

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.02.02

基于外腔半导体激光器的微型原子钟

廉吉庆^{1,2,3}, 潘多^{2*}, 赵天^{2,4}, 黄鹏翔⁵, 陈景标^{2,6}

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071; 2. 北京大学 电子学院 量子电子学研究所
光子传输与通信全国重点实验室, 北京 100871; 3. 兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000;
4. 国测量子科技(浙江)有限公司, 浙江 湖州 313098; 5. 温州大学 电气与工程学院,
浙江 温州 325035; 6. 合肥国家实验室, 安徽 合肥 230088)

摘要: 为了解决传统微型和芯片级相干布居囚禁(Coherent Population Trapping, CPT)原子钟使用的垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL)线宽大的问题, 采用自研的激光芯片和毫米量级尺寸的光学元件, 设计了一种适用于微型CPT铷原子钟、波长为795 nm的微型外腔半导体激光器(External Cavity Diode Laser, ECDL), 该激光器尺寸小于1 cm³, 且具有线宽窄、直接调制特性好的特点。基于该ECDL, 首次实现了非VCSEL光源的微型原子钟设计验证, 短期频率稳定度达到 $3.70 \times 10^{-11}@1\text{ s}$, $1.35 \times 10^{-12}@1\text{ 000 s}$, 对后续研制高性能微型甚至芯片级原子钟产品具有重要意义。

关键词: 外腔半导体激光器; 相干布居囚禁; 微型原子钟; 窄线宽激光器

中图分类号: TB939; TN248.4; TN249 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 02-0026-07

Miniature atomic clock based on external cavity diode laser

LIAN Jiqing^{1,2,3}, PAN Duo^{2*}, ZHAO Tian^{2,4}, HUANG pengxiang⁵, CHEN Jingbiao^{2,6}

(1. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China; 2. State Key Laboratory of Photonic and Communications, Institute of Quantum Electronics, Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China; 4. China Quantum Measurement Technology Co. Ltd., Huzhou 313098, China; 5. College of Electrical & Electronic Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China; 6. Hefei National Laboratory, Hefei 230088, China)

Abstract: In order to solve the problems of wide linewidth of the vertical cavity surface emitting laser (VCSEL) used in traditional miniature and chip scale coherent population trapping (CPT) atomic clocks, a micro external cavity diode laser (ECDL) for CPT rubidium atomic clocks with a wavelength of 795 nm was designed using a self-developed laser chip and millimeter sized optical components. The laser has a size of less than 1 cm³ and features narrow linewidth and good direct modulation characteristics. Based on this ECDL, a miniature atomic clock with non-VCSEL light source has been achieved for the first time, with a short-term frequency stability of $3.70 \times 10^{-11}@1\text{ s}$ and $1.35 \times 10^{-12}@1\text{ 000 s}$. This is of

收稿日期: 2024-12-31; 修回日期: 2025-01-16

基金项目: 北京市科技新星计划项目(20240484696); 科技创新2030“量子通信与量子计算机”重大项目(2021ZD0303200); 温州重大科技创新项目(ZG2020046); 真空技术与物理重点实验室基金项目(6142207220101); 2024甘肃省人才重点项目

引用格式: 廉吉庆, 潘多, 赵天, 等. 基于外腔半导体激光器的微型原子钟[J]. 计测技术, 2025, 45(2): 26-32.

Citation: LIAN J Q, PAN D, ZHAO T, et al. Miniature atomic clock based on external cavity diode laser[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(2): 26-32.



great significance for the subsequent realization of high-performance miniature or even chip-scale atomic clock products.

