

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311847

# 冷原子光栅磁光阱的研制及 CPT 信号的探询\*

朱雨濛<sup>1,2</sup>, 于治龙<sup>1</sup>, 姚明昊<sup>1</sup>, 詹志明<sup>2</sup>, 刘小赤<sup>1</sup>

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 武汉 430071; 2. 江汉大学人工智能学院 武汉 430056)

**摘要:**相干布居囚禁原子钟在小型化方面具备不可替代的优势。由于热原子气室内部高压缓冲气体的限制,导致其频率稳定度仍有进一步提升的空间。利用激光冷却原子技术作为替代,可以有效提升其中长期性能。然而,目前的冷原子物理系统仍然相对复杂,不利于原子钟整体系统的集成化和小型化。我们研制了高衍射效率光栅芯片、平面磁阱芯片以及微小型真空腔室,共同构建基于平面核心器件的磁光阱,利用单光束捕获冷原子  $2 \times 10^6$  个。此外,为了简化 CPT 冷原子钟的激光系统,通过单激光结合时分复用系统的方式,仅用单一 Rb D2 线激光实现了原子冷却与 CPT 探询。以上的工作为将来实现微小型化高性能冷原子 CPT 钟的最终锁定和性能评估奠定了重要理论和技术基础。

**关键词:**微波原子钟;相干布居囚禁;激光冷却;光栅芯片

**中图分类号:** TH71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Coherent population trapping resonance signal interrogation based on grating magneto-optical trap

Zhu Yumeng<sup>1,2</sup>, Yu Zhilong<sup>1</sup>, Yao Minghao<sup>1</sup>, Zhan Zhiming<sup>2</sup>, Liu Xiaochi<sup>1</sup>

(1. Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Artificial Intelligence, Jiangnan University, Wuhan 430056, China)

**Abstract:** Coherent population trapping (CPT) atomic clock has irreplaceable advantages in miniaturization. The mid-long-term frequency stability of vapor cell-based CPT clock is limited by buffer gas collision and broadening. To overcome these limitations, the laser-cooling atom technique is an alternative method to improve the mid-long-term performance. However, the conventional cold atom system remains relatively complicate. A MOT based on planar elements is proposed, which consists of grating chip, coils chip, and a compact vacuum chamber. The  $10^6$  cold atoms are trapped with a single beam. Moreover, a laser stabilized on the Rb D2 line combined with time-multiplexed frequency shifting is proposed to realize laser cooling and CPT interrogation with a single laser. This work evaluates the potential for developing a miniature/compact high-performance cold atom CPT clock.

**Keywords:** microwave atomic clock; coherent population trapping; laser cooling; grating chip

## 0 引 言

近年来,小型化的高性能微波原子钟在许多领域得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。相对于直接采用微波探询技术的原子钟,相干布居囚禁(coherent population trapping, CPT)原子钟由于物理部分不需要谐振微波腔,可以进一步简化结构,具有体积小、能耗低的特点<sup>[4]</sup>,在集成化和微小型化原子钟的研究领域具有里

程碑式的意义。

目前,基于微制造技术的芯片级 CPT 原子钟的研制已经成功实现<sup>[5-6]</sup>。而它们的核心物理部件通常为充入碱金属原子(一般为 Cs 或者 Rb)和高压缓冲气体的热原子玻璃气室<sup>[7]</sup>,以增加原子的相互作用时间,并减少腔壁碰撞造成的弛豫<sup>[7-11]</sup>。因此,尽管许多高性能 CPT 钟具有优异的短期频率稳定度<sup>[12-16]</sup>,但由于气室中的缓冲气体会不可避免地引入碰撞频移与压力展宽,中长期频率稳定度不够理想<sup>[17]</sup>。

收稿日期:2023-08-28 Received Date: 2023-08-28

\* 基金项目:国家重点研发计划(2021YFF0603701)、国家自然科学基金(12273087)项目资助

针对这一问题,利用激光冷却俘陷原子方式代替热原子气室是一种有效的解决手段。继2013年美国国家标准与技术研究所(national institute of standards and technology, NIST)首次提出了冷原子CPT钟的构想后<sup>[18]</sup>,迄今为止在实验中报道的最好结果秒稳可达 $1.3 \times 10^{-11}$ ,万秒后降至 $2 \times 10^{-13}$ <sup>[19]</sup>。CPT技术与激光冷却原子技术的结合可以极大地消除碰撞频移,而且由于冷原子的相干时间更长,也可以进一步减轻光频移。因此,冷原子CPT钟在准确度和长期稳定度方面展现出了巨大的潜力<sup>[20-22]</sup>。

虽然过渡到冷原子比热原子封装有明显的优势,但是构建一个小型化的冷原子CPT钟依然存在着许多问题与挑战,主要在于物理系统与激光系统两个方面。首先,减小物理部分是减小整体系统体积和功耗的主要途径,而这部分的主要局限在于与激光冷却相关的实验装置的尺寸和复杂性。目前,传统的激光冷却系统一般采用磁光阱(magneto-optical trap, MOT)来冷却和捕获原子<sup>[23]</sup>,它是由3对正交的对射激光束、1对圆柱形的反亥姆霍兹线圈和真空系统组成,另外还需要大量的光学元件进行光学对准、偏振调整和光束整形。因此,其物理系统的结构相对复杂,不满足构建小型化、低功耗系统的要求。为此,针对MOT的主要核心器件,研制了高衍射效率的光栅芯片<sup>[24]</sup>用于简化MOT的光学构型,利用单层平面磁阱芯片提供冷却原子所需的梯度磁场<sup>[25]</sup>,并设计制备了微小化被动型真空腔室提供实验的超高真空环境,共同构建微小磁光阱,实现了基于平面核心器件的单光束原子冷却。此外,进一步简化激光系统对于降低系统整体的复杂性也至关重要。在过去的系统中通常采用两台激光源分别提供冷却光、再泵浦光和CPT双色光场<sup>[18]</sup>,我们通过单激光结合时分复用系统的方式,在小型光栅磁光阱(grating magneto-optical trap, GMOT)系统的基础上仅用单一Rb D2线激光实现了原子冷却与CPT探询。这些工作为将来实现微小化的高性能冷原子CPT钟的最终锁定和性能评估奠定了重要理论和技术基础。

