

引用格式: JIANG Chenhui, ZHANG Linbo, CHEN Long, et al. 10^{-16} Level 698 nm Ultra-stable Laser[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(11):1114001

江晨晖, 张林波, 陈龙, 等. 10^{-16} 量级 698 nm 超稳激光[J]. 光子学报, 2021, 50(11):1114001

10^{-16} 量级 698 nm 超稳激光

江晨晖^{1,2}, 张林波^{1,2}, 陈龙¹, 刘涛^{1,2}, 董瑞芳^{1,2}, 张首刚¹

(1 中国科学院国家授时中心, 西安 710600)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了实现高稳定度的锶原子光钟, 设计了基于 30 cm 腔超稳激光系统。系统性评估并抑制了系统中存在的主要噪声, 将参考腔的振动不敏感度降低到 $6 \times 10^{-10}/g$, 对应的频率不稳定性小于 3.6×10^{-16} ; 使用真空室内控温的方法, 将控温层的温度变化减小到 0.4 mK 以内, 腔上温度起伏在 1 Hz 处相比实验室环境温度降低了 5 个数量级; 功率抖动经抑制达到了 1 pW, 对应的频率不稳定性为 $2.4 \times 10^{-19}@1$ s; 剩余幅度噪声、光纤相位噪声经抑制后均小于 3×10^{-16} , 完全满足达到 10^{-16} 量级超稳激光的条件。与 10 cm 腔超稳激光系统进行拍频比对, 综合拍频结果和噪声分析显示, 系统锁定后激光频率不稳定度的秒稳小于 6.2×10^{-16} 。

关键词: 锶原子光钟; 超稳激光; 振动不敏感度; 温度控制; 功率抖动; 剩余幅度噪声; 光纤相位噪声

中图分类号: O439

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215011.1114001

10^{-16} Level 698 nm Ultra-stable Laser

JIANG Chenhui^{1,2}, ZHANG Linbo^{1,2}, CHEN Long¹, LIU Tao^{1,2}, DONG Ruifang^{1,2}, ZHANG Shougang¹

(1 National Time Service Centre, Chinese Academy of Science, Xi'an 710600, China)

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Abstract: To achieve a highly stable strontium atomic optical clock, the ultra-stable laser system based on 30 cm cavity is designed. Systematic evaluation and suppression of the main noise in the system is performed, so that the current vibration insensitivity of the reference cavity is reduced to $6 \times 10^{-10}/g$ with the corresponding frequency instability less than 3.6×10^{-16} . By using the method of temperature control in the vacuum chamber, the temperature changes is less than 0.4 mK in a day, and the temperature fluctuation of the cavity is 5 orders of magnitude lower than the laboratory environment temperature at 1 Hz. The power jitter is suppressed to 1 pW, and the corresponding frequency instability is $2.4 \times 10^{-19}@1$ s. The residual amplitude noise and fiber phase noise are less than 3×10^{-16} after being suppressed, which fully meets the requirements for ultra-stable lasers of the order of 10^{-16} . Comparing the beat frequency with a 10 cm cavity ultra-stable laser system, comprehensive beat frequency results and noise analysis show that the stability of the laser frequency instability is less than $6.2 \times 10^{-16}@1$ s after the system locked.

Key words: Strontium lattice clock; Ultra-stable laser; Vibration insensitivity; Temperature control; Power jitter; Residual amplitude noise; Fiber phase noise

OCIS Codes: 140.3425; 120.3180; 120.3940; 140.6088; 120.2230

基金项目: 国家自然科学基金委重大科研仪器设备研制专项(No.61127901), 国家自然科学基金青年科学基金(No.11903041)

第一作者: 江晨晖(1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超稳激光。Email: jiangchenhui15@mails.ucas.ac.cn

导师(通讯作者): 刘涛(1976—), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为超稳激光、时间频率传递。Email: taoliu@ntsc.ac.cn