Key words: external cavity diode laser; coherent population trapping; miniature atomic clock; narrow linewidth laser

0 引言

用两束相干激光作用原子,将原子基态的两个超精细能级耦合到一个激发态,如果相干激光的频率差严格等于基态超精细能级差对应的频率,则原子会被抽运到两个超精细能级的相干叠加态,处于该状态的原子不再吸收激光,原子对激光呈现“透明”状态,这种现象被称为CPT现象。基于CPT现象的原子钟被称为CPT原子钟^[1],由于该类原子钟物理部分没有微波腔的限制,可以实现微型化甚至芯片化设计,近年来一直是原子钟领域研究的热点之一。目前世界上体积最小的商用原子钟产品是基于CPT现象的原子钟,整体体积仅16 cm³,与恒温晶振体积相当,但具有更高的频率精度和守时性能,已被广泛应用于通信网络、GPS信号接收终端、无人驾驶系统、水下传感器系统等^[2]。

在微型CPT原子钟方案中,为了减小整机尺寸、降低物理系统的复杂度,相干激光通常用微波直接调制激光器产生。目前微型CPT原子钟方案普遍采用VCSEL作为光源,该类激光器具有封装小、直调带宽大的优点,非常适用于微型原子钟^[3-8]。基于VCSEL的CPT原子钟稳定度已达到 $5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2} (1 \text{ s} < \tau < 1000 \text{ s})$ ^[8],但研究表明:VCSEL线宽较宽(典型值为几十MHz),在原子共振时会引入较多噪声,导致基于VCSEL的CPT原子钟性能难以进一步提升^[10-11]。近年来,国际上有研究机构采用功率更高、线宽更窄的分布式布拉格反射(Distributed Bragg Reflector, DBR)激光器、分布式反馈(Distributed Feedback, DFB)激光器或ECDL开展CPT原子钟的技术研究,探索新的方案设计。但这些激光器尚未实现适用于CPT原子钟的微型封装,且直接调制带宽较小,绝大多数方案中微波信号需要通过声光调制器(Acousto-Optic Modulator, AOM)或电光调制器(Electro-Optic Modulator, EOM)实现对激光的调制^[11-16],因此基于窄线宽激光器的CPT原子钟尚未实现微型化样机。

本课题组研制了一种体积小于1 cm³,直调带宽大于4 GHz的795 nm微型ECDL作为制备CPT信号的光源,并在基于VCSEL的微型CPT铷原子钟基础上进行了相应的改进设计,实现了基于ECDL的微型CPT原子钟样机,对进一步开展高性能微型甚至芯片级CPT原子钟的研制具有非常重要的意义。

1 微型外腔半导体激光器

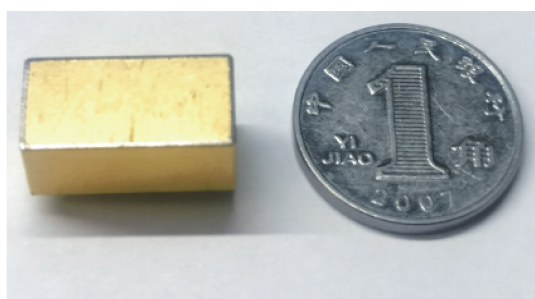
微型CPT原子钟采用微波直接调制激光器的方式实现相干光的制备,所用激光器应具有体积小、线宽窄、直接调制带宽大等特点。传统外腔激光器的腔长较大,在减小腔长的过程中,本课题组综合考虑了波长稳定性、线宽、频率可调性、光谱纯度、输出功率等多个因素,通过精确优化设计参数,综合芯片衰减、反射率组合和腔长长度,设计最佳匹配结果,在保证激光器调制带宽满足要求的前提下,将腔长缩短至10 mm左右。设计的微型外腔半导体激光器实物和内部结构如图1(a)、图1(b)所示,采用自研的激光器芯片和毫米量级特征尺寸的微型光学元件,整体封装尺寸为16 mm × 7 mm × 8 mm,体积小于1 cm³,满足微型CPT原子钟的使用需求。

1.1 激光线宽

与VCSEL相比,ECDL可以实现1 MHz甚至更小的线宽,这是ECDL用于微型原子钟最重要的一个性能优势。本课题组利用设计的激光控制电路将2支ECDL的波长调整至794.977 nm附近,并搭建拍频光路进行拍频。拍频时,2支ECDL的输出功率为8 mW左右,拍频信号输入频谱仪(型号为Keysight N9010B)后获得的线宽测试结果如图2所示,拍频线宽为213 kHz,对应每支激光器线宽为151 kHz,与VCSEL相比,线宽减小了数百倍。

