

我国基准光钟及其绝对频率测量*

卢炳坤^{1,2,3} 林弋戈^{1,3,†} 方占军^{1,3}

(1 中国计量科学研究院 北京 100029)

(2 清华大学精密仪器系 北京 100084)

(3 国家市场监管重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

High precision optical clock and its absolute frequency measurement in China

LU Bing-Kun^{1,2,3} LIN Yi-Ge^{1,3,†} FANG Zhan-Jun^{1,3}

(1 National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

(2 Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(3 Key Laboratory of State Administration for Market Regulation (Time Frequency and Gravity Primary Standard), Beijing 100029, China)

2023-06-19收到

† email: linyige@nim.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230703

摘要 光钟能够产生高稳定、高准确的光学频率,在时间频率计量、基础物理研究、相对论大地测量等领域有着潜在的应用。中国光钟研究从21世纪初开始起步,在超稳激光产生、量子参考体系制备、系统频移评估和绝对频率测量等方面取得了长足的进步,目前已经有多个研究组的光钟系统频率不确定度进入 10^{-18} 量级,多个机构实现了光钟绝对频率测量,并且有三种光钟的测量结果被国际时间频率咨询委员会采纳。文章将回顾中国为应对秒定义变革而开展的高准确度光钟及其绝对频率测量研究,梳理目前取得的进展和成果,总结存在的问题,并对未来发展提出建议。

关键词 光钟, 光频标, 秒定义, 系统频移评估, 绝对频率测量

Abstract Optical clocks can generate ultra-stable and ultra-precise optical frequencies, for potential use in time and frequency metrology, fundamental physics, relativistic geodesy, and so forth. Many groups in China began optical clock research in the early 21st century, and made significant progress in designing and establishing ultra-stable lasers, preparing quantum references, systematic shift evaluation, and absolute frequency measurement. Several groups have already evaluated the systematic frequency shifts of their optical clocks with uncertainties on the order of 10^{-18} . Some groups have made absolute frequency measurements, and the results of three types of optical clocks have been adopted by the Consultative Committee for Time and Frequency of the International Committee for Weights and Measures. This paper will review the development of high precision optical clocks and their absolute frequency measurements in China, and provide suggestions for future research.

Keywords optical clock, optical frequency standard, definition of the second, systematic frequency shift evaluation, absolute frequency measurement

* 国家重点研发计划(批准号: 2021YFF0603802)、国家自然科学基金精密测量物理重大研究计划(批准号: 91336212, 91736310)资助项目

1 引言

在20世纪50年代以前,全世界普遍采用了平太阳日的1/86400作为秒定义^[1]。随着科学技术的发展,对计时准确性的要求越来越高,科学家发现地球自转并不稳定。1960年,第11届国际计量大会(CGPM)的第9项决议第一次明确地定义了秒,采用了地球公转的规律性来计时^[2]。但是地球的公转也并不是非常稳定,且存在复现困难的问题。随着量子物理的发展,人们逐渐认识到微观世界的一些现象有着更稳定的规律性,并且在不同时间不同地点复现时有着天然的一致性。20世纪40年代末,美国国家标准局研制成功国际上第一台氨分子钟^[3];1955年,英国国家物理实验室(NPL)研制成国际上第一台铯原子钟^[4],人类的计时技术进入了原子钟时代,CGPM也在1967年把秒定义从“天文秒”改成了基于铯原子跃迁的“原子秒”^[5]。在原子钟诞生后的几十年里,其不确定度指标提升了超过一百万倍^[6],以光学频率波段的原子跃迁作为量子参考的光钟后来逐渐成为原子钟研究的主要方向^[7, 8]。本文将介绍光钟研究的背景、光钟的组成、光钟的分类等基本信息,着重介绍我国为应对秒定义变革而开展的高准确度基准光钟及其绝对频率测量研究的进展,总结取得的成绩和存在的问题,以及对未来发展的展望。

2 光钟概述

光钟,光频原子钟的简称,是利用频率在光学波段的原子(分子、离子)跃迁作为量子参考而建立的原子钟(原子频率标准)。在计量领域,“钟”和“频标”在概念上是有所区分的^[9],频标只要求输出标准频率信号,而钟则还要具备输出时间信号(秒脉冲或者时刻)的能力。根据现有光钟的结构和信号输出情况,目前的光钟准确地讲应该被称为光频标,但是由于国际、国内计量领域已经非常广泛地采用了光钟这个说法,本文将不再严格区分“钟”和“频标”。

目前提到光钟,往往会把光钟限定于基于冷原子物理技术建立的高准确度光钟这个范围,但是光钟包含的内容远比这个广泛。根据前面光钟的定义,传统的稳频激光也可被称为光钟,而激光稳频技术在激光刚刚诞生后的20世纪60年代就出现了^[10],可以作为光频标研究的开始。实际上基于碘分子稳频的固体激光系统就曾经被称为碘钟^[11, 12],而直到目前,仍然有人把一些稳频激光的研究称为光频标研究或者光钟研究^[13],在空间原子钟研究领域仍然被用作标准频率源^[14, 15]。

根据对量子参考跃迁探测方法的不同,光钟可分为主动型光钟和被动型光钟。主动型光钟是通过探测原子受激辐射的发射光谱而实现的光钟^[16, 17],而被动型光钟则是探测原子在外部激光源激励下的吸收光谱从而得到频率误差信号,通过修正外部激光源的频率而实现的光钟。主动型光钟对应于微波原子钟里的主动型氢原子钟,目前还在研究发展阶段^[18-20],与传统激光的主要区别是,其输出频率由原子跃迁频率决定,而不是腔的共振频率决定,具有结构简单、稳定性好等特点,未来在全光频守时领域有潜在的应用。

目前研究最广泛的光钟是被动型光钟。被动型光钟的结构如图1所示。

被动型光钟通常由三部分组成:光学本地振荡器、量子参考体系和锁定控制系统。光学本地振荡器是一套超稳激光系统,提供短期稳定性非常优异的光学频率信号,用于激励钟跃迁;量子

