symmetry*, 2022, 14(10): 2213–2227.
- [20] 左娅妮, 戴少阳, 曹士英, 等. 基于端帽阱的镱离子光钟的系统设计及研究进展[J]. *时间频率学报*, 2022, 45(2): 83-88.
- [21] WEBSTER S A, GILL P. Force-insensitive optical cavity[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3572-3574.
- [22] WANG S, CAO J, YUAN J, et al. Integrated multiple wavelength stabilization on a multi-channel cavity for a transportable optical clock[J]. *Optics Express*, 2020, 28(8): 11852-11860.
- [23] CUI K F, CHAO S J, SUN C L, et al. Evaluation of the systematic shifts of a $^{40}\text{Ca}^+ - ^{27}\text{Al}^+$ optical clock[J]. *The European Physical Journal D*, 2022, 76(8): 140.
- [24] BERKELAND D J, BOSHIER M G. Destabilization of dark states and optical spectroscopy in Zeeman-degenerate atomic systems[J]. *Physical Review A*, 2002, 65(3): 033413.
- [25] EJTEMAEE S, THOMAS R, HALJAN P C. Optimization of Yb^+ fluorescence and hyperfine-qubit detection[J]. *Physical Review A*, 2010, 82(6): 063419.
- [26] SCHNEIDER T. Optical frequency standard with a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion[D]. Hanover: University of Hanover, 2005.
- [27] GLOGER T F, KAUFMANN P, KAUFMANN D, et al. Ion-trajectory analysis for micromotion minimization and the measurement of small forces[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(4): 043421.
- [28] IBARAKI Y, TANAKA U, URABE S. Detection of parametric resonance of trapped ions for micromotion compensation[J]. *Applied Physics B*, 2011, 105(2): 219-223.
- [29] TANAKA U, MASUDA K, AKIMOTO Y, et al. Micromotion compensation in a surface electrode trap by parametric excitation of trapped ions[J]. *Applied Physics B*, 2011, 107(4): 907-912.
- [30] DEHMELT H G. Monoion oscillator as potential ultimate laser frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1982, IM-31(2): 83-87.
- [31] BERNARD J E, MADEJ A A, MARMET L, et al. Cs-based frequency measurement of a single, trapped ion transition in the visible region of the spectrum[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(16): 3228-3231.
- [32] BARWOOD G P, GAO K, GILL P, et al. Development of optical frequency standards based upon the $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$ transition in $^{88}\text{Sr}^+$ and $^{87}\text{Sr}^+$ [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, 50(2): 543-547.
- [33] SCHNEIDER T, PEIK E, TAMM C. Sub-Hertz optical frequency comparisons between two trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(23): 230801.
- [34] NICHOLSON T L, MARTIN M J, WILLIAMS J R, et al. Comparison of two independent Sr optical clocks with 1×10^{-17} stability at 10^3 s[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(23): 230801.
- [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] PEIK E, SCHNEIDER T, TAMM C. Laser frequency stabilization to a single ion[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2006, 39(1): 145-158.