

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311930

NIM-Sr2 锶原子光晶格钟物理系统研究*

卢炳坤^{1,2,3}, 廖堂银^{1,2,3}, 杨涛^{1,3}, 林戈戈^{1,3}, 方占军^{1,3}

(1. 中国计量科学研究院时间频率计量科学研究所 北京 100029; 2. 清华大学精密仪器系 北京 100084;
3. 国家市场监督管理总局重点实验室(时间频率与重力计量基准) 北京 100029)

摘要: 锶原子光晶格钟在基础物理研究和时间频率精密测量领域中占有重要的地位。中国计量科学研究院在第1套锶原子光晶格钟 NIM-Sr1 的基础上,开展了进一步提升光钟性能的研究,研制出了第2套锶原子光晶格钟 NIM-Sr2。NIM-Sr2 的物理系统在量子参考体系制备、钟激光探寻及系统频移评估等方面进行了重新设计。在原子炉和磁光阱之间新增真空差分结构,使原子炉的运行对磁光阱区域真空压力的影响降低到 1×10^{-8} Pa;将塞曼减速器中的通电线圈替换为永磁铁,优化了水冷反亥姆霍兹线圈的缠绕方式,并向外延伸塞曼减速器通光窗口,把磁光阱区域环境温度的不均匀性降低到了 0.166 K。系统频移评估表明,这些物理系统的改进显著减小了 NIM-Sr2 的系统频移不确定度,达到了 7.2×10^{-18} 。

关键词: 光钟;光晶格;系统频移评估;物理系统

中图分类号: O562.3 TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 140.6020 410.55

Design of the physics apparatus unit of NIM-Sr2 strontium optical lattice clock

Lu Bingkun^{1,2,3}, Liao Tangyin^{1,2,3}, Yang Tao^{1,3}, Lin Yige^{1,3}, Fang Zhanjun^{1,3}

(1. Division of Time and Frequency Metrology, 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)

Abstract: Strontium optical lattice clock plays a key role in fundamental physics research and precision measurement of time and frequency. Based on the research of its first strontium optical clock, NIM-Sr1, the National Institute of Metrology (NIM) has conducted in-depth study to enhance the performance of its optical clocks, designed and built the second strontium optical lattice clock, NIM-Sr2. Benefited from the experiences gained in the quantum reference preparation, clock transition interrogation and systematic frequency shift evaluation of NIM-Sr1, the physics apparatus of NIM-Sr2 is redesigned and improved. A vacuum differential pumping stage is added between the atomic oven and the magneto-optical trap (MOT) chamber, which reduces the MOT chamber pressure variation to 1×10^{-8} Pa when the oven is switched between on and off. By replacing the coils in Zeeman slower with permanent magnets, optimizing the winding of the water-cooled anti-Helmholtz coils, and extending the viewport for Zeeman slowing laser beam, the inhomogeneity of the ambient temperature in the MOT region is reduced to 0.166 K. The frequency evaluation revealed that these improvements significantly reduced the systematic shift uncertainty of NIM-Sr2 to 7.2×10^{-18} .

Keywords: optical clocks; optical lattice; systematic frequency shift evaluation; physics apparatus

0 引言

基于光学频率跃迁的光钟在全球导航定位^[1]、大地测量^[2]、引力波探测^[3]、物理定律测试^[4]等领域具有广阔

的应用前景。除了起步研究相对较早的离子光钟外, Katori 研究小组提出了中性原子的光晶格囚禁方案,推动了光晶格钟的发展^[5]。美国国家标准与技术研究院 (National Institute of Standards and Technology, NIST) 的¹⁷¹Yb 原子光晶格钟的系统频移不确定度在 2018 年已

经达到 1.4×10^{-18} ^[2],是所有已知光晶格钟里不确定度最小的。目前共有 10 个光频跃迁被国际计量委员会 (International Committee of Weights and Measures, CIPM) 定义为秒的次级表示,且预计 2030 年光频跃迁有望正式作为秒定义^[6]。其中,⁸⁷Sr 原子的 $^1S_0 - ^3P_0$ 跃迁自然线宽仅有 1 mHz,该跃迁频率绝对值经多个实验室独立测量一致性最好^[6]。国内外多个机构都对基于⁸⁷Sr 原子的光晶格钟(下称锶光钟)进行了深入的研究^[7-12],日本理化学研究所 (Institute of Physical and Chemical Research, RIKEN) 和美国实验天体物理联合研究所 (Joint Institute of Laboratory Astrophysics, JILA) 的锶光钟系统不确定度分别达到了 3.5×10^{-18} ^[13] 和 2.0×10^{-18} ^[14],处于领先地位。