收稿日期: 2021-04-15; 录用日期: 2021-06-22

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

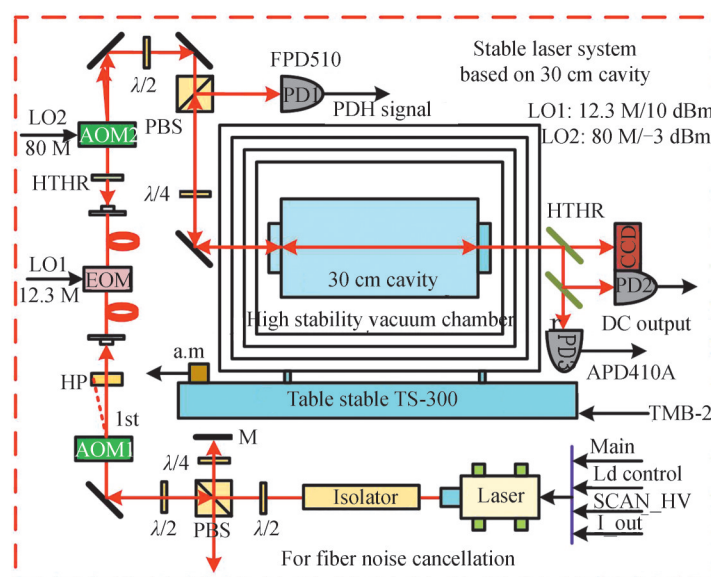
铯原子光钟有望成为下一代频率标准^[1-2],为了实现铯原子参考跃迁线的精密测量,需要研制具有极高频率稳定度的698 nm 稳频激光^[3-4]。通常使用 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频技术将激光频率锁定在一个作为参考的高精细度光学法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)腔的谐振频率上,因此作为频率参考的腔长成为决定超稳激光性能的关键因素。影响光学腔腔长的因素主要包括振动引起的腔体形变、温度起伏导致腔体的热胀冷缩和分子热运动引起的热噪声^[5]。振动和环境温度导致的腔长涨落通常使用隔振、隔热、控温以及设计振动不敏感的支撑结构等方式抑制,从而参考腔的腔长起伏主要受限于热噪声,也称为热噪声极限^[6]。

降低热噪声极限的方法主要有使用更长的腔体^[7]、用低机械损耗的材料作为腔镜^[8]、增大光斑^[9]以及降低参考腔的温度^[10]等。目前国内外多家单位开展了基于PDH稳频技术超稳激光的研究^[11-15],使用长腔作为频率参考,可以有效降低超稳腔的热噪声。但是参考腔对环境噪声敏感,导致各项噪声更加难以抑制。比如振动噪声,同样的振动环境和支撑结构条件下,长腔的形变量更大,长度稳定性更差^[16];多家单位报道了振动敏感度为 $10^{-11}/g$ 的10 cm腔,但是对于长腔,通常会设计相对复杂的支撑方式^[11]或者通过反复开启真空室调节支撑位置然后测量^[15],才能将振动敏感度降低到 $10^{-10}/g$ 量级。而要达到同样的温控指标,长腔的受控体更大,温度的热不均匀性也更加明显,因此控制难度也更高^[17]。由于腔内共振光功率与耦合进腔的光功率、腔的精细度成正比,因此对于高精度的参考腔,腔内共振光功率极大,腔镜吸收光功率导致的热效应同样也会影响腔长稳定度。此外,光纤相位噪声、剩余幅度噪声等都会影响锁定后的激光频率不稳定度^[18-21]。

本文搭建一种基于30 cm长腔的超稳激光系统,热噪声极限为 1×10^{-16} 。采用软性支撑和硬支撑结合的方法设计了一种支撑垫片,降低了振动敏感度对安装位置的敏感度,从而避免了设计复杂的支撑方式或者反复开启真空室进行位置的调整。系统性评估了抑制后的温度、剩余幅度、光纤相位等噪声,并测量了各项噪声与激光频率不稳定度之间的转换系数,计算得到各项噪声引起的激光频率不稳定度。

1 实验装置

激光稳频实验装置如图1所示,激光光源为实验室自研的698 nm外腔光栅反馈半导体激光器^[22],其输出功率达35 mW。该激光器的频率可通过改变注入电流进行快调制,改变外腔光栅上压电陶瓷



30 cm cavity: 30 cm-long cavity; Isolator: Optical isolator; $\lambda/2$: Half wave plate; $\lambda/4$: Quarter wave plate; PBS: Polarization Beam Splitter; M: Mirror; HP: High extinction ratio polarizer; AOM1, AOM2: Acousto-optic modulator; EOM: Electro-optic modulator; HTHR: Half transparent and half reflecting mirror; PD1, PD2, PD3: Photodetectors; a.m: Accelerometer; TMB-2: Vibration stimulus source; Table Stable TS-300: TS-300 vibration isolation platform; LO1, LO2: Signal source

图1 30 cm长腔稳频系统光机装置

Fig. 1 Optical mechanical device with 30 cm long cavity frequency stability system