## 1 理论模型与仿真

### 1.1 光栅芯片

光栅芯片冷却原子的基本原理如图1(a)所示。入射光场( $I_{in}$ )和衍射光场( $I_{diff}$ )的散射力,需在一对反亥姆霍兹线圈产生的四极磁场中心达到平衡,平衡系数取决于入射光和衍射光的功率和偏振<sup>[26]</sup>。而设计光栅芯片主要需考虑两个方面:获得高衍射效率和高制造工艺容差。由于0阶衍射光的偏振对于冷却过程是不利的,其衍射效率应尽量低。

在理论模型构建与仿真部分,假设只考虑光栅芯片的理想结构,如图1(b)所示。 $r$ 为占空比, $T$ 为光栅深度, $d$ 为光栅周期, $m$ 级衍射光与入射光的功率比值,即衍射效率可表示为<sup>[27]</sup>:

$$\frac{P_m}{P_{in}} = \frac{\rho}{m^2 \pi^2} \left[ \sin^2(m\pi r) + \sin^2\left(\frac{m\pi S}{d}\right) + 2\cos\phi \sin(m\pi r) \sin\left(\frac{m\pi S}{d}\right) \right] \quad (1)$$

其中, $S$ 为下底面有效宽度, $\phi$ 为上表面与下表面衍射光束的相位差。通过上述公式进行数值计算与仿真,探究光栅深度、光栅周期及占空比对一阶衍射光效率的影响,可得到高衍射效率光栅芯片的参数范围。

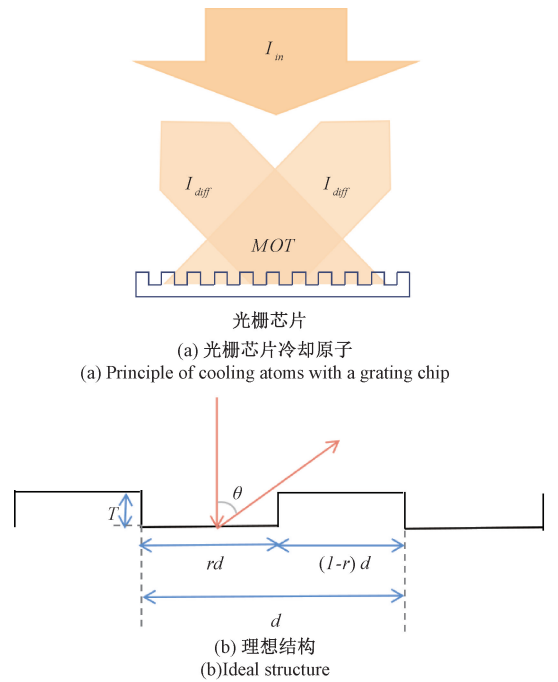


图1 光栅芯片的基本原理

Fig. 1 Basic principle of a grating chip

如前所述,0级衍射功率应最小化,而 $P_1/P_{in}$ 的功率比应最大化。其中需要注意的是,对于一阶衍射光束,深度 $T$ 应该保持在最小值,这样光栅中的衍射面积就可以尽可能的大。图2(a)和(b)分别为0阶与1阶光束衍射效率的仿真结果。 $P_1/P_{in}$ 的最大值大致对应于 $P_0/P_{in}$ 达到零的相同范围,但中心最大值略低于0.5。与 $P_0/P_{in}$ 的结果相似,在较大的 $T$ 和 $r$ 范围内,1阶光束的衍射效率对制造误差 insensitive。

