

基于双光子跃迁的铷原子光学频率标准

张炯阳 翟浩 王骥 肖玉华 代虎 廉吉庆 杨世宇 陈江 刘志栋

Rubidium atomic optical frequency standard based on two-photon transition

ZHANG Jiong-yang, ZHAI Hao, WANG Ji, XIAO Yu-hua, DAI Hu, LIAN Ji-qing, YANG Shi-yu, CHEN Jiang, LIU Zhi-dong

引用本文:

张炯阳, 翟浩, 王骥, 肖玉华, 代虎, 廉吉庆, 杨世宇, 陈江, 刘志栋. 基于双光子跃迁的铷原子光学频率标准[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2024-0120

ZHANG Jiong-yang, ZHAI Hao, WANG Ji, XIAO Yu-hua, DAI Hu, LIAN Ji-qing, YANG Shi-yu, CHEN Jiang, LIU Zhi-dong. Rubidium atomic optical frequency standard based on two-photon transition[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2024-0120

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0120>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

在体跨尺度双光子显微成像技术

In-vivo across-scales two-photon microscopic imaging technique

中国光学 (中英文). 2022, 15(6): 1167 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0086>

光子辅助Fano共振隧穿周期双阱势特性

Photon-assisted Fano resonance tunneling periodic double-well potential characteristics

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1251 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0068>

光学频率梳的相干合成研究进展

Research progress on coherent synthesis of optical frequency comb

中国光学 (中英文). 2021, 14(5): 1056 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0071>

量子点发光二极管稳定性提高策略

Strategies for improving the stability of quantum dots light-emitting diodes

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 117 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0184>

Ni^{2+} 掺杂和卤素空位填充协同抑制 CsPbBr_3 纳米晶体中的离子迁移

Suppressed ion migration in halide perovskite nanocrystals by simultaneous Ni^{2+} doping and halogen vacancy filling

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 77 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0060>

二维过渡金属硫族化合物中的缺陷和相关载流子动力学的研究进展

Progress on defect and related carrier dynamics in two-dimensional transition metal chalcogenides

中国光学 (中英文). 2021, 14(1): 18 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0106>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-14

基于双光子跃迁的铷原子光学频率标准

张炯阳¹, 翟浩^{1,2}, 王骥^{1*}, 肖玉华¹, 代虎¹, 廉吉庆¹, 杨世宇¹, 陈江¹, 刘志栋¹
(1. 兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃兰州, 730000;
2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京, 100083)

摘要: 精确计时对国民经济发展、科学技术进步以及国防军事安全等领域至关重要。基于双光子跃迁的光学频率标准因其稳定度高、复现性好和易于小型化等显著优势, 有望成为实际可用的小型化光频标。本文简要阐述了双光子跃迁的基本原理, 介绍了国内外基于双光子跃迁的铷原子光频标的研究现状和进展, 最后分析总结出未来基于双光子跃迁的铷原子光学频率标准的发展趋势为系统小型化、性能指标提升以及集成应用与工程化。

关键词: 双光子跃迁; 光频标; 稳定度; 小型化

中图分类号: TM935.11 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2024-0120 CSTR: 32171.14.CO.2024-0120

Rubidium atomic optical frequency standard based on two-photon transition

ZHANG Jiong-yang¹, ZHAI Hao^{1,2}, WANG Ji^{1*}, XIAO Yu-hua¹, DAI Hu¹, LIAN Ji-qing¹, YANG Shi-yu¹,
CHEN Jiang¹, LIU Zhi-dong¹

(1. *Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, 730000, China;*

2. *School of Instrumentation and Optoelectronic Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China*)

* *Corresponding author, E-mail: 20138295@qq.com*

Abstract: Precise timing plays a vital role in national economic development, scientific and technological progress, national defense and military security. The optical frequency standard based on two-photon transition is expected to become a practical miniaturized optical frequency standard due to its significant advantages such as high stability, good reproducibility and easy miniaturization. In this paper, the basic principle of two-photon transition is briefly described, and the research status and progress of rubidium atomic optical frequency standards based on two-photon transition at home and abroad are introduced. Finally, it is concluded that the future development trends of rubidium atomic optical frequency standards based on two-

收稿日期: 2024-07-12; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 军科委创新特区项目 (No. 23-XXXX-015); 中国航天科技集团有限公司钱学森青年基金项目; 甘肃省领军人才计划资助项目 (No. 2023-LJRC-366); 国家自然科学基金项目 (No. U2341247)

Supported by The Project of National Defence Innovation Zone of Science and Technology Commission of CMC, China (No. 23-XXXX-015); The Qian Xuesen Youth Innovation Fund of China Aerospace Science and Technology Corporation; The Project of Leading Talents of Gansu Province (No. 2023-LJRC-366); The National Natural Science Foundation of China (No. U2341247)

photon transition is system miniaturization, performance improvement, integrated application and engineering.

Key words: two-photon transition; optical frequency standard; stability; miniaturization

1 引言

精确计时对国民经济发展、科学技术进步以及国防军事安全等领域至关重要。卫星导航系统、通信系统、导弹与卫星控制、天文观测、引力波测量、深空探测、大地测量、网络系统等都依赖于精确计时^[1-10]。国际时间频率咨询委员会(CCTF)对秒定义的变革也迫在眉睫,未来将成为天地一体化时间同步系统的主导。原子钟以原子不同能级间的稳定跃迁为参考,是精确的时频测量装置,根据激发原子跃迁的电磁波所处的不同频段,可以将原子钟分为微波原子钟和光学原子钟。

铷钟^[11-13]、铯钟^[14-17]、氢钟^[18-20]等传统原子钟在重量、体积、功耗和稳定度等方面都有各自的优势,是应用较为广泛的微波原子钟。冷原子微波钟的频率稳定度达到了 $1.6 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,准确度达到 10^{-16} 水平^[21-25],并于2016年实现了空间的搭载测试^[26-27],基于各向同性冷却的积分球冷原子钟的小型化和工程化工作也在有序开展^[28-30]。汞离子微波钟经过在轨性能验证,具有 3×10^{-16} /天的低频率漂移率,有望成为下一代星载原子钟^[31]。目前,基于微波频段的频标技术已经日趋成熟,频率稳定度在 $10^{-12} \sim 10^{-14} \tau^{-1/2}$ 的水平,其性能指标很难再进一步得到较大提升。

光波段跃迁的光学频率标准(简称光频标),工作频率较微波频率高4~5个数量级,理论上具有更高的Q值和频率稳定度,有望成为新的秒定义^[32]。基于中性原子光晶格技术和离子囚禁技术的光频标频率稳定度达到 $4.8 \times 10^{-17} \tau^{-1/2}$,系统频移不确定度已经达到 6×10^{-19} ^[33-36]。得益于光频梳技术的发展,光频标的高频率稳定度可以高相干地传递到射频频段,使得光学原子钟成为实际可用的光学频率标准^[37-38]。德国通信导航研究所(DLR)提出的开普勒计划将在每颗卫星上搭载星载光频标,以提高定位授时的精度^[39]。国内外部分研究小组还开展了可移动高精度光钟的研制工

作^[40-42],中国科学院国家授时中心的铯原子光晶格钟也于2022年发射升空^[43]。中性原子光晶格钟、离子光钟等高精度光钟具有出色的频率稳定性能,但是复杂的激光光路和庞大的真空系统在短时间内难以满足星载等应用对原子钟小体积、低功耗的实际需求。因此,研究能够满足未来时频测量和传递应用的小型化光学原子频标技术就变得尤为重要。