中国计量科学研究院(下称计量院)于 2006 年开始了锶光钟的预研,陆续实现了锶原子的一级冷却^[15]、二级冷却^[16]、光晶格装载^[17]、钟跃迁谱线探测^[18]和闭环锁定等,于 2015 年完成了计量院第 1 套锶光钟 NIM-Sr1 的首次系统频移不确定度评估^[19],自比对稳定度 $6.6 \times 10^{-15} / \sqrt{\tau}$,系统总不确定度为 2.3×10^{-16} ,并溯源到铯原子喷泉钟进行了绝对频率测量,测量不确定度为 3.4×10^{-15} ,该结果被国际时间频率咨询委员会 (Consultative Committee for Time and Frequency, CCTF) 采纳作为⁸⁷Sr 原子跃迁推荐值计算的源数据。2021 年,经过改进后^[20],NIM-Sr1 的系统频移不确定度提升到 2.9×10^{-17} ,绝对频率测量不确定度提升到 3.1×10^{-16} ^[21]。2017 年起,针对 NIM-Sr1 系统频移评估过程发现黑体辐射和碰撞频移对系统不确定度贡献较大,在物理系统的设计上进行改进,计量院在昌平院区进行第 2 套锶光钟 NIM-Sr2 的研制,并于 2022 年进行评估,系统频移不确定度达到 7.2×10^{-18} ^[22]。本文将详细介绍 NIM-Sr2 的物理系统,并探讨改进后的系统在系统频移不确定度评估中起到的积极作用。

1 物理系统设计考虑因素

1.1 原子制备流程和钟探寻过程

量子参考系统的设计需要依据量子参考制备的流程,由所需要的光、电、磁等因素来决定。锶的原子序数为 38,是一种碱土金属,最外层为 2 个电子。相比铯原子⁸⁸Sr,费米子⁸⁷Sr 不需要较强的磁场即可实现窄跃迁激发^[17],适合作为光钟的量子参考。在量子参考体系制备中涉及的能级结构如图 1 所示,主要经过的流程如图 2 所示。固态锶金属经加热后产生热原子蒸汽,此时原子速度较快,需要进行塞曼减速后才可以被磁光阱 (magneto-optical trap, MOT) 捕获。塞曼减速和一级 MOT 采用的是 $^1S_0 - ^1P_1$ 跃迁。该跃迁波长为 461 nm,线宽约

32 MHz,可以快速冷却原子至 mk 量级^[15]。在冷却过程中,部分处于 1P_1 激发态上的原子会经自发辐射而逐步跃迁至 3P_2 能级上,该能级寿命较长,原子会在该能级上滞留,离开冷却循环,造成冷却效率下降^[23]。因此通过引入 679 和 707 nm 的重泵光将原子泵回冷却循环,提高冷却效率。由于 $^1S_0 - ^1P_1$ 跃迁谱线的多普勒冷却极限温度仍然较高,因此需要对锶原子进行二级冷却^[24]。 $^1S_0 - ^3P_1$ 跃迁波长为 689 nm,线宽约 7.5 kHz,可以进一步将原子冷却至 μ k 量级。两级冷却后,通过引入光晶格把原子囚禁在 Lamb-Dicke 区,消除原子的热运动和钟跃迁探测时的反冲效应^[25]。由于 1S_0 与 3P_0 能级在磁场下会产生塞曼分裂,因此需要对原子所处环境的磁场进行补偿。同时,为消除一阶塞曼频移,以及提高原子的利用率,在钟正常运行时需要交替锁定 $\pm 9/2$ 两个塞曼子能级跃迁^[26],如图 3 所示。所以,需要对原子进行极化,即一方面添加偏置磁场,另一方面需要右旋或左旋圆偏振极化光将原子极化到 $+9/2$ 或 $-9/2$ 塞曼子能级上。为避免囚禁原子数的变化对激发几率带来的影响,一般采用归一化法对原子的激发几率进行计算。使用钟激光将原子激发后,使用 461 nm 探测光探测留在基态剩余的原子并将这些原子推出晶格,同时使用光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 收集荧光,计算基态原子数;开启重泵光,将激发态原子泵浦回基态,再次使用探测光探测此时的基态原子,也就是原激发态原子,同时用 PMT 收集荧光计算激发态原子数。在分别得到基态和激发态原子数后,就可以计算归一化的原子激发几率。通过调制钟激光的频率在单一塞曼子能级谱线的两个肩膀上分别得到两个跃迁几率,就能够计算钟激光相对于这个塞曼谱线的频率误差信号,实现钟激光锁定到一个塞曼分量。量子参考体系制备流程与钟探寻过程的部分光和磁场的时序图如图 4 所示。每当进行一次探测后,需要重新制备新的原子。因此,每个能级的锁定需要循环进行两个周期,而交替锁定塞曼子能级跃迁时需要 4 个周期。

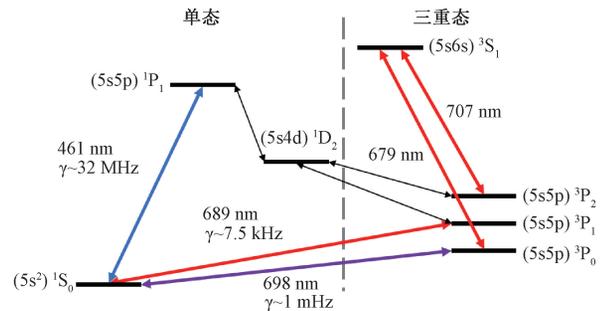


图 1 ⁸⁷Sr 跃迁能级结构

Fig. 1 Partial of the ⁸⁷Sr energy level

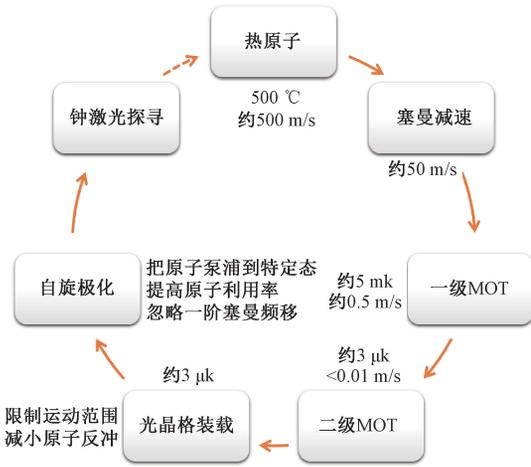


图 2 量子参考体系制备与钟跃迁探测流程

Fig. 2 Process of the preparation of the quantum reference and clock laser interrogation