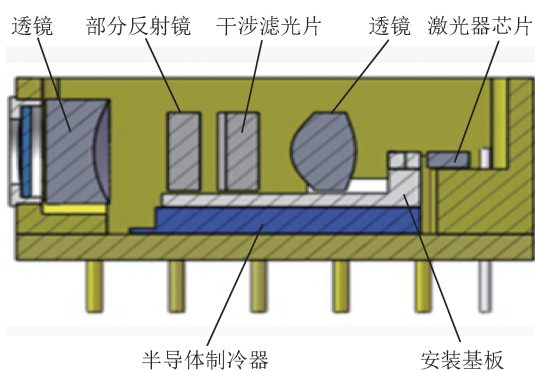
1.2 输出功率

ECDL的输出激光功率比VCSEL的大是其另一重要优势,虽然微型原子钟所需激光功率不高,但在使用大尺寸气室的高性能CPT原子钟方案中,



(a) 微型外腔半导体激光器实物图

(a) Photograph of the ECDL

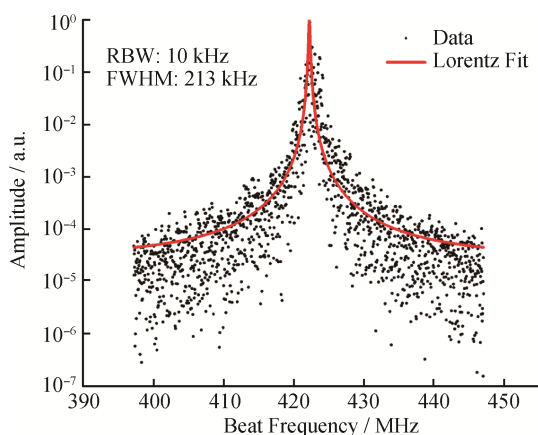


(b) 微型外腔半导体激光器结构示意图

(b) Structural diagram of the ECDL

图1 微型外腔半导体激光器

Fig.1 Miniature ECDL



注：分辨率带宽(Resolution Bandwidth, RBW)；半峰全宽(Full Width at Half Maxima, FWHM)。

图2 微型外腔半导体激光器拍频信号

Fig.2 Beating data of two identical miniature ECDLs

高激光功率有助于增加激光与原子作用强度，进而提升跃迁信号强度。另外，ECDL采用微波直接调制的方式产生相干激光，而微波信号对激光器的调制方式以调幅为主，该信号通过 Bias-Tee 直接加载到激光器驱动电流上，因此激光器功率-电流(P-I)曲线的斜率会在一定程度上影响调制所需的

微波功率，曲线线性度也会影响微波调制后的光谱边带相对强度。本课题组测试了ECDL功率-电流曲线，如图3所示，激光器阈值电流为25.9 mA，当电流达到阈值后，荧光变成激射光，光功率明显提升。该激光器最大输出功率约12.15 mW，输出功率比VCSEL典型输出功率大数十倍。

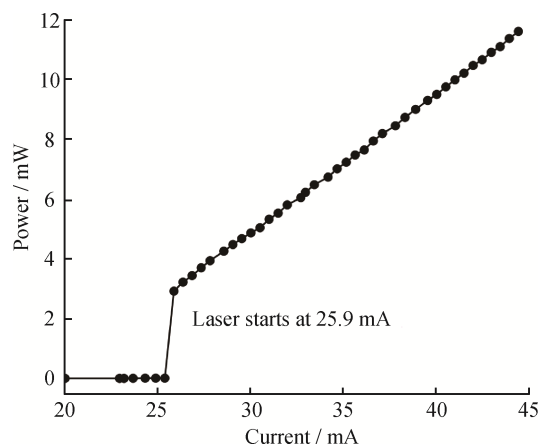


图3 微型外腔半导体激光器功率-电流曲线

Fig.3 P-I relationship of the miniature ECDL

1.3 频率调制与波长调谐特性

直接调制带宽是限制传统微型窄线宽激光器在CPT原子钟系统中应用的关键因素，传统窄线宽激光器的直接调制带宽通常较小，达不到CPT原子钟直接调制所需的微波频率范围，需要额外增加AOM或EOM实现微波信号对激光的调制，导致光路系统复杂，整机难以实现小型化。在微型CPT原子钟方案中，激光器调制带宽应大于原子基态超精细能级间对应频率的一半，对铷原子而言，该频率为3.4 GHz。因此，微型ECDL的直接调制带宽应至少大于3.4 GHz。