小型化光学原子频标以光频跃迁作为量子参考跃迁,利用气室中的原子、分子或原子束,能够获得相对较高的频率稳定度,很好地弥补了传统微波钟和高精度光钟之间的频率稳定度空白,研究较多的有碘分子调制转移谱光频标、铷原子调制转移谱光频标、钙原子束光频标和铷原子双光子跃迁光频标等多种方案。碘分子调制转移谱光频标将激光的频率稳定度提升至秒稳 4×10^{-15} ,在万秒内频率稳定度优于 6×10^{-15} ,德国洪堡大学(DLR)与其合作者成功研制了小型化碘分子光钟工程样机并在探空火箭上完成搭载验证^[44],但是长期稳定度还有待提升^[45-47]。铷原子调制转移谱光频标虽然也可以达到 4.5×10^{-14} 的1s频率稳定度,受限于剩余幅度调制噪声和环境温度变化的限制,在10s左右就达到了闪变平台,长期稳定度需要进一步研究和优化^[48-50]。钙原子束光频标的频率稳定度达到 $5.5 \times 10^{-14} \tau^{-1/2}$,但仍然需要真空腔体和超稳光学腔实现对激光器的预稳定^[51-52]。

双光子跃迁利用对向传播的激光,消除了多普勒频率展宽,获得的跃迁谱线线宽接近原子的自然线宽,在氢、钠、铷等原子系统中被广泛研究,并在长度基准“米”的定义^[53]和频率标准的实现^[54-58]以及物理常数的测量^[59-61]中发挥了重要的作用,得到了法国、美国、澳大利亚等多个国家的持续研究发展。双光子跃迁光频标利用气室中的热原子可以实现频率稳定,因其体积小、频率稳定度高等优势,被认为是美国下一代导航卫星用星载原子钟的有力候选者^[62]。

本文就基于双光子跃迁的铷原子频率标准进行了综述,首先对双光子跃迁光频标的基本原理

进行了介绍, 针对国内外双光子跃迁铷原子光频标的研究现状进行了梳理和总结, 并对双光子跃迁光频标未来的发展趋势进行了分析。

2 基本原理

双光子跃迁通过吸收两个光子来激发原子跃迁, 采用适当的构型可以消除原子跃迁谱线的多普勒展宽, 使谱线线宽接近原子的自然线宽。其基本原理已在多篇文献中都进行了分析^[63,64]。

对于速度为 \mathbf{v} 的原子与频率为 ω_1 和 ω_2 (对应波矢分别为 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2) 的两束激光作用后, 发生双光子跃迁的概率 Γ_{if} 如(1)式所示^[65]:

$$\Gamma_{if} \propto \frac{\gamma_{if} I_1 I_2}{[\omega_{if} - \omega_1 - \omega_2 - \mathbf{v} \cdot (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2)]^2 + (\gamma_{if}/2)^2} \left| \sum_k \frac{\mathbf{D}_{ik} \cdot \mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{D}_{kf} \cdot \mathbf{e}_2}{\omega_{ki} - \omega_1 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}_1} + \frac{\mathbf{D}_{ik} \cdot \mathbf{e}_2 \cdot \mathbf{D}_{kf} \cdot \mathbf{e}_1}{\omega_{ki} - \omega_2 - \mathbf{v} \cdot \mathbf{k}_2} \right|^2, \quad (1)$$

式中 I_1 、 I_2 为两束激光的光强, γ_{if} 为谱线的均匀展宽宽度, ω_{ik} 和 \mathbf{D}_{ik} 分别为能级 i 和能级 f 之间的跃迁频率和跃迁矩阵元, \mathbf{e}_1 和 \mathbf{e}_2 为偏振单位矢量。第一项描述了双光子跃迁的谱线线型, 当激光线宽远小于 γ_{if} 时, 获得的跃迁谱线是洛伦兹线型, 谱线宽度接近原子的自然线宽。实际获得的跃迁谱线是洛伦兹线型与幅度很弱的多普勒线型的叠加, 多普勒展宽来源于同向传播的两个光子与原子发生的双光子跃迁, 通过选择合适的偏振结构可将多普勒背景消除^[66]。第二项描述了双光子跃迁的跃迁概率。从(1)式中可以看出, 双光子跃迁的概率与激光的光强成正比, 意味着光强越强, 对应原子跃迁的信号强度也就越强。

考虑两束相反传播的激光 \mathbf{k}_1 和 \mathbf{k}_2 , 在实验室坐标系下, 速度为 \mathbf{v} 的原子吸收两个光子的共振条件为:

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1)/\hbar = \omega_1 - \mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{v} + \omega_2 - \mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{v} = \omega_1 + \omega_2 - (\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \cdot \mathbf{v}, \quad (2)$$

当两束激光频率完全相同时 $\mathbf{k}_1 = -\mathbf{k}_2$, 上式中与速度相关的项被抵消, 在两束激光重叠范围内的所有原子都可以发生双光子跃迁。不同于饱和和吸收谱只作用于特定速度的原子, 双光子跃迁对所有速度的原子都是适用的, 这在一定程度上弥补了双光子跃迁效率的不足。

图 1(a) 是铷原子双光子跃迁的能级图, 处于基态 $5^2S_{1/2}$ 的原子吸收两个光子后被激发至 $5^2D_{5/2}$ 态, 之后原子将沿 $5^2D_{5/2} \rightarrow 6^2D_{3/2} \rightarrow 5^2S_{1/2}$ 的路径自发辐射, 并辐射 420nm 的荧光, 对该荧光收集就可以得到双光子跃迁谱线的信息。D. Sheng 等人测量了 $5^2D_{5/2}$ 态的能级寿命为 238.5 (2.3) ns, 对应该双光子跃迁谱线的自然线宽约为 330 kHz^[67]。图中①、②两条跃迁路径分别对应双色和单色双光子跃迁。双色场跃迁中原子分别吸收 776 nm 和 780 nm 的光子, 与中间态能级的失谐仅为几个 GHz, 具有较大的跃迁几率。单色场中的双光子跃迁, 原子吸收相反传播的两个 778 nm 的光子, 与中间态能级的失谐为 ~ 1 THz, 双光子跃迁几率较双色场中低数个量级。图 1(b) 是实际测量得到的铷原子 $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ 双光子跃迁谱线图^[68]。

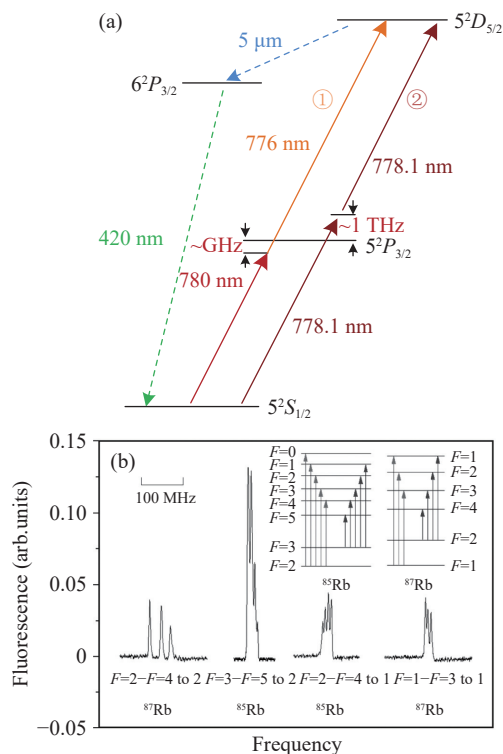


图 1 (a) 铷原子双光子跃迁的能级图及 (b) 铷原子双光子跃迁能级图^[68]

Fig. 1 (a) Energy level diagram of two-photon transition of rubidium atom and (b) Energy level diagram of two-photon transition of rubidium atom^[68]

铷原子双光子跃迁系统的组成示意图如图 2 所示。反向传播的两束激光经透镜聚焦后光斑直径仅为几百 μm , 气室中的铷原子与激光作用后发

生双光子跃迁,原子自发辐射的荧光信号非常微弱,通常只有几十 pW,因此采用光电倍增管这种灵敏度高、线性度好的光电探测器对荧光进行收集,即可得到双光子跃迁谱线。通过对跃迁谱线信号微分得到锁频的误差信号,最终通过反馈控制单元实现对激光频率的锁定。提高原子气室的温度可以增加气室中铷原子的密度,在一定范围内能够有效提升谱线的信噪比。