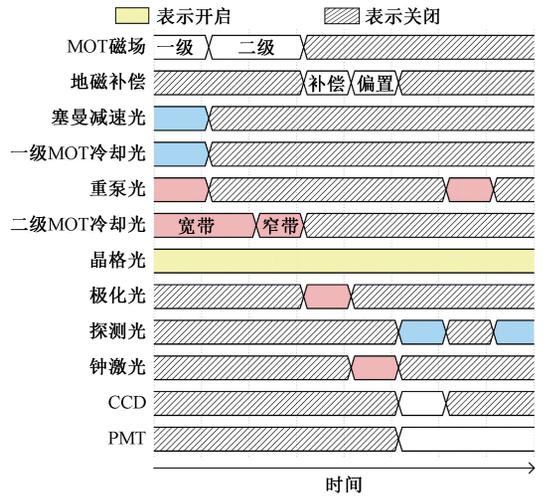
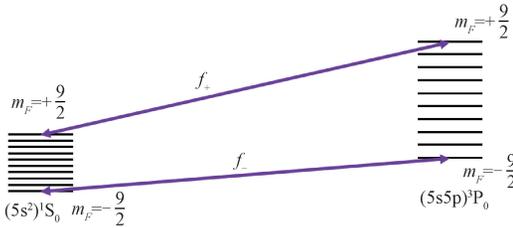
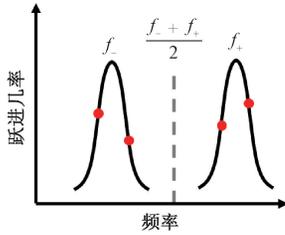


图 4 量子参考体系制备时序图

Fig. 4 Quantum reference preparation timing diagram



(a) 塞曼子能级跃迁示意图
(a) Zeeman sublevel transition schematic



(b) 锁频示意图
(b) Frequency locking schematic

图 3 塞曼子能级跃迁锁频示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Zeeman components locking

1.2 系统频移影响量

物理系统的设计同样需要考虑到该系统对未来光钟的系统频移评估的影响。NIM-Sr1 的最新一次评估结果如表 1 所示, 表格内的单位均为 10^{-17} [21]。明显看到, 对 NIM-Sr1 系统评估不确定度影响较大的有黑体辐射、晶格光斯塔克(表中分为 3 项)、碰撞频移、二阶塞曼、背景气体碰撞等。其中, 晶格光斯塔克频移、碰撞频移、二阶塞曼频移这几项的不确定度主要与晶格势阱深度和频率、原子密度、磁场大小等因素有关[14, 27], 在设计时虽然要合理考虑光束参数、磁场补偿线圈等, 但与物理系统的设计没有直接关联。

表 1 NIM-Sr1 最近一次评估结果

Table 1 Latest evaluation results of NIM-Sr1

频移项	修正 ($\times 10^{-17}$)	不确定度 ($\times 10^{-17}$)
MOT 腔黑体辐射	496.1	1.6
原子炉和塞曼窗口黑体辐射	1.1	0.4
晶格标量/张量	2.5	1.3
晶格超极化	-2.7	1.1
晶格 M1/E2	0	0.6
碰撞	9.2	1.4
二阶塞曼	20.4	0.3
背景气体碰撞	2.1	0.3
直流斯塔克	2.1	<0.1
探测光交流斯塔克	0	<0.1
伺服误差	0	<0.1
隧穿	0	<0.1
总计	530.8	2.9

对锶原子光晶格钟系统, 原子感受到的黑体辐射主要包括 MOT 腔体、加热的原子炉以及塞曼减速器通光的加热窗口, 其中 MOT 腔体的温度不均匀性主要来自于 MOT 反亥姆霍兹线圈和塞曼减速器磁场线圈的加热。熔融石英窗片对红外波段具有良好的不透过性, 周围环境透过窗片对原子造成的直接黑体辐射频移可以忽略[28]。原子周围环境的热辐射对锶原子钟黑体辐射频移可以表示为[29]:

$$\Delta\nu(T) = \Delta\nu_{\text{stat}} \left(\frac{T}{T_0}\right)^4 + \Delta\nu_{\text{dyn}} \left[\left(\frac{T}{T_0}\right)^6 + \mathcal{O}\left(\frac{T}{T_0}\right)^8 \right] \quad (1)$$

其中, $\Delta\nu_{\text{stat}} = -2.13023(6) \text{ Hz}^{[29]}$ 与 $\Delta\nu_{\text{dyn}} = -148.7(7) \text{ mHz}^{[30]}$ 分别表示静态和动态频移系数, T_0 表示参考温度 300 K. T 为原子感受到的等效温度. 对于一个处于稳态下的球形壳中心的原子或原子团, 感受到球壳缝隙外的一个表面造成的黑体辐射与球壳整体的黑体辐射, 小球的等效温度可以表示为^[31]:

$$T^4 = \frac{\Omega T_2^4 + (4\pi - \Omega)\varepsilon T_1^4}{\Omega + (4\pi - \Omega)\varepsilon} \quad (2)$$