本课题组参照激光器调制带宽测试标准^[17]，利用网络分析仪(型号为Agilent N5230A)对ECDL的直接调制特性进行了测试，如图4所示。设置网络分析仪的扫频截止频率为6 GHz，对激光器进行调制使其输出扫频光信号，并将高速光电探测器获得的信号输入网络分析仪。网络分析仪获得的频率响应曲线如图5所示，以调制频率为0 GHz的增益值为初值，增益下降3 dB处(即由-11 dB下降至-14 dB)的频率即调制带宽，经测试被测激光器的调制带宽为4.8 GHz，满足CPT铷原子钟的使用要求。

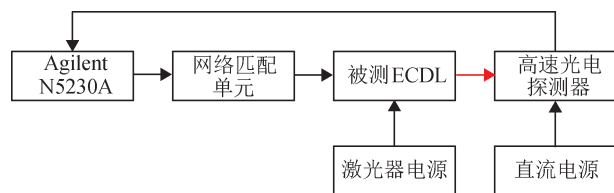


图4 直接调制带宽测试框图

Fig.4 Schematic diagram of direct modulation bandwidth testing

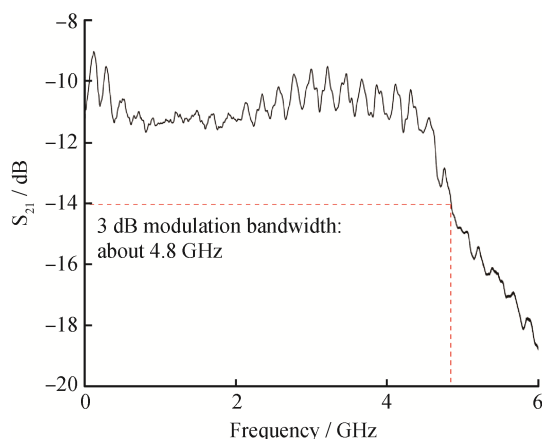


图5 微型外腔半导体激光器的频率响应曲线

Fig.5 Frequency response curve of the miniature ECDL

在微波信号调制激光器产生的多色激光中， ± 1 级边带用于产生CPT信号，为了使 ± 1 级边带的相干光强度最大、提升有用光的比例和CPT信号对比度，通常需要调整微波功率或激光器工作参数以优化调制深度。为判断锁定谱线是否为 ± 1 级边带产生以及微波调制深度是否合适，CPT原子钟工作时需要对激光器工作波长进行连续扫描，获得至少3个连续的吸收光谱，因此ECDL的连续可调谐频率范围应至少大于6.8 GHz。将激光器温度固定在30 °C，对激光器工作电流进行扫描，并用波长计(型号为HighFinesse WS6-200)测得激光器波长&频率与电流变化的对应曲线，如图6所示。激光器工作电流在26 ~ 46 mA内，激光波长连续可调谐范围为33 pm(即对应图6中波长从794.967 ~ 795.000 nm)，满足CPT铷原子钟对激光器的参数要求。

