

国防科技大学建校 70 周年专题

中国空间站冷原子光钟激光系统*

刘云¹⁾²⁾ 王文海¹⁾²⁾ 贺德晶¹⁾²⁾ 周勇壮¹⁾²⁾ 沈咏¹⁾²⁾ 邹宏新^{1)2)†}

1) (国防科技大学理学院, 量子信息研究所, 长沙 410073)

2) (量子信息机理与技术湖南省重点实验室, 长沙 410073)

(2023 年 3 月 18 日收到; 2023 年 4 月 26 日收到修改稿)

中国研制的世界首台空间冷原子光钟于 2022 年 10 月 31 日随“梦天”实验舱成功发射, 进入中国空间站. 紧凑稳定的激光系统是实现光钟空间应用的关键环节. 本课题组提出类同步调谐方案, 研制了高性能外腔半导体激光器, 能同时满足空间光钟对激光器调谐范围、线宽和力学热学稳定性的要求. 采用注入锁定和锥形放大器进行激光功率放大, 满足了空间光钟对激光功率的要求. 本文简要介绍了空间冷原子光钟的系统构成、激光器方案和电控系统, 并对光钟激光系统面临的问题和发展方向进行了总结和展望.

关键词: 冷原子光钟, 中国空间站, 激光系统, 控制系统**PACS:** 42.55.Px, 07.60.-j**DOI:** 10.7498/aps.72.20230412

1 引言

原子钟以原子量子化的能级作为基准, 具有远超传统计时工具的精度, 目前已在现代守时系统和卫星导航系统中得到广泛应用^[1]. 在太空实现高精度原子钟的稳定运行, 将有助于与地面钟组建立频率比对链路, 构建更高精度时频体系^[2]. 在航天器上搭载原子钟可以为深空探测提供高精度导航定位^[3]. 对太空中不同引力势场处的原子钟进行频率比对可以实现对广义相对论的高精度验证^[4].

目前在太空中运转的较为成熟的原子钟均是基于热原子, 受多普勒频移和碰撞频移等因素影响, 无法充分发挥原子钟的精度优势. 为了进一步提升精度, 2016 年中国科学院上海光学精密机械研究所研制了世界首台在轨运行的激光冷却原子钟^[5]. 2019 年美国宇航局 (National Aeronautics and Space administration, NASA) 喷气推进实验室研

制了基于囚禁离子的深空原子钟^[6]. 这些钟虽然相比传统热原子钟准确度和稳定度都大幅提高, 但其钟跃迁频率只在微波频段, 进一步提升的空间有限. 光钟的钟跃迁频率相比微波钟高 4—5 个数量级, 在准确度和稳定度方面都具有显著优势, 因此受到广泛关注. 2006 年, 欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 开启了“空间光频原子钟” (SOC) 项目, 目前已实现了锶 (Sr) 原子和镱 (Yb) 原子可移动光晶格钟的演示验证^[7,8]. 俄罗斯航天局 (Russian Federal Space Agency) 也计划进行空间光钟测试, 目前已完成可移动 Yb 离子光钟原型机^[9]. 2021 年, 日本理化学研究所 (RIKEN) 研制了高精度可搬运 Sr 原子光钟, 有望进一步开展空间应用研究^[10]. 中国科学院国家授时中心于 2016 年开始空间光钟研究, 并于 2018 年完成了小型化 Sr 原子光钟物理系统的研制^[11].

激光器是光钟系统的核心部件. 空间光钟必须能够抵抗火箭发射过程中的巨大振动, 同时质量、尺寸、能耗等还受到严苛限制. 这就要求其激光系

* 国家自然科学基金 (批准号: 62105368, 62275268) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hxzou@nudt.edu.cn

统也具有极佳的紧凑性、能效比和稳定性. 目前的商用激光器可以满足地面指标要求, 但无法空间使用. 激光器在航天领域的应用始自 NASA 的一系列空间科学试验计划, 自 2001 年, MOLA, GLAS, CALIPSO, MLA, LOLA 等高精度科学测量装置进入太空进行相关物理参数测量, 但这些项目里采用的都是调 Q 脉冲 Nd:YAG 激光器^[12]. 2012 年, 为了探测大气层 CO_2 和 O_2 含量和分布情况, 研究气候变暖问题, 发射了基于分布反馈式 (distributed feed back, DFB) 激光器和光纤放大的连续激光器, 证明光纤激光器可以应用于航天系统^[13]. 2015 年, 法国空间研究中心 (National Centre for Space Studies) 和巴黎天文台 (Paris Observatory) 等单位联合发表了一篇关于 PHARAO 计划激光器的设计方案^[14]. 这个计划是为了将冷原子钟送到国际空间站, 整个光路系统围绕 Cs 原子所需要的 852 nm 波长, 将多台外腔半导体激光器 (external cavity diode lasers, ECDL) 利用光学锁相环连到一起, 其 ECDL 采用猫眼结构. 2016 年, 德国光梳生产厂家 Menlo-System 联合多家德国单位将飞秒光梳送上了太空^[15], 用于将来基于卫星的精密计量. 系统将飞秒光梳锁在 Cs 原子钟上, 然后对 Rb 原子饱和吸收稳频的 780 nm 激光器进行频率精确测量. 这里的 780 nm 激光器是采用集成化的 DFB 激光器来实现的, 他们将激光管、隔离器、光纤准直器和射频调制电路集成到了一起. 2017 年, 柏林洪堡大学 (Humboldt University of Berlin) 等单位合作实现了 K^{39} 所需 766.7 nm 外腔反馈半导体激光器, 并将两台激光器进行拍频锁定, 完成了太空验证实验^[16]. 激光器与前面所介绍的激光器完全不一样, 其直接将激光芯片集成到系统中, 芯片两边镀膜, 一边通过体全息布拉格光栅 (volume holographic Bragg grating, VHBG) 反射回来形成反馈, 然后主激光从另外一边射出, 并通过集成的透镜、隔离器和准直器耦合到光纤中输出. 对于 Sr 原子光钟, 所需要的波长种类较多, 目前都没有成熟 DFB 或分布式布拉格反射器 (distributed Bragg reflector, DBR) 光源, 且不在光纤增益波长范围之类, 因此只能采用非线性频率变换的方式产生, 导致体积和功耗等指标无法满足空间站要求. 2019 年, 德国联邦物理技术研究院 (Physikalisch Technische Bundesanstalt) 研制了一种基于电光调制器 (electro-optic modulator, EOM) 调制的紧凑型 ECDL^[17],