其中, T 为有效温度, Ω 为缝隙外辐射表面对原子的立体角, T_2 为球壳缝隙外辐射表面的温度, T_1 为球壳温度, ε 为球壳内表面发射率. 上式可以看成是 T_1 和 T_2 的加权平均, 缝隙外辐射表面对原子的有效立体角可以表示为:

$$\Omega_{\text{eff}} = \frac{4\pi\Omega}{\Omega + (4\pi - \Omega)\varepsilon} \quad (3)$$

从公式(1)~(3)可以看出, 球壳和发热物体的温度越均匀, 即温度的不确定度越小, 最终等效温度的不确定度就越小; 不确定度较大的发热物体距离原子越远, 所占的立体角就越小, 其温度的不确定度在有效温度的占比就越小. 对于物理系统的设计来说, 一方面要让加热的原子炉以及塞曼减速加热窗口应该尽可能地远离原子, 另一方面要减小 MOT 腔体的温度不均匀性, 即对发热的反亥姆霍兹线圈和塞曼减速器磁场线圈进行控制. 真空系统中的热背景气体(主要是氢气)与铯原子碰撞会产生背景气体碰撞频移, 与系统真空度相关^[32]. 为了减小该项系统频移, 应该对物理系统尤其是 MOT 腔体处的真空程度进行优化.

2 NIM-Sr2 物理系统

铯原子光晶格钟大致可以分为激光光学系统、真空物理系统、超稳本地振荡器系统等. 此外, 一些光钟为了向外界输出频率或进行其它应用, 还具有频率转换及光纤传递系统. 其中, 对于铯原子光晶格钟系统不确定度评定影响较大部分的主要位于真空物理系统. 基于图 2 所示的量子参考体系制备主要流程, 在 NIM-Sr1 的基础上, 对 NIM-Sr2 进行设计, 来提高系统频移不确定度指标. NIM-Sr2 真空物理系统如图 5 所示, 其中二维准直结构和 MOT 腔体分别连接一个抽速为 55 L/s 的离子泵 (VacIon Plus 55, Agilent), 差分真空结构连接一个抽速为 20 L/s 的离子泵 (VacIon Plus 20, Agilent) 共 3 个离子泵维持该物理系统的真空.

铯是一种碱土金属, 位于元素周期表第五周期第 II A 族, 熔点约为 770°C, 常温下是固体金属. 为了在短时间内囚禁到足够数量的铯原子, 需要获得足够的铯蒸汽压^[33], 一般需要利用原子炉对铯固体加热至约

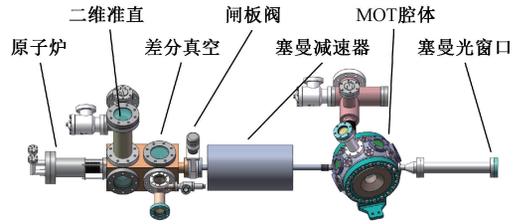


图 5 NIM-Sr2 真空物理系统结构图

Fig. 5 Structure of NIM-Sr2 vacuum system

500°C^[34]. 原子炉主要由不锈钢制成, 其剖面结构如图 6 所示. 封装电极向外连接原子炉温度控制器, 向内连接加热丝与两个热电偶, 两个热电偶固定在加热器上, 分别用于环内温控与环外监测. 加热器由加热丝穿套绝缘陶瓷后紧密缠绕在加热套上, 对处于原子储存室内的铯固体进行加热. 加热器外共有 3 层隔热层, 主要目的是提高温度均匀性, 防止有原子堆积在炉口, 堵住喷嘴, 另一方面减少热量向外流失, 提高加热效率, 同时还可以避免原子炉表面温度过高, 对实验室温度产生的影响, 以及避免人员烫伤等风险. 喷嘴由长 6.4 mm, 通孔直径为 100 μm 的毛细管阵列组成, 将气态原子转化为原子束并朝指定方向喷出. 波纹管一端连接原子炉, 另一端连接二维准直器. 通过调节波纹管, 可以确保原子束流与后续结构对准.

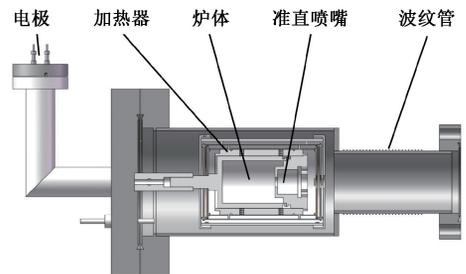


图 6 NIM-Sr2 原子炉剖面结构

Fig. 6 Profile of NIM-Sr2 oven

即便经过原子炉喷嘴初步准直, 热铯原子蒸汽的横向运动速度仍然较大. 为了提高原子利用率, 原子在从原子炉出射后首先进入二维准直结构. 二维准直结构在与原子运动方向垂直的两个方向上有两对熔融石英窗片, 通过两对对射的准直光对原子束进行横向冷却, 降低热铯原子的横向运动速度, 压窄原子束的发散角, 可以提高最终达到磁光阱的原子数量. 由于原子炉内温度较高, 会导致二维准直结构及其后续结构的真空度变差. 因此, 与 NIM-Sr1 物理系统具有显著不同的是, 为了更好的维持后续结构尤其是 MOT 腔体的真空度, 在二维准直结构后增加了真空差分结构, 内置内径 6 mm 长 90 mm 的真空差分管, 降低二维准直结构与后续结构之间的流

