

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2311716

高性能磁选态光检测铯原子钟的研究*

李源昊¹, 陈思飞¹, 刘晨¹, 范利锋¹, 王延辉^{1,2}

(1. 北京大学电子学院 北京 100871; 2. 北京大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室 北京 100871)

摘要:介绍了一种新型的可搬运铯原子钟,采用非均匀磁场进行选态,采用与4-5循环跃迁线共振的激光进行检测。介绍了此方案的物理系统、光学系统和电路系统。进一步展示了基于此方案原子钟的整机与指标,最佳整机体积4U,稳定度达到 $4 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$, $4.5 \times 10^{-14} @ 10\,000 \text{ s}$, $2.2 \times 10^{-14} @ 1 \text{ d}$,优于可搬运铯钟典型产品5071A优质型。将此方案与磁选态磁检测铯原子钟和光抽运铯原子钟进行了对比,并给出了此方案的优点与待解决的问题。最后介绍了两种针对磁选态光检测铯钟的可行性改善,一种为采用3-2循环跃迁线检测的反选型原子钟,一种为采用光抽运-磁选态的混合选态型原子钟,有望进一步提升稳定度指标至稳定度低于 $3 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$ 。

关键词: 原子钟; 铯原子钟; 可搬运铯原子钟; 磁选态; 光检测

中图分类号: TH714 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research on high-performance compact cesium clock using magnetic state selection and optical detection

Li Yuanhao¹, Chen Sifei¹, Liu Chen¹, Fan Lifeng¹, Wang Yanhui^{1,2}

(1. School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The article introduces a new compact cesium beam clock with a non-uniform magnetic field for state selection and a laser that resonates with D₂ 4-5 line for detection. The basic structure which contains the physical system, the optical system, and the servo system as well as the operation principle of the clock, is described. A 4U size prototype with stability of $4.0 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$, $4.5 \times 10^{-14} @ 10\,000 \text{ s}$ and $2.2 \times 10^{-14} @ 1 \text{ d}$ is realized, which is better than high performance type 5071A cesium beam clock. The clock is compared with the conventional cesium beam clock and the optically pumped cesium beam clock. The advantages and disadvantages of the clock are analyzed. Two feasible improved schemes are introduced, which are expected to further improve the stability to better than $3 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$. One scheme uses a laser that resonates with D₂ 3-2 line for detection. The other scheme uses optical pumping and non-uniform magnetic field together for state preparation.

Keywords: atomic clock; cesium clock; compact cesium clock; magnetic state selection; optical detection

0 引言

原子钟(也称量子频率标准)以原子的量子能级之间跃迁的频率作为标准,相比于传统的机械钟或天体周期运动定义的时间具有更好的稳定性和准确性。原子钟在守时授时、导航定位、精密测量等领域具有重要意义^[1]。原子钟类型众多,不同体积和功耗的原子钟在不同领域有所应用。实验室原子钟往往能够具有极高的指

标^[2],国际目前最领先的原子钟,由黄焱等^[3]构建的镱光晶格钟,已经达到 10^{-18} 秒稳, 10^{-20} 的长期稳定度。国内钙离子光频标钟也已经做到秒稳 10^{-15} 水平,不确定度 10^{-18} 水平。芯片级原子钟以超低功耗和超小体积成为领域热门^[4]。诸多其他类型原子钟的体积和功耗介于两者之间,例如可搬运铯原子钟。这类原子钟具有一定功耗和体积,但仍然可以装载在例如潜艇、舰船等大型移动平台上,或者灵活部署在需要的场所。

收稿日期:2023-07-24 Received Date: 2023-07-24

* 基金项目:教育部联合基金(8091B042103)项目资助

现行的时间定义由 Cs-133 原子给出。Cs-133 原子不受干扰的基态超精细跃迁频率被定义为 9 192 631 770 Hz^[5]。以 Cs-133 构建的铯原子钟在时频领域具有重要的作用。铯钟可以分为热束钟、冷原子钟和泡钟,相应的原子状态分别为热原子束流、经过激光冷却的冷原子和在泡中的原子蒸气。在铯原子热束钟中,根据原子态的制备和检测方式不同,又可以细分为磁选态磁检测类型^[6-7],光抽运类型^[8-10],以及本文主要介绍的磁选态光检测类型^[11-13]。