(Piezoelectric, PZT)的电压进行慢调节。激光出射光经过一个隔离度为50 dB的光隔离器防止光反馈。每束光光强使用二分之一波片(Half wave plate, $\lambda/2$)和偏振分束棱镜(Polarization Beam Splitter, PBS)调节,第一对 $\lambda/2$ 和PBS取出一部分光作为本地信号,与两次经过光纤被半透半反镜(Half Transparent and Half Reflecting Mirror, HTHR)反射回的远端光信号拍频,测量其相位噪声反馈至执行器件AOM1抑制。为了减小剩余幅度调制噪声,在电光调制器(Electro-optic Modulator, EOM)前放置消光比为100 000:1的偏振器(型号:GT10-B),并旋转偏振器以调节光的偏振方向与EOM电场方向相同。激光经过EOM(型号:PM705-b)进行相位调制,使其产生一对幅度相等相位相反的边带。调制后的激光入射参考腔并被参考腔反射时,两次经过四分之一波片使得反射光的偏振方向和入射光垂直,从而再次经过PBS被反射至探测器PD1(Photodetectors, PD),载波与边带的拍频信号即为PDH信号。高增益、低噪声的光电探测器PD3探测光功率起伏噪声,反馈至AOM2抑制光功率噪声。

FP超稳腔是超稳激光的核心。在本系统中,使用30 cm长、15 cm直径的超低膨胀系数玻璃(Ultra-Low Expansion glass, ULE glass)作为腔体,一对平凹的熔融石英作为腔镜,其中凹镜的曲率半径为1 m,在腔镜外侧光胶上一对ULE环以减小腔体和腔镜热膨胀系数不匹配导致的形变。采用腔衰荡法测得该参考腔的精细度高达434 000(1 kHz腔线宽)。根据涨落耗散理论,计算了室温下该30 cm腔的热噪声极限为 1×10^{-16} 。

为了降低环境变化对参考腔稳定性的影响,优化了参考腔的支撑结构,参考腔水平支撑在4个圆形垫片上,垫片放置于Zerodur玻璃制作的U型槽上。为了减小空气折射率的变化并减小声音传播和热传导,将参考腔置于真空室和三层热屏蔽层中,使用一个75 L/s的离子泵维持真空,真空度稳定在 5×10^{-5} Pa附近。采用真空室内部温控的方式进行主动温度控制,温度一天内变化的峰峰值小于0.4 mK。为了达到更好的热均匀性以及散热,真空室和屏蔽层的材料均为铝,其中热屏蔽层的内外表面均镀金。整个真空室、温控系统、光路置于主动隔振台上以减小FP腔的环境振动,隔振台的噪底约为 $10^{-8}/g(>1 \text{ Hz})$ 。把整个系统置于隔音箱内减小声音噪声的影响,该隔音箱可以将外部音频噪声衰减20 dB以上,同时也减小了空气的对流,使得系统环境温度更加稳定。

2 各项噪声的抑制与评估

2.1 振动噪声的抑制与评估

振动是影响腔长稳定的主要因素,实验中使用加速度计和快速傅里叶变换分析仪测量了隔振台台面的基底振动噪声。隔振台开启后,工作在0.5~200 Hz频率区间对应的振动加速度均低于 $6 \times 10^{-7} g$,为了获得 10^{-16} 量级超稳激光,参考腔需要达到 $10^{-10}/g$ 量级的振动不敏感^[15]。肖特公司的零级微晶玻璃(Zerodur)硬度大,膨胀系数低,机械应力导致的相对位移很小,非常适合作为参考腔的支撑^[11]。因此在本系统中,使用Zerodur U型槽作为参考腔的支撑基底。参考腔的振动不敏感性与参考腔支撑点的位置有关,数值模拟分析了不同的支撑位置振动不敏感度的大小,如图2实线所示。以U型槽中心为坐标原点,光学方向为 x 轴,水平垂直于 x 轴为 z 轴时,硬支撑时4个支撑点分别于坐标 $(\pm 126.5, y, \pm 68)$ mm处具有最小的振动不敏感度。