经测试，ECDL的线宽比VCSEL典型线宽小2个量级以上，且直接调制带宽和波长调谐范围满足CPT铷原子钟的使用需求。

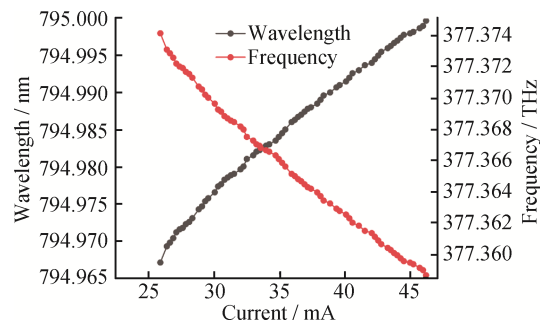


图6 微型外腔半导体激光器的波长&频率-电流曲线

Fig.6 λ -I and f-I relationships of the miniature ECDL

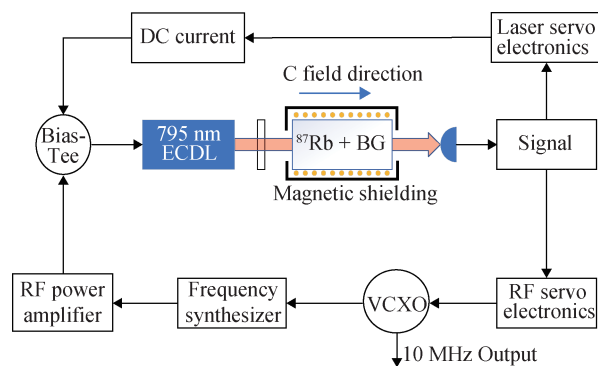
2 基于ECDL的微型CPT原子钟设计

利用ECDL，本课题组设计了微型CPT原子钟，原子钟设计方案、结构及样机如图7所示。微型CPT原子钟样机体积为48 cm³，稳态功率小于4 W。

微型原子钟的控制电路和气室组件在原有基于VCSEL的微型原子钟相关设计基础上实现。原子气室采用6 mm × 6 mm × 6 mm玻璃气室，壁厚1 mm，内部充入⁸⁷Rb原子和一定压强的惰性缓冲气体，气室外部的C场线圈为工作原子提供与光轴平行的恒定磁场。激光器温度设定为30 °C，3.4 GHz微波信号和直流电流通过Bias-Tee偏置器叠加后驱动ECDL，激光器发出的多色光在直流电流控制下实现波长扫描，激光锁定电路根据扫描获得的谱线信号实现激光波长锁定。激光波长锁定后，通过控制10 MHz温补晶振(Temperature Compensated Crystal Oscillator, TCXO)的输出频率实现微波信号扫描，获得CPT信号，并由微波锁定电路实现信号检测和微波频率锁定。

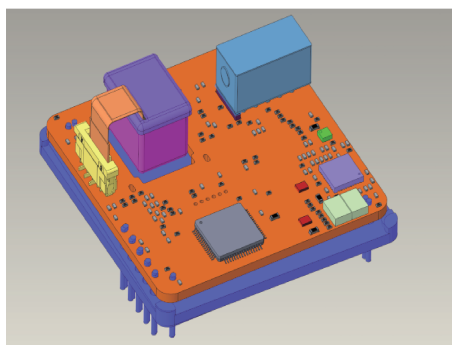
控制电路采用5 V供电，沿用了VCSEL-CPT微型原子钟的微波倍频、信号检测、伺服锁定等电路设计。由于外腔激光器的工作电流和输出功率比VCSEL的大10倍以上，激光器调制所需微波功率也需要相应提高，因此在原有微波倍频电路输出端增加微波功率放大模块。微波功率放大模块选用Minicircuits公司的低噪声微波功率放大器TSS-53LNB+，该芯片对3.4 GHz信号放大增益约20 dB，微波信号输出功率可达15 dBm以上，同时采用3 mm × 3 mm超小封装，能够满足电路微型设计需求。激光器直流电流源输出范围为20 ~ 50 mA，