可以同时产生二级冷却光和搅拌光, 但该方案并未进行振动测试. 同年, 意大利比萨大学 (University of Pisa) 针对紧凑型 Sr 原子光钟研制了一种基于 Pr:GLF 晶体的半导体泵浦固体激光器^[18], 但同样未进行振动测试. 本次梦天舱中搭载的光钟系统所采用的超稳激光采用的是基于干涉滤光片的 ECDL^[19]. 该方案结构稳定, 抗振性能强, 但自由运行时线宽较宽, 且连续调谐范围小, 因此并不适用于其他波长的激光器. 本文介绍一种采用类同步调谐方案的 ECDL, 可以在保证调谐范围的同时获得较窄的线宽, 以及良好的力学稳定性和热学稳定性, 能够满足空间光钟的需要.

2 空间 Sr 原子光钟系统构成

中国空间站 Sr 原子光钟的系统构成如图 1 所示. 整套光钟共由 5 个单元构成, 包括: 光学单元、物理单元、电控单元、空间光梳系统和窄线宽激光器. 其中物理单元主要由放置 Sr 原子样品的真空系统和波长计构成. 真空系统中的 Sr 原子炉加热到 400 °C 后经过差分管和塞曼减速线圈, 进入主真空腔体后被磁光阱 (MOT) 陷俘. 物理单元中的波长计主要用于对系统的 6 路激光进行波长测量, 并将测量结果通过网口传输给电控单元. 物理单元中还有电荷耦合器件 (CCD) 相机和光电倍增管 (PMT) 探测器, 其结果同样传输给电控单元. 电控单元是整个系统的中央控制单元, 其不仅负责与其他各个单机进行通信和协调工作, 同时包含了对激光器、声光调制器 (AOM)、磁场线圈和光开关等的驱动, 以及时序控制.

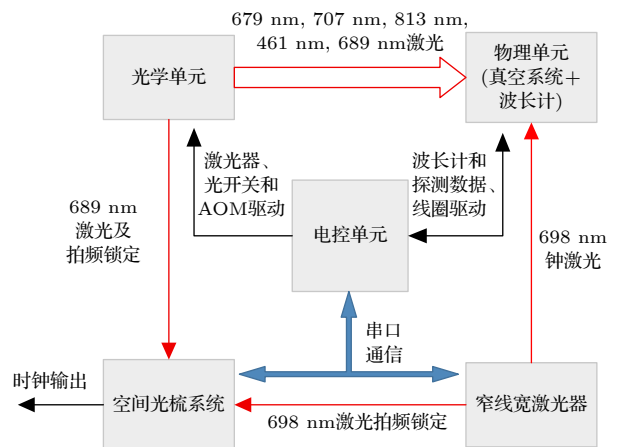


图 1 Sr 原子空间光钟系统方框图

Fig. 1. Schematic of Sr atom space optical clock system.

激光器是光钟里的核心部件,对于空间光钟而言,激光器能否满足航天要求是空间光钟能否成功发射的关键. Sr 原子相应的能级如图 2 所示. Sr 原子光钟系统需要 6 种不同输出波长的激光器,其中波长 461 nm 激光用于 Sr 原子塞曼减速与多普勒冷却, 679 nm 激光用于多普勒冷却的重泵浦光, 707 nm 激光用于重泵浦光和暗态消除, 689 nm 窄线宽激光器用于 Sr 原子二级冷却和原子扰动, 698 nm 窄线宽激光器用于 Sr 原子的钟跃迁探测, 813 nm 激光用于光晶格的产生.

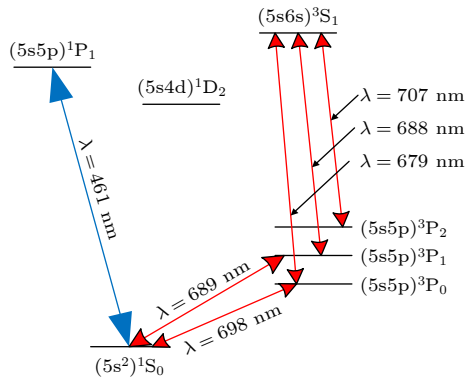


图 2 Sr 原子光钟系统所需 6 种不同波长激光
Fig. 2. Lasers at six wavelengths in Sr atom optical clock system.

光学单元总共包含了 679, 707, 813, 461, 689 nm 5 个波长的激光器和对应的集成光路. 所有激光通过光纤连接到物理单元, 进行原子的激光冷却和光晶格装载. 窄线宽激光器是一个独立的单元, 其将 698 nm 激光器锁定到 ULE 腔上, 并进行精密控温和隔振后, 一方面输送到物理单元进行 Sr 原子钟谱探测, 另一方面通过光纤输送到空间光梳单元作为光梳的光学参考基准. 空间光梳是经过加固和处理后的光纤光梳系统, 重复频率 200 MHz, 同时锁定到氢钟和窄线宽激光器上, 产生 100 MHz 的微波信号进行使用. 锁定后的空间光梳还作为 689 nm 的锁定参考源, 用于稳定和线宽压窄光学单元中的 689 nm 激光器. 窄线宽激光器和空间光梳分别通过串口与电控单元相连, 接收指令并上报单机状态, 最终配合光钟电控完成整套光钟的闭环运行.