采用磁选态和光检测构建的可搬运铯原子钟(简称“磁光小铯钟”)是一种新型结构原子钟,以 Cs-133 的超精细能级跃迁的 9.19 GHz 微波频率为基准,具有较小的体积和重量。相比于传统的磁选态类型和光抽运类型具有不同的特点,主要体现在检测系统简易程度、谱线线宽、光频移和信噪比等方面。该方案自 2009 年由北京大学 Wang 团队^[11-12]提出并持续发展,在 2017 年实现了 $1.1 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 的稳定度,5 d 稳定度达到 2.7×10^{-14} ^[12],2019 年实现 $9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的稳定度^[11]。团队在近年实现最高 $4 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的稳定度,并且可以保证多台达到 $6 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$,超过可搬运铯钟的代表产品 5071A 优质型。本文将详细介绍磁光小铯钟的物理系统、光学系统以及电路系统,并介绍该结构钟的优点、待解决问题以及最新进展。本文提出两种新型改进:采用 3-2 线检测的反选型磁光小铯钟具有更好的信噪比与更小的线宽,已经在实验室平台实现 $2.9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的稳定度;采用磁选态光抽运的混合选态铯束钟通过选态磁铁的磁场对原子进行频移,舍弃了光抽运原子钟所需要的声光调制器,同时拥有更高的指标。

1 磁光小铯钟系统

1.1 物理系统

铯原子钟的物理系统多为长条管状结构,常被称为“束管”。对于磁光小铯钟,束管的结构如图 1 所示,主要包含铯炉、准直器、选态磁铁、微波腔、光检测区 5 个部分。束管内部保持 10^{-6} Pa 级别的真空。

铯炉和准直器提供具有小发散角的原子束流。图 2 所示为 Cs-133 的能级结构,铯炉中的 Cs 的在 $6S_{1/2} F=4$ 与 $6S_{1/2} F=3$ 态的分布保持相近的比例,在与微波相互作用前需要进行态制备。经过选态磁铁偏转后,不同态的原子会按照不同轨迹进行飞行,进入微波腔的原子主要为 $6S_{1/2} F=3$ 的原子,因为选态磁铁产生非均匀磁场,原子在其中受到偏转力,满足:

$$\mathbf{F} = \mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: μ_{eff} 为原子有效磁矩; \mathbf{B} 为选态磁铁产生的磁场。不同的态具有不同的原子磁矩,因此受力不同,从而按照不同轨迹运行。

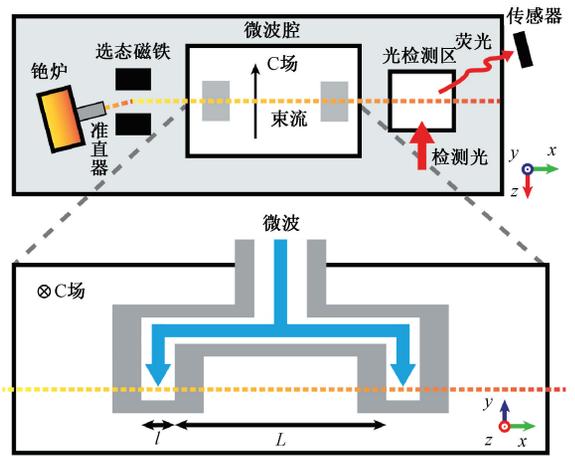


图 1 磁光小铯钟物理系统示意图

Fig. 1 Diagram of the physical system of the magneto-optical compact cesium clock

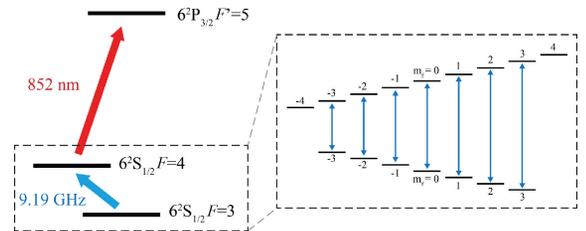


图 2 Cs-133 能级图

Fig. 2 Level energy of Cs-133

微波腔采用 Ramsey 腔,利用 Ramsey 分离场技术实现对微波频率谱的线宽压窄,形成的微波频率谱常被称作“Ramsey 曲线”。近共振条件下 Ramsey 曲线的表达式为:

$$P_\nu = \frac{1}{2} (1 + \cos(2\pi(\nu - \nu_c)T)) \sin^2(b\tau) \quad (2)$$

式中: ν 为馈入频率; ν_c 为共振频率; $T = L/v$, L 为微波腔漂移区长度; v 为原子运动速率; $\tau = l/v$, l 为微波作用区长度; $b = \mu B_{\text{mw}}/\hbar$, μ 为原子磁矩, B_{mw} 为微波磁场的振幅(相关几何物理量如图 1 所示)。微波腔的漂移区越长, Ramsey 曲线线宽越窄。微波腔内分布着垂直于束流方向的均匀磁场,为原子提供量子轴,分裂磁子能级,常被称为 C 场(C-field)。通过扫描微波频率可以获得 7 条 π 跃迁谱线(图 2 中的 7 个 $\Delta m_f = 0$ 跃迁)。图 3 所示为实际扫描得到的跃迁谱线,其中每一个跃迁谱线都包含一个缓变平台以及一个高频条纹,高频条纹即式(2)的 Ramsey 曲线,而缓变平台被称为 Rabi 台(Rabi pedestal),Rabi 台的线宽宽度与微波作用区长度 l 相关。在磁光小铯钟中, $L=0.16$ m, $l=0.01$ m。