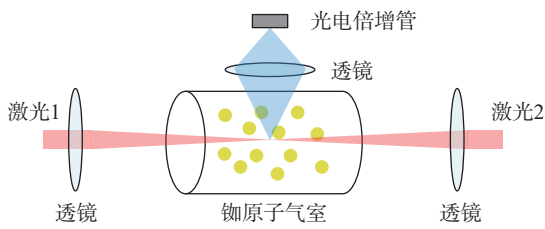


图2 双光子跃迁系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of two-photon transition system

3 基于双光子跃迁的铷原子光频标研究现状

L.S.Vasilenko 等人在 1970 年首次提出,原子在驻波场中发生双光子跃迁时多普勒效应将被消除,获得的跃迁谱线线宽是原子的自然线宽^[63]。该想法于 1974 年分别由法国的 F.Biraben 和美国 M.D.Levenson 两个研究小组利用脉冲激光在钠原子蒸汽中进行了证实^[66,69],之后由 T.W.Hansch 用连续激光实现,跃迁谱线的信噪比也随之有大地提升。

Kato 和 Stoicheff 在 1976 年测量了铷原子 $5S_{nD}(n=11\sim 32)$ 的双光子跃迁^[70],而 $5S-5D$ 的双光子跃迁则由 F. Nez 等人在 1993 年测得,并且发现双光子跃迁谱的信噪比较高^[71]。相比于通过饱和吸收谱和调制转移谱方式获得的跃迁谱线,双光子跃迁谱线具有更窄的谱线线宽,也意味着以此实现的频率标准具有更高的频率稳定度。因此,基于双光子跃迁的光频标实现方法受到了多个研究小组的关注,并在理论和实验上进行了深入的研究。

3.1 国外研究现状

a) 778.1 nm 单色激光场双光子频标

1993 年,法国 LKB 实验室、国际计量局和法国国家计量院的联合研究团队利用 778 nm 的激

光将处于 $5S_{1/2}$ 态的原子激发到 $5D_{3/2}$ 或 $5D_{5/2}$ 态,原子沿着 $5D \rightarrow 6P \rightarrow 5S$ 的路径自发辐射,通过探测辐射的 420 nm 激光来研究铷原子双光子跃迁的性质。测得铷原子 $5S \rightarrow 5D$ 跃迁的频率不确定度为 8 kHz,频率稳定度为 $7 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$,该指标在 2 年后被提升至 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ^[71-72]。之后,该联合团队又与法国埃夫里大学的研究人员对建成的三台双光子频标装置进行了长达三年的跟踪观测,对光频移、频率调制深度、黑体辐射等效效应进行了深入地分析和研究^[54]。鉴于双光子跃迁较好的复现性和较低的频率噪声,国际长度计量委员会 (CIPM) 在 1997 年将 ^{85}Rb 原子 $5S_{1/2}(F=3) \rightarrow 5D_{5/2}(F=5)$ 的双光子跃迁谱线作为长度单位“米”定义的推荐谱线之一。印度霍米巴巴国家研究所 2021 年也实现了 778.1nm 的单色激光中铷原子的双光子跃迁,频率稳定度为 $\sim 3 \times 10^{-10} \tau^{-1/2}$ ^[73]。

b) 腔增强的双光子频标

F.Nez 等人在 1993 年的实验中一个有趣的工作是利用法布里-珀罗腔 (FP 腔) 来增强双光子跃迁的信号。原子在 FP 腔中发生双光子跃迁主要有以下几个优势:一是 FP 腔需要很好的模式匹配,入射激光和经 FP 腔反射的激光能够很好地重合,有效减小了激光不重合引入的残留一阶多普勒效应;二是激光在 FP 腔中来回反射,对激光光强有“放大”作用,仅需要很小功率的入射光就能使原子发生明显双光子跃迁。F.Nez 等人用精细度为 50 的 FP 腔来进行双光子跃迁实验,腔内激光功率约 25 mW 左右,获得的荧光谱线线宽约 500 kHz^[71]。加拿大拉瓦尔大学的 M.Poulin 等人将铷泡放置于 FP 光学腔内,激光在腔内来回反射,增强了腔内激光的功率,因此注入到腔内的激光功率仅为 0.5 mW,极大减小了激光功率的需求,最终获得的双光子跃迁谱线的宽度为 410 kHz,锁定后激光频率稳定度为 $2.5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2} @ 0.1 \text{ s} \sim 100 \text{ s}$ ^[74]。英国国家物理实验室 (NPL) 搭建了两套相同的双光子光频标装置,都将铷泡放置到精细度为 100 的 FP 腔中,在对系统误差仔细评估后,两套光频标的测量一致性优于 5 kHz,稳定度为 $9.3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2} @ 1 \text{ s} \sim 100 \text{ s}$ ^[75]。

c) 激光倍频实现的双光子频标

铷原子的双光子跃迁频率的二分频与光通信的 1.55 μm 频带一致,因此经 1556 nm 倍频后实

现的双光子光频标能够为光通信系统提供精确的频率参考^[76]。Y. Awaji 等人 and M. Zhu 等人都曾尝试将经双光子稳频后的 778 nm 激光作为参考, 对倍频后的 1556 nm 激光进行绝对频率测量或者激光频率锁定^[77-78], 如果能够将 1556 nm 激光倍频后作用于双光子跃迁, 则能够直接获得具有较高频率稳定度的通信波段激光。埃及国家标准研究院利用 1556 nm 激光倍频的方案实现双光子跃迁, 并系统研究了激光功率、调制频率、调制深

度、铷泡温度等多个参数对双光子跃迁信号的影响, 测量了铷原子 $5S \rightarrow 5D$ 的绝对跃迁频率, 不确定度为 5 kHz^[79]。美国 Applied Technology Associates 公司、空军研究实验室 (AFRL) 等机构的联合团队在 2018 年也报道了双光子跃迁光钟, 实验方案原理图和阿兰方差评估结果如图 3 所示。该原子钟的稳定度指标达到 $4 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 万秒稳达到 10^{-15} 量级, 证明了双光子跃迁方案具有良好的中长期稳定度^[55]。

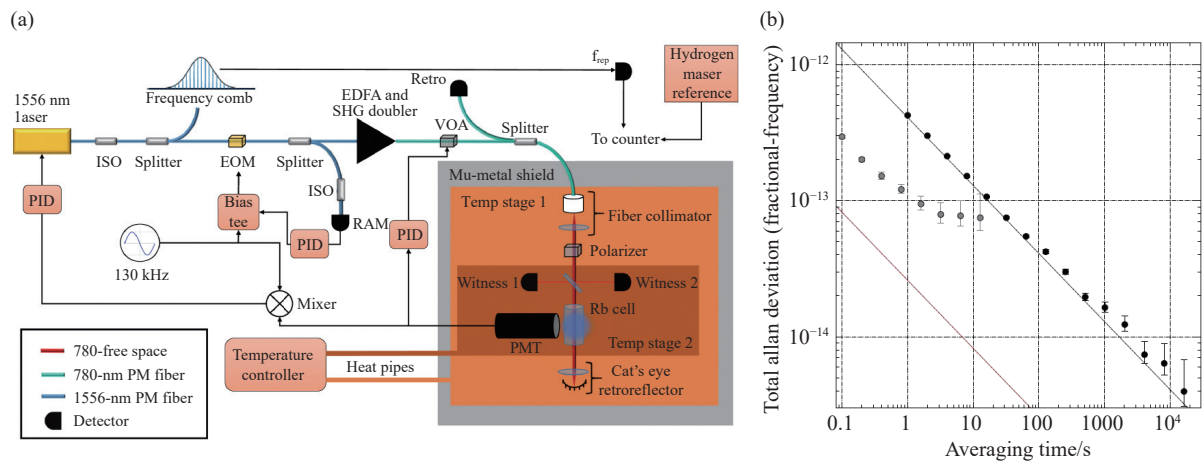


图 3 ATA、AFRL 等联合团队报道的 (a) 双光子跃迁光钟方案与 (b) 频率稳定度结果^[55]