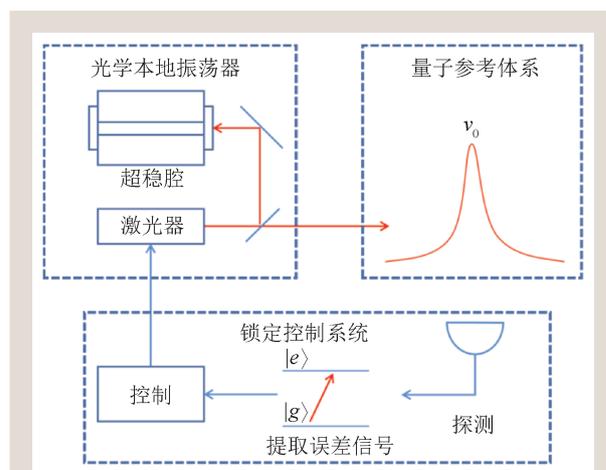


图1 被动型光钟的组成结构

参考体系是光钟准确频率的来源,需要采用激光、电场和磁场等相结合的原子物理实验手段来制备,并尽可能隔离外界环境的影响;锁定控制系统操控光学本地振荡器激励量子参考体系,通过探测系统得到光学本地振荡器频率与量子参考体系钟跃迁频率之间的误差,并通过伺服系统反馈控制光学本地振荡器的频率,使其输出频率与量子参考体系的钟跃迁频率一致。

按照量子参考体系制备手段的不同,光钟可分为冷原子光钟和热原子光钟。我们平常提到的高准确度光钟一般是指基于冷原子技术建立的光钟,由于采用了激光冷却和离子囚禁等技术,大大减小了原子热运动造成的多普勒频移,具有准确度高的优点。热原子光钟包含基于气室以及基于热原子束的光钟,由于结构简单,在体积功耗受限的领域有一定的应用潜力,但是在光频守时钟应用方面仍需要进一步提高稳定度^[21, 22]。

在高准确度冷原子光钟里,按照量子参考体系的类型不同,又分为离子光钟和中性原子光晶格钟两类。本文所介绍的光钟将聚焦于利用冷原子技术建立的高准确度光钟这个范围。

离子光钟采用了离子囚禁技术,利用磁场、静电场或射频场将带电离子囚禁在超高真空中,离子与外界环境较好地隔离^[23],具有系统频移不确定度低的优点,目前国际上最好的离子光钟的系统频移不确定度已经进入了 10^{-19} 量级^[24, 25]。但是由于目前的离子光钟只囚禁了一个离子,因此受量子投影噪声限制,使得频率稳定度低于囚禁多个参考粒子的中性原子光钟。目前正在研制基于多离子的光钟,有望提升离子光钟的频率稳定度^[26-28]。

中性原子光晶格钟利用光晶格囚禁大量中性原子作为量子参考,通过光晶格把原子囚禁在兰姆—迪克区,消除运动效应(热运动和光子反冲)造成的影响,同时引入“魔术波长”光晶格技术,减小由于光晶格激光的引入而造成的系统频移^[29, 30],增加原子与钟跃迁探测激光的作用时间,减小探测的傅里叶极限线宽,实现了秒级频率稳定度进入 10^{-17} 量级^[31]。

为了实现光钟的实际应用,还需要给光钟配

备输出系统。光钟输出超稳定的特定光学频率,除了在光钟实验室里直接应用外,往往需要传递到其他位置的实验室。用于超稳光学频率跨空间距离传递的不可或缺的手段,是光纤频率传递^[32, 33]。光纤频率传递利用不等臂长的迈克尔孙干涉仪对传递光纤链路产生的噪声进行采样,并建立频率补偿系统对输出端的频率进行噪声补偿,能够实现不损失光钟稳定度的光学频率传输,目前传输距离可达上千公里^[34, 35]。光钟直接输出的频率是参考原子跃迁附近的频率,为了能够与其他光学频率进行比对,或者与微波频率进行比对,需要把特定光学频率转换到其他光学波段或者微波波段。频率转换采用飞秒光学频率梳来实现,可以采用低噪声的窄线宽飞秒光梳^[36, 37],或者利用普通光梳采用传递振荡器模式来实现频率转换^[38-40]。

光钟的性能一般采用光钟的系统频移不确定度和频率稳定度来表征。光钟的系统频移不确定度表示光钟的输出频率与光钟量子参考跃迁的理想频率之间频差的不确定度,而不是光钟输出绝对频率的不确定度。由于目前秒定义基于铯原子跃迁,所以光钟的绝对频率需要溯源到铯原子钟上进行测量,因此光钟绝对频率的不确定度受铯原子钟不确定度的限制,这一点需要非常注意。光钟的频率稳定度是指一台独立工作的光钟输出频率的稳定度,需要采用与其他光钟比对的方法才能测量。在光钟性能表征中,还有人采用环内频率稳定度^[41, 42]、分时交替自比对频率稳定度^[43, 44]和分空间自比对^[45]等指标,这些指标并不表征一台独立光钟输出频率的稳定度,但是在特定测量里可以获得分辨率优势,得到较好的差分测量不确定度^[46]。

3 国际光钟的发展

20世纪70年代末,美国科学家就提出了利用囚禁离子研制光学频率标准的建议^[47],相关的理论研究为光钟的研制奠定了基础。80年代,基于Pound—Drever—Hall (PDH)技术建立了超稳激光^[48],利用激光冷却中性原子建立光学频率标准

的建议也被提了出来^[49]。到20世纪末和21世纪初,飞秒光学频率梳的出现^[50, 51],推动了光钟研究的快速发展。2001年,汞离子光钟和中性钙原子光钟的频率比对得到了 7×10^{-15} @1 s的频率稳定度,首次实现了光钟的稳定度超越最好的微波钟,光钟的发展进入了快车道^[52]。2003年,日本东京大学研究组提出了魔术波长光晶格的想法^[29],开启了中性原子光晶格钟的快速发展。2010年,美国国家标准与技术研究院(NIST)的铝离子光钟的不确定度首次进入到 10^{-18} 量级^[53],2015年,NIST与科罗拉多大学天体物理联合实验室(JILA)的镱原子光晶格钟的不确定度达到了 2.1×10^{-18} ^[54],2019年,以低温硅腔为本地光学振荡器的镱光钟频率稳定度达到了 $4.8 \times 10^{-17} / \sqrt{\tau}$ (τ 表示测量频率稳定度的平均时间)^[55]。目前国际上已报道的不确定度指标最好的离子光钟是镱离子光钟,其系统频移不确定度已经达到 6×10^{-19} ^[25]。从2000年到目前,有多次诺贝尔物理学奖的工作与光钟研究有直接关系。光钟的研究推进人类测量能力的极限,不仅提升时间频率的测量能力,推动国际单位制时间单位秒的重新定义,同时可以检验现有物理规律、探索引力效应、暗物质等,寻找新的物理规律^[56-58]。