光钟的 5 个单元都采用独立机箱安装, 所有单元之间采用光纤和电缆连接. 整个光钟由电控系统进行协调和控制分别实现原子的产生、减速、俘获、一级冷却、二级冷却、光晶格装载和钟谱探测

等功能, 同时电控系统还负责对各台激光器进行控制、频率稳定, 对超稳激光和光梳子系统输入的信号进行处理等功能. 最后光钟的时间信号从飞秒光梳输出, 进行传输和其他应用.

3 光钟激光器

受体积和功耗限制, 空间光钟系统所有激光器均选用半导体激光器. 激光器直接输出功率不足时则采用注入或半导体锥形放大 (tapered amplifier, TA) 的方式提升功率. 因此整个激光系统除 698 nm 钟激光器外, 包含了 5 台种子激光器、5 台注入激光器以及 1 台半导体 TA 放大器.

3.1 种子激光器

所有种子激光器均采用 Littman 结构光栅外腔反馈半导体激光器方案. 本文提出类同步调谐光栅 ECDL 方案, 用柔性铰链结构支架代替传统的悬臂梁结构支架, 能够模拟反射光栅或直角棱镜围绕虚拟轴点旋转, 并且大大缩短了旋臂长度^[20]. 该方案在保证激光器满足同步调谐条件, 获得宽泛无跳模调谐性能的同时, 使得激光器外形小巧、结构紧凑, 抗振性能得到有效提升, 可应用于航空航天、武器装备或其他环境恶劣的工业领域. 图 3 为 Littman 结构类同步调谐 ECDL 结构图, 包括输出窗口 5、激光二极管压环 6、激光二极管 7、激光二极管卡座 8、准直透镜卡座 9、准直透镜 10、反射光栅 11、三角棱镜 12、柔性铰链结构支架 13、压电陶瓷 14、压电陶瓷安装套 15 和高反镜 16. 另外, 1—4 项分别为激光器外底板、控制器接口和控温陶瓷, 未在图中体现出来, 可以参考发明专利^[21].

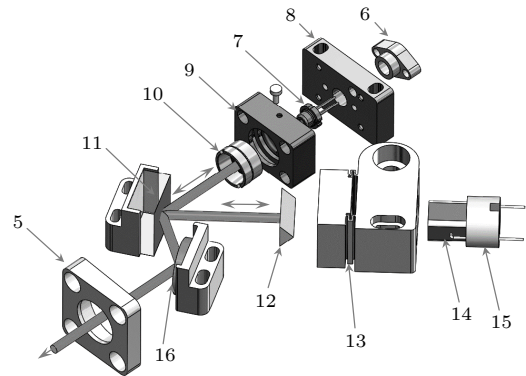


图 3 Littman 结构类同步调谐 ECDL 结构图
Fig. 3. Exploded view of Littman-configuration ECDL with synchronous-tuning-like scheme.

Littman 结构光栅 ECDL 的工作原理图如图 4 所示, 其中反射镜平面和光栅平面延长线的交点为最佳调谐旋转点 Q , 在激光管的输出耦合端面镀了增透膜的情况下, 想要获得连续不跳模调谐, 必须保持反射光栅与外腔的选模条件同步进动, 同时满足光栅方程与外腔驻波条件. 这里通过改变 PZT 支点的位置和调节两个柔性链的长度来满足类同步调谐条件, 最终达到最优的调谐效果.

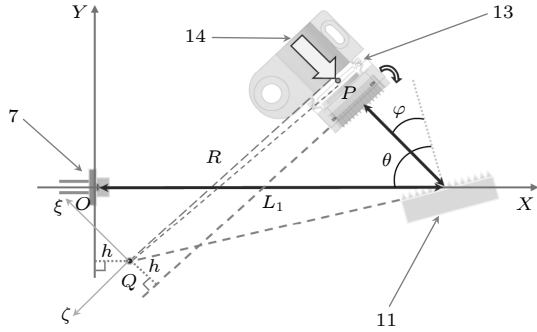


图 4 Littman 结构光栅 ECDL 的工作原理图 (P , 压电陶瓷作用点; θ , 光栅入射角; φ , 光栅一级衍射角; R , 理想旋转半径; L_2 , 实际旋转半径; h , 调谐点与 Y 轴的垂直距离; Q , 调谐支点)

Fig. 4. Functional schematic of Littman-configuration ECDL. (P , PZT action point; θ , grating incident angle; φ , first order diffraction angle of grating; R , ideal rotation radius; L_2 , actual rotation radius; h , the distance between the pivot point and the Y coordinate axis; Q , pivot point).

3D 机械结构装配图如图 5 所示. 其中图 5(a) 是整个种子激光器的安装爆炸图, 最左边的小镜架是窗口片和整型棱镜对; 图 5(b) 是主体部分安装完成后的结构图; 图 5(c) 是最终装配完成后的激光器效果图. 该激光器实际质量为 279 g 左右, 可以满足空间站的体积、质量和抗振性要求.

3.2 注入激光器

用于一级冷却的 461 nm 激光器需要功率在 600 mW 以上, 市面上只有倍频激光器可以满足这个要求. 但倍频激光器因其原理上的局限性, 无法同时满足低功耗、小体积和轻质量等约束条件, 不能用于空间站 Sr 原子光钟系统. 本系统采用种子激光器和注入激光器相结合的方式实现 461 nm 激光器的功率放大. 用于 Sr 原子二级冷却的 689 nm 激光同样存在功率不够的问题, 也是采用注入放大的方式来满足使用要求.

注入放大激光器原理很简单, 就是一个单管激光二极管结合精密控温来实现, 很多文献都有报道^[22], 这里不详细介绍其原理, 只简单介绍一下本文采用的注入激光器结构, 如图 6 所示. 图 6(a) 是注入激光器爆炸图, 激光二极管放入紫铜热沉中固定, 安装准直透镜将光束调成平行光, 然后通过整型棱镜对输出. 图 6(b) 和图 6(c) 则是装配完成的结构图.