覆盖激光器工作电流范围。



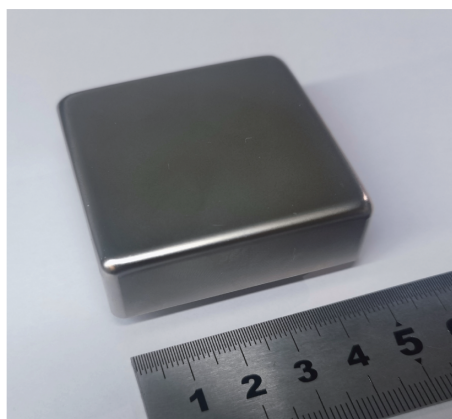
(a) 微型原子钟方案图

(a) Schematic diagram of the miniature atomic clock



(b) 微型原子钟结构示意图

(b) Structure diagram of the miniature atomic clock



(c) 微型原子钟实物图

(c) Photograph of the miniature atomic clock

图7 微型原子钟设计图

Fig.7 Design of the miniature atomic clock

3 微型原子钟测试与分析

对基于ECDL的微型CPT原子钟进行测试, 光信号由光电转换器探测, 滤波放大后被微控制器采集并发送至上位机观测, 获得的CPT信号如图8所示, 信号线宽约为767 Hz, 对比度为1.52%。

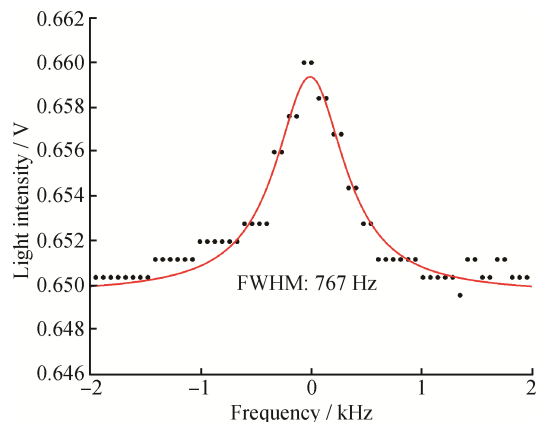


图8 基于ECDL的微型原子钟CPT信号

Fig.8 CPT signal of the ECDL-based miniature atomic clock

以高精度商用铷钟信号(其频率稳定度为 $5 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$)作为参考信号, 对微型原子钟锁定后的输出信号进行测试, 频率稳定度达到 3.70×10^{-11} @1 s, 1.35×10^{-12} @1 000 s, 如图9所示。

采用ECDL的微型原子钟短期稳定度达到了与基于VCSEL的微型原子钟稳定度相同的水平, 测试结果虽然并未展示出外腔激光器作为光源带来的性能优势, 但验证了该激光器在微型原子钟的应用可行性。对设计的微型原子钟噪声来源进行分析可知, 限制稳定度的主要因素是控制电路: 随着激光噪声的降低, 包含微波噪声、数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)控制量化噪声、信号处理噪声等在内的控制电路本底噪声成为系统的主要噪声, 限制了微型原子钟的稳定度指标。

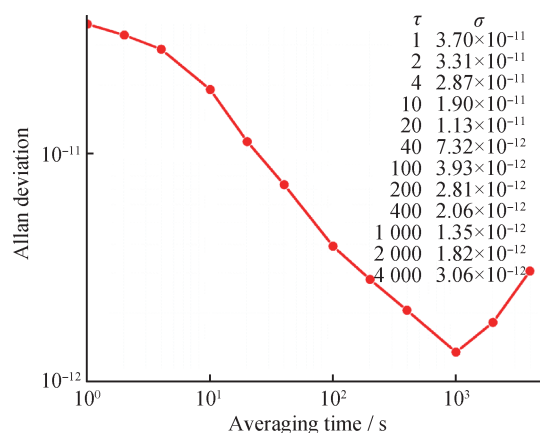


图9 基于ECDL的微型原子钟频率稳定度测试结果

Fig.9 Frequency stability of the ECDL-based miniature atomic clock

4 结论

本研究针对传统微型CPT原子钟的光源激光功率低、线宽大的问题,设计了一种微型外腔半导体激光器。经测试,激光器样品线宽为151 kHz,典型输出功率大于5 mW,直接调制带宽大于4 GHz,频率连续调谐区间大于15 GHz,满足微型CPT原子钟的应用需求。基于该激光器实现的微型CPT原子钟样机的体积为48 cm³,稳态功耗小于4 W,稳定度达到 $3.70 \times 10^{-11}@1\text{ s}$, $1.35 \times 10^{-12}@1000\text{ s}$,验证了该ECDL在微型CPT原子钟应用的可行性,为未来高性能微型原子钟的研制奠定了基础。之后本课题组的工作将集中在电路低噪声改进设计,以提升整机的稳定度,同时将开展基于外腔激光器的芯片级CPT原子钟的设计工作。