4 我国高准确度光钟及其绝对频率测量研究进展

我国是在21世纪初开始涉足基于冷原子技术的高准确度光钟研究领域。2005年,在973计划“原子频标物理与技术基础”项目的支持下,国内几个光钟研究小组启动了光钟的研究,后续国内又有多个经费渠道支持了更多光钟研究组起步研究,目前国内有超过十个光钟组在开展约十种基于不同量子参考的光钟研究。以下主要从超稳激光技术和光钟整体的进展来介绍。

4.1 超稳激光技术研究

国际上在20世纪80年代就开展了超稳激光相关的研究。1999年,亚赫兹量级的超稳激光在美

国国家标准与技术研究院的光钟研究组研制成功^[59],表明超稳激光的理论、超稳腔的材料研究等都已经达到了比较成熟的阶段^[60-62],限制超稳腔性能极限的热噪声理论也开始发展^[63, 64]。国内这时在超稳激光方面还刚刚起步。21世纪初,国际上刚刚开始超稳腔设计和支撑方面引入有限元分析技术,来优化超稳腔系统对振动噪声的敏感性。2006年,中国计量科学研究所和中国科学院武汉物理与数学研究所的研究人员参与了早期的超稳腔有限元优化设计研究^[65],分析了包括垂直支撑、水平支撑等多种支撑结构和圆柱形、长方体形、切槽形等各种腔型的超稳腔设计,并在后续开展了更详细的分析^[66]。目前有限元分析已成为超稳激光研究领域的重要工具^[67, 68]。

华东师范大学团队通过有效的国际合作,在国内最早开展了基于超高精细度超稳腔的超稳激光实验研究,2008年,实现了Hz量级超稳激光^[69]。该研究组采用了波长为1064 nm的Nd:YAG固体激光器作为光源,使用当时国际上刚刚发展起来的垂直放置的橄榄球型超稳腔技术,腔体由超低热膨胀系数玻璃(ULE)材料制成,超稳腔的精细度达到了300000。Nd:YAG固体激光器本身的噪声性能非常出色,因此采用快速压电陶瓷作为频率伺服执行器就能够实现线宽压缩,PDH稳频系统的闭环控制带宽低于100 kHz。该小组建立了两套超稳激光系统,通过两套系统的拍频测量超稳激光的性能,得到单系统的线宽为1.7 Hz,1秒平均时间的稳定度为 3×10^{-15} 。

2011年,中国科学院武汉物理与数学研究所为钙离子光钟研制了钟跃迁探测激光系统,把一台729 nm单频钛宝石激光器的频率锁定到了一个用微晶玻璃Zerodur材料做成的超稳腔上^[70]。钛宝石激光也是一种固体激光器,频率噪声低,因此该小组采用声光调制器(AOM)作为伺服反馈的快速执行器,采用钛宝石激光器的压电陶瓷作为慢速执行器,实现了激光器到超稳腔的锁定,锁定环路的闭环带宽约为200 kHz。通过把稳频后的激光再次锁定到另一个ULE材料制成的超稳腔的方法进行了线宽评估,得到超稳激光系统的线宽为41 Hz。

2013年, 华中科技大学小组成功研制了铝离子光钟的超稳激光^[71]。该小组采用1068 nm 半导体激光器作为光源, 通过四倍频到267.0 nm 作为铝离子光钟的探测激光。相对于固体激光器来说, 半导体激光器的噪声更大, 因此需要更大的反馈增益来实现噪声抑制, 而半导体激光器拥有高带宽的电流调制端口, 有利于进行比固体激光器更快速的反馈控制。这个小组采用了两个10 cm 的ULE材料的超稳腔作为频率参考, 通过有限元技术优化腔的支撑结构, 并采用主动隔振平台对振动噪声进行了抑制。超稳激光系统的闭环控制带宽达到了1.5 MHz, 通过两套独立的超稳激光系统拍频比对得到激光的线宽优于3 Hz, 1秒平均时间的频率稳定度达到了 2×10^{-14} 。

2014年, 中国计量科学研究院为铯原子光晶格钟研制了698 nm的超稳激光^[72]。该研究组采用一台自研的半导体激光器作为光源, 在外腔半导体激光头里直接集成了快速反馈控制电路, 最大限度地减小了电路延迟, 便于得到更大的反馈控制带宽, 实现了高达4 MHz的闭环控制带宽。该超稳激光系统进行了有限元优化设计, 采用10 cm的切槽圆柱腔体, 横截面为蘑菇形状, 超稳腔水平支撑, 并采用精密被动隔振平台隔离振动噪声。通过建立两套超稳激光系统, 拍频得到的线宽优于6 Hz, 频率稳定度在1—10 s平均时间范围内都优于 5×10^{-15} 。

国内的超稳激光研究到2014年基本实现了第一阶段的探索, 朝着进一步提升超稳激光指标的方向发展。2016年, 中国科学院武汉物理与数学研究所钙离子光钟研究组把钛宝石激光器和半导体激光器分别锁定到ULE材料制成的超稳腔上, 并优化锁定参数, 通过拍频比对测量, 得到了1 Hz的激光线宽和 2×10^{-15} @ 1—100 s的频率稳定度^[73, 74]。为了优化超稳激光的频率漂移特性,

多个研究组采用光钟的钟跃迁频率或者飞秒光学频率梳为频率参考, 专门针对超稳腔的零膨胀温度进行了测量^[75-77]。这些测量所采用的超稳腔都是由ULE材料制作的腔体, 各个研究组测量得到的超稳腔零膨胀温度基本是在5—35 °C范围内, 尽管都在ULE材料生产厂家的声称范围内, 但是并不一致。为了减小超稳腔的热噪声, 后来的超稳腔多采用熔融石英材料作为超稳腔镜的基底, 形成了不同种材料组成的超稳腔, 零膨胀温度更会偏离ULE材料本身的零膨胀温度点^[78], 因此各个研究组需要各自测量才能得到超稳腔零膨胀温度的准确值。

2018年, 中国计量科学研究院铯原子光晶格钟研究组实现了基于30 cm长参考腔的超稳激光^[79]。在只有一个30 cm参考腔的情况下, 该小组采用了铯原子光频跃迁作为频率参考, 测量得到超稳激光的稳定度在10 s平均时间内优于 3×10^{-16} 。采用长度更长的超稳腔可以减小热噪声对超稳腔相对频率稳定度的贡献, 因此国内外很多小组都研制了基于长参考腔的超稳激光系统^[41, 80, 81]。这么多研究组选择30 cm作为超稳腔的腔长, 主要是从两个方面考虑。第一个原因是早期的参考腔多采用10 cm的腔体长度, 热噪声限制的稳定度在 1×10^{-15} 附近, 而根据热噪声理论, 30 cm参考腔的热噪声极限在 1×10^{-16} 附近, 比10 cm腔提升约一个量级。第二个原因是从成本方面考虑的, 腔体长度的增长伴随着腔体积的增大, 大块的ULE材料更不易获得, 更难加工, 价格并不是按线性增长的, 30 cm是腔材料和加工成本的一个比较优化的值。并且超稳激光系统不仅仅包含腔本身的成本, 还包括为腔提供恒温 and 隔声隔振的真空控温系统的制作成本以及体积重量限制, 目前的30 cm长腔也是考虑这些问题后所做的一个比较合理的选择。