光检测区由球面镜和光电传感器构成。球面镜能够有效地将荧光汇聚到光电传感器上,使光电传感器接收

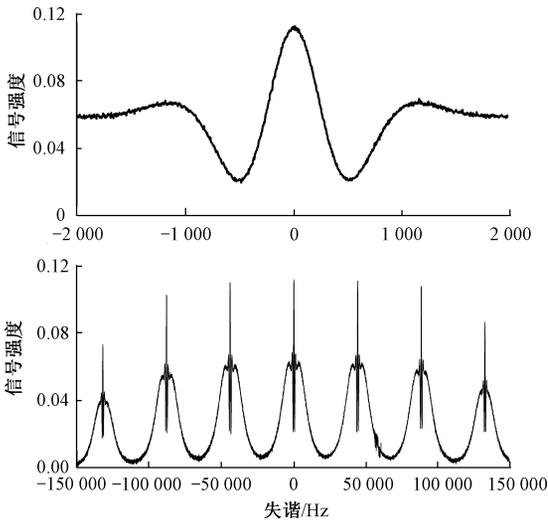


图3 Ramsey曲线,包含7条 π 跃迁谱线,中心谱线的线宽约为475 Hz

Fig. 3 Ramsey curve, contains seven π -transition spectral lines, the 475 Hz linewidth of the central fringe

更多荧光。激光采用4-5循环跃迁线,即激光频率与 $6S_{1/2} F=4 \rightarrow 6P_{3/2} F'=5$ 的跃迁共振。由于偶极跃迁选择定则, $F'=5$ 态原子在自发辐射后只会落回 $F=4$ 而不会落回 $F=3$ 态,原子反复跃迁释放荧光。荧光光强大小反映了 $F=4$ 态原子的多少,因此当微波对准 $F=3$ 和 $F=4$ 之间的9.19 GHz跃迁时,荧光信号出现极大。荧光信号用作鉴频信号,实现微波频率锁定。此外,物理系统中还包含维持内部真空的离子泵、保持内部磁场稳定的磁屏蔽等结构。

1.2 光学系统

由于采用光检测方案,磁光小铯钟需配备光学系统。光学系统的结构如图4所示,具有结构简易与小型化的特点。

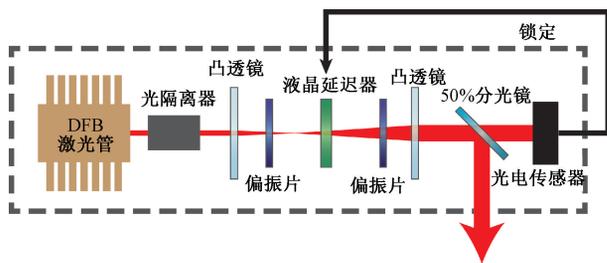


图4 光学系统示意图

Fig. 4 Diagram of the optical system

光学系统所选择的分布式反馈(distributed feedback, DFB)激光管在大范围内不出现跳模,对于可搬运原子钟来说十分重要,这保证了长期运行与开关机复现的可靠性。光斑被放大到直径5 mm左右。经50%分光镜分光

后,一路进入光电传感器用于检测光强,配合液晶延迟器进行光强锁定,另一路射入物理系统与原子相互作用进行光检测。

由于不需要光抽运铯钟所需要的抽运光,光学系统中省去了声光调制器(acousto-optical modulator, AOM)等移频元件。当激光频率对准原子4-5循环跃迁线时,原子会释放荧光,因此荧光除了可以用于产生微波频率的误差信号,也可以用于产生激光频率的误差信号。原子束流的荧光信号对应的激光谱常被称为“束谱”。利用束谱可以对激光频率进行锁定。由于检测光基本与束流垂直,束谱没有一阶多普勒效应^[14]。

1.3 电路系统

电路系统主要由模拟电源、微波模块、伺服模块、高压模块4部分构成,结构如图5所示。模拟电源向伺服模块供电,伺服模块以及包含在伺服模块中的稳压电路进一步向微波模块、高压模块、C场线圈、铯炉加热丝、各个光电传感器、激光管等元件供电。伺服模块由FPGA和外围电路组成。