Fig. 3 ATA, AFRL and other joint teams reported (a) Two-photon transition optical clock scheme and (b) results of frequency stability.

d) 小型化双光子跃迁光频标

鉴于双光子光频标在稳定度指标上展现出来的显著优势, 近几年来, 多个研究小组也试图实现装置的小型化, 以满足典型应用场景中对光钟体积、功耗等参数的要求。美国国家标准技术研

究院 (NIST) 与其合作者在 2020 年的报道中, 将 778 nm 激光器、铷源、光电倍增管、光学器件等核心器件小型化, 整个光学系统尺寸仅为 35 cm^3 , 功耗约 450 mW, 短期稳定度达到 $2.9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, 光频标装置实物图如图 4(a) 所示^[80]。

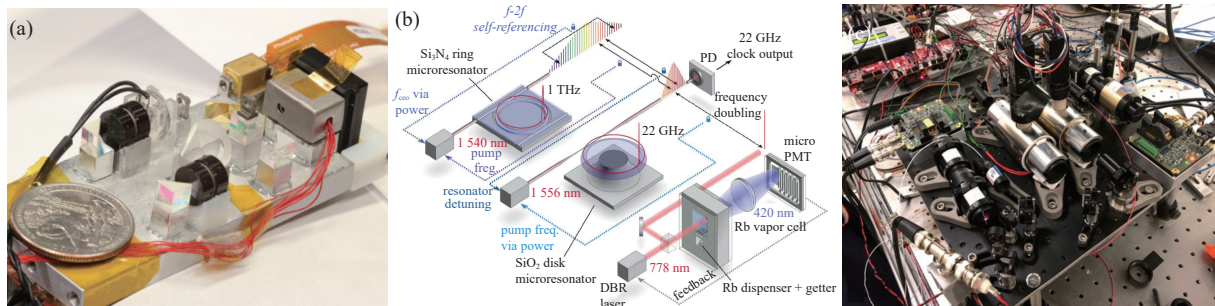


图 4 小型化光学原子钟。(a) 和 (b) 来自美国 NIST^[80,82], (c) 来自加拿大多伦多大学^[83]

Fig. 4 Miniaturized optical atomic clock. (a) and (b) from NIST, USA^[80,82], (c) from University of Toronto, Canada^[83].

为了减小激光频率噪声的限制, 该团队又以外腔半导体激光器作为本振, 利用锁定到超稳谐振腔上的蓝宝石光频梳进行测试, 将频率稳定度

提升至 $1.8 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$ ^[81]。Zachary L. Newman 等人还报道了一个包括光频梳的双光子跃迁小光钟的光子集成方案, 如图 4 (b) 所示, 文中提到的微型

铷气室的尺寸仅为 $3 \times 3 \times 3 \text{ mm}^3$, 光电倍增管也利用微刻蚀的方式实现。该集成光钟的跃迁谱线线宽为 $\sim 1 \text{ MHz}$, 短期频率稳定度达到 $2.9 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 。这项工作展示了芯片光钟实现的可行性, 并为未来基于双光子跃迁光钟的集成化提供了参考^[82]。加拿大多伦多大学的平流层光学铷原子钟项目 (SORCE) 也实现了光学原子钟的小型化, 由两套相同的小型化双光子光钟组成, 集成后体积为 $35.9 \times 33.5 \times 25.1 \text{ cm}^3$, 如图 4 (c) 所示。2019 年 8 月, 这两套小型化光频标系统被搭载到平流层气球中, 在飞行阶段光钟的稳定度达到 $6.4 \times 10^{-9} \tau^{-1/2}$, 6000 s 时的频率稳定度达到 10^{-11} ^[83]。

e) 基于双色场激发的双光子频标

前文中列举的研究工作都是在单色激光场中实现的, 这种方案的优点是仅利用一个种子激光源就可以满足双光子跃迁的激光频率需求, 这对实现小型化光学原子钟而言是极为有利的。但是这个方案也有明显的劣势, 在本文的第 2 部分中也提到, 激光频率较中间能级的失谐达到 2 nm, 需要较高的激光功率才能驱动明显的双光子跃迁。利用双色激光场实现的双光子跃迁, 可以任意改变激光频率与中间能级之间的失谐 (通常为几个 GHz), 能够将原子跃迁概率提高数个量级, 有效地提高了光频标跃迁谱线的信噪比。

澳大利亚阿德莱德大学与其合作者使用双色激光作为光源实现了铷原子的双光子跃迁光频标, 激光频率与中间能级的失谐为 $\Delta \approx 1.5 \text{ GHz}$, 跃迁效率较单色双光子跃迁提高了 8 个数量级, 最终实现的光频标频率稳定度为 $1.5 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 100 s 的稳定度为 4.9×10^{-14} ^[84]。通过倍频方式实现的小型化光频标装置的质量和体积分别为 17 kg 和 25 L, 功耗为 100 W, 长期稳定度提升至 $3 \times 10^{-15} @ 8000 \text{ s}$ ^[85]。

3.2 国内研究进展

2015 年, 北京大学赵建业课题组通过通信波段光纤光梳倍频的方式, 获得了中心波长为 778 nm、功率为 20 mW、光谱宽度 10 nm 的光梳激光, 实现了铷原子双光子跃迁的激发, 最终建立了频率稳定度为 $8 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ 的热原子双光子频标^[86-87]。2019 年又通过对磁光阱中的冷原子插入连续光的方式, 在冷原子系统中实现了铷原子的双光子跃迁, 将光频标的短期稳定度提升至 $1.4 \times$

$10^{-12} \tau^{-1/2}$ ^[88]。

中科院精密测量科学与技术创新研究院提出了一种双问询方法 (Dual-interrogation method) 来抑制双光子频标中的光频移。实验中将 1556 nm 激光倍频后分为两路, 两束激光都分别与独立气室中的铷原子作用发生双光子跃迁, 将各自随激光功率变化的光频移标定后, 通过双问询方法对光频移进行抑制。光频标短期频率稳定度达到 $3 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 百秒稳定度较抑制前提升近一个量级^[89]。

中科院上海光学精密机械研究所吕德胜课题组利用 778.1 nm 的外腔半导体激光器作为光源, 以 20 kHz 的正弦信号调制激光频率, 实现了铷原子的双光子跃迁, 对 420 nm 荧光探测后解调出了双光子跃迁的误差信号, 并实现了激光频率的锁定。通过与光频梳的拍频, 获得频标的频率稳定度指标为 $1.5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$, 积分 500 s 时稳定度降低至 2.9×10^{-13} ^[57]。

上海交通大学的王镓淇等人利用单色激光场中的双光子跃迁来研究原子谱线展宽机制, 并对多种展宽效应进行了分析和研究^[90]。

山西大学开展了碱金属原子双光子跃迁的实验研究。在双色连续激光场中获取了铷原子的双光子跃迁光谱, 也利用光梳激发原子的双光子跃迁, 获取了对应原子跃迁谱线, 但并未直接用于频率稳定^[68, 91-92]。

3.3 研究现状评述

国内外多家研究机构都开展了双光子跃迁光频标的研究工作, 表 1 列出了具有代表性的光频标研究现状。法国 LKB 等研究机构在早期的研究工作中, 对双光子跃迁开展了大量的研究工作。美国多家机构的研究工作主要集中在近十年, 在长期稳定度的提升以及小型化和芯片化等方面都开展了较为系统和深入的研究。美国 AFRL 还计划在 2024 年底将小型化的双光子光钟搭载到 NTS-3 导航技术卫星上, 该卫星是美国国防部近 50 年来第一个实验性综合导航卫星系统, 以提高未来卫星导航定位的精度^[93, 94]。澳大利亚阿德莱德大学研制的双光子跃迁光频标的长期稳定度也已达 3×10^{-15} , 并且实现了装置的小型化。国内多家研究机构也开展了双光子跃迁光频标的研究工作, 频标的短期稳定度指标已经达