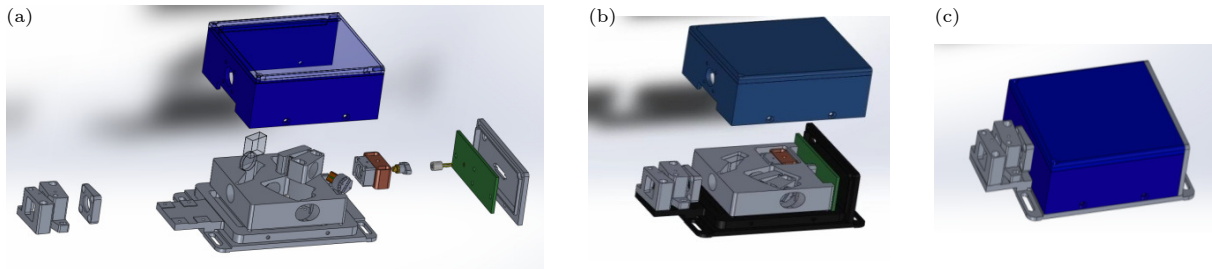


图 5 种子激光器结构装配图

Fig. 5. Assembly view of seed laser.

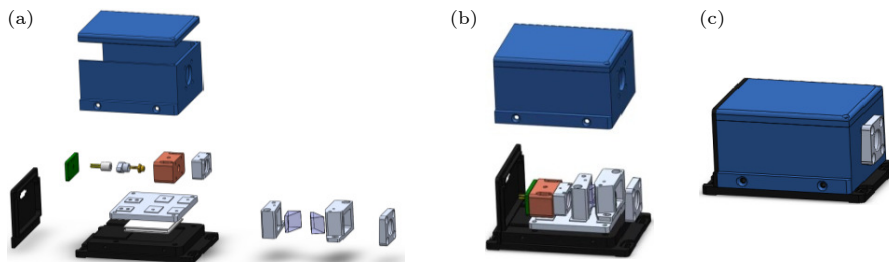


图 6 注入激光器结构装配图

Fig. 6. Assembly view of injection locked laser.

3.3 半导体 TA 放大器

Sr 原子光钟需要 813 nm 作为魔幻波长, 实现光晶格装载. 为了实现有效的原子装载, 满足钟跃迁谱的探测信噪比要求, 进入真空系统的 813 nm 激光功率需要达到 800 mW 以上, 考虑光路中的损耗和光纤耦合效率, 激光器出光功率应该在 2 W 以上. 采用种子激光结合半导体 TA 放大, 勉强可以满足使用要求. 图 7(a) 是 TA 放大激光器爆炸图, TA 芯片固定在紫铜热沉上, 两边分别用相同的非球面镜进行准直, 为了提升芯片的使用寿命, 采用密封设计, 避免灰尘和水汽进入腔体内. 图 7(b) 和图 7(c) 则是装配完成的结构图, 整个 TA 放大器结构非常紧凑, 并且包含了接口电路和连接器, 满足抗振和长寿命使用要求.

3.4 实物图和测试结果

所有激光器集成到 3 块光路面板中, 如图 8 所示. 左边的光路面板包含了 813 nm 种子、813 nm TA 放大器、689 nm 种子、679 nm 和 707 nm 激光器, 右边的两块光路面板分别包含了 2 台 689 nm

注入激光器和 3 台 461 nm 注入激光器. 特殊的铝合金基板材料和结构保证轻量化的同时有一定刚度, 加强筋和镂空处都经过精心的设计、仿真; 所有光学元件和镜架采用专门设计的小型化元件, 以满足空间站严格的体积和质量要求. 单块光学面板尺寸为 548 mm×380 mm×85 mm.

光钟激光系统所有种子激光器都是采用相同的结构, 性能相近. 针对其中的 689 nm 激光器自由运行时和拍频锁定后的频谱特性进行了测试, 如图 9 所示. 左图是激光器自由运行状态下的情况, 扫描带宽为 100 MHz, 激光线宽小于 1 MHz, 连续调谐范围根据波长不同有一定差别, 在无前馈的条件下通常为 3—5 GHz, 加入前馈后可达 20 GHz. 右图是通过拍频锁定, 将 689 nm 激光器锁定到一台商用超稳激光器后拍频得到的结果, 偏置频率选取 50 MHz, 扫描带宽 10 MHz, 锁定后拍频线宽小于 1 Hz. 经过实验验证, 所有激光器性能均满足空间 Sr 原子光钟的正常运行要求, 光钟在轨开机功耗测试正常.

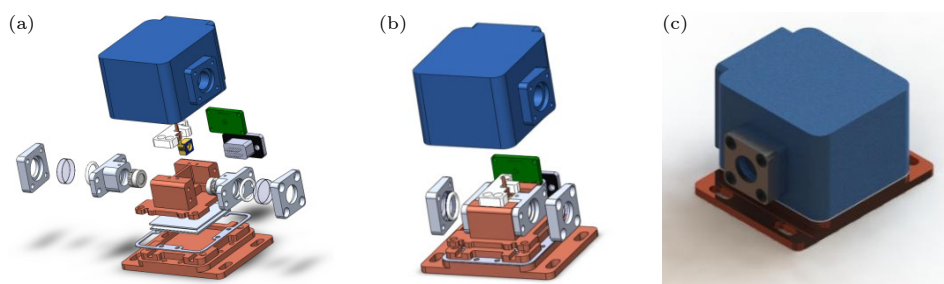


图 7 TA 放大器结构装配图

Fig. 7. Assembly view of tapered amplifier.