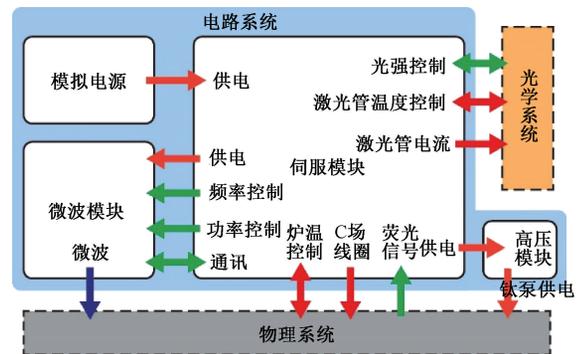


图5 电路系统结构

Fig. 5 Diagram of the circuit system

微波模块内置10 MHz恒温晶振,该晶振的信号最终用于原子钟输出。10 MHz信号通过倍频系统产生9.19 GHz,倍频系数可以进行设定与修改。在微波模块中,9.19 GHz的调制通过周期性修改倍频系数实现。设 f_0 为中心频率, Δf 为调制深度, f_m 为调制频率时,可则倍频系数为:

$$k_1 = \frac{f_0 - \Delta f}{10.0 \text{ MHz}}, k_2 = \frac{f_0 + \Delta f}{10.0 \text{ MHz}}$$

当倍频系数在 k_1, k_2 之间以 f_m 为频率切换时,即可实现频率点的周期性变化,即微波频率调制。对荧光信号进行解调后得到误差信号,通过比例-积分-微分(PID)锁定对压控晶振的压控电压进行调节即实现微波频率闭环锁定。综上,磁光小铯钟属于被动式原子钟^[15-16]。

除微波频率锁定回路,在电路系统中有其他多个锁定回路,包括微波功率锁定,C场强度锁定,原子炉温度锁定以及与光学系统相关的光强锁定、激光管温度锁定和激光频率锁定。其中与光学系统相关的锁定和原子炉温度锁定采用模拟锁定,微波功率锁定,C场强度锁定采用数字锁定。

在微波功率锁定回路中,伺服系统增加对微波功率的调制并对荧光信号强度进行解调以确认微波功率是否处于使荧光信号最大的优值。在C场强度锁定回路中,C场线圈电流被动态调节以实现0-0线峰值频率与1-1线峰值频率具有一个固定的频差。其中1-1线指图2中标出的 $F=3, m_f=1 \rightarrow F=4, m_f=1$ 微波跃迁。该方式可以等效实现C场强度的锁定。Cs-133基态微波跃迁的塞曼效应由 Breit-Rabi 公式给出^[17]:

$$\nu_c = \nu_0 + 700\ 830m_F H + 26.715(16 - m_F^2)H^2 \quad (3)$$

式中: ν_c 为谱线共振频率; ν_0 为无磁场共振频率; H 为磁场大小; m_F 为上下能级的磁量子数(因为为 π 跃迁,所以上下能级磁量子数一致)。从式(3)可以看出,1-1线频率($m_F=1$)和0-0线频率的差只与磁场大小 H 相关,因此可用于锁定磁场。实际操作为将倍频系数在 k_1 、 k_2 增加一定值,使得频点改为1-1线的峰值左右两侧。C场强度被锁定在60 mGuass左右,可计算出1-1线和0-0线频差为42 kHz,此时将倍频系数改为:

$$k_1' = \frac{f_0 - \Delta f + 42\text{ kHz}}{10.0\text{ MHz}}$$

$$k_2' = \frac{f_0 + \Delta f + 42\text{ kHz}}{10.0\text{ MHz}}$$

即可实现频点切换。之后对压控晶振电压进行调制,对荧光信号强度进行解调,用PID计算后将修正量修正到C场线圈的电流上,通过对C场电流的动态调节实现C场强度锁定。

微波功率锁定,C场强度锁定和微波频率锁定需要分时进行,此时微波频率锁定会存在死区时间(dead time)。分时方案为在每100 s内分别进行一次1 s的微波功率锁定与C场强度锁定。由于在1 s内本振(即压控晶振与微波倍频系统)的稳定度优于量子系统的稳定度,加之有98%的时间进行微波频率锁定,每100 s中2 s的死区时间并不会对微波频率锁定造成较大影响。

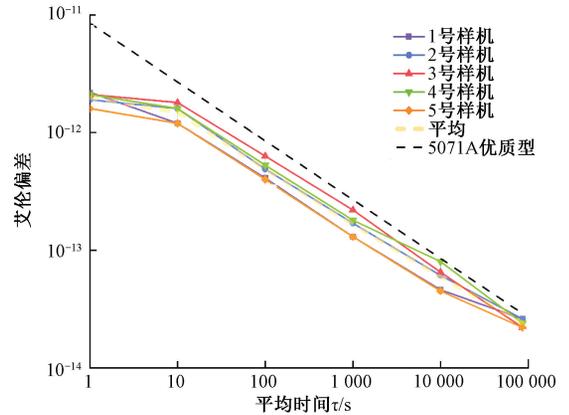
2 磁光小铯钟的特性与指标

2.1 磁光小铯钟稳定度指标

本文研制的BD1024型磁光小铯钟,标准4U机箱大小,220 V@50 Hz交流电供电,具有较好的可搬运性。整机样机实物图如图6(a)所示,多台可搬运整机的测试稳定度指标如图6(b)所示。