到国际领先水平, 但是 Allan 偏差在百秒时基本都到了闪变平台, 频标的长期稳定度与国外相比

还有较大的差距。此外, 在装置小型化方面还尚未有公开的报道。

表 1 国内外代表性双光子跃迁光频标研究现状

Tab. 1 Research status of representative optical frequency atomic clocks based on two-photon transition at home and abroad

国家	研究机构	年份	秒稳 ($\times 10^{-13}$)	长稳 ($\times 10^{-15}$)	文献
法国	LKB等	1998	3	10@1000 s	[54]
	AFRL等	2018	4	4@10000 s	[55]
美国	NIST	2019	44	220@1000 s	[82]
		2021	1.8	5@1600 s	[81]
	贝塞尔大学	2022	5	3@10 ⁶ s	[95]
加拿大	拉瓦尔大学	2002	2.5	58@100 s	[74]
英国	NPL	2005	9.3	120@100 s	[75]
埃及	国家标准研究院	2016	40	680@1000 s	[96]
澳大利亚	阿德莱德大学等	2023	1.5	3@8000 s	[85]
中国	北京大学	2019	14	40@2000 s	[88]
	中科院上海光机所	2023	15	290@500 s	[57]
	中科院武汉精测院	2024	4	70@100 s	[89]

4 发展趋势分析

自 1997 年被 CIPM 作为“米”定义的推荐参考谱线获取方式后, 基于双光子跃迁的光频标技术就受到了广泛的关注与研究, 其中又以对铷原子系统的研究最为广泛。目前, 这种光频标的频率稳定度已经达到 $\sim 1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 万秒稳定度优于 5×10^{-15} , 被认为是有望满足未来 GNSS 需求的小型原子钟之一^[62]。通过对近年来双光子光频标研究的相关文献与公开报道的梳理与总结, 在笔者看来, 基于双光子跃迁的光频标总体呈现如下文所述的发展趋势。

4.1 系统小型化

基于双光子跃迁的光频标利用铷气室中的热原子就可以实现, 不需要复杂的真空维持系统或超稳光学腔系统, 极大地简化了装置的复杂程度, 有利于整个装置的小型化。利用小型光学元器件搭建的光频标装置的体积减小至 35 cm^3 , 利用光纤器件实现的双色光频标装置的体积也减小到 25 L, 光频标体积小于传统磁选态铷原子钟 ($\sim 30 \text{ L}$), 短期和中期频率稳定度也接近甚至超过

了传统磁选态铷原子钟的频率稳定度, 这使得双光子光频标装置在未来具有广阔的使用场景。此外, NIST 也已经利用光子集成技术在芯片上实现了双光子小光钟, 这对未来光频标装置的进一步小型化提供了新的借鉴意义。但是, 不可忽视的是, 装置的小型化通常是以牺牲性能指标为代价的, 比如会选取宽线宽激光器、带有杂质气体的原子释放机制等, 这些都会影响频标的频率稳定度。因此, 如何在保证光频标性能指标的前提下, 达到应用要求的体积、重量以及功耗 (SWaP) 等指标要求, 这是在装置小型化过程中需要重点关注的。

4.2 性能指标提升

双光子光钟的频率稳定度目前已经普遍接近 $1 \times 10^{-13} \tau^{-1/2}$, 万秒稳定度也被证明优于 5×10^{-15} , 然而, 更长时间尺度的频率稳定度则受到系统频移变化的影响变得恶化。造成系统不稳定因素的主要来源是光频移和背景气体碰撞频移, 前者由于激光功率变化导致能级移动, 后者则是铷原子与背景原子碰撞引起的。针对光频移的影响, 要实现 1×10^{-15} 的频率稳定度指标, 则要求激光的功

率稳定性好于 $2.1\mu\text{W}$, 这对功率监测系统以及反馈稳定系统都是较高的要求。V. Gerginov 等人通过选择合适的激光失谐量和双色激光的光功率比, 最终减小了光频移效应对频标频率稳定度的影响^[97]。Tin Nghia Nguyen 等人又进一步研究了双色激光场中多普勒效应和压力频移变化的影响, 使光频标对激光功率涨落和气室温度变化都不敏感^[98]。中科院精测院的研究人员也提出双询问方法来抑制光频移的影响。这些方法都有利于减小光频移对光频标长期稳定度的影响^[89]。

铷原子频标的气室中会充制特定成分的缓冲气体, 以减小共振线宽并提高激光抽运效率, 铷原子会与缓冲气体和背景铷原子碰撞, 使原子能级发生轻微移动, 造成碰撞频移, 频移量也随着气室温度的变化而变化^[99]。因此, 对气室进行高精度温度控制是提高频标长期稳定度的重要手段。此外, 铷气室通常都由玻璃胚体加工而成, 空气中的氦气很容易通过渗透进入气室, 导致气室中的气压发生变化, 影响频标的长期稳定度。Nathan D. Lemke 等人尝试将光频标放置到真空中以消除渗氦的影响, 在扣除氦气的影响后, 在 1 天乃至 10 天的时间尺度上频标的长期稳定度都好于 5×10^{-15} ^[95]。

激光频率的不确定度也是光频标的一个重要指标。双光子光频标中激光频移的主要来源有光频移、碰撞频移、二阶多普勒频移、塞曼频移等, 这些效应都会影响激光频率的准确度。F. Nez 和 F. Biraben 在 1993 实现 Rb 原子 5S-5D 的双光子跃迁时, 就通过与参考 He-Ne 激光比对得到其不确定度为 5 kHz^[71]。后来, 法国 LKB 实验室、美国空军实验室、埃及国家标准研究院等都对双光子跃迁激光的绝对频率进行了测量, 不确定度最低约 600 Hz (1σ)^[54-55, 96]。

以上这些措施都是在实验室环境下实现的, 频标的长期稳定度和不确定度有了明显的改善和提升。针对实际使用场景中温度、压力、磁场等环境因素的变化, 仍能确保光频标的高长期稳定度和高准确度, 这需要在将来的工作中重点关注和研究。

4.3 集成应用与工程化

双光子光频标的性能指标在实验室环境下已经得到了验证, 在实现装置的小型化后, 还需要考

虑其集成应用并提高工程化水平。小型双光子光频标在光频段具有较高的频率稳定度, 在时频应用中利用光学频率梳的高相干梳齿, 可以方便地将光频标的高稳定度转化至微波频段, 提供 $10^{-13} \tau^{-1/2}$ 水平的高稳定射频参考信号。此外, 基于 1556 nm 激光倍频的双光子跃迁, 种子激光处于激光通信的 C 波段, 能够为远距离激光通信提供频率稳定的激光源。

在工程化方面, 按照技术成熟度等级的划分, 基于双光子跃迁光频标的技术成熟度仅达到 4 级, 即完成了实验室环境下的性能验证, 未来仍需对其在使用环境下的性能进行深入分析和测试。目前, 基于碘分子调制转移谱的光钟已经完成了在探空火箭上的搭载^[44] 和海上平台的试验^[100], 在光学元器件固定、电子学部分设计以及系统整体集成等方面的经验可以为双光子光频标工程化程度的提升提供借鉴。国内多家研究机构在星载原子钟研制方面具有丰富的研究经验和完善的研制体系, 能够为双光子光频标装置的工程化实现提供重要的技术支持。此外, 对于面向星载应用的光频标装置而言, 空间环境中的空间辐照、热效应、磁场等效应对激光器、光纤等核心部件的影响, 也是未来工程化需要考虑的重要因素^[101]。

5 结束语

双光子光频标的短期稳定度达到 $10^{-13} \tau^{-1/2}$, 在天及更长积分时间上都被证实具有较高的稳定度水平。本文围绕双光子跃迁技术在光学频率标准中的应用, 简要介绍了双光子跃迁的基本原理, 并对国内外基于双光子跃迁实现的铷原子光频标的研究现状进行了总结和分析。基于双光子跃迁的小型光频标, 其频率稳定度虽未达到中性原子光晶格钟和囚禁离子光钟的指标, 但已经超越传统微波原子钟, 其较小的体积和功耗可以实现便携式和在机动载体上的应用, 通过集成化手段也能够与微波时频系统相耦合, 成为具有竞争力的新型原子频标。相比离子微波钟和冷原子微波钟, 基于双光子跃迁的小型光频标还可以直接用于光通信, 未来也将有望成为星载原子钟的有力候选。