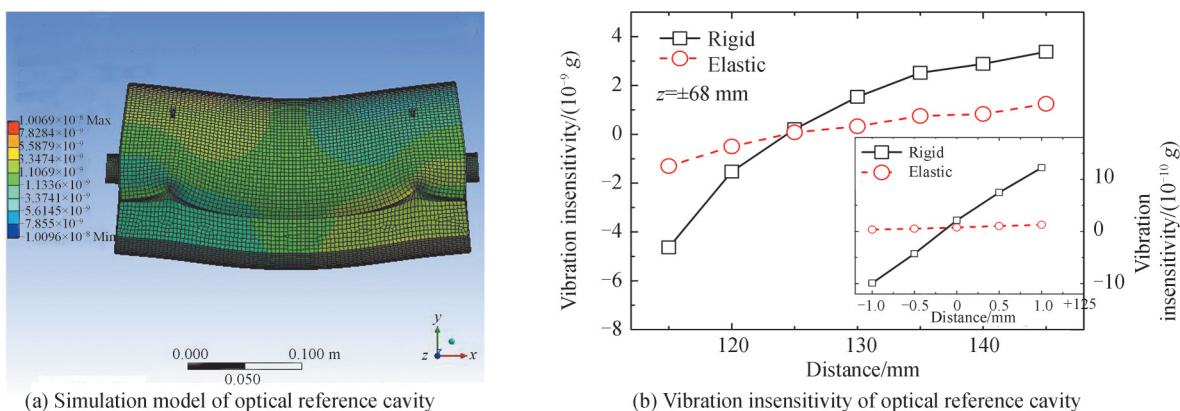


图2 光学参考腔振动不敏感度仿真结果

Fig. 2 Simulation results of vibration insensitivity of optical reference cavity

实际使用的参考腔材料不一定具有非常均匀的物理特性,安装过程中也会引入各种误差,这些误差会导致实际的振动不敏感度和计算值有偏差。文献[16]深入讨论了引起计算误差的各项原因,发现实验中支撑的4个点受力不均引起误差最主要的因素。为了消除此因素,可以使用软性支撑方法,然而如果支撑材料为全软性,在实际安装过程中腔体受力后会出现较大的整体转动,导致该支撑面处各点受力不均,甚至偏离支撑位置^[23],且重为15 kg的腔长期置于垫片上,该支撑物回溯性降低,导致振动敏感度下降。

为此设计了一种弹性垫片,用来降低低频振动噪声对参考腔长度稳定度的影响,组装如图3所示,硬度较大的Viton底座(C)和柱塞(A)中间夹着两个碟形弹簧垫圈(B)。将该弹性支撑垫片放置于Zerodur支撑槽上支撑超稳腔。仿真分析了使用这种弹性支撑方式与硬性支撑下的振动敏感度,如图2(b)所示。硬性支撑方式下支撑垫片的底面设置为固定约束(bond support),垫片顶面与参考腔的接触类型为绑定约束(bonded support)。弹性垫片的底座底面固定,底座顶面与碟形弹簧组底面、碟形弹簧组顶面与柱塞帽檐底面接触类型均为无摩擦约束(frictionless support)。碟形弹簧的组合方式为外径对合,设置为弹性约束(elastic support)。腔体与垫片顶面的接触类型均为绑定约束。对参与计算的所有实体设置-y方向的重力,并等距改变光轴方向的支撑位置,然后根据有限元分析得到腔体的形变,从而计算参考腔光学长度的变化^[16]。根据仿真结果可见,图2(b)所示,弹性支撑与硬性支撑相比,最佳支撑点的位置基本不变,但是斜率与代表硬性支撑的实线相比减小了近3倍,即对安装位置的敏感度降低。另一方面,由于实际安装中支撑垫片会偏离最优点导致4个点受力不均,因此分析了3个支撑点位于最佳支撑位置,而第4个支撑点偏离最优支撑点从而导致4点受力不均的情况,分析结果如图2(b)插图。可以明显看出,使用柔性支撑对4点受力不均更加敏感,偏离支撑位1 mm振动敏感度相较4点均匀降低了将近一个量级。而使用弹性支撑,偏离1 mm振动敏感度仅降低2倍左右,因此这种弹性垫片可以有效降低因安装误差导致的振动不敏感度。