(a) BD1024的4U整机实拍
(a) Picture of the 4U size prototype BD1024



(b) 多台整机稳定度指标
(b) Frequency stability of multiple prototypes

图6 BD1024 整机特性

Fig. 6 Features of the BD1024 prototype

通过对原子炉温度、检测光光强、微波调制深度等参数进行扫描,并综合物理系统的寿命以及稳定性,实现对铯原子钟指标的优化^[18]。在众多参数中,束光学参数为重点研究对象。束光学参数较难进行实验测试,但直接影响束原子钟的指标。在束光学理论计算中,主要采用蒙特-卡洛方法(Monte-Carlo)进行仿真,获得合适的准直器角度与位置的理论结果;实验验证则通过动态台实验进行。动态台实验中,微波腔、检测区以及铯原子炉、准直器与可搬运整机大小相同,区别在于在铯原子炉和准直器上增加了一个由步进电机驱动的平台,该步进电机可以提供0.1 mm的步进并在真空环境工作。在实验的进一步验证下,团队得到了合适的准直器角度与位置,有效指导对实际的物理系统的装配以及优化。

通过优化,磁光小铯钟的稳定度指标从2017年的 $1.1 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ 提升至指标超过Microchip 5071A优质型(原惠普公司5071A)。在稳定度测试中,团队测试了5台样机,结果如图6(b)所示,平均指标在 $6 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 左右。其中最佳的5号样机具体指标如表1所示。

表1 最佳样机稳定度指标

Table 1 The stability data of the best prototype

平均时间/s	1	10	100	1 000	10 000	86 400
艾伦偏差	1.6×10^{-12}	1.2×10^{-12}	4.0×10^{-13}	1.3×10^{-13}	4.5×10^{-14}	2.2×10^{-14}

2.2 3种热束铯钟技术比较

磁光小铯钟、传统磁选态磁检测铯钟和光抽运铯钟的鉴频信号噪声类型均为白噪声,原子钟的稳定度如下^[19]:

$$\sigma = \frac{1}{K} \frac{\delta\nu}{\nu_c} \frac{1}{SNR} \frac{1}{\sqrt{\tau/s}} \quad (4)$$

式中: K 为与共振线型有关的常数; $\delta\nu$ 为线宽; ν_c 为跃迁共振频率; τ 为采样时间; s 为单位秒。对于3种原子钟,主要差别在信噪比和线宽方面。

信噪比(SNR)的影响因素较多,由物理系统决定的影响因素主要有原子束强和选态纯度。若单位时间内检测 N 个原子,原子之间相互作用较弱,则散粒噪声正比于 \sqrt{N} 。磁选态本身通过舍弃 $F=4$ 态原子实现态制备,因此束强小,散粒噪声大,信噪比低。从原子束强角度,在相同的铯原子消耗速率下,磁光小铯钟和磁选态磁检测铯钟的束强小于光抽运铯钟。

选态纯度方面,采用光检测方案时,若选态后原子束中包含 $F=4$ 且 $m_F \neq 0$ 态的原子时,这部分原子不会参与微波跃迁,但会在光检测时释放荧光。这意味着此部分荧光对鉴频信号无贡献,仅贡献噪声,因此进一步恶化信噪比^[20]。在光抽运钟中,若抽运效率低,该问题影响较大。磁光小铯钟具有类似的问题。在强磁场下, $F=4$, $m_F = -4$ 与 $F=3$ 态原子具有相似的磁场频移, $F=4$ 的其他磁子能级具有相反的频移,因此在进行磁选态时, $F=4$, $m_F = -4$ 态原子会掺入 $F=3$ 的原子束中。在磁选态磁检测结构中, $F=4$, $m_F = -4$ 态原子会在第2个非均匀磁场中被大量偏转,影响较小,因此基本不具有和光抽运钟以及磁光小铯钟相似的 $F=4$, $m_F \neq 0$ 态杂散原子问题。

非均匀磁场在进行选态的同时,也具有选速的作用。经过选态磁铁后,原子整体速度更慢。光检测方案中,由

于慢速原子通过光场时间长,释放更多荧光,从而增加了慢速原子在等效速度分布上的占比。磁光小铯钟虽然比磁选态磁检测型铯钟少了一个选态磁场,但由于有光检测带来的等效减速效果,因此谱线线宽相当。整体而言,磁光小铯钟与磁选态磁检测铯钟的微波谱线线宽相比于光抽运铯钟窄许多。