参考文献:

- [1] BOTHWELL T, KENNEDY C J, AEPPLI A, *et al.*. Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample[J]. *Nature*, 2022, 602(7897): 420-424.
- [2] ASHBY N, HEAVNER T P, JEFFERTS S R, *et al.*. Testing local position invariance with four cesium-fountain primary frequency standards and four NIST hydrogen masers[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(7): 070802.
- [3] 孙和平, 杨元喜, 叶朝辉, 等. 精密(量子)测量时代下时空基准研究中的关键科学问题和核心技术[J]. 中国科学基金, 2024, 38(1): 172-181.
- SUN H P, YANG Y X, YE ZH H, *et al.*. Key scientific frontiers and core technologies in space-time reference research in the era of precision (quantum) measurement[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2024, 38(1): 172-181. (in Chinese).
- [4] 杨元喜, 任夏, 贾小林, 等. 以北斗系统为核心的国家安全 PNT 体系发展趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 66(5): 929-938.
- YANG Y X, REN X, JIA X L, *et al.*. Development trends of the national secure PNT system based on BDS[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(5): 929-938.
- [5] 罗俊, 艾凌皓, 艾艳丽, 等. 天琴计划简介[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2021, 60(1-2): 1-19.
- LUO J, AI L H, AI Y L, *et al.*. A brief introduction to the TianQin project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(1-2): 1-19. (in Chinese).
- [6] 谢军, 郑晋军, 张弓, 等. 卫星导航系统发展现状与未来趋势[J]. 前瞻科技, 2022, 1(1): 94-111.
- XIE J, ZHENG J J, ZHANG G, *et al.*. Development status and future trend of satellite navigation systems[J]. *Science and Technology Foresight*, 2022, 1(1): 94-111. (in Chinese).
- [7] 翟浩, 廉吉庆. 原子钟性能对卫星导航系统定位精度的影响分析[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(5): 118-123.
- ZHAI H, LIAN J Q. Analysis of the influence of atomic clock performance on positioning accuracy of satellite navigation systems[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(5): 118-123. (in Chinese).
- [8] 曹远洪, 杜润昌, 赵杏文, 等. 原子钟技术在电力系统应用——中国电力系统时间同步体系建设方案初探[C]. 第十二届中国卫星导航年会论文集——S05 空间基准与精密定位, 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2021: 8.
- CAO Y H, DU R CH, ZHAO X W, *et al.*. Application of atomic clock technology in grid system —preliminary study on construction of time synchronization system in China grid[C]. *The 12th China Satellite Navigation Annual Conference*, China Satellite Navigation Office Academic Exchange Center, 2021: 8. (in Chinese)(**查阅网上资料, 未找到标黄信息, 请确认**).
- [9] 王勇征, 田映东, 彭刚, 等. 铯原子钟在通信网中的应用研究[J]. 数码设计, 2021, 10(1): 59.
- WANG Y ZH, TIAN Y D, PENG G, *et al.*. Research on the application of cesium atomic clock in communication network[J]. *Digital Insigne*, 2021, 10(1): 59. (in Chinese)(**查阅网上资料, 未找到标黄信息, 请确认**).
- [10] SCHULDT T, DÖRINGSHOFF K, OSWALD M, *et al.*. Absolute laser frequency stabilization for LISA[J]. *International Journal of Modern Physics D*, 2019, 28(12): 1845002.
- [11] CUI J Q, MING G, WANG F, *et al.*. Realization of a rubidium atomic frequency standard with short-term stability in $10^{-14} \tau^{-1/2}$ level[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 1500507.
- [12] 崔敬忠, 杨坦, 张玲, 等. 真空环境下铷钟性能的研究[J]. 真空与低温, 2016, 22(5): 271-274,295.
- CUI J ZH, YANG T, ZHANG L, *et al.*. Study of the performance of rubidium frequency standard in vacuum environment[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2016, 22(5): 271-274,295. (in Chinese).
- [13] JEANMAIRE A, ROCHAT P, EMMA F. Rubidium atomic clock for Galileo[C]. *Proceedings of the 31th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting*, 1999: 627-636. (**查阅网上资料, 未找到出版社信息, 请补充**).
- [14] 陈江, 刘志栋, 王骥, 等. 一种超小型磁选态铯原子钟[J]. 时间频率学报, 2022, 45(1): 9-14.
- CHEN J, LIU ZH D, WANG J, *et al.*. Small compact magnetically state-selected cesium atomic clock[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2022, 45(1): 9-14. (in Chinese).
- [15] 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. (in Chinese).
- [16] CHADSEY H, KUBIK A. Maintenance of HP 5071A primary frequency standards at USNO[C]. *Proceedings of Precise Time Interval Syst. Appl. Meeting*, 1997: 49-59. (查阅网上资料, 未能确认标黄信息, 未找到出版社信息, 请核对并补充).
- [17] 王骥, 黄良育, 陈江, 等. 磁选态铯原子频率标准技术研制进展[J]. *时间频率学报*, 2022, 45(1): 15-25.
WANG J, HUANG L Y, CHEN J, *et al.*. Progress on cesium atomic frequency standard with magnetic state-selection technology[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2022, 45(1): 15-25. (in Chinese).
- [18] 何克亮, 张为群, 林传富. 主动型氢原子钟的研究进展[J]. *天文学进展*, 2017, 35(3): 345-366.
HE K L, ZHANG W Q, LIN CH F. Progresses in researches of active hydrogen atomic clock[J]. *Progress in Astronomy*, 2017, 35(3): 345-366. (in Chinese).
- [19] POLYAKOV V, TIMOFEEV Y, DEMIDOV N. Frequency stability improvement of an active hydrogen maser with a single-state selection system[C]. *2021 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*, IEEE, 2021: 1-4.
- [20] 郑贺斐, 李晶, 冯克明, 等. 被动型氢原子钟单频调制的鉴频特性研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(3): 0311001.
ZHENG H F, LI J, FENG K M, *et al.*. Frequency discrimination for passive hydrogen maser based on single frequency modulation[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(3): 0311001. (in Chinese).
- [21] WEYERS S, GERGINOV V, KAZDA M, *et al.*. Advances in the accuracy, stability, and reliability of the PTB primary fountain clocks[J]. *Metrologia*, 2018, 55(6): 789-805.
- [22] GUENA J, ABGRALL M, ROVERA D, *et al.*. Progress in atomic fountains at LNE-SYRTE[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2012, 59(3): 391-410.
- [23] PELLE B, ARCHAMBAULT L, DESRUELLE B, *et al.*. Cold-atom-based commercial microwave clocks at 1×10^{-15} relative instability over more than one month[C]. *2022 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*, IEEE, 2022: 1-4.
- [24] 陈伟亮, 刘昆, 郑发松, 等. 长期稳定度 2.6×10^{-16} 的工程化高可靠铷原子喷泉钟[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(2): 79-86.
CHEN W L, LIU K, ZHENG F S, *et al.*. Engineering highly reliable Rb fountain clock with a long-term instability of 2.6×10^{-16} [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(2): 79-86. (in Chinese).
- [25] 李慧, 杜远博, 刘洪力, 等. 用于本地时标系统的铯原子喷泉钟研制[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(9): 23-29.
LI H, DU Y B, LIU H L, *et al.*. Development of cesium fountain clock as local precision time and frequency standard[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition)*, 2022, 50(9): 23-29. (in Chinese).
- [26] LIU L, LU D SH, CHEN W B, *et al.*. In-orbit operation of an atomic clock based on laser-cooled ^{87}Rb atoms[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2760.
- [27] REN W, LI T, QU Q ZH, *et al.*. Development of a space cold atom clock[J]. *National Science Review*, 2020, 7(12): 1828-1836.
- [28] LIU P, MENG Y L, WAN J Y, *et al.*. Scheme for a compact cold-atom clock based on diffuse laser cooling in a cylindrical cavity[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(6): 062101.
- [29] MENG Y L, JIANG X J, WU J, *et al.*. Satellite-borne atomic clock based on diffuse laser-cooled atoms[J]. *Frontiers in Physics*, 2022, 10: 985586.
- [30] ESNAULT F X, ROSSETTO N, HOLLEVILLE D, *et al.*. HORACE: a compact cold atom clock for Galileo[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(5): 854-858.
- [31] BURT E A, PRESTAGE J D, TJOELKER R L, *et al.*. Demonstration of a trapped-ion atomic clock in space[J]. *Nature*, 2021, 595(7865): 43-47.
- [32] 曹士英, 房芳. 秒定义变革及我国时间频率基准的发展和应对[J]. *信息技术与政策*, 2022, 48(7): 2-8.
CAO SH Y, FANG F. Redefinition of unit of time and research progress of primary frequency standard in NIM[J]. *Information and Communications Technology and Policy*, 2022, 48(7): 2-8. (in Chinese).
- [33] 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.