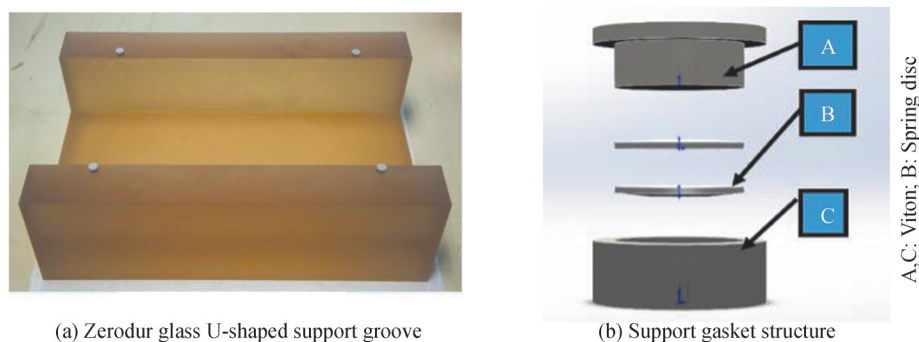


图3 超稳参考腔支撑结构

Fig. 3 The support structure of the ultra-stable reference cavity

由于加工误差及安装误差会导致振动敏感度的计算值与实际值之间存在偏差,因此需要通过实验测量系统的振动敏感度。实验中超稳激光系统置于主动隔振平台上,如图1所示。该隔振台隔振模式时的振动噪声密度如图4(a)所示,为了更精确地评估参考腔振动敏感度,实验中通过调制产生 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 量级的振动噪声,将振动噪声放大3个数量级,从而可以通过拍频信号精确评估振动敏感度的大小。该隔振平台可以通过外部配套的振动调制器(TMB-2)加载特定频率的振动信号,当加载垂直方向的振动激励信号进行测试时,同时测试了3个方向的振动,发现水平两个方向比垂直方向振动小两个量级以上,因此可以忽略水平方向振动对测试结果的影响^[24]。

如图4(b)所示,超稳激光锁定后在垂直方向分别加载10~70 Hz的振动。利用一套 10^{-15} 量级的超稳激光作为参考,同时记录振动和拍频信号,拍频结果如图4(c)所示。图4(d)是将激光频率抖动幅度除以振动幅度的结果,可见在低频区域参考腔的振动不敏感度约为 $6 \times 10^{-10}/g$,其中50 Hz处受市电干扰较大,故未在图中显示。

当主动隔振台工作时,可以根据振动不敏感度计算得到振动噪声 S_a 引起的激光频率噪声谱 $S_v(f) = k \cdot S_a(f)$ 。激光的相对阿伦偏差可从频率噪声谱计算出,即