磁光小铯钟的检测方式相对于其他两种铯钟结构具有较大优势。磁检测方案引入了第2个非均匀磁场、热丝和电子倍增器。原子触碰热丝后转化为离子并通过倍增增强信号。电子倍增器的增益随时间衰减严重。虽然可以通过不断增大电子倍增器电压的方法维持增益,但当电压达到最大允许电压时,电子倍增器将不能工作,整钟寿命终结^[6]。磁光小铯钟和光抽运钟采用光检测方案,因此没有上述问题。而相比于光抽运钟,磁光小铯钟只使用一束光,不需要使用 AOM 等移频元件进行移频。因此磁光小铯钟光学系统更简易,可靠性与长期稳定性也更高。

磁光小铯钟由于采用光检测,也和光抽运钟一样存在光频移。本文研制的磁光小铯钟目前的光频移在 $10^{-12}/\text{mW}$ 水平,通过锁定光强基本可以解决光频移对短期稳定度的影响,但光频移仍会影响准确度、复现性和长期稳定度。本文提出了两种方案解决磁光小铯钟的光频移问题。一种办法为采用双光检测,通过额外引入一束拥有负光频移的失谐光,两个光的光频移相互抵消实现零光频移^[21]。另一种办法为采用特定频率和占空比脉冲光检测,只检测束流上一部分原子,通过在恰当的时机断光来保证这一部分原子与微波作用时不受到光照,从而实现抑制光频移^[22]。

3种热束铯钟方案的特点如表2所示。不同类型铯钟有各自的优势与问题。

表2 不同热束钟方案对比

Table 2 Comparison of different thermal beam clock schemes

类型	原子束强	选态程度与噪声	检测系统	谱线线宽	光频移
磁选态光检测	小	选态后混入的 $F=4$, $m_F = -4$ 影响噪声	简易,只有一束光,不需要移频	窄	有
磁选态磁检测	小	选态后混入的 $F=4$, $m_F = -4$ 对噪声影响小	复杂,寿命受限于倍增系统	窄	无
光抽运光检测	大	抽运不充分时混入的 $F=4$, $m_F \neq 0$ 影响噪声	复杂,需要两束不同频率光	宽	有

3 未来展望

磁光小铯钟设计可以进一步优化。例如,通过非均匀磁场选择 $F=4$ 态并采用 $3-2(F=3 \rightarrow F'=2)$ 循环跃迁线进行光检测,可以解决混入 $F=3$ 的原子束中的 $F=4$, $m_F=-4$ 态原子带来的负面影响^[23]。另一方面,这种选态方式也会使原子的速度更慢、速度分布更窄,从而产生线宽更窄的 Ramsey 共振图样。该方案带来的挑战为使用光检测时,需要检测 $F=3$ 态原子,但在使用该循环跃迁线时,会出现量子布居囚禁效应,即由于基态磁子能级之间的相干性,原子不会被跃迁到激发态 $F'=2$ 态,从而不会释放荧光。在光检测区引入一个强磁场(约为 3 Guass)对磁子能级进行频移,破坏原有的相干性,即可恢复了荧光。实现了该方案的初步验证,使稳定度指标提升到了 $2.9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 。图 7 和 8 所示为该方案的初步测试结果。基于该方案的可搬运样机研发正在进行中,有望进一步提高磁光小铯钟的稳定度指标。