导,从而使后续结构具有更高真空度^[35],如图 7 所示。两个真空计分别用来监测二维准直结构和 MOT 腔体这两部分的真空度,炉子关闭时分别为 2.6×10^{-8} 和 2.0×10^{-7} Pa,打开炉子后稳定到 1.7×10^{-7} 和 2.1×10^{-7} Pa。这表明真空差分管将热原子炉对 MOT 腔体真空度的影响减小到了 1×10^{-8} Pa。为了在探测晶格内原子时减小热铯原子束流对光晶格中原子寿命的影响,在差分真空腔的差分真空管后还增加了通孔直径为 6 mm 的机械快门(XRS6, Uniblitz Shutter Systems),通过时序控制其配套控制器(VCM-D1, Uniblitz Shutter Systems)实现机械快门的开启和关断。值得说明的是,在实际使用过程中我们发现,机械快门具有一定的使用寿命,长时间使用后可能发生形变导致卡顿或产生间歇性故障,然而实验发现机械开关是否启用对系统频移的影响在 10^{-19} 量级以下^[14],因此在后续工作中,机械开关处于固定开启状态。

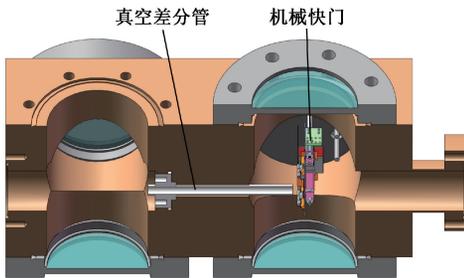


图 7 二维准直与真空差分结构

Fig. 7 Two-dimensional collimation and differential vacuum structure

如图 5 所示,真空系统整体长度约 1.6 m,一旦某一部分如机械开关出现故障或重新装填原子炉中的铯原子时,整个系统的真空都要破坏,这会对日后整个系统尤其是核心区域 MOT 腔体的真空度造成影响,进而影响背景气体碰撞频移与光晶格中原子寿命。因此,真空差分结构后设置了一个闸板阀,把闸板阀前后分为两个独立的真空环境。在钟日常运行时,打开闸板阀;在需要打开一侧的真空环境进行维护时,关闭闸板阀,可以保护另一侧的真空环境。

原子经过闸板阀后进入塞曼减速器。塞曼减速器主要的作用是对速度约为 500 m/s 的热原子进行减速,使得原子的速度减慢到 MOT 的捕获范围内,即低于 50 m/s,另一方面也可以作为二级差分真空管,提高 MOT 腔体的真空度。塞曼减速器对原子的减速需要磁场与激光两部分共同完成,其中磁场一般由线圈缠绕制成^[15]。即便对线圈进行水冷,仍然很难保证发热线圈尤其是与 MOT 相邻部位的热传导不对原子黑体辐射产生影响。为此,设计了永磁体塞曼减速器,如图 8 所示。它的好处

是既没有功耗,不会影响原子的黑体辐射频移,也不会存在水冷系统引起的振动噪声。塞曼减速器由 40 个外径相同但内径不同的环形永磁铁组成,磁场沿纵轴相对于其设计值的最大变化约为 2%,沿径向轴在中心 5 mm 处的波动小于 1%,最终实现了总原子中约 2% 的原子减速到目标速度以下,满足使用要求^[36]。塞曼减速器末端还加入了小线圈以补偿 MOT 腔体中心的磁场梯度。当原子经过塞曼减速器时,需要从另一端发射一束波长为 461 nm 的光,使其与原子运动方向相反,即原子和光子对向而行,对原子进行减速。由于未被 MOT 捕获的原子有可能沿着运动方向附着在塞曼减速光进入真空系统的窗口上进行堆积,因此该窗口一般需要进行加热,避免窗口被镀上一层铯原子而阻挡塞曼减速光的通过^[37]。在 NIM-Sr2 系统中,铠装加热器将窗口温度控制在约 80°C。相比 NIM-Sr1,将该窗口向远离 MOT 腔体的位置向外延伸了 30 cm。这样做一方面可以减少铯原子在窗口上的沉积,另一方面也减小了原子看到该窗口的立体角,从而减小该窗口对 MOT 中心原子的黑体辐射频移。