### 1.2 平面单层磁阱芯片

实现微小冷原子系统必不可少的另一组件是产生四极磁场的反亥姆霍兹线圈。中国科学技术大学Liang Chen等提出了平面线圈芯片方案,本文采用该方案的设

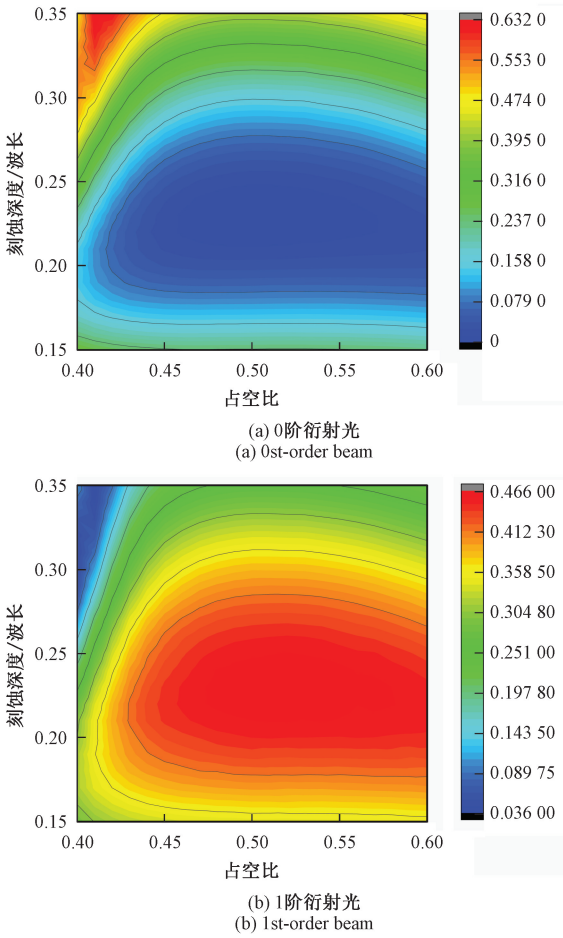


图2 衍射效率仿真结果

Fig. 2 Simulation results of diffraction efficiency

计思路<sup>[25]</sup>,取代了传统的圆柱形反亥线圈,提供捕获冷原子所需的磁场梯度(约 10 Gs/cm)。通过表面沉积铜线的印刷电路板(printed circuit board, PCB),在单个平面芯片上用电流极性相反的小线圈和大线圈产生梯度磁场,如图3所示。单层平面磁阱芯片由两个半径不同( $R_1 < R_2$ )、匝数( $N_1$ 和 $N_2$ )不同、电流方向相反( $I$ 和 $-I$ )的同轴线圈组成。对于选取的设计半径,可以调整匝数,使磁场强度在线圈平面上方期望的高度 $z_0$ ,即MOT目标工作点(0,0, $z_0$ )处为0。对应的梯度公式为<sup>[25]</sup>:

$$\frac{\partial B_z}{\partial z}(0, \phi, z_0) = -\frac{3\mu_0 z_0 I}{2} \left( \frac{N_1 R_1^2}{(R_1^2 + z_0^2)^{\frac{5}{2}}} - \frac{N_2 R_2^2}{(R_2^2 + z_0^2)^{\frac{5}{2}}} \right) \quad (2)$$

通过理论计算选取线圈芯片的参数,印刷铜线的厚度为 $70 \mu\text{m}$ ,宽度为 $200 \mu\text{m}$ ,间距为 $200 \mu\text{m}$ 。线圈的内圈 $N_1 = 17$ 匝,半径为 $2.0 \sim 8.8 \text{ mm}$ ;外圈 $N_2 = 13$ 匝,半径为 $9.6 \sim 14.8 \text{ mm}$ 。线圈仿真结果如图4所示,工作点 $z_0 = 6.3 \text{ mm}$ ,磁场梯度为 $13.9 \text{ Gs/cm}$ 。

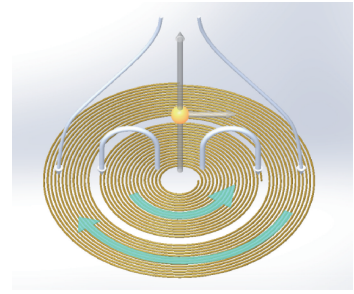


图3 平面反亥姆霍兹线圈结构

Fig. 3 Structure of the planar Anti-Helmholtz coil

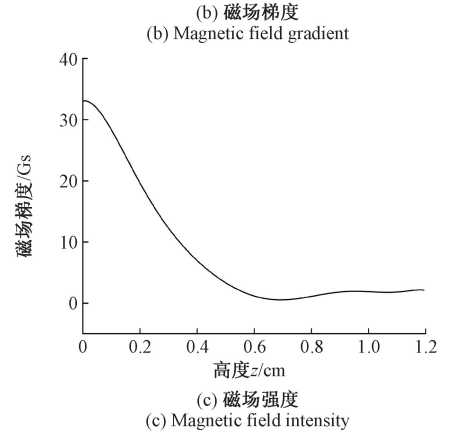
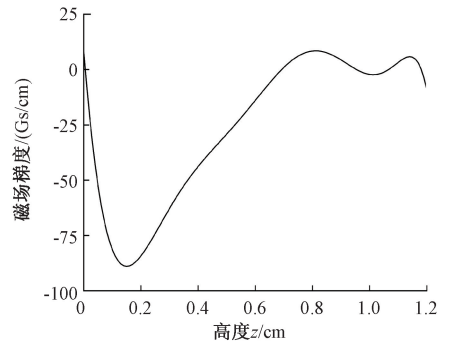
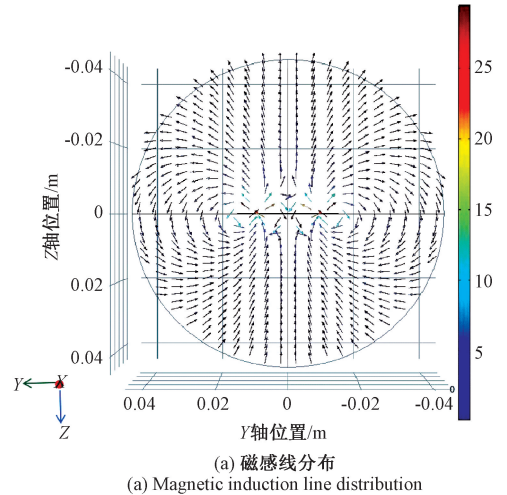