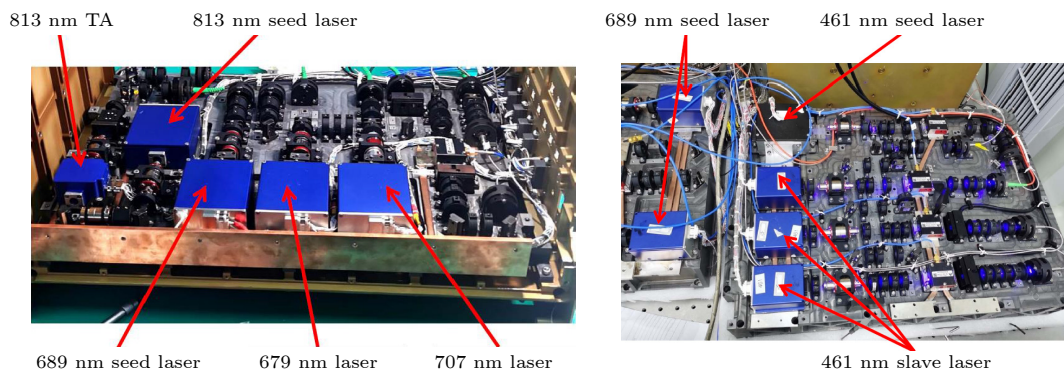


图 8 激光系统实物图

Fig. 8. Pictures of laser system.

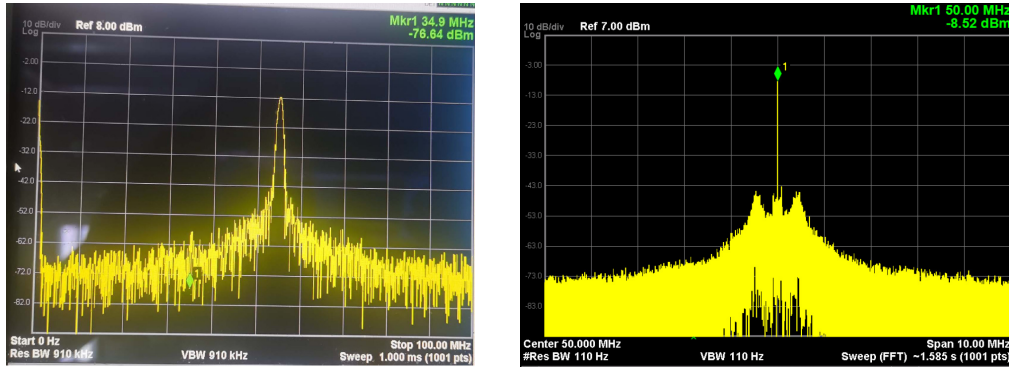


图9 689 nm 激光器拍频锁定前后频谱图

Fig. 9. Beating signals of 689 nm lasers before (left) and after (right) frequency offset locking.

4 光钟激光控制系统

光钟激光控制系统与其他驱动和控制模块协调工作, 共同构成独立的光钟电控单元. Sr 原子光钟需要 6 个波长的激光器, 如何有效地驱动它们, 并让它们协调工作是一件复杂的事情. 其中 461 nm 激光用于原子的一级激光冷却, 679 nm 和 707 nm 用于匀化和回泵, 提升一级冷却效率. 689 nm 激光用于原子的二级激光冷却, 将原子温度降低到 30 μ K 以下, 然后用大功率 813 nm 激光进行光晶格装载, 最后用 698 nm 激光进行钟谱探测. 整套光钟的运行必须严格按照时序进行, 具体时序可参考文献 [23]. 光钟激光控制系统集成在光钟电控单元中, 是其重

要的组成部分. 光钟电控单元是整套的光钟的核心控制系统, 它由 4 个基于 FPGA 的控制板和一系列的驱动电路协调完成, 其结构如图 10 所示.

其中光钟主控是整个光钟电控单元的核心, 其主要功能包括: 1) 时序控制磁场线圈驱动、AOM 驱动的微波开关、液晶波片和机械光开关; 2) 采集各路电源电压、温度和 3 路磁场信号; 3) 与数据采集和声光控制系统进行串口通信, 发送运行状态获得谱数据; 4) 与两套激光器控制系统进行通信, 将激光器设置参数发送给激光控制器, 同时将激光器监视数据反馈给地面; 5) 与波长计和 CCD 相机进行通信, 获取二者的测量数据, 一方面反馈控制激光器参数, 另一方面将数据发送到地面; 6) 与空间光梳和窄线宽激光器进行通信, 获取它们的状态信息, 并协调工作, 完成测频、锁频和闭环等功能;