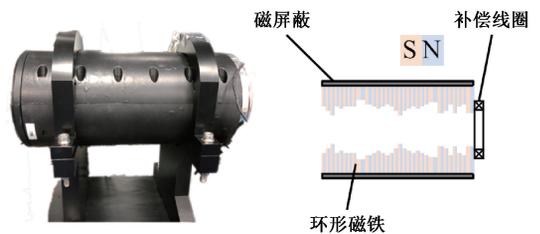


图 8 永磁体塞曼减速器

Fig. 8 Zeeman slower made of permanent magnets

原子经过塞曼减速器后进入 MOT 腔体,在这里完成两级 MOT 冷却、光晶格装载和钟激光探测等过程。由于铯原子光晶格钟采用的是两级 MOT 冷却, MOT 中心的磁场梯度需要根据冷却阶段进行改变,因此反亥姆霍兹线圈无法像塞曼减速器一样用永磁铁进行替代。MOT 主腔体采购自 Kimball Physics 公司,具有 2 个 8 英寸大窗口、8 个 2.75 英寸中窗口以及 16 个 1.33 英寸小窗口。其中,两个对称的 8 英寸大窗口分别放置了不锈钢材质的凹槽法兰,法兰内放置了 MOT 所需要的两对反亥姆霍兹线圈。两级 MOT 理论上共需要 12 个通光窗口,由于外部的笼式结构将 MOT 光路重叠,因此 MOT 只需要 6 个通光窗口即可。两个大窗口中间留出了 MOT 光所需要的通光空间, MOT 光占用了 4 个 2.75 英寸中窗口,其中一个窗口同时用来抽真空。晶格光占用两个中窗口,其中一个窗口与钟激光共用,剩余两个中窗口分别用于 PD 和 PMT 收集荧光信号。探测光、重泵光、塞曼减速器窗口等其它需求均采用 1.33 英寸小窗口。不同于 NIM-Sr1 采用的接近于水平的光晶格^[17], NIM-Sr2 光晶格

的方向与重力方向夹角约为 12° ，晶格之间的重力势能差可以有效地抑制隧穿效应^[14]。

在一级 MOT 冷却过程中, MOT 中心所需要的磁场梯度约为 50 G/cm , 反亥姆霍兹线圈的工作电流约为 50 A 。为了控制 MOT 腔体的温度, 采用外径 5 mm 、内径 3 mm 的空心铜管缠绕制成的反亥姆霍兹线圈, 内通冷却水, 线圈产生的热量可以被流经空心铜管的冷却水带走。空心铜管之间用环氧树脂密封、绝缘和粘合。冷却水通过并联的方式进入供水管和反亥姆霍兹线圈, 两个线圈供水水管长度尽可能相同, 尽可能地确保线圈中冷却水的流量和温度相同。两路冷却水分别安装了一个流量传感器来监测流量。如果冷却器意外故障或冷却能力不足, 系统会发出警报并自动关闭线圈, 避免 MOT 腔体局部温度迅速升高, 威胁真空密封性。为了更好地控制 MOT 腔体的温度, 参考其他实验小组的线圈的缠绕方式^[38], 首先绕制最靠近金属腔壁的一层, 即图 9 所示覆盖红色阴影的铜管, 然后逐层向内绕制。通过这样的方式, 调节冷却水的温度可以快速影响 MOT 腔壁的温度, 达到减小黑体辐射频移不确定度的目的。

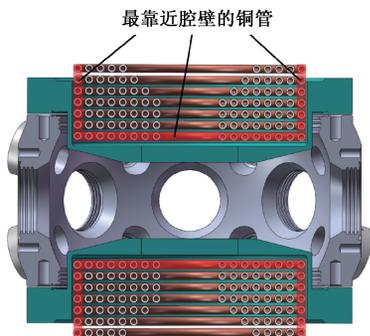


图9 反亥姆霍兹线圈

Fig. 9 Anti-Helmholtz coil

3 系统频移评估

NIM-Sr2 基于上述改进进行了系统频移评估。针对系统频移不确定度贡献较大的 MOT 腔体黑体辐射项, 采用了校准后温度测量不确定度为 7 mK 的铂电阻温度探头对 MOT 腔体的温度进行测量。首先使用热像仪来了解 MOT 腔体的温度梯度, 便于选取温度探头的放置位置。同时需要不断调节和优化反亥姆霍兹线圈中冷却水的温度, 使原子周围的温度梯度尽可能小。如图 10 所示, 综合考虑热源和冷却水的影响后, 将 4 个温度探头安装在线圈附近, 一个温度探头安装在塞曼加热窗口附近, 两个安装在不同的窗口上。所有这些传感器都用导热胶带固定在 MOT 腔上。最后一个温度探头用来监测室温。得益于 Sr2 系统在设计之初对发热的考虑, 安装在 MOT 腔表面的温度探头之间的最大温差测量结果为 0.166 K ,

相比 NIM-Sr1 的 0.54 K 的温度均匀性有显著提升。通过均匀分布统计模型, 得到 0.05 K 的温度不确定度, 由式(1)得到 MOT 腔体黑体辐射频移不确定度相比 NIM-Sr1 的 1.6×10^{-17} 降低到 3.8×10^{-18} , 降低近一个量级。根据 NIM-Sr2 的系统尺寸进行计算, 加热的抛光不锈钢原子炉和塞曼减速石英窗口的立体角分别为 $5.90 \times 10^{-5} \text{ sr}$ 和 $4.72 \times 10^{-3} \text{ sr}$ 。考虑原子炉温度 $793(50) \text{ K}$, 窗口温度 $353(20) \text{ K}$, 由式(1)、(2)得二者综合黑体辐射频移为 $-11.3(4.0) \times 10^{-18}$ 。通过建立新的超稳激光系统、加入能量滤波方法、引入其它小组测量的相关系数等方法, NIM-Sr2 总的系统频移不确定度为 7.2×10^{-18} , 具体各项见表 2。详细的评估过程见参考文献^[22]。