图4 磁阱芯片仿真结果

Fig. 4 Simulation result of the coils chip

## 2 实验装置

### 2.1 光栅磁光阱

根据以上仿真结果可选取合适的设计参数加工样品,光栅周期为 1 400 nm,光栅深度为 200 nm,占空比为 1:1,并在硅表面镀上 100 nm 的金膜。制备好的光栅芯片样品边长为 20 mm,厚度约 1 mm,如图 5 所示。分别测试芯片各部分 1 级衍射光的衍射角度和功率,衍射角度分别为 34.5°、33.4° 和 34.3°,衍射效率分别为 41.0%、41.7% 和 41.3%,与参数设计仿真的结果基本吻合。

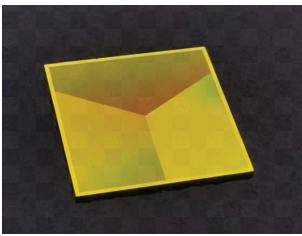


图5 光栅芯片实物图  
Fig. 5 Image of the chip

本系统中使用的线圈芯片厚度为 700  $\mu\text{m}$ ,边长为 30 mm(图 6),该芯片由 3 层相同的铜电路并联而成。电路端通过金属孔连接到芯片底部的印刷焊盘上。这种配置能够防止电流线影响上表面的磁场。实际使用时,该芯片在额定电流 2 A 下,测得稳定电压为 3.2 V,可获得满足冷原子实验所需磁场梯度。在 6.4 W 的低加热功率下,芯片温度可保持在 77°C 左右。因此,该线圈芯片可以在相对较低的功率设置下为 MOT 提供稳定的磁场(传统的反亥线圈功率通常可达几十瓦甚至更高)。

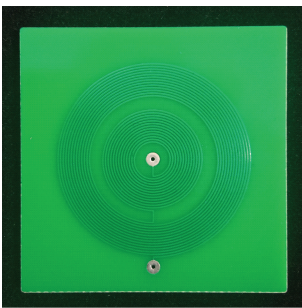


图6 线圈芯片实物图  
Fig. 6 Image of the coil chip

后续对于平面线圈的改进方案将集中在结构优化与降低功耗两方面。首先,如上图所示,目前芯片的结构是包括内、外两层线圈,目的是提供两个相反的磁场。事实上,外层线圈在  $z$  轴上提供的磁场是相对较小的,功耗却

更大。因此可考虑将其设计为内外层嵌套的结构,不仅能进一步减小尺寸,并且线圈半径减少后,可以用更小的电流提供相同梯度大小的磁场,进而也降低了线圈的功耗。

如前所述,激光冷却还依赖于超高真空环境,以避免碱金属原子与背景气体的热碰撞和反应。由于此部分过去主要是由模块化的通用组件实现,也就把真空装置尺寸限制在升量级上,对冷原子系统的小型化造成了主要的限制。为了开发基于原子光栅芯片的小型 MOT,我们设计了一种与光栅芯片、平面磁阱芯片兼容的厘米量级真空腔室。该腔室的设计需要满足以下几个要求:首先,腔室需要具有良好的密封性,能够维持对于冷却和捕获原子必要的真空水平(通常高达  $10^{-6}$  Pa)。冷却光和探测光应该能够透射整个腔室,因此必须选择在实验所需波长范围内具有良好光学性质的材料作为腔室窗口。同时,为了降低尺寸、重量和功耗(size, weight and power, SWaP),系统中也应该移除主动泵,采用被动泵送的方式维持超高真空。

图 7 展示本文设计加工的立方体腔室。该室的整体尺寸为 7 cm×3.5 cm×3.5 cm,窗口的直径为 2 cm,与光栅芯片尺寸相同。我们设计了 5 个焊接在腔室主体上的光学窗口。冷却光束可以透过垂直方向的上、下表面窗口入射到光栅芯片上,产生 3 束衍射光。侧面的窗口分别用于原子探测和荧光检测。本文设计中使用钛作为腔室主体的材料,因为与不锈钢相比,钛的放气性和渗透性较低<sup>[28]</sup>。而选择蓝宝石作为光学窗口材料的原因是,它具有较宽的波长透过范围和较低的氦渗透率<sup>[29]</sup>。结合到主腔室的阀杆用于集成电流激活的 Rb 源和非蒸发型吸气剂(non-evaporable getters, NEG)。NEG 可以被动地从腔室中抽出残余气体,并长期保持冷原子系统的高真空水平<sup>[30]</sup>。需要注意的是,因为整个真空系统无法承受高激活温度(通常高达 700°C~900°C),所以在系统中选用的是低激活温度型 NEG,在 450°C~500°C 时就可以达到相当程度的活化,设备运行期间的温度为 150°C~300°C。初期腔室通过一根铜杆与离子泵相连,一旦腔室达到实验所需的真空水平,就可以利用冷焊技术切断铜

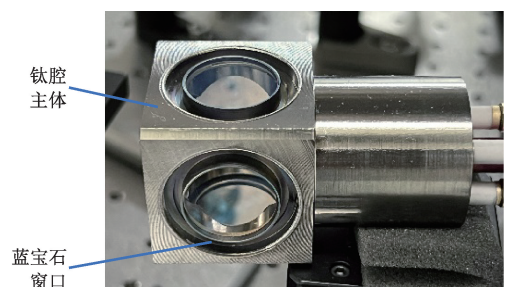


图7 真空腔室  
Fig. 7 Vacuum chamber

杆,形成一个微小型的被动真空腔室。目前,仅靠 NEG 被动泵送腔室内真空可基本稳定维持在  $5 \times 10^{-6}$  Pa 以下。

为了验证上述核心组件的性能,搭建了 GMOT 系统进行冷原子实验,如图 8 所示。将冷却光和再泵浦光通过 PBS 合束耦合进保偏光纤,并接入 GMOT 装置。从光纤准直器发出的线偏振入射光被  $1/4$  波片调整为圆偏振光,再经过透镜将直径为 7.5 mm 的高斯光束扩至 60 mm。MOT 中冷却光的光强为  $5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ ,再泵浦的光强为  $0.4 \text{ mW}/\text{cm}^2$ 。光栅芯片安装在真空腔的下底面,线圈芯片安装在光栅芯片的下方并对齐,使得两个芯片的工作区域重合。系统运行后,在四极磁场的作用下,来自光栅的 3 束一阶衍射光束与入射光束形成 MOT,实现原子的冷却与囚禁。