国内为光钟服务的超稳激光研究路径见表1。最初选用了基于短ULE腔体的常温超稳腔, 后转向基于长参考腔的常温超稳腔, 目前基本实现长参考腔稳频方案达到目标稳定度, 开始转向热噪声极限更低的设计方案, 如采用新型晶体镀膜^[82, 83]

表1 国内超稳激光技术的发展

	第一阶段	第二阶段	未来趋势
腔体	常温, ULE材料, 短腔, 水平或者垂直支撑	常温, ULE材料, 长腔, 水平支撑	低温, 单晶硅、钛蓝宝石等晶体材料
镜片	ULE基底, 电解质镀膜	熔融石英基底, ULE环调节零膨胀温度, 电解质镀膜	晶体镀膜
热噪声	$\sim 10^{-15}$	$\sim 10^{-16}$	$\sim 10^{-17}$

或者低温环境^[84-86]

等。目前,传统常温超稳腔方案中的腔体加工、镜片超光滑抛光、超高反射率镀膜、精密光胶、腔精细度测量、真空控温系统设计加工、PDH锁

定、整体性能评估等关键技术,国内已经可以做到自主满足性能要求,但是在超低膨胀玻璃材料、晶体镀膜技术等更基础的材料和工艺领域仍然需要加强研究。

4.2 高准确度光钟及其绝对频率测量研究

在光钟整体研究方面,国内有多个光钟组已经发表了光钟系统频移不确定度评估结果、绝对频率测量结果或者光钟稳定度测量结果,部分光钟进展情况的总结见表2^[87-96]。

以下以中国科学院武汉物理与数学研究所(以下简称武汉物数所)钙离子光钟的研究和中国计量科学研究院(以下简称计量院)的锶原子光晶格钟研究为代表,介绍国内离子光钟和中性原子光晶格钟及其绝对频率测量研究的发展。

2005年,武汉物数所实现了基于激光冷却的单个钙离子稳定囚禁,观察到了钙离子的量子跳跃^[97]。该小组还分析了端帽阱囚禁的单个钙离子光钟各种系统频移的特性,从理论上分析了这种光钟的各类不确定度来源及其量级^[98]。特别是,虽然钙离子光钟的电四极频移比较大,但是通过采用钟跃迁的三对不同的塞曼成分来锁定,可以把这个频移量减小到零附近^[99]。这些工作为后续钙离子光钟的建立提供了非常好的实验和理论基础。

2011年,该研究组首次完成了钙离子光钟的不确定度评估^[100],系统频移不确定度达到了 7.8×10^{-16} 。限制不确定度指标的系统频移为线性塞曼频移和电四极频移,这两项频移在后续都可以通过锁定多个塞曼分量来进一步抑制,性能提

表2 国内部分光钟的研究进展情况*

量子参考	研究机构	分时自比对稳定度	互比对稳定度	系统频移不确定度	绝对频率测量不确定度	参考文献
^{87}Sr	NIM	$1.2 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$	—	7.2×10^{-18}	3.1×10^{-16}	[87, 88]
^{87}Sr	NTSC	$6.6 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$	—	5.1×10^{-17}	4.1×10^{-16}	[89]
$^{40}\text{Ca}^+$	WIPM/APM	$2.5 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$	$3.0 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$ [4]	3.0×10^{-18} [4]	3.2×10^{-16}	[90-92]
$^{27}\text{Al}^+$	WIPM/APM	$3.7 \times 10^{-14}/\sqrt{\tau}$	—	7.9×10^{-18}	—	[93]
^{171}Yb	WIPM/APM	—	$4.6 \times 10^{-16}/\sqrt{\tau}$	—	—	[94]
^{171}Yb	ECNU	—	$2.9 \times 10^{-15}/\sqrt{\tau}$	1.3×10^{-16}	7.3×10^{-16}	[95, 96]

* NIM: 中国计量科学研究院; NTSC: 中国科学院国家授时中心; WIPM/APM: 中国科学院武汉物理与数学研究所/中国科学院精密测量科学与技术创新研究院; ECNU: 华东师范大学。τ表示测量稳定度的平均时间。

升具有很大的潜力。为了测量钙离子光钟的绝对频率,需要把钙离子光钟的频率溯源到基于铯原子的秒定义。2012年,武汉物数所与计量院合作,利用基于全球定位系统(GPS)精密单点定位(PPP)技术,把位于武汉的钙离子光钟的频率与位于北京的原子时标国家计量基准 UTC (NIM) 连接起来,通过卫星链路对钙离子光钟的绝对频率进行了测量^[101],测量不确定度达到了 3.9×10^{-15} ,测量结果被国际时间频率咨询委员会(CCTF)采纳作为计算钙离子光钟国际推荐值的源数据。这项工作的完成是我国光钟研究第一次走过一个比较完整的流程,武汉物数所在国内首次实现高准确度钙离子光钟系统频移不确定度评估,与计量院一起在国内首次开展了基于卫星链路的高准确度光钟绝对频率测量。

接着,武汉物数所研究组进一步改进了钙离子光钟^[102-104],比如用光离子代替了电子枪轰击离子钙原子,极大降低了离子源对离子阱的污染,有助于控制微运动频移并提升离子囚禁寿命;采用有限元分析结合实验测量的方法把黑体辐射频移的不确定度评估到 2×10^{-18} 。2016年,开展了两台钙离子光钟的比对实验,两台光钟的一致性达到了 5.5×10^{-17} ,验证了钙离子光钟系统频移不确定度评估的可靠性^[103]。通过频率比对,测量了由于光钟位置不同而产生的相对论红移,为光钟在大地测量中的应用进行了初步验证^[105]。2019年底,中国科学院精密测量科学与技术创新研究院(原武汉物数所,以下简称中科院精密测量院)研制的两台可搬运钙离子光钟分别通过公路和铁路运输来到位于北京市昌平区的计量院,开展了新一轮的绝对频率测量^[105, 106]。利用计量院参与国际