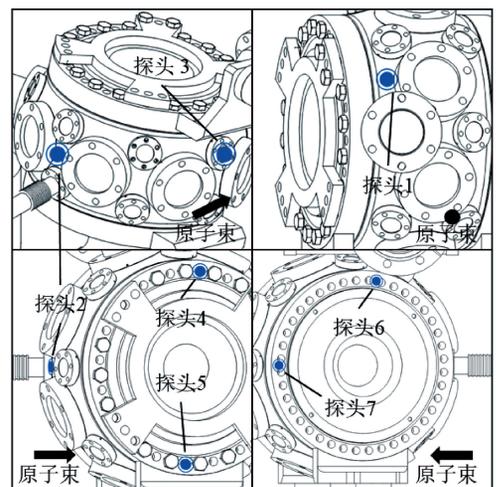


图10 探头在 MOT 腔体上的分布

Fig. 10 Layout of the sensors on the MOT chamber

表2 NIM-Sr2 最近一次评估结果

Table 2 Latest evaluation results of NIM-Sr2

频移项	修正($\times 10^{-18}$)	不确定度($\times 10^{-18}$)
MOT 腔黑体辐射	5 105.1	3.8
原子炉和塞曼窗口黑体辐射	11.3	4.0
晶格标量/张量	11.5	2.6
晶格超极化	-11.9	0.4
晶格 M1/E2	-20.1	0.8
碰撞	58.5	3.1
二阶塞曼	105.2	0.1
背景气体碰撞	10.0	1.1
直流斯塔克	20.9	0.2
探测光交流斯塔克	0	1.0
伺服误差	0	1.0
隧穿	0	1.0
总计	5 290.5	7.2

4 结 论

本文介绍了锶原子光晶格钟运行过程中所必需的原子炉、塞曼减速、一级 MOT 冷却、二级 MOT 冷却、光晶格装载、自旋极化、钟激光探寻等过程需要的光、电、磁以及它们之间在时序上配合,以此为基础给出了设计物理系统需要考虑的因素。根据物理系统对锶光钟系统频移不确定度评估的影响,以 NIM-Sr1 的系统设计为基础,主要针对真空度优化和黑体辐射频移控制两个方向,对 NIM-Sr2 的真空物理系统进行设计,改进部分包括差分真空结构、永磁铁塞曼减速器、水冷反亥姆霍兹线圈、向外延伸的加热塞曼减速窗口等。利用这套物理系统,NIM-Sr2 于 2022 年进行首次系统频移评估,黑体辐射频移的不确定度比 NIM-Sr1 低约一个数量级,总系统频移不确定度达到 7.2×10^{-18} [22]。

致谢

中国计量科学研究所的锶原子光晶格钟,是在李天初院士的远见卓识下立项研究的,在后续的研究中李院士倾注了大量的心血,推动了该研究的快速进展。谨以本文纪念李天初院士。

参考文献

- [1] SCHULDT T, GOHLKE M, OSWALD M, et al. Optical clock technologies for global navigation satellite systems [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25: 1-11.
- [2] 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.
- [3] KOLKOWITZ S, PIKOVSKI I, LANGELLIER N, et al. Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks [J]. *Physical Review D*, 2016, 94: 124043.
- [4] GODUN R M, NISBET-JONES P B R, 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.
- [5] TAKAMOTO M, HONG F L, HIGASHI R, et al. An optical lattice clock [J]. *Nature*, 2005, 435(7040): 321-324.
- [6] 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.
- [7] LU X, GUO F, WANG Y, et al. Absolute frequency measurement of the ^{87}Sr optical lattice clock at NTSC using international atomic time [J]. *Metrologia*, 2022, 60(1): 015008.
- [8] HISAI Y, AKAMATSU D, KOBAYASHI T, et al. Improved frequency ratio measurement with ^{87}Sr and ^{171}Yb optical lattice clocks at NMIJ [J]. *Metrologia*, 2021, 58: 15008.
- [9] NEMITZ N, GOTOH T, NAKAGAWA F, et al. Absolute frequency of ^{87}Sr at 1.8×10^{-16} uncertainty by reference to remote primary frequency standards [J]. *Metrologia*, 2021, 58(2): 025006.
- [10] OHMAE N, TAKAMOTO M, TAKAHASHI Y, et al. Transportable strontium optical lattice clocks operated outside laboratory at the level of 10^{-18} uncertainty [J]. *Advanced Quantum Technologies*, 2021, 4(8): 2100015.
- [11] SCHWARZ R, DÖRSCHER S, AL-MASOUDI A, et al. Long term measurement of the ^{87}Sr clock frequency at the limit of primary Cs clocks [J]. *Physical Review Research*, 2020, 2: 33242.
- [12] HOBSON R, BOWDEN W, VIANELLO A, et al. A strontium optical lattice clock with 1×10^{-17} uncertainty and measurement of its absolute frequency [J]. *Metrologia*, 2020, 57(6): 065026.
- [13] 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.
- [14] BOTHWELL T, KEDAR D, OELKER E, et al. JILA SrI optical lattice clock with uncertainty of 2.0×10^{-18} [J]. *Metrologia*, 2019, 56(6): 065004.
- [15] SHAO-KAI W, QIANG W, YI-GE L, et al. Cooling and trapping ^{88}Sr atoms with 461 nm laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26: 93202.
- [16] WANG Q, LIN B K, ZHAO Y, et al. Magneto-optical trapping of ^{88}Sr atoms with 689 nm laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(3): 033201.
- [17] LIN Y G, WANG Q, LI Y, et al. Magnetic field induced spectroscopy of ^{88}Sr atoms probed with a 10 Hz linewidth laser [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, 30(1): 014206.
- [18] WANG Q, LIN Y G, LI Y, et al. Observation of spin polarized clock transition in ^{87}Sr optical lattice clock [J]. *Chinese Physics Letters*, 2014, 31: 123201.
- [19] LIN Y G, WANG Q, LI Y, et al. First evaluation and frequency measurement of the strontium optical lattice clock at NIM [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 090601.
- [20] LI Y, LIN Y, WANG Q, et al. An improved strontium lattice clock with 10^{-16} level laser frequency stabilization [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(5): 051402.