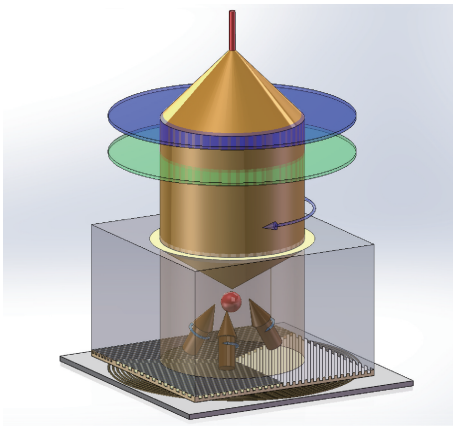


图 8 GMOT 系统结构图

Fig. 8 Structure of the GMOT

捕获原子后,为了表征此系统冷却原子的具体性能,用荧光检测法来测量原子数。与原子荧光相比,由于光栅表面的衍射光和腔壁内部的反射,散射在腔室中的杂散光较多。因此,本文利用空间滤波透镜系统收集来自原子的干净信号,使光电倍增管检测到的非原子团捕获点的信号最小化<sup>[31]</sup>。

## 2.2 时分复用单激光系统

目前,大多数 CPT 实验都是使用 D1 线进行探测。然而,使用 D2 线进行探测可以将单个激光同时作为冷却光束、再泵浦光束和 CPT 光束的源,可以大大降低冷原子钟中激光系统的复杂性。对于构想的小型化冷原子 CPT 钟,采用该方案减少了仪器的复杂性和尺寸,同时也降低了功率。

在此,将冷原子技术与 CPT 架构相结合,演示了一种基于 D2 线探测的冷原子 CPT 钟原型。光学装置的示意图如图 9 所示,使用单个 780 nm 的分布式布拉格反射

器(distributed Bragg reflector, DBR)激光器,利用调制转移谱(modulation transfer spectrum, MTS)将频率锁定到  $F=2 \rightarrow F'=3$  跃迁上。冷却光通过声光调制器(acousto optic modulators, AOM)移频至距离循环跃迁 8 MHz 红失谐处。随后光路通过一个 6.58 GHz 驱动的光纤耦合光电调制器(electro-optic modulator, EOM),产生边带,得到再泵浦光。CPT 光则是通过 AOM 移频将激光频率移至  $F=2 \rightarrow F'=2$  跃迁上,再经 EOM 调制 6.835 GHz 产生  $F=1 \rightarrow F'=2$  光边带。

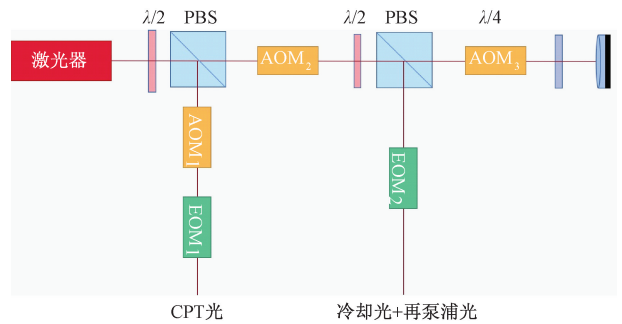


图 9 激光系统光路图

Fig. 9 Illustration of the laser system

实验时序控制操作流程如图 10 所示,通过 AOM 以及 EOM 加载的射频信号实现不同光路的开关控制:首先开启 MOT 光路及反亥线圈,完成冷原子制备后,立即关闭冷却光、再泵浦光及磁场电流,随后进行 CPT 探测<sup>[32-33]</sup>。

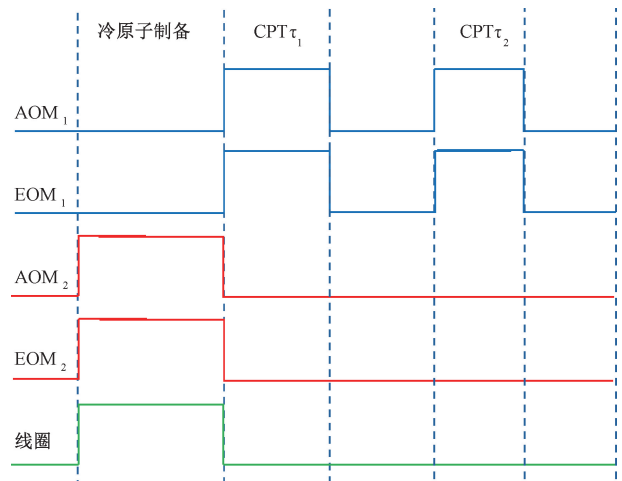


图 10 操作时序图

Fig. 10 Timing of operations

对于最终原子钟的锁定,还需考虑激光系统产生的光频移。图 11 中显示了用于激光功率稳定的实验装置图。激光先由 AOM 调制,经 PBS 分光后,透射部分为实验所用光,反射部分的功率输出由光电二极管