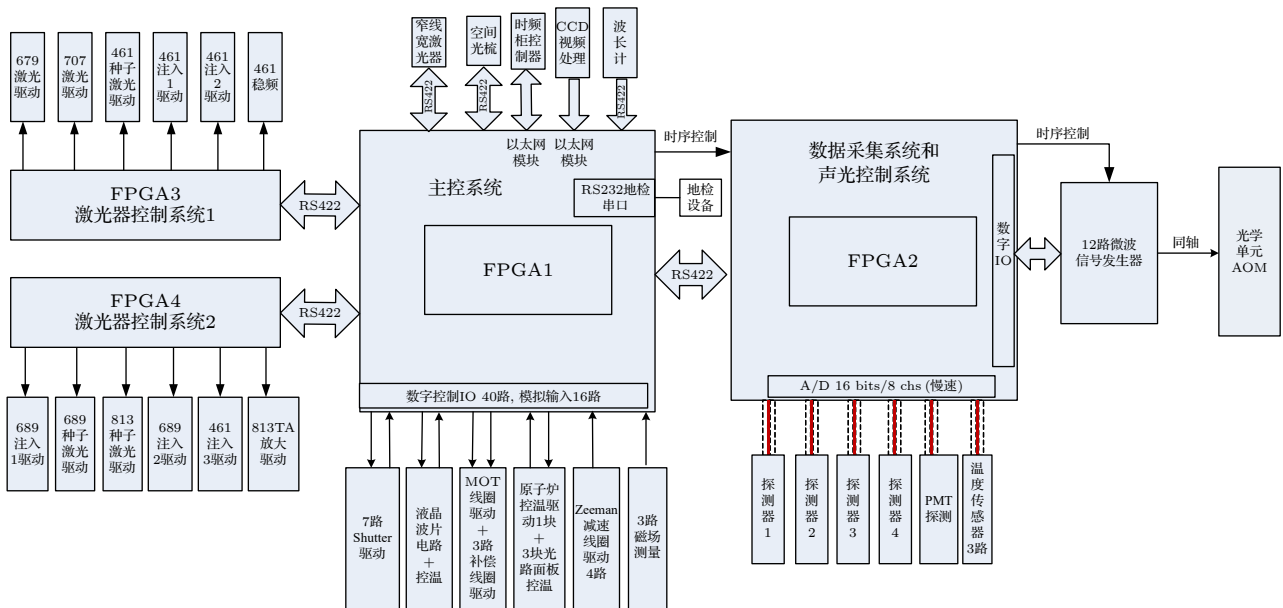


图10 空间光钟电控系统方框图

Fig. 10. Schematic of electronic control unit of space optical clock.

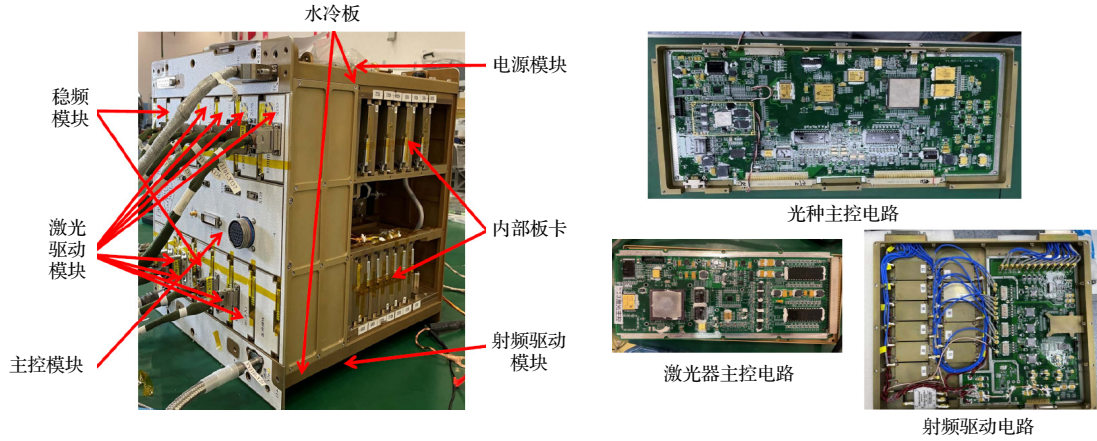


图 11 光钟电控单元 (左) 和主要控制电路 (右) 实物图

Fig. 11. Pictures of electronic control unit (left) and main control modules (right).

7) 与时频柜控制器通信, 获取地面指令, 同时将各个应用数据和工参数据进行下传; 8) 与地检设备或上位机按约定通信协议进行通信, 用于调试设备. FPGA1 控制整个光钟的工作模式和对时频柜的通信, 同时负责时序信号产生, 并通过硬件电路同步给其他 FPGA.

基于 FPGA2 的数据采集和声光控制系统, 主要完成对 12 路数字信号合成器 (DDS) 进行参数配置, 产生所需要的射频驱动信号. 产生的射频信号经过滤波和功率放大后, 由微波开关控制, 并通过同轴线缆输送到光学单元上的 AOM, 对激光信号进行移频、扫频和时序控制. 该系统还备有高速数据采集, 用于对扫谱产生的 PMT 数据进行采集和分析, 同时对真空系统的温度进行采集监视.

基于 FPGA3 和 FPGA4 的两套激光控制系统, 主要用于对 Sr 原子光钟所需要的 679, 707, 461, 689, 813 nm 五个波长的激光器进行参数设置和数据采集, 同时与光钟主控进行数据交互. 其中 461 nm 激光器包含种子激光和 3 台注入激光器, 用于增加功率, 满足 Sr 原子一级冷却需要. 689 nm 激光器包含种子激光和 2 台注入激光器, 用于增加功率满足 Sr 原子二级冷却需要. 813 nm 激光器由种子激光器和 TA 放大器两部分构成. 同时, 两套激光控制系统还需要控制 461 nm 稳频模块和 689 nm 拍频锁定模块, 实现两台激光器的波长锁定. 所有激光器调优都是基于软件自动完成, 相关算法在光钟主控中进行, 然后通过串口通信将所有激光器的参数值发送给激光主控, 并对激光驱动模块参数进行设置. 698 nm 钟激光器是一套独立的单机, 不受这里的控制系统控制.

空间光钟电控单元和主要控制电路实物如图 11 所示. 电控单元采用水冷进行散热, 两块水冷板分别放置在电控箱的顶端和底端, 所有单元模块通过结构与水冷板相连. 电控箱前面板包含了 11 台套激光器的驱动模块和稳频模块, 光钟主控单元放置在电控箱中部, 并通过前面板连接器引出信号. 发热量较大的电源模块和射频驱动模块分别与水冷板直接相连, 保持良好的散热特性. 其他内部板卡则放置在电控箱的两侧, 通过顶部和底部进行散热. 整个电控单元尺寸 465 mm×420 mm×410 mm, 总功耗小于 600 W, 且在不同工作模式下, 光钟软件会自动关闭不需要的能量供给. 图 11 右图是 3 块带 FPGA 配置项的控制电路实物图, 包含光钟主控、激光器主控和射频驱动模块. 其中, 两块激光器主控电路功能一致, 所以只放了 1 张图, 射频驱动电路实际上还包含了 DDS 信号产生电路和数据采集电路.