- [34] 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.
- [35] LI J, CUI X Y, JIA ZH P, *et al.*. A strontium lattice clock with both stability and uncertainty below 5×10^{-18} [J]. *Metrologia*, 2024, 61(1): 015006.
- [36] 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.
- [37] DIDDAMS S A, JONES D J, YE J, *et al.*. Direct link between microwave and optical frequencies with a 300 THz femtosecond laser comb[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102-5105.
- [38] DEL'HAYE P, SCHLISSER A, ARCIZET O, *et al.*. Optical frequency comb generation from a monolithic microresonator[J]. *Nature*, 2007, 450(7173): 1214-1217.
- [39] GIORGI G, SCHMIDT T D, TRAINOTTI C, *et al.*. Advanced technologies for satellite navigation and geodesy[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 64(6): 1256-1273.
- [40] POLI N, SCHIOPPO M, VOGT S, *et al.*. A transportable strontium optical lattice clock[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(4): 1107-1116.
- [41] KONG D H, WANG ZH H, GUO F, *et al.*. A transportable optical lattice clock at the national time service center[J]. *Chinese Physics B*, 2020, 29(7): 070602.
- [42] ZHANG H Q, HUANG Y, ZHANG B L, *et al.*. Absolute frequency measurements with a robust, transportable $^{40}\text{Ca}^+$ optical clock[J]. *Metrologia*, 2023, 60(3): 035004.
- [43] 任洁, 谭巍, 郭峰, 等. 空间铷原子光钟磁场分析及主动补偿系统[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(11): 1337-1343.
REN J, TAN W, GUO F, *et al.*. Magnetic field analysis and active compensation system for strontium optical lattice clock in space[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(11): 1337-1343. (in Chinese).
- [44] DÖRINGSHOFF K, GUTSCH F B, SCHKOLNIK V, *et al.*. Iodine frequency reference on a sounding rocket[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 11(5): 054068.
- [45] ZHANG ZH Q, WANG ZH Y, LIU H L, *et al.*. An ultra-stable laser based on molecular iodine with a short-term instability of 3.3×10^{-15} for space based gravity missions[J]. *Classical and Quantum Gravity*, 2023, 40(22): 225001.
- [46] ZANG E J, CAO J P, LI Y, *et al.*. Realization of four-pass I_2 absorption cell in 532-nm optical frequency standard[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, 56(2): 673-676.
- [47] DÖRINGSHOFF K, SCHULDT T, KOVALCHUK E V, *et al.*. A flight-like absolute optical frequency reference based on iodine for laser systems at 1064 nm[J]. *Applied Physics B*, 2017, 123(6): 183.
- [48] LEE S, MOON G, PARK S E, *et al.*. Laser frequency stabilization in the 10^{-14} range via optimized modulation transfer spectroscopy on the ^{87}Rb D_2 line[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(4): 1020-1023.
- [49] ZHANG SH N, ZHANG X G, CUI J ZH, *et al.*. Compact Rb optical frequency standard with 10^{-15} stability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(10): 103106.
- [50] QI X H, CHEN W L, LIN Y, *et al.*. Ultra-stable rubidium-stabilized external-cavity diode laser based on the modulation transfer spectroscopy technique[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(4): 044205.
- [51] KERSTEN P, MENSING F, STERR U, *et al.*. A transportable optical calcium frequency standard Dedicated to J. Helmcke on the occasion of his 60th birthday[J]. *Applied Physics B*, 1999, 68(1): 27-38.
- [52] SHANG H S, ZHANG X G, ZHANG SH N, *et al.*. Miniaturized calcium beam optical frequency standard using fully-sealed vacuum tube with 10^{-15} instability[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30459-30467.
- [53] QUINN T J. Practical realization of the definition of the metre, including recommended radiations of other optical frequency standards (2001)[J]. *Metrologia*, 2003, 40(2): 103-133.
- [54] HILICO L, FELDER R, TOUAHRI D, *et al.*. Metrological features of the rubidium two-photon standards of the BNM-LPTF and Kastler Brossel Laboratories[J]. *The European Physical Journal: Applied Physics*, 1998, 4(2): 219-225.
- [55] MARTIN K W, PHELPS G, LEMKE N D, *et al.*. Compact optical atomic clock based on a two-photon transition in rubidium[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(1): 014019.
- [56] JANA S, SAHOO B K, SHARMA A. Progress towards the development of a portable all-optical atomic clock based on a two-photon transition in warm atomic vapor[C]. *2022 URSI Regional Conference on Radio Science*, IEEE, 2022: 1-4.
- [57] 孟一鸣, 项静峰, 徐斌, 等. 铷 87 原子双光子跃迁光谱稳频特性研究[J]. *中国激光*, 2023, 50(23): 2301013.