(photodiode, PD)检测后产生环内信号,将其与参考电压进行比较产生误差信号。误差信号通过比例积分器(PI)控制器进行积分,以此校正用于驱动 AOM 的射频信号,即可通过此伺服环路控制 AOM 衍射光的输出功率稳定<sup>[34]</sup>。

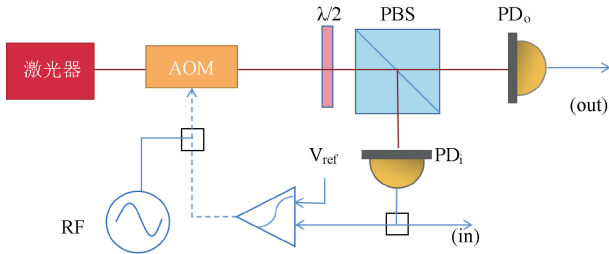


图 11 激光功率稳定

Fig. 11 Experimental setup stabilizing the laser power

此外,由于双色光场的边带比值不稳定导致的非谐振光频移限制了 CPT 钟的中长期频率稳定性<sup>[35]</sup>,还需建立反馈系统稳定产生 CPT 信号的光边带比值,稳定失谐光频移<sup>[36]</sup>,如图 12 所示。微波信号驱动 EOM 产生边带后,利用快速光电二极管(FPD)检测边带的 6.834 GHz 拍频信号。然后用肖特基二极管(schottky barrier diode, SBD)将拍频信号转换为电压信号,经过伺服系统(servo)与基准电压进行比较。误差信号被发送到 PI 控制器,利用它产生的校正信号来调整压控衰减器(voltage-controlled attenuator, V-A),稳定 EOM 的边带比值。

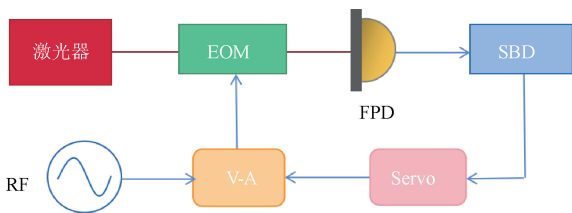
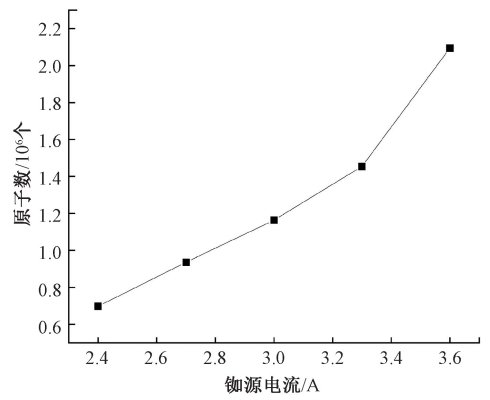


图 12 边带比值稳定

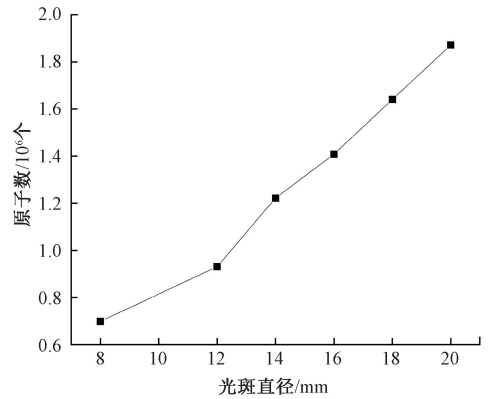
Fig. 12 Experimental setup stabilizing the sideband ratio

### 3 结 果

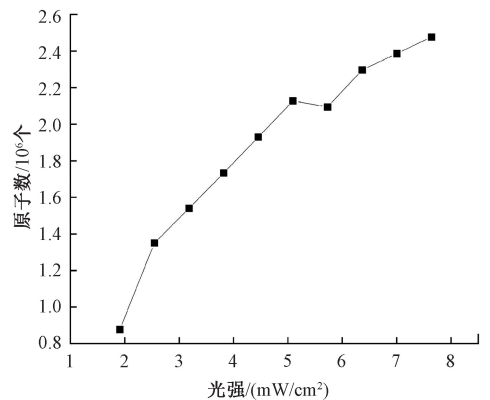
对原子团进行荧光检测,结果表明此 GMOT 捕获了  $2 \times 10^6$  个原子。图 13(a)为原子数与铷源电流的关系图。此外,在 GMOT 中捕获的原子数量主要取决于光束重叠的体积(光斑直径)和激光的强度<sup>[24]</sup>。冷原子数与冷却光束直径(阱的体积)近似成正比,如图 13(b)所示。在图 13(c)中,可以看到捕获原子数一定程度上取决于激光光强。



(a) 铷源电流  
(a) Current of dispenser



(b) 光斑直径  
(b) Beam size



(c) 激光光强  
(c) Laser intensity

图 13 原子数随系统参数的变化

Fig. 13 Variation of atom number with system parameter

基于 GMOT 的冷原子 CPT 共振信号如图 14 所示。在这里,我们使用吸收信号的对比度来表征共振信号。吸收对比度定义为 CPT 的深度与光学吸收共振之间的比率。测量到的信号显示出 >50% 的对比度,表明有较多的原子被囚禁在暗态。相比之下,基于微型蒸汽气室的 CPT 共振的典型吸收对比度为 0.1% ~ 10%。由于 CPT 时钟的光频移和频率稳定性取决于暗态的形成,这种基