原子时合作的卫星链路，实现了高准确度的钙离子光钟绝对频率溯源，溯源不确定度达到了约 5×10^{-16} 。其中参考文献[105]的测量结果赶在CCTF新一轮数据征集前发表，被CCTF采纳，助力钙离子光钟跃迁频率成为国际秒的次级表示谱线之一^[107]。2022年，该研究组为钙离子光钟建立了液氮低温环境，大大减小了黑体辐射频移的不确定度，把钙离子光钟的总系统频移不确定度推进到了 3×10^{-18} ^[91]，利用可搬运钙离子光钟在计量院进行的新一轮绝对频率测量，其不确定度达到了 3.2×10^{-16} ^[92]。

在中性原子光钟方面，计量院于2006年开始了铯原子光晶格钟的预研。2007年，开展了铯光钟物理装置的设计^[108]，很快实现了铯原子的一级激光冷却^[109]。铯原子的激光冷却与冷原子物理中常用的碱金属原子的激光冷却不同，采用了两级激光冷却的方案^[110]，其中第二级激光冷却采用的原子跃迁线宽只有7.5 kHz，普通的半导体激光器无法直接用于激光冷却实验，需要利用PDH技术锁定到超稳腔进行线宽压缩后才能使用^[111, 112]。这使得铯原子光晶格钟的研究中，需要在研究的更早阶段解决半导体激光器线宽压缩的问题，当时这项技术在国内基本是空白。计量院通过国际合作，研制了外腔半导体激光器和快速伺服反馈电路，在2010年攻克了半导体激光线宽压缩技术，在没有采用精密隔振平台的条件下，建立了线宽为150 Hz、秒级频率稳定性为 4.3×10^{-14} 的689 nm

半导体激光系统，满足铯原子激光冷却对激光性能的要求^[113]，并实现了铯原子的第二级激光冷却^[114]和光晶格装载^[115]。

计量院铯光钟团队最初探索了基于 ^{88}Sr 原子的钟跃迁探测和锁定。由于 ^{88}Sr 原子的 $^1S_0-^3P_0$ 跃迁是严格禁戒的，因此采用了磁致跃迁的方案，通过增加一个较强的磁场来实现钟跃迁激发^[115]。受当时钟跃迁探测激光系统的性能限制，再加上为了提升钟跃迁激发的拉比频率而施加的强磁场和高功率探测激光引起的较大频移，基于 ^{88}Sr 原子闭环锁定的不确定度指标很难提升，计量院铯光钟组转向研究基于 ^{87}Sr 的铯光钟。2014年，实现了弱磁场下钟跃迁塞曼谱的探测，光谱分辨率达到了赫兹量级，并通过光抽运的方式实现了自旋态极化，进一步提升了拉比激发跃迁几率，并有助于减小塞曼频移和光晶格斯塔克频移^[116]。2015年，计量院完成了铯光钟的第一次系统频移不确定度评估，总体不确定度达到了 2.3×10^{-16} ，并利用本地铯原子喷泉钟作为参考，进行光钟绝对频率溯源，测量的不确定度达到了 3.4×10^{-15} ^[144]。该测量结果在2015年被CCTF采纳作为 ^{87}Sr 光钟跃迁频率推荐值计算的源数据。计量院在国内首次走过铯原子光晶格钟研究的完整流程，在通过卫星链路实现光钟频率测量的方法之外，又实现了通过参考到本地铯原子喷泉钟进行绝对频率测量的方案，2015年实现了国内光钟首次为国际秒的次级表示原子跃迁频率定值做出贡献。

计量院的铯光钟后续又进行了进一步的改进，通过采用30 cm长ULE参考腔提升超稳激光的性能，通过设计多通道高精度温度测量系统精密评估黑体辐射频移。2021年把铯光钟的系统频移不确定度提升到了 2.9×10^{-17} ^[88]，并通过卫星链路连接国际时间频率公报中的国际基准和次级频率标准而溯源到现行秒定义，对铯光钟的绝对频率进行了不确定度 3.1×10^{-16} 的测量，在2022年，设计的第二套铯光钟的

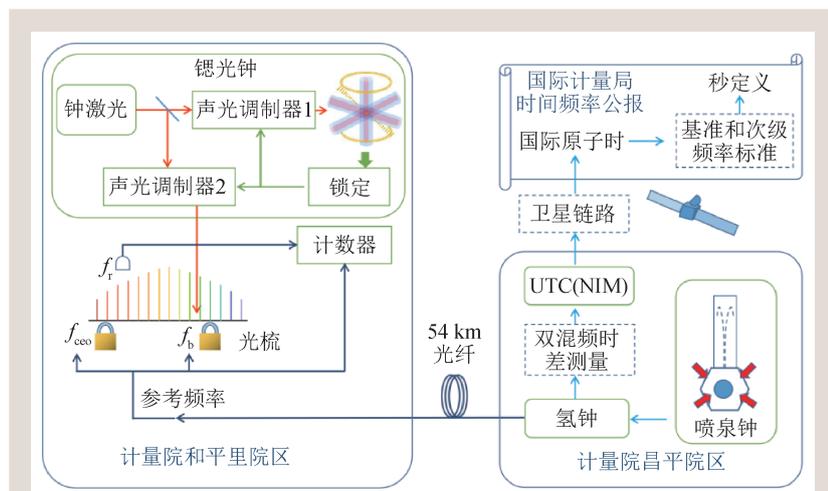


图2 铯光钟绝对频率溯源链路示意图

系统频移不确定度进一步提升到了 7.2×10^{-18} [87]。

计量院的锶光钟绝对频率溯源链路如图2所示。计量院目前已经建立了光钟绝对频率测量开放共享平台,能够溯源到本地铯原子喷泉钟,或者通过卫星链路进行远程溯源,为国内光钟开展绝对频率溯源服务。

国内其他研究组也在冷原子高准确度光钟研究方面取得了令人鼓舞的进展。华东师范大学开展了镱原子光晶格钟的研究[95, 117–120],2021年,实现了镱原子光晶格钟系统频移不确定度评估,不确定度达到了 1.3×10^{-16} ,并且与计量院合作进行了基于卫星链路的远程绝对频率溯源,测量不确定度达到了 7.3×10^{-16} ,数据被CCTF采纳[96]。至此,国内已经有3个实验室的3种光钟通过计量院的绝对频率溯源能力进行了绝对频率测量,测量结果全部为秒的次级表示跃迁频率定值做出贡献。