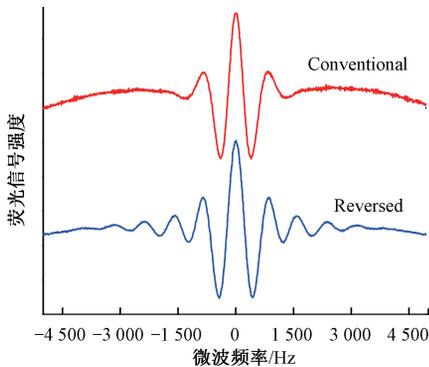


图 7 两种选态-检测组合方案的 Ramsey 曲线的对比

Fig. 7 The Ramsey pattern of the conventional scheme and the new scheme

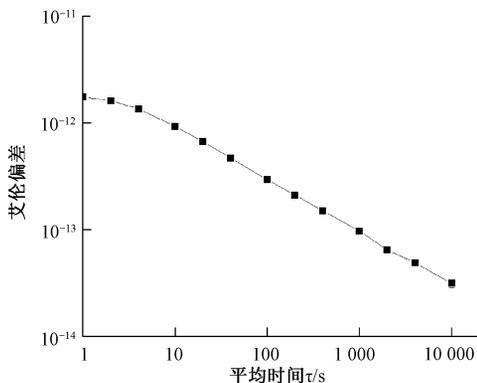


图 8 新方案的稳定度指标

Fig. 8 The frequency stability of the new type

在磁偏转的基础上进一步增加光抽运可以解决原子束强小的问题。光抽运的引入几乎不会影响原子的运动轨迹,因此基于原有结构的束光学分析仍然有效。另一方面,采用光抽运-磁选态的混合方案提供了一种“同频光抽运检测”的可行性,即使用 $4-5$ 循环跃迁线同时进行光抽运与光检测。常见的铯原子光抽运方式为采用与 $F=4 \rightarrow F'=4$ 共振的频率光,因此与检测光 $F=4 \rightarrow F'=5$ 存在一个 251 MHz 的频移,通常使用 AOM 实现该频移。在采用混和选态时,可以利用选态磁铁弥散出的磁场对原子能级进行频移,使得 $F=4 \rightarrow F'=5$ 的共振频率光也可以实现抽运的效果,省去了额外设备提供频移,实现“同频光抽运检测”。选态磁铁的磁极头磁场大小略大于 1 T,因此可以在光抽运区提供约为 300 Guass 的磁场以实现上述效果。目前已经在实验中观察到了这种同频光抽运检测的现象,如图 9 所示,更进一步的实验正在开展。

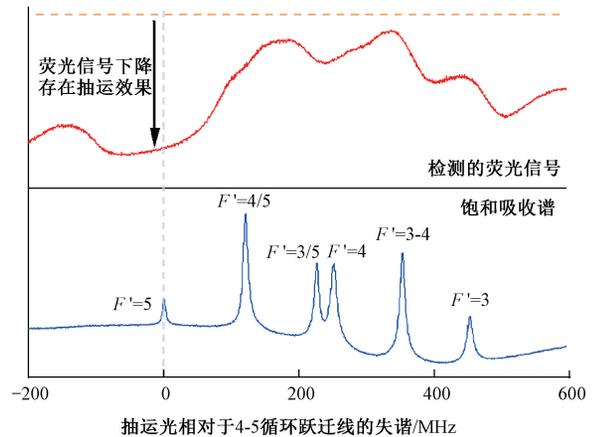


图 9 被选态磁铁影响后的光抽运效果与 D_2 线饱和吸收谱与被选态磁铁影响后的光抽运效果对比

Fig. 9 Fluorescence signal and D_2 line saturation absorption spectrum vs. frequency of pumping light

4 结 论

磁选态光检测铯原子钟已实现 4U 原理样机,多台样机稳定度约为 $6 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, 最佳样机稳定度达到 $4.0 \times 10^{-13} @ 100 \text{ s}$, $4.5 \times 10^{-14} @ 10000 \text{ s}$, 超过可搬运铯钟的代表产品 5071A 优质型。磁选态光检测铯原子钟作为一种新结构原子钟,相比于磁选态磁检测与光抽运原子钟有着不同的优势与待解决问题。优势主要包括舍弃热丝、偏转磁铁、电子倍增器等元件,延长寿命;只有一束光并可以通过束谱锁定,光学系统简洁;具有更小的微波谱线宽。原子束强小,选态后原子束混有 $F=4$ 态原子,信