于 GMOT 的 CPT 共振结果验证了本文微小型冷原子系统和时分复用单激光系统可以应用于高性能冷原子 CPT 时钟。

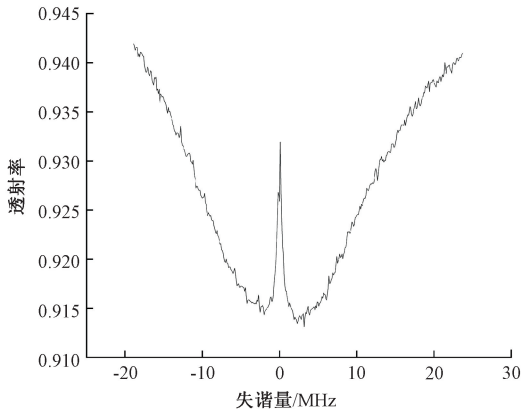


图 14 CPT 信号

Fig. 14 CPT transmission signal

## 4 结 论

从长远来看,本文计划在 GMOT 结构的简单基础上开发一种紧凑的或芯片级的冷原子 CPT 时钟。目前,已经研制出了高衍射效率( $>40\%$ )的光栅芯片,并结合平面反亥姆霍兹线圈芯片和小型化被动真空腔,构建了基于光栅原子芯片的微小型 GMOT 系统,实现了单光束冷却方案,捕获了 $2 \times 10^6$ 个 $^{87}\text{Rb}$ 原子。通过单激光结合时分复用系统的方式,仅用单一 Rb D2 线激光实现了原子冷却与 CPT 探测。在 GMOT 中还获得了高吸收对比度 CPT 共振信号,证实该方案在冷原子 CPT 时钟中具有潜在的应用前景。

后续计划最主要的工作是在此基础上完成原子钟的锁定。其次,还需对系统各部分进行优化。目前系统的物理封装基本上是紧凑的,但仍然存在进一步减小体积、降低功耗的空间。目前磁阱芯片功耗相对较大,散热性能较差,对系统有一定的加热作用,需要改进设计。如果将 GMOT 系统与微型电子机械系统(micro-electromechanical-systems, MEMS)工艺结合,核心器件之间的距离可以减少到毫米级<sup>[37]</sup>。对于激光系统也可在已有基础上选择其他锁定方案,进一步减少光路中的调制器件。此外,我们将尝试更优化的探测方法,最大限度地提高 CPT 的共振幅度。同时改进实验装置,以提升钟的中长期稳定度。

## 参考文献

- [1] ALMAT N, GHARAVIPOUR M, MORENO W, et al. Long-term stability analysis toward  $< 10^{-14}$  level for a highly compact POP Rb cell atomic clock [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(1): 207-216.
- [2] SHEN Q, LIN H, DENG J, et al. Pulsed optically pumped atomic clock with a medium to long-term frequency stability of  $10^{-15}$  [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91.
- [3] MICALIZIO S, LEVI F, CALOSSO C E, et al. A pulsed-laser Rb atomic frequency standard for GNSS applications[J]. GPS Solutions, 2021, 25: 94.
- [4] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping: A review[J]. Applied Physics B, 2005, 81: 421-442.
- [5] KNAPPE S, SHAH V, SCHWINDT P D D, et al. A microfabricated atomic clock [J]. Applied Physics Letter, 2004, 85:1460-1462.
- [6] LUTWAK R, RASHED A, VARGHESE M, et al. The chip-scale atomic clock: Prototype evaluation [C]. Precise Time and Time Interval Meeting, 2007: 269-290.
- [7] JIA S, JIANG Z, JIAO B, et al. The microfabricated alkali vapor cell with high hermeticity for chip-scale atomic clock[J]. Applied Sciences, 2022, 12(1): 436.
- [8] DYER S, MCWILLIAM A, HUNTER D, et al. Nitrogen buffer gas pressure tuning in a micro-machined vapor cell[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(7), DOI: 10.1063/5.0153881.
- [9] HAN R, YOU Z, SHI Y, et al. Investigation on spin relaxation of microfabricated vapor cells with buffer gas[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2020, 64:1391-1399.
- [10] LIN H, TIAN Y, TAN B, et al. Differential detection scheme for compact CPT atomic clocks[J]. Europhysics Letters, 2017, 119(2), DOI: org/10.1051/epjconf/20147700017.
- [11] YUN P, TRICOT F, CALOSSO C E, et al. High-Performance coherent population trapping clock with polarization modulation [J]. Physical Review Applied,