- MENG Y M, XIANG J F, XU B, *et al.*. Frequency stabilization characteristics of ^{87}Rb two-photon transition spectrum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(23): 2301013. (in Chinese).
- [58] CHU C H, SHIH Y J, CHANG P CH, *et al.*. Frequency of the unmodulated 778-nm rubidium clock measured in high vacuum[C]. *2023 Conference on Lasers and Electro-Optics*, IEEE, 2023: 1-2.
- [59] NEZ F, PLIMMER M D, BOURZEIX S, *et al.*. First pure frequency measurement of an optical transition in atomic hydrogen: better determination of the Rydberg constant[J]. *Europhysics Letters*, 1993, 24(8): 635-640.
- [60] SCHWOB C, JOZEFOWSKI L, DE BEAUVOIR B, *et al.*. Optical frequency measurement of the $2S$ - $12D$ transitions in hydrogen and deuterium: rydberg constant and lamb shift determinations[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(25): 4960-4963.
- [61] KIRAN KUMAR P V, SURYANARAYANA M V. Precision two-photon spectroscopy of alkali elements[J]. *Pramana*, 2014, 83(2): 189-219.
- [62] JADUSZLIWER B, CAMPARO J. Past, present and future of atomic clocks for GNSS[J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(1): 27.
- [63] VASILENKO L S, CHEBOTAEV V P, SHISHAEV A V. Line shape of two-photon absorption in a standing-wave field in a gas[J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 1970, 12(3): 113-116.
- [64] 冯晨, 吕杭哲, 段剑, 等. 基于双光子光谱的光学频率标准[J]. *计测技术*, 2023, 43(4): 103-112.
- FENG CH, LYU H ZH, DUAN J, *et al.*. Optical frequency standard based on two-photon spectroscopy[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(4): 103-112. (in Chinese).
- [65] DEMTRÖDER W. *Laser Spectroscopy 2: Experimental Techniques*[M]. Berlin: Springer, 2008.
- [66] BIRABEN F, CAGNAC B, GRYNBERG G. Experimental evidence of two-photon transition without Doppler broadening[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 32(12): 643-645.
- [67] SHENG D, PÉREZ GALVÁN A, OROZCO L A. Lifetime measurements of the $5d$ states of rubidium[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 062506.
- [68] 范鹏瑞, 李一鸿, 李少华, 等. 利用铷原子双光子跃迁产生 420nm 蓝光的实验研究[J]. *量子光学学报*, 2017, 23(2): 144-150.
- FAN P R, LI Y H, LI SH H, *et al.*. Experimental investigation on the 420 nm blue light generated by two-photon transition of Rb[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2017, 23(2): 144-150. (in Chinese).
- [69] LEVENSON M D, BLOEMBERGEN N. Observation of two-photon absorption without doppler broadening on the $3S$ - $5S$ transition in sodium vapor[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 32(12): 645-648.
- [70] KATO Y, STOICHEFF B P. Two-photon absorption to highly excited D states of Rb atoms[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1976, 66(5): 490-492.
- [71] NEZ F, BIRABEN F, FELDER R, *et al.*. Optical frequency determination of the hyperfine components of the $5S_{1/2}$ - $5D_{3/2}$ two-photon transitions in rubidium[J]. *Optics Communications*, 1993, 102(5-6): 432-438.
- [72] FELDER R, TOUAHRI D, ACEF O, *et al.*. Performance of a GaAlAs laser diode stabilized on a hyperfine component of two-photon transitions in rubidium at 778 nm[J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, 2378: 52-57.
- [73] SHUKLA V, NATH S K, NAIK V, *et al.*. Studies on rubidium $5S$ - $5d$ two-photon absorption[J]. *Journal of Modern Optics*, 2021, 68(6): 311-321.
- [74] POULIN M, LATRASSE C, TOUAHRI D, *et al.*. Frequency stability of an optical frequency standard at 192.6 THz based on a two-photon transition of rubidium atoms[J]. *Optics Communications*, 2002, 207(1-6): 233-242.
- [75] EDWARDS C S, BARWOOD G P, MARGOLIS H S, *et al.*. Development and absolute frequency measurement of a pair of 778 nm two-photon rubidium standards[J]. *Metrologia*, 2005, 42(5): 464-467.
- [76] RIEHLE F. *Frequency Standards: Basics and Applications*[M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [77] ZHU M, STANDRIDGE R W. Optical frequency standard for optical fiber communication based on the Rb $5s \rightarrow 5d$ two-photon transition[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(10): 730-732.
- [78] AWAJI Y, NAKAGAWA K, DE LABACHELERIE M, *et al.*. Optical frequency measurement of the $\text{H}^{12}\text{C}^{14}\text{N}$ Lamb-dip-stabilized 1.5- μm diode laser[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(19): 2024-2026.
- [79] TERRA O, HUSSEIN H. An ultra-stable optical frequency standard for telecommunication purposes based upon the $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ two-photon transition in Rubidium[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(2): 27.
- [80] MAURICE V, NEWMAN Z L, DICKERSON S, *et al.*. Miniaturized optical frequency reference for next-generation

- portable optical clocks[J]. *Optics Express*, 2020, 28(17): 24708-24720.
- [81] NEWMAN Z L, MAURICE V, FREDRICK C, *et al.*. High-performance, compact optical standard[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(18): 4702-4705.
- [82] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, *et al.*. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock[J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680-685.
- [83] COTE K, JACKSON S, ZAZO R, *et al.*. The stratospheric optical rubidium clock experiment[C]. *70th International Astronautical Congress*, IAF, 2019.
- [84] PERRELLA C, LIGHT P S, ANSTIE J D, *et al.*. Dichroic two-photon rubidium frequency standard[J]. *Physical Review Applied*, 2019, 12(5): 054063.
- [85] LOCKE C R, NG S, SCARABEL J, *et al.*. Portable optical atomic clock based on a dichroic two-photon transition in rubidium[C]. *2023 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*, IEEE, 2023: 1-2.
- [86] ZHANG S Y, WU J T, ZHANG Y L, *et al.*. Direct frequency comb optical frequency standard based on two-photon transitions of thermal atoms[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 15114.
- [87] WU J T, HOU D, QIN ZH Y, *et al.*. Observation of Rb two-photon absorption directly excited by an erbium-fiber-laser-based optical frequency comb via spectral control[J]. *Physical Review A*, 2014, 89(4): 041402(R).
- [88] LENG J X, XU H, LU H Y, *et al.*. Optical communication frequency standard using a fiber laser to excite cold rubidium two-photon transition[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(5): 1183-1188.
- [89] LI D, LIU K Q, WANG P F, *et al.*. Dual-interrogation method for suppressing light shift in Rb 778 nm two-photon transition optical frequency standard[J]. *Optics Express*, 2024, 32(2): 2766-2773.
- [90] 王铿淇, 郭进先. 基于铷原子双光子跃迁的原子谱线展宽机制教学演示[J]. *物理与工程*, 2023, 33(2): 119-125.
WANG K Q, GUO J X. Teaching demonstration of spectrum broadening in two-photon transition of Rb[J]. *Physics and Engineering*, 2023, 33(2): 119-125. (in Chinese).
- [91] ZHANG Y CH, WU J ZH, LI Y Q, *et al.*. A direct frequency comb for two-photon transition spectroscopy in a cesium vapor[J]. *Chinese Physics B*, 2012, 21(11): 113701.
- [92] ZHANG Y CH, FAN P R, YUAN J P, *et al.*. High-resolution Rb two-photon transition spectroscopy by a femtosecond frequency comb via pulses control[J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(11): 113201.
- [93] <https://afresearchlab.com/technology/nts-3>. (查阅网上资料, 请补充完整信息).
- [94] LEMKE N D, PHELPS G, BURKE J H, *et al.*. The optical rubidium atomic frequency standard at AFRL[C]. *2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium*, IEEE, 2017: 466-467.
- [95] LEMKE N D, MARTIN K W, BEARD R, *et al.*. Measurement of optical rubidium clock frequency spanning 65 days[J]. *Sensors*, 2022, 22(5): 1982.
- [96] TERRA O, HUSSEIN H. An ultra-stable optical frequency standard for telecommunication purposes based upon the $5S_{1/2} \rightarrow 5D_{5/2}$ two-photon transition in rubidium[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122(2): 27. (查阅网上资料, 本条文献和第 79 条文献重复, 请核对).
- [97] GERGINOV V, BELOY K. Two-photon optical frequency reference with active ac Stark shift cancellation[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(1): 014031.
- [98] NGUYEN T N, SCHIBLI T R. Temperature-shift-suppression scheme for two-photon two-color rubidium vapor clocks[J]. *Physical Review A*, 2022, 106(5): 053104.
- [99] 薛文祥, 陈江, 杜志静, 等. 温度对 POP Rb 原子钟性能影响的研究[J]. *时间频率学报*, 2012, 35(3): 129-136.
XUE W X, CHEN J, DU ZH J, *et al.*. Study of the temperature effect on POP Rb atomic clock[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2012, 35(3): 129-136. (in Chinese).
- [100] ROSLUND J D, CINGÖZ A, LUNDEN W D, *et al.*. Optical clocks at sea[J]. *Nature*, 2024, 628(8009): 736-740.
- [101] 沈自才, 崔云, 牛锦超. 激光技术在航天工程中的应用及对策[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(10): 2703-2711.
SHEN Z C, CUI Y, NIU J CH. Applications and countermeasures of laser technology in space engineering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2703-2711. (in Chinese).

作者简介:



张炯阳(1994—),男,甘肃酒泉人,博士,工程师,2022年于华中科技大学获得博士学位。主要从事小型化光学原子钟、冷原子精密测量等方面的研究。E-mail: zhangjy529@126.com



翟浩(1971—),男,甘肃静宁人,博士,研究员,硕士生导师,1999年于中国空间技术研究院获得硕士学位,2020年于北京航空航天大学获得博士学位。主要从事原子钟与时空基准技术研究。E-mail: 2692244353@qq.com



王 骥(1977—),男,甘肃白银人,博士,研究员,硕士生导师,2005年于西安交通大学获得博士学位。主要从事原子钟与时频技术研究。E-mail: 20138295@qq.com