2022年,中科院精密测量院的另一台可搬运钙离子光钟在计量院实现了通过卫星链路的绝对频率测量[106],测量不确定度为 5.3×10^{-16} 。2023年,中国科学院国家授时中心的锶原子光晶格钟进行了系统频移评定,总不确定度达到 5.1×10^{-17} ,通过卫星链路进行了绝对频率溯源,测量不确定度达到了 4.1×10^{-16} [89]。

中科院精密测量院研制了铝离子量子逻辑光钟,采用钙离子作为协同冷却离子[121, 122],实现了量子逻辑探测[123]。在2022年,建成了系统频移不确定度达到 7.9×10^{-18} 的铝离子光钟[93]。

华中科技大学的铝离子光钟研究取得了非常可喜的进展[124–127]。中科院精密测量院研制的镱原子光晶格钟实现了闭环锁定[42],通过两台光钟比对得到了光钟的稳定度为 $4.6 \times 10^{-16} / \sqrt{\tau}$ [94]。中国科学技术大学虽然比较晚才开展锶原子光晶格钟的研究,但是取得了非常快速的进展[128]。

计量院[129]、中科院精密测量院、清华大学和北京无线电计量测试研究所还开展了镱离子光钟的研究,中国科学院上海光学精密机械研究所开展了汞原子光晶格钟的研究[130],国防科技大学开展了汞离子光钟的研究[131, 132],多个研究组都取得了显著的进展。

5 总结与展望

我国高准确度光钟及其绝对频率测量研究起步时间上落后于国际同行,相关的实验基础薄弱,但是在过去的十年里取得了非常显著的进展。目前已经有中科院精密测量院的钙离子光钟和铝离子光钟、计量院的锶原子光晶格钟三台光钟的系统频移不确定度达到了 10^{-18} 量级。在光钟绝对频率测量方面,计量院与中科院精密测量院、华东师范大学合作,利用计量院的本地铯原子喷泉钟和连接国际原子时的卫星链路,对计量院的锶原子光晶格钟、中科院精密测量院的钙离子光钟和华东师范大学的镱原子光晶格钟进行了绝对频率测量,测量结果被CCTF采纳,为国际秒的次级表示三种光频跃迁频率定值做出了贡献。中国科学院国家授时中心也通过卫星链路实现了对锶原子光晶格钟绝对频率的测量。新近钙离子光钟的绝对频率测量结果,支持了钙离子光钟跃迁被CCTF选为秒的次级表示跃迁频率,这是由我国光钟绝对频率测量数据主导支撑的秒的次级表示光频跃迁。我国光钟研究逐步在国际光钟研究领域产生影响。

目前,CCTF已经制定了秒定义变更的路线图[133],并且提出了秒定义变更之前必须实现的里程碑条件。这些条件对光钟的系统频移不确定度、光钟绝对频率测量不确定度以及光钟比值测量不确定度等提出了明确的指标要求。我们需要看到,我国的光钟研究虽然有了长足的进步,为了能够在不久的将来基于光频跃迁秒的重新定义中作出中国贡献,仍然需要努力攻关。

(1)开展系统频移不确定度优于 2×10^{-18} 的光钟研究

国内很多研究组完成了第一步的量子参考制备、闭环锁定或者初步系统频移不确定度评估,光钟整体性能距离国外最先进的研究组还有半个到一个量级的差距,虽然已经把差距大大缩小,但仍需要更进一步提升研究水平。

要进一步推进理论与实验结合,才能使我国光钟实现跟国际先进研究组并跑甚至领跑。国内

光钟相关的理论研究,已经为光钟研究提供了指导,产生了具有特色的研究成果^[127, 134-138]。随着光钟实验组能力的提升,未来需要更加重视理论组与实验组的紧密合作。

与国际上一个国家通常只有一两家单位研究光钟的情况不同,我国开展光钟研究的单位和研究组数量是比较多的,充分表明国家对这个研究方向非常重视。但是建议进行宏观层面的协调与规划,有助于我国光钟研究的稳定和健康发展。

(2)开展优于 5×10^{-18} 的光钟频率比值测量研究

前期,国内光钟研究的重点放在了光钟系统频移不确定度指标的提升上,为推动 CCTF 启动秒的重新定义工作做出了贡献。目前, CCTF 还没有确定采用哪种方案来重新定义秒,但可以肯定的是,能够真正对新秒定义定值起作用的量值,是光钟的绝对频率测量值和不同种光钟的比值测量值。尤其是不同种光钟的比值测量,能够超越现有铯原子喷泉钟不确定度的限制,得到更高准确度的比对测量结果,对新秒定义的定值起到关键作用。根据 CCTF 正在讨论的路线图,秒重新定义时间在 2030 年的可能性较大,我国需要尽快

在光钟比值测量方面进行规划和研究,争取为新秒定义的定值做出实质贡献。

在未来,我国高准确度光钟研究还需要进一步提升光钟的可靠性,同时开展光钟在相对论大地测量、原子时标驾驭等方面的应用,发挥光钟在科学探索和精密测量中的作用。目前已经有研究组开展基于低温技术的超稳腔研究,有望进一步提升光钟的稳定度^[139, 140];有一些组还开展了多离子光钟、高离化态离子光钟、核光钟的研究等^[141],在进一步提升光钟不确定度指标方面,有可能会做出一些具有特色的成果;国内也开展了可搬运光钟的研究^[142, 81, 143-145],提升了光钟的可靠性和移动能力,为大地测量和光钟驾驭时标的研究提供准确的频率参考。另外,我国还将进一步开展空间光钟和星载光钟的研究^[146],同时研究相关的自由空间精密光学频率比对技术^[147, 148],未来光钟有潜力为更广阔的应用提供支持。