5 总结和展望

本文详细介绍了光钟里每种激光器的实现方案和结构设计, 结合电控系统共同构成了当前空间光钟的激光器系统; 所有模块均采用轨道可更换单元设计, 当某个模块出现故障时, 可由宇航员进行更换. 为了满足空间站时频柜的约束条件, 整套光钟按 5 个独立单元进行设计和装配. 这是目前首台进入太空的光钟, 成功实现了光钟的高度集成, 国产化率达到 80% 以上. 光钟系统里最敏感的就是激光器, 也是影响光钟可靠性最主要的因素. Sr 原子光钟所需要的激光波长主要集中在可见光波段,

受限于这个波段的半导体材料还不成熟, 激光二极管的寿命和功率都偏低, 只能采用注入放大的方式来满足使用需求, 这给系统带来了很大的不确定性, 而且严重限制了光钟的连续运行时间. 光钟要真正走向实际应用, 必须解决光源的问题, 针对光钟激光系统的发展方向, 作如下展望: 1) 从半导体材料和工艺入手, 解决激光二极管的功率和寿命问题; 2) 寻求有效的注入激光反馈控制机制, 确保其不失锁; 3) 采用光纤激光器结合频率变换技术代替半导体激光器方案, 但需要提升转换效率, 降低功耗, 满足更多场景的应用; 4) 发展微纳光学技术, 重点解决声光移频问题, 实现光学系统的高度集成. 中国空间站冷原子光钟是世界首台上天的光钟, 标志着中国在光钟工程化方面已经迈出了第一步, 相信不久的将来, 可以率先实现光钟的实际工程应用, 有效提升我国时频体系的精度, 服务于社会.

参考文献

- [1] Mallette L A, White J, Rochat P 2010 *IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium* Indian Wells, CA, USA, May 4–6, 2010 p11414524
- [2] Batori E, Ahmat N, Affolderbach C, Mileti G 2021 *Adv. Space Res.* **68** 4723
- [3] Thornton C L, Border J S 2003 *Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation* (New York: Wiley-Interscience) pp28–31
- [4] Wolf P, Blanchet L 2016 *Classical Quantum Gravity* **33** 035012
- [5] Liu, L, Lyu D S, Chen W B, Li T, Qu Q Z, W B, Li L, Ren W Dong Z R, Zhao J B, Xia W B, Zhao X, Ji J W, Ye M F, Sun Y G, Yao Y Y, Song D, Liang Z G, Hu S J, Yu D H, Hou X, Shi W, Zang H G, Xiang J F, Peng X K, Wang Y Z 2018 *Nat. Commun.* **9** 2760
- [6] Burt E A, Prestage J D, Tjoelker R L, Enzer D G, Kuang D, Murphy D W, Robison D E, Seubert J M, Wang R T, Ely T A 2021 *Nature* **595** 43
- [7] Schiller S, Gorlitz A, Nevsky A, Alighanbari S, Vasilyev S, Abou-Jaoudeh C, Mura G, Franzen T, Sterr U, Falke S, Lisdat C, Rasel E, Kulosa A, Bize S, Lodewyck, Tino G M, Poli N, Schioppo M, Bongs K, Singh Y, Gill P, Barwood G, Ovchinnikov Y, Stuhler J, Kaenders W, Braxmaier C, Holzwarth R, Donati A, Lecomte S, Calonico D, Levi F 2012 *European Frequency and Time Forum, Gothenburg, Sweden, April 23–27, 2012*, p412
- [8] Bongs K, Singh, Smith L, He W, Kock O, Swierad D, Hughes J, Schiller S, Alighanbari S, Origlia S, Vogt S, Sterr O, Lisdat C, Le Targat R, Lodewyck J, Holleville D, Venon B, Bize S, Barwood G P, Gill P, Hill I R, Ovchinnikov Y B, Poli N, Tino G M, Stuhler J, Kaenders W 2015 *C. R. Phys.* **16** 553
- [9] Khabarova K, Kryuchkov D, Borisenko A, Zalivako I, Semerikov I, Aksenov M, Sherstov I, Abbasov T, Tausenev A, Kolachevsky N 2022 *Symmetry* **14** 2213
- [10] Ohmae N, Takamoto M, Takahashi Y, Kokubun M, Araki K, Hinton A, Ushijima I, Muramatsu T, Furumiya T, Sakai Y, Moriya N, Kamiya N, Fujii K, Muramatsu R, Shiimado T, Katori H 2021 *Adv. Quantum Technol.* **4** 2100015
- [11] Zhao F J, Gao F, Han J X, Zhou C H, Meng J W, Wang Y B, Guo Y, Zhang S G, Chang H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 050601 (in Chinese) [赵芳婧, 高峰, 韩建新, 周驰华, 孟俊伟, 王叶兵, 郭阳, 张首刚, 常宏 2018 *物理学报* **67** 050601]
- [12] Krebs D J, Novo-Gradac A M, Li S X, Lindauer S J, Afzal R S, Yu A W 2005 *Appl. Opt.* **44** 1715
- [13] Yu A W, Krainak M A, Stephen M A, Chen J R, Coyle B, Numata K, Camp J B, Abshire J B, Allan G R, Li S X, Riris H 2012 *Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications*, San Francisco, California, United States, February 15, 2012 p823713
- [14] Lévêque T, Faure B, Esnault F, Delaroche C, Massonnet D, Grosjean O, Buffe F, Torresi P, Bommer T, Pichon A, Béraud P, Lelay J, Thomon S, Laurent P 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 033104
- [15] Lezius M, Wilken T, Deutsch C, Giunta M, Mandel O, Thaller A, Schkolnik V, Schiemangk M, Dinkelaker A, Kohfeldt A, Wicht A, Krutzyk M, Peters A, Hellmig O, Duncker H, Sengstock K, Windpassinger P, Lampmann K, Hülsing T, Hänsch T, Holzwarth R 2016 *Optica* **3** 1381
- [16] Dinkelaker A N, Schiemangk M, Schkolnik V, Kenyon A, Lampmann K, Wenzlawski A, Windpassinger P, Hellmig O, Wendrich T, Rasel E M, Giunta M, Deutsch C, Kürbis C, Smol R, Wicht A, Krutzyk M, Peters A 2017 *Appl. Opt.* **56** 1388
- [17] Schwarz R, Dorscher S, Al-Masoudi A, Vogt S, Li Y, Lisdat C 2019 *Rev. Sci. Instrum.* **90** 023109
- [18] Sottile A, Damiano E, Di Lieto A, Tonelli M 2019 *Opt. Lett.* **44** 594
- [19] Meng L Q, Zhao P Y, Meng F C, Long Chen, Xie Y, Wang Y K, Bian W, Jia J J, Liu T, Zhang S G, Wang J Y 2022 *Chin. Opt. Lett.* **20** 021407
- [20] Zou H X, Wang W H, Zhan Z H 2021 CN Patent ZL 202110005798.9 [2021-01-05] (in Chinese) [邹宏新, 王文海, 詹子豪 2021 国专利 ZL 202110005798.9 [2021-01-05]]
- [21] Zou H X, Zhan Z H, Wang W H 2021 CN Patent ZL 202110005871.9 [2021-01-05] (in Chinese) [邹宏新, 詹子豪, 王文海 2021 中国专利 ZL 202110005871.2 [2021-01-05]]
- [22] Shaffer M K, Ranjit G, Sukenik C I 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 046102
- [23] Guo F, Tan W, Zhou C H, Xia J, Chen Y X, Liang T, Liu Q, Liu Y, He D J, Zhou Y Z, Wang W H, Shen Y, Zou H X, Chang H 2021 *AIP Adv.* **11** 125116