- 2017, 7(1):014018.
- [12] LIU X, MEROLLA J M, GUERANDEL S, et al. Coherent-population-trapping resonances in buffer-gas-filled Cs-vapor cells with push-pull optical pumping[J]. *Physical Review Applied*, 2013, 87, DOI: org/10.1155/2011/683415.
- [13] HAFIZ M A, BOUDOT R. A coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock based on push-pull optical pumping[J]. *Applied Physics*, 2015, DOI:org/10.1063/1.4977955.
- [14] YUN P, MEJRI S, TRICOT F, et al. Double-modulation CPT cesium compact clock [C]. *Physics: Conference Series*, 2016, 723.
- [15] HAFIZ M A, COGET G, PETERSEN M, et al. Toward a high-stability coherent population trapping Cs vapor-cell atomic clock using auto balanced Ramsey spectroscopy[C]. *Physical Review*, 2018.
- [16] HAFIZ M A, COGET G, PETERSEN M, et al. Symmetric auto balanced Ramsey interrogation for high-performance coherent-population-trapping vapor cell atomic clock [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(24): 244102. 1-244102. 5.
- [17] VANIER J, AUDOIN J. The quantum physics of atomic frequency standards [M]. 1992, DOI: 10.1201/9781003041085.
- [18] ESNAULT F X, BLANSHAN E, IVANOV E N, et al. Cold-atom double- $\lambda$  coherent population trapping clock[J]. *Physical Review A*, 2013, 88.
- [19] LIU X, YUDIN V I, TAICHENACHEV A V, et al. High contrast dark resonances in a cold-atom clock probed with counterpropagating circularly polarized beams[J]. *Applied Physics Letter*, 2017, 111(22), DOI: 10.1063/1.5001179.
- [20] LIU X, IVANOV E, YUDIN V I, et al. Low-drift coherent population trapping clock based on laser-cooled atoms and high-coherence excitations fields[J]. *Physical Review Applied*, 2017, 8(5), DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.8.054001>.
- [21] ELVIN R, WRIGHT M W, LEWIS B, et al. Towards a compact, optically interrogated, cold-atom microwave clock[J]. *Advanced Optical Technologies*, 2020, 9(5): 297-303.
- [22] LIU X, RU N, DUAN J, et al. High-performance coherent population trapping clock based on laser-cooled atoms[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(4):054001.
- [23] PHILLIPS W D. Nobel lecture: Laser cooling and trapping of neutral atoms [J]. *Reviews of Modern Physics*, 1998, 70(3): 721.
- [24] NSHII C C, VANGELEYN M, COTTER J P, et al. A surface-patterned chip as a strong source of ultracold atoms for quantum technologies [J]. *Nature Nanotechnology*, 2013, 8: 321-324.
- [25] CHEN L, HUANG C, XU X, et al. Planar-integrated magneto-optical trap [J]. *Physical Review Applied*, 2022, 17(3), DOI:10.48550/arXiv.2107.07367.
- [26] DUAN J, LIU X, ZHOU Y D, et al. High diffraction efficiency grating atom chip for magneto-optical trap[J]. *Optics Communications*, 2022, 513:128087.
- [27] COTTER J P, MCGILLIGAN J P, GRIFFIN P F, et al. Design and fabrication of diffractive atom chips for laser cooling and trapping [J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(6): 172.
- [28] TAKE M, KURISU H, YAMAMOTO S, et al. Hydrogen outgassing mechanism in titanium materials[J]. *Applied Surface Science*, 2011, 258(4): 1405-1411.
- [29] STEPHENS M, RHODES R, WIEMAN C. Study of wall coatings for vapor-cell laser traps[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 76(6): 3479-3488.
- [30] LITTLE B J, HOTH G W, CHRISTENSEN J, et al. A passively pumped vacuum package sustaining cold atoms for more than 200 days [J]. *AVS Quantum Science*, 2021, 3(3).
- [31] BURROW O S, OSBORN P F, BOUGHTON E, et al. Stand-alone vacuum cell for compact ultracold quantum technologies [J]. *Applied Physics Letter*, 2021, 119(12):124002.
- [32] 吕梦洁, 王光明, 颜树华, 等. 原子干涉重力仪集成光源系统综述 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(7): 1-10.
- LYU M J, WANG G M, YAN SH H, et al. Overview of integrated light source system for atomic interferometer gravimeter [J]. *Journal of Electronic Measurement and*



Instrumentation, 2021, 35(7): 1-10.

- [33] 苏业南, 周超, 李期学, 等. 冷原子干涉可编程时序控制系统设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(10): 74-82.
- SU Y N, ZHOU CH, LI Q X, et al. Design and implementation of a programmable timing control system for cold atom interference [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 ( 10 ): 74-82.
- [34] TRICOT F, PHUNG D H, LOURS M, et al. Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89, DOI:10.1677/jme.1.02008.
- [35] POLLOCK J W, YUDIN V I, SHUKER M, et al. AC stark shifts of dark resonances probed with Ramsey spectroscopy[J]. Physical Review A, 2018(98), DOI: 10.1103/PhysRevA.98.053424.
- [36] YAO M, DUAN J, WANG X, et al. Microwave synthesizer and self-adaption system for high performance coherent population trapping atomic clocks [J]. IEEE Access, 2021, 10: 3177-3181.
- [37] MCGILLIGAN J P, MOORE K R, DELLIS A, et al. Laser cooling in a chip-scale platform [J]. Applied Physics Letter, 2020, 117, DOI:10.1063/5.0068725.

## 作者简介



**朱雨濛**, 2021 年于河海大学获得学士学位, 现为江汉大学硕士研究生, 主要研究方向为微小型冷原子系统。

E-mail: zhu\_yu\_meng@163.com

**Zhu Yumeng** received her B. Sc. degree from Hohai University in 2021. She is currently a master student at Jiangnan University. Her main research interest is microminiaturization of the cold atom system.



**刘小赤** (通信作者), 2008 年于华中科技大学获得学士学位, 2010 年于巴黎第十一大学获得硕士学位, 2013 年于法国国家科研中心 FEMTO-ST 研究所/贝桑松大学获得博士学位, 现为中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研究员, 主要研究方向为原子频标和量子精密测量。

E-mail: liuxc@apm.ac.cn

**Liu Xiaochi** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2008, received his M. Sc. degree from University of Paris-Sud in 2010, and received his Ph. D. degree from FEMTO-ST, CNRS, University of Besancon in 2013. He is currently a research fellow at Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology. His main research interests include atomic frequency standards and quantum precision measurement.