参考文献

- [1] VANIER J. Atomic clocks based on coherent population trapping: a review [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81: 421 - 442.
- [2] VANIER J, GODONE A, LEVI F. Coherent population trapping in cesium: dark lines and coherent microwave emission [J]. *Physical Review A*, 1998, 58 (3). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1905-3>.
- [3] SKVORTSOV M N, IGNATOVICH S M, VISHNYAKOV V I, et al. Miniature quantum frequency standard based on the phenomenon of coherent population trapping in vapours of ⁸⁷Rb atoms [J]. *Quantum Electronics*, 2020, 50: 576 - 580.
- [4] KITCHING J, KNAPPE S, VUKICEVIC M, et al. A microwave frequency reference based on VCSEL-driven dark line resonances in Cs vapor [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49 (6): 1313 - 1317.
- [5] KNAPPE S, SHAH V, SCHWINDT P D D, et al. A microfabricated atomic clock [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85 (9): 1460 - 1462.
- [6] TAN B, YUN P, YANG J, et al. A chip scale lin⊥lin quasi-bichromatic laser scheme [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102 (16). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4803481>.
- [7] VASKOVSKAYA M I, CHUCHELOV D S, TSYGAN KOV E A. Dual microwave frequency modulation of the VCSEL injection current for a CPT-based atomic clock [J]. *Optics Letters*, 2024, 49 (17): 4791-4794.
- [8] MICROCHIP. SA. 31m, SA. 33 and SAm. 35m: Miniature Atomic Clock (MAC) SA. 3Xm [EB/OL]. [2024. 11. 29]. <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00002981A.pdf>.
- [9] BARANTSEV K A, POPOV E N, LITVINOV A N. Influence of the finite linewidth of the laser radiation spectrum on the shape of the coherent population trapping resonance line in an optically dense medium with a buffer gas [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2015, 121 (5): 758 - 769.
- [10] DUMONT P, DANIEL J M, CAMARGO F A, et al. Evaluation of the noise properties of a dual-frequency VCSEL for compact Cs atomic clocks [J]. *Proceeding of SPIE*, 2015, 9349. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2077663>.
- [11] CHENG P F, ZHANG J W, WANG L J. Ramsey-coherent population trapping Cs atomic clock based on lin//lin optical pumping with dispersion detection [J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28 (7). DOI: 10.1088/1674-1056/28/7/070601.
- [12] YUN P, LI Q L, HAO Q, et al. High-performance coherent population trapping atomic clock with direct-modulation distributed Bragg reflector laser [J]. *Metrologia*, 2021, 58 (4). DOI: 10.1088/1681-7575/abffde.
- [13] YUN P, TRICOT F, CALOSSO C E, et al. High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 7. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.014018>.
- [14] HAFIZ M A, BOUDOT R. A coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock based on push-pull optical pumping [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118 (12). DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4931768>.
- [15] ZIBROV S, NOVIKOVA I, PHILLIPS D, et al. Coherent - population - trapping resonances with linearly polarized light for all-optical miniature atomic clocks [J]. *Physical Review A*, 2010, 81 (1). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.81.013833>.
- [16] WARREN Z, SHAHRIAR M, TRIPHATHI R, et al, Ex-

perimental and theoretical comparison of different optical excitation schemes for a compact coherent population trapping Rb vapor clock [J]. Metrologia, 2017, 54(4): 418 - 431.

- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 光通信用高速直接调制半导体激光器的测量方法: GB/T 21548—2021[S]. 2021.

State Administration for Market Regulation and National Standardization Administration. Methods of measurement of the high speed semiconductor lasers directly modulated for optical fiber communication systems: GB/T 21548—2021[S]. 2021. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 廉吉庆(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为原子钟技术。



通信作者: 潘多(1990—), 女, 副研究员, 博士, 主要研究方向为新型原子钟。