SPECIAL TOPIC—The 70th anniversary of National University of Defense Technology

Laser system of cold atom optical clock in China Space Station^{*}

Liu Yun¹⁾²⁾ Wang Wen-Hai¹⁾²⁾ He De-Jing¹⁾²⁾ Zhou Yong-Zhuang¹⁾²⁾
Shen Yong¹⁾²⁾ Zou Hong-Xin^{1)2)†}

1) (*Institute for Quantum Science and Technology, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

2) (*Hunan Key Laboratory of Mechanism and Technology of Quantum Information, Changsha 410073, China*)

(Received 18 March 2023; revised manuscript received 26 April 2023)

Abstract

The world's first space optical clock (SOC) developed in China, which is composed of five subsystems, i.e. an optical unit, a physics unit, an electronic control unit, a space optical frequency comb, and an ultrastable laser, was successfully launched with the Mengtian space laboratory on October 31, 2022, and entered into the China Space Station (CSS). Compact and stable laser is a key element for the operation of the SOC. The optical unit consists of 5 lasers with wavelengths of 461, 679, 689, 707 and 813 nm, respectively. With a synchronous-tuning-like scheme, high-quality external cavity diode lasers (ECDLs) are developed as the seeds. The linewidths of the lasers are all reduced to approximately 100 kHz, and their tuning ranges, free from mode hopping, are capable of reaching 20 GHz, satisfying the requirements for the SOC. With careful mechanical and thermal design, the stability of the laser against vibration and temperature fluctuation is sufficiently promoted to confront the challenge of rocket launching. While the power from the ECDL is sufficient for 679-nm repump laser and 707-nm repump laser, additional injection lock is utilized for the 461-nm laser and 689-nm laser to amplify the power of the seeds to more than 600 mW, so that effective first and second stage Doppler cooling can be achieved. To generate an optical lattice with deep enough potential well, over 800-mW 813-nm lasers are required. Therefore, a semiconductor tapered amplifier is adopted to amplify the seed to more than 2 W, so as to cope with various losses of the coupling optics. The wavelengths and output power values of the 5 lasers are monitored and feedback is controlled by the electronic control unit. All the modules are designed and prepared as orbital replaceable units, which can be easily replaced by astronauts in case failure occurs. Now the lasers are all turned on and operate normally in CSS. More data of the SOC will be obtained in the near future. At present stage, according to our evaluation, the continuous operation time of the SOC is limited by the injection locked lasers, which are relatively vulnerable to mode hopping. Hopefully, this problem can be solved by improving the laser diode preparing technology, or developing fiber lasers with compact frequency conversion modules.

Keywords: cold atom optical clock, China Space Station, laser system, control system

PACS: 42.55.Px, 07.60.-j

DOI: [10.7498/aps.72.20230412](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230412)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62105368, 62275268).

[†] Corresponding author. E-mail: hxzou@nudt.edu.cn

中国空间站冷原子光钟激光系统

刘云 王文海 贺德晶 周勇壮 沈咏 邹宏新

Laser system of cold atom optical clock in China Space Station

Liu Yun Wang Wen-Hai He De-Jing Zhou Yong-Zhuang Shen Yong Zou Hong-Xin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 184202 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230412

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230412>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高精度空间站共视时间比对新方法

Super-high accurate new method of common-view time comparison based on space station

物理学报. 2018, 67(19): 190601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180842>

小型化铯光钟物理系统的研制

Miniaturization of physics system in Sr optical clock

物理学报. 2018, 67(5): 050601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172584>

锶原子光晶格钟

Strontium optical lattice clock

物理学报. 2018, 67(16): 160604 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181097>

绝热跃迁方法测量铯喷泉钟冷原子碰撞频移

Investigation of cold atom collision frequency shift measured by rapid adiabatic passage in cesium fountain clock

物理学报. 2020, 69(14): 140601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191800>

光梳主动滤波放大实现锶原子光钟二级冷却光源

Optical frequency comb active filtering and amplification for second cooling laser of strontium optical clock

物理学报. 2018, 67(8): 080601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172733>

锶原子光晶格钟自旋极化谱线的探测

Interrogation of spin polarized clock transition in strontium optical lattice clock

物理学报. 2018, 67(7): 070601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172759>