- [21] LIN Y, WANG Q, MENG F, et al. A ^{87}Sr optical lattice clock with 2.9×10^{-17} uncertainty and its absolute frequency measurement[J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 035010.
- [22] LU B K, SUN Z, YANG T, et al. Improved evaluation of BBR and collisional frequency shifts of NIM-Sr2 with 7.2×10^{-18} total uncertainty[J]. *Chinese Physics Letters*, 2022, 39(8): 080601.
- [23] DROZDOWSKI R, IGNACIUK M, KWELA J, et al. Radiative lifetimes of the lowest $^3\text{P}_1$ metastable states of Ca and Sr [J]. *Z Phys D-Atoms, Molecules and Clusters*, 1997, 41(2): 125-131.
- [24] KATORI H, IDO T, ISOYA Y, et al. Magneto-optical trapping and cooling of strontium atoms down to the photon recoil temperature[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(6): 1116-1119.
- [25] 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.
- [26] OELKER E, HUTSON R B, KENNEDY C J, et al. Demonstration of 4.8×10^{-17} stability at 1 s for two independent optical clocks[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13: 714-719.
- [27] USHIJIMA I, TAKAMOTO M, KATORI H. Operational magic intensity for Sr optical lattice clocks[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(26): 263202.
- [28] XIONG D, ZHU Q, WANG J, et al. Finite element analysis of blackbody radiation environment for an ytterbium lattice clock operated at room temperature[J]. *Metrologia*, 2021, 58(3): 035005.
- [29] MIDDELMANN T, FALKE S, LISDAT C, et al. High accuracy correction of blackbody radiation shift in an optical lattice clock[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109.
- [30] 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(1): 6896.
- [31] ABDEL-HAFIZ M, ABLEWSKI P, AL-MASOUDI A, et al. Guidelines for developing optical clocks with 10^{-18} fractional frequency uncertainty [J]. *ArXiv Preprint*, 2019, ArXiv: 1906.11495.
- [32] ALVES B X R, FOUCAULT Y, VALLET G, et al. Background gas collision frequency shift on lattice-trapped strontium atoms[C]. 2019 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum (EFTF/IFC), IEEE, 2019: 1-2.
- [33] JACOB K T, WASEDA Y. The vapour pressures of barium and strontium[J]. *Journal of the Less Common Metals*, 1988, 139(2): 249-259.
- [34] BOBER M, MORZY ŃSKI P, CYGAN A, et al. Strontium optical lattice clocks for practical realization of the metre and secondary representation of the second[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(7): 075201.
- [35] 张素平. 多级差分真空系统设计、计算和调试[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007.
ZHANG S P. The design, calculation and adjustment of multi-differential vacuum system[D]. Beijing: Graduate school of the Chinese academy of sciences, 2007.
- [36] WANG Q, LIN Y G, GAO F L, et al. A longitudinal zeeman slower based on ring-shaped permanent magnets for a strontium optical lattice clock[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(10): 100701.
- [37] NOSSKE I, COUTURIER L, HU F, et al. Two-dimensional magneto-optical trap as a source for cold strontium atoms[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(5): 053415.
- [38] KOLLER S B, GROTTI J, VOGT St, et al. Transportable optical lattice clock with 7×10^{-17} uncertainty[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(7): 073601.

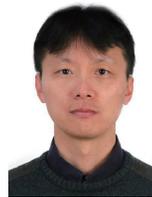
作者简介



卢炳坤, 2017年于北京理工大学获得学士学位, 2020年于中国计量科学研究院获得硕士学位, 现为清华大学精密仪器系光学工程专业博士研究生, 主要研究方向为铯原子光晶格钟。

E-mail: lbk20@mails. tsinghua. edu. cn

Lu Bingkun received his B. Sc. degree in 2017 from Beijing Institute of Technology, received his M. Sc. degree in 2020 from National Institute of Metrology, China. He is currently pursuing his Ph. D. degree in the Department of Precision Instrument at Tsinghua University. His main research interest is strontium optical lattice clock.



林弋戈(通信作者), 2013年于北京理工大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院时间频率计量科学研究所研究员, 主要研究方向为时间频率量子计量基准、时间频率精密比对与测量等。

E-mail: linyige@nim. ac. cn

Lin Yige (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 2013 from Beijing Institute of Technology. He is currently a research fellow in the Division of Time and Frequency Metrology at National Institute of Metrology, China. His main research interests include time and frequency atomic standards, precision measurement of time and frequency, et al.