噪比低和光检测引入光频移都是有待解决的问题。目前的设计仍有较大的优化空间,有望实现稳定度的进一步改善。

参考文献

- [1] 张继海,董绍武,袁海波,等. 北斗三号非差组合载波相位时间比对性能分析[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(11): 45-53.
ZHANG J H, DONG SH W, YUAN H B, et al. The performance analysis of BeiDou-3 undifferenced combined carrier phase time comparison[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 45-53.
- [2] HALL J L. Defining and measuring optical frequencies: The optical clock opportunity-and more (Nobel lecture)[J]. Chemphyschem, 2006, 7(11): 2242-2258.
- [3] 黄焱,王玉琢,林弋戈,等. 钙离子光频标钟跃迁绝对频率测量[J]. 计测技术, 2022, 42(5): 86-96.
HUANG Y, WANG Y ZH, LIN G G, et al. Absolute frequency measurement of Ca⁺ optical frequency standard clock transition [J]. Metrology and Measurement Technology, 2022, 42(5): 86-96.
- [4] 杨巧会,潘多,陈景标. 芯片级原子钟研究进展[J]. 真空电子技术, 2023(1): 1-11.
YANG Q H, PAN D, CHEN J B. Research progress of chip-scale atomic clocks [J]. Vacuum Electronics, 2023(1): 1-11.
- [5] 房芳,张爱敏,林弋戈,等. 时间:天文时-原子秒-基于常数重新定义秒[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2021, 51(7): 105-115.
FANG F, ZHANG A M, LIN G G, et al. Time: Astronomical time-atomic time-redefining second based on constant [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2021, 51(7): 105-115.
- [6] 陈江,王骥,马沛,等. LIP Cs3000C 磁选态铯原子钟的测试[J]. 时间频率学报, 2018, 41(3): 190-193.
CHEN J, WANG J, MA P, et al. Test of magnetic-selected cesium atomic clock LIP Cs3000C [J]. Journal of Time and Frequency, 2018, 41(3): 190-193.
- [7] KALLIOMAKI K, MANSTEN T, MANNERMAA J. Short and long term stability of HP CS standards including environmental effects; proceedings of the 2004 18th European Frequency and Time Forum (EFTF 2004), F 5-7 April 2004, 2004[C].
- [8] 赵杏文,韦强,李东旭,等. 激光抽运小型铯原子钟研制进展[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 1-8.
ZHAO X W, WEI Q, LI D X, et al. Progress on optically pumped cesium beam frequency standard [J]. Journal of Time and Frequency, 2022, 45(1): 1-8.
- [9] XIE W, WANG Q, HE X, et al. Frequency instability of a miniature optically pumped cesium-beam atomic frequency standard[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(7): 074705.
- [10] HE X, FANG S, YUAN Z, et al. Compact optically pumped cesium beam atomic clock with a 5-day frequency stability of 7×10^{-15} [J]. Applied Optics, 2021, 60(34): 10761-10765.
- [11] LIU C, WANG S, CHEN Z, et al. Optical detection in magnetic state-selection Cs beam tubes for transportable Cs beam clocks [J]. Measurement Science and Technology, 2019, 30(7): 075044.
- [12] LIU C, WANG S, CHEN Z, et al. A caesium atomic beam microwave clock detected by distributed feedback laser diodes[C]. 2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFCS). IEEE, 2017.
- [13] LIU C, ZHOU S, WANG Y. Noise investigation on optical detection in a cesium beam clock with magnetic state selection[C]. 2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (IFCS/EFTF). IEEE, 2015.
- [14] GERGINOV V, TANNER C E. Fluorescence of a highly collimated atomic cesium beam: Theory and experiment[J]. Optics Communications, 2003, 222(1-6): 17-28.
- [15] 潘志兵,谢勇辉,帅涛,等. 小型化星载被动型氢原子钟研制 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 105-112.
PAN Z B, XIE Y H, SHUAI T, et al. Development of mini space passive hydrogen maser [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 105-112.
- [16] 张佳,史田田,缪健翔,等. 主动光钟研究进展[J]. 计测技术, 2023, 43(3): 1-16.
ZHANG J, SHI T T, MIAO J X, et al. Research progress of active optical clock [J]. Metrology and

- Measurement Technology, 2023, 43(3): 1-16.
- [17] 王义遒, 王庆告, 傅济时, 等. 量子频标原理[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
WANG Y Q, WANG Q G, FU J SH, et al. Quantum Frequency Standard[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [18] LIU C, CHEN S, CHEN Z, et al. Improving the short-term frequency stability of a magnetic-state-selected cesium beam clock with optical detection[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(7): 073302.
- [19] VANIER J, AUDOIN C. The Quantum Physics of Atomic Frequency Standards [M]. Adam Hilger: Bristol and Philadelphia, 1989.
- [20] CHEN S, LIU C, XU S, et al. Beam optics analysis on magnetic-state-selected atomic clocks with optical detection [J]. Journal of Applied Physics, 2022, 131(11): 114401.
- [21] XU S, CHEN S, LIU C, et al. Optimization of frequency shifts in optically detected magnetic-state-selection cesium beam atomic clocks [J]. Europhysics Letters, 2021, 136(2): 23002.
- [22] LI Y, XU S, CHEN S, et al. Light shift suppression with pulsed light detection in magnetic-state-selected cesium beam clocks [J]. Optics Express, 2022, 30(24): 43271-43280.

- [23] CHEN S, LIU C, FAN L, et al. A new magnetic state selection method in high-performance optically detected compact cesium beam clocks [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, DOI: 10.1063/5.0147451.

作者简介



李源昊, 2022年于北京大学获得学士学位, 现为北京大学博士研究生, 主要研究方向为小型铯原子钟和原子钟中的光偏移。

E-mail: liyuanhao39@pku.edu.cn

Li Yuanhao received his B. Sc. degree from Peking University in 2022. He is currently a Ph. D. candidate at Peking University. His main research interests include compact cesium clock and light shift in atomic clocks.



王延辉(通信作者), 2002年于北京师范大学获得学士学位, 2007年于北京大学获得博士学位, 现为北京大学副教授, 主要研究方向为铯钟和铷钟。

E-mail: wangyanhui@pku.edu.cn

Wang Yanhui (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing Normal University in 2002, and Ph. D. degree from Peking University in 2007. Now he is an associate professor at Peking University. His main research interests include cesium clock and rubidium clock.