致谢 感谢高克林老师对本文的细心指导和修改;感谢国内各个光钟研究组提供丰富的研究成果和深有启发的讨论。谨以此文纪念李天初院士。

参考文献

- [1] 泰瑞·奎恩 著,张玉宽 主译. 从实物到原子——国际计量局与终极计量标准的探寻. 北京:中国质检出版社,2015. p.219
- [2] Resolution 9 of 11th CGPM, <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/11-1960/resolution-9>
- [3] Lombardi M A. Journal of Research of NIST, 2017, 122: 29
- [4] Ramsey N F. Metrologia, 2005, 42: S1
- [5] 李天初. 计量学报, 2006, 27: 6
- [6] Lombardi M A. IEEE Instrumentation Measurement Magazine, 2012, 15: 47
- [7] Berkeland D J *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80: 2089
- [8] Riehle F *et al.* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48: 613
- [9] 计量学名词审定委员会. 计量学名词. 北京:科学出版社, 2016. pp.152—160
- [10] Hall J. Frequency-stabilized Lasers: a Driving Force for New Spectroscopies. North Holland, Amsterdam, 1994
- [11] 臧二军,曹建平,李焯等. 中国激光, 2007, 34(2): 203
- [12] Ye J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2001, 87: 270801
- [13] Cheng F H *et al.* Chin. Phys. B, 2021, 30: 50603
- [14] Doringshoff K *et al.* 2010, DOI: 10.1109/EFTF.2010.6533715
- [15] Perrella C *et al.* Phys. Rev. Applied, 2019, 12: 054063
- [16] Chen J, Chen X. 2005, DOI: 10.1109/FREQ.2005.1574003
- [17] Chen J. Chinese Science Bulletin, 2009, 54: 348
- [18] Shi T *et al.* Review of Scientific Instruments, 2018, 89: 043102
- [19] Shi T *et al.* Front. Phys., 2022, 10: 967255
- [20] Zhang J *et al.* AAPPS Bull., 2023, 33: 10
- [21] Olson J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123(7): 073202
- [22] Zhang X *et al.* A Transportable Calcium Atomic Beam Optical Clock. 2016, DOI: 10.1109/FCS.2016.7563535
- [23] Dehmelt H G. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1982, IM-31: 83
- [24] Brewer S M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2019, 123: 033201
- [25] Zhang Z Q *et al.* Science Advances, 2023, 9: eadg1971
- [26] Hayasaka K. Extension of the Ion Optical Clock to Multi-Ion Systems. 2019, DOI: 10.1109/CLEOE-EQEC.2019.8871750
- [27] Kaewuam R *et al.* Progress on Multi-ion Optical Clock with $^{176}\text{Lu}^+$. In: DAMOP19 Meeting of The American Physical Society, 2019
- [28] Reens D *et al.* A Multi-Ion Photonic Integrated Optical Clock. In: DAMOP20 Meeting of the American Physical Society, 2020
- [29] Katori H *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 91: 173005
- [30] Ye J *et al.* Science, 2008, 320: 1734

- [31] Oelker E *et al.* Nat. Photonics, 2019, 13: 714
- [32] Ma L S *et al.* Opt. Lett., 1994, 19: 1777
- [33] Ye J *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 2003, 20: 1459
- [34] Droste S *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 110801
- [35] Schioppo M *et al.* Nat. Commun., 2022, 13: 1
- [36] Schibli T R *et al.* Nat. Photon., 2008, 2: 355
- [37] Inaba H *et al.* Opt. Express, 2013, 21: 7891
- [38] Stenger J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2002, 88: 073601
- [39] Telle H R *et al.* Appl. Phys. B, 2002, 74: 1
- [40] Yao Y *et al.* Nat. Sci. Rev., 2016, 3: 463
- [41] Jiang Y Y *et al.* Nature Photonics, 2011, 5: 158
- [42] Liu H *et al.* Chin. Phys. Lett., 2017, 34: 20601
- [43] Nicholson T L *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 109: 230801
- [44] Lin Y G *et al.* Chin. Phys. Lett., 2015, 32: 090601
- [45] Marti G E *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 103201
- [46] Bothwell T *et al.* Nature, 2022, 602: 420
- [47] Walls F L *et al.* New Possibilities for Frequency Standards Using Laser Cooling and Detection of Stored Ions. 1978, DOI: 10.1109/FREQ.1978.200274
- [48] Drever R W P *et al.* Applied Physics B: Lasers and Optics, 1983, 31: 97
- [49] Hall J L *et al.* J. Opt. Soc. Am. B, 1989, 6: 2194
- [50] Reichert J *et al.* Opt. Commun., 1999, 172: 59
- [51] Diddams S A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2000, 84: 5102
- [52] Diddams S A *et al.* Science, 2001, 293: 825
- [53] Chou C W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2010, 104: 070802
- [54] Nicholson T L *et al.* Nat. Commun., 2015, 6: 6896
- [55] Bothwell T *et al.* Metrologia, 2019, 56: 065004
- [56] Bishof M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2011, 106: 250801
- [57] Derevianko A, Pospelov M. Nature Physics, 2014, 10: 933
- [58] Arvanitaki A *et al.* Phys. Rev. D, 2015, 91: 015015
- [59] Young B C *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 3799
- [60] Black E D. Am. J. Phys., 2001, 69: 79
- [61] Fox R W *et al.* Experimental Methods in the Physical Sciences, 2003, 40: 1
- [62] Wang Y J, Fan Z X. Laser Physics, 2003, 13: 1166
- [63] Harry G M *et al.* Classical and Quantum Gravity, 2002, 19: 897
- [64] Numata K *et al.* Phys. Rev. Lett., 2004, 93: 250602
- [65] Chen L *et al.* Phys. Rev. A, 2006, 74: 053801
- [66] Tao Y *et al.* Chin. Phys., 2007, 16: 1374
- [67] Luo Y *et al.* Design of an Optical Reference Cavity with Flexible Thermal Expansion Tuning Properties. 2012, DOI: 10.1109/EFTF.2012.6502363
- [68] Zhang J *et al.* Eur. Phys. J. D, 2013, 67: 46
- [69] Jiang Y Y *et al.* Chin. Phys. B, 2008, 17: 2152
- [70] Guan H *et al.* Opt. Commun., 2011, 284: 217
- [71] Luo Y *et al.* Progress Report on Development of Ultrastable Lasers for $^{27}\text{Al}^+$ Optical Clock. 2013, DOI: 10.1109/EFTF-IFC.2013.6702145
- [72] Li Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2014, 31: 024207
- [73] Bian W *et al.* Review of Scientific Instruments, 2016, 87: 063121
- [74] Shang J *et al.* Opt. Commun., 2017, 382: 410
- [75] Liu H *et al.* Chin. Phys. B, 2018, 27: 053201
- [76] 李婷等. 物理学报, 2021, 70(7): 073701
- [77] Wang Z *et al.* Opt. Express, 2021, 29: 30567
- [78] Legero T *et al.* JOSA B, 2010, 27: 914
- [79] Li Y *et al.* Chin. Opt. Lett., 2018, 16: 051402
- [80] Jin L *et al.* Opt. Express, 2018, 26: 18699
- [81] 陶斌凯, 陈群峰. 量子电子学报, 2019, 36: 299
- [82] Cole G D *et al.* Nature Photonics, 2013, 7: 644
- [83] Cole G D *et al.* Optica, 2016, 3: 647
- [84] Kessler T *et al.* Nat. Photon., 2012, 6: 687
- [85] Matei D G *et al.* Phys. Rev. Lett., 2017, 118: 263202
- [86] Robinson J M *et al.* Optica, 2019, 6: 240
- [87] Lu B K *et al.* Chin. Phys. Lett., 2022, 39: 080601
- [88] Lin Y *et al.* Metrologia, 2021, 58: 035010
- [89] Lu X *et al.* Metrologia, 2023, 60: 015008
- [90] Guan H *et al.* AVS Quantum Science, 2021, 3(4): 044701
- [91] Huang Y *et al.* Phys. Rev. Appl., 2022, 17: 034041
- [92] Zhang H *et al.* Metrologia, 2023, 60: 035004
- [93] Cui K *et al.* Eur. Phys. J. D, 2022, 76: 140
- [94] Zhang A *et al.* Metrologia, 2022, 59: 065009
- [95] Gao Q *et al.* Scientific Reports, 2018, 8: 8022
- [96] Luo L *et al.* Metrologia, 2020, 57: 065017
- [97] Shu H L *et al.* Chin. Phys. Lett., 2005, 22: 1641
- [98] Wu L J *et al.* Chin. Phys. Lett., 2006, 23: 83
- [99] Margolis H S *et al.* Science, 2004, 306: 1355
- [100] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2011, 84: 053841
- [101] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2012, 85: 030503
- [102] Cao J *et al.* Chin. Phys. Lett., 2014, 31: 043701
- [103] Huang Y *et al.* Phys. Rev. Lett., 2016, 116: 013001
- [104] Zhang P *et al.* Metrologia, 2021, 58: 035001
- [105] Huang Y *et al.* Phys. Rev. A, 2020, 102: 050802
- [106] Cao J *et al.* Appl. Phys. Lett., 2022, 120: 054003
- [107] BIPM-standard frequencies. <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/standard-frequencies-second>. accessed Jun. 15, 2023
- [108] Wang S K *et al.* Design and Construction of Zeeman Slower for ^{87}Sr Optical Clock at NIM. 2008, DOI: 10.1109/CPPEM.2008.4574780
- [109] Wang S *et al.* Chin. Phys. Lett., 2009, 26: 093202
- [110] Katori H *et al.* Phys. Rev. Lett., 1999, 82: 1116
- [111] Mukaiyama T *et al.* Phys. Rev. Lett., 2003, 90: 113002
- [112] Li Y *et al.* Applied Physics B: Lasers and Optics, 2004, 78: 315
- [113] Li Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2010, 27: 074208
- [114] Wang Q *et al.* Chin. Phys. Lett., 2011, 28: 033201
- [115] Lin Y G *et al.* Chin. Phys. Lett., 2013, 30: 014206
- [116] Wang Q *et al.* Chin. Phys. Lett., 2014, 31: 123201
- [117] Wang W L, Xu X Y. Chin. Phys. B, 2010, 19: 123202

- [118] Zhou M, Xu X Y. *Chin. Phys. B*, 2014, 23:013202
- [119] Chen N, Xu X. *Laser. Phys. Lett.*, 2015, 12:015501
- [120] Xu Y L, Xu X Y. *Chin. Phys. B*, 2016, 25: 103202
- [121] Shang J J *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2016, 33: 103701
- [122] Cui K *et al.* *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 2018, 51:045502
- [123] Chao S J *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2019, 36: 120601
- [124] Xu Z *et al.* Towards an $^{27}\text{Al}^+$ Ions Optical Clock. 2014, DOI: 10.1109/EFTF.2014.7331525
- [125] Liu K *et al.* *Sci. Sin.-Phys. Mech. Astron.*, 2016, 46:073004
- [126] Zhang J *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2017, 34: 050601
- [127] Zhang T *et al.* *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 266: 107562
- [128] 李杰. 10^{-18} 量级稳定性和不确定度的锶光晶格钟的实验研究. 中国科学技术大学博士论文, 2023
- [129] Zuo Y *et al.* Towards a High-Performance Optical Clock Based on Single 171-Yb Ion. 2021, DOI: 10.1109/OGC52961.2021.9654373
- [130] Fu X H *et al.* *Chin. Opt. Lett.*, 2018, 16:060202
- [131] 张祥, 卢本全, 李冀光 等. *物理学报*, 2019, 68:043101
- [132] 刘李辉, 邹宏新, 刘曲 等. *物理学报*, 2012, 61: 103101
- [133] Riehle F. *Comptes Rendus Physique*, 2015, 16: 506
- [134] Yu Y, Sahoo B K. *Phys. Rev. A*, 2018, 97:041403
- [135] Yu Y, Sahoo B K. *Phys. Rev. A*, 2019, 99:022513
- [136] Liang S Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 2021, 103:022804
- [137] Yin M J *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2021, 38:073201
- [138] Lu X T *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 127:033601
- [139] He L *et al.* *Opt. Lett.*, 2023, 48: 2519
- [140] Wang W W *et al.* *Frontiers in Physics*, 2023, 11, DOI: 10.3389/fphy.2023.1176783
- [141] Yu Y *et al.* 2021, arXiv:2107.10520
- [142] Cao J *et al.* *Appl. Phys. B*, 2017, 123(4): 112
- [143] Huang Y *et al.* *Phys. Rev. A*, 2020, 102:050802
- [144] Cao J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120:054003
- [145] 孔德欢 等. *物理学报*, 2021, 70(3):030601
- [146] Guo F *et al.* *AIP Advances*, 2021, 11: 125116
- [147] Shen Q *et al.* *Optica*, 2021, 8:471
- [148] Shen Q *et al.* *Nature*, 2022, 610:661



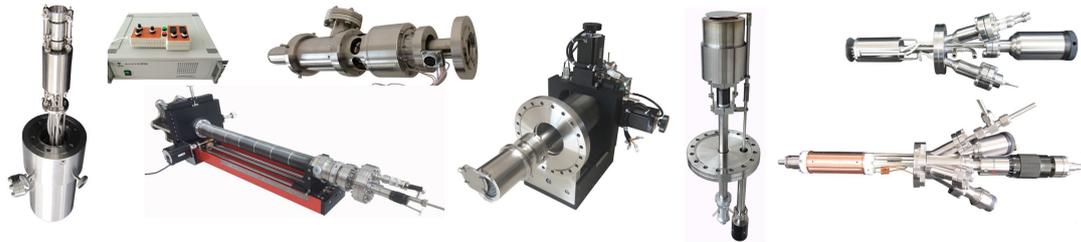
大连齐维科技发展有限公司

地址: 大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氦离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