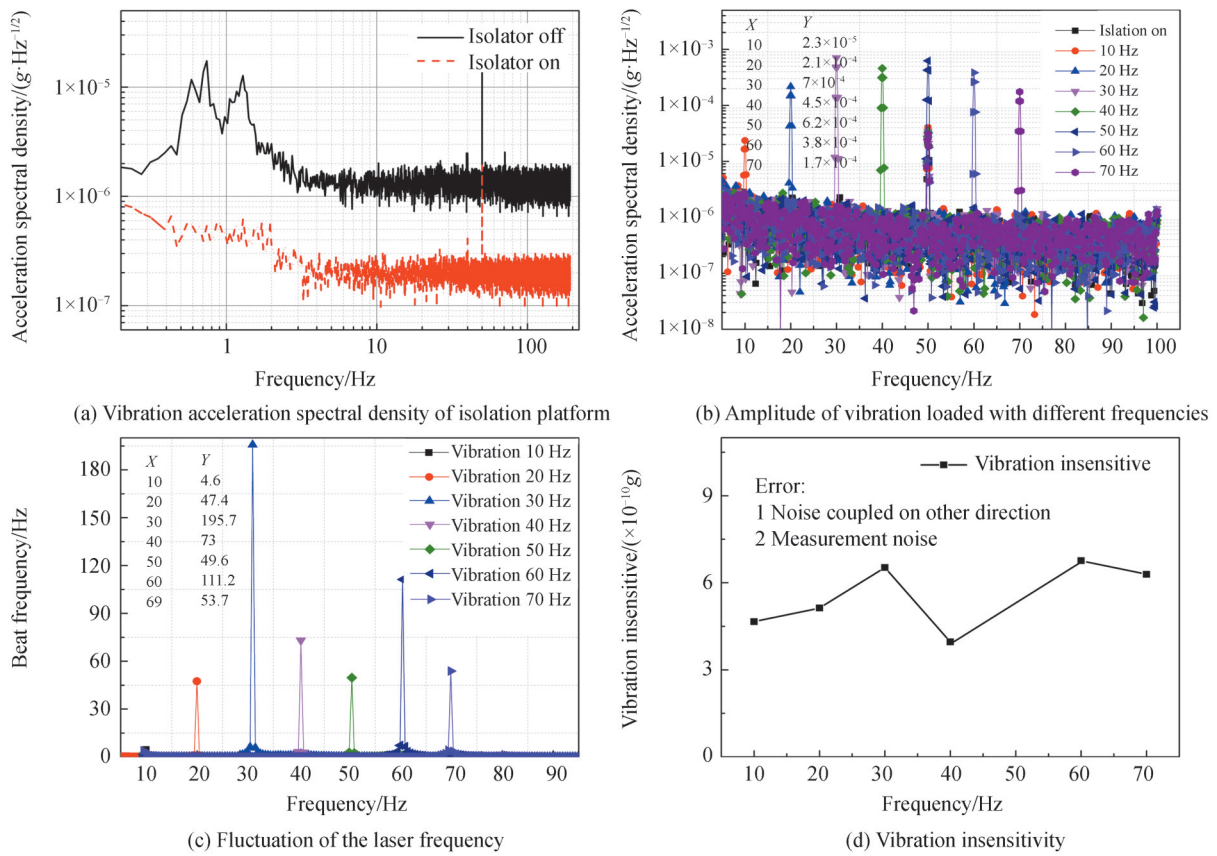


图4 振动噪声及频率敏感度测量
Fig. 4 Measurement of vibration noise and frequency insensitivity

$$\sigma^2(\tau) = 2 \int_0^\infty S_v(f) \frac{\sin^4(\pi f \tau)}{(\pi f \tau)^2} df \quad (1)$$

根据式(1)和图4(a)的测量结果可以算出振动引起的激光频率稳定性在平均时间大于4 s时均抑制到了该参考腔的热噪声极限以下。但是平均时间小于4 s的频率稳定性大于热噪声极限,其中秒稳达到了 3.6×10^{-16} 。

2.2 温度波动

ULE玻璃的热膨胀系数在 $0 \sim 50^\circ\text{C}$ 附近通常小于 $3 \times 10^{-8}/\text{K}$,参考腔的温度波动通常需要抑制到几十 nK 甚至更低^[25]。为了降低环境温度起伏噪声,实验中将参考腔放入三层表面镀金的铝制热屏蔽层中,如图5所示。屏蔽层和真空室的热时间常数约为 120 h,对应 1 Hz处温度噪声能降低5个量级以上。

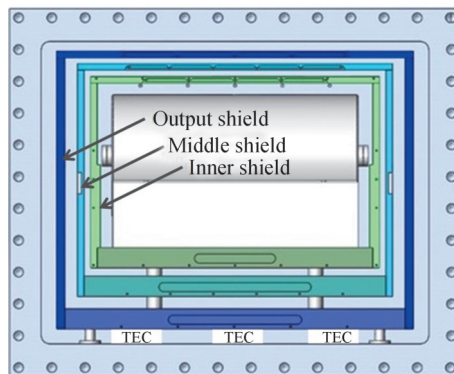


图5 真空室及屏蔽层结构
Fig. 5 Structure diagram of vacuum chamber and shielding layer

屏蔽层对温度起伏的衰减倍数与温度波动的频率成正比,即频率越低衰减倍数越小。真空室对温度的低通滤波作用可表示为^[26]

$$\frac{\Delta T_{\text{in}}(f)}{\Delta T_{\text{out}}(f)} \approx \frac{1}{f\tau} \quad (1)$$

式中, $\Delta T_{\text{out}}(f)$ 为真空室外的温度波动, $\Delta T_{\text{in}}(f)$ 为真空室内超稳腔感受到的温度波动, f 为傅里叶频率, τ 为真空系统的热时间常数。测量发现实验室的环境温度噪声主要集中在10 mHz以下的低频区域,此处屏蔽层的衰减倍数相比1 Hz处降低了两个量级以上,但是噪声却提高了两个量级以上,因此仅靠被动屏蔽很难降低低频温度噪声的起伏。使用主动温控的方法可以有效降低低频温度噪声的起伏。比较方便的做法是在真空室外部温控,然而由于热对流效应较强,这种方法受到环境的影响较大,存在环境温度噪声容易耦合进真空室、热均匀性差等特点,不利于有效温度控制。相比于外部温控,真空室内仅存在微弱的热辐射和热传导效应,因此在真空室内部主动温控的方法不需要非常大功率的加热制冷源即可对温度抖动进行补偿,可以有效降低环境热噪声对参考腔的影响,减小低频温度噪声的幅度。

系统中将6组(每组3个)泊尔贴贴在最外层屏蔽层与真空室底层之间,其中铝制真空室作为散热通道,控制最外层屏蔽层的温度变化。两个热敏电阻分别置于真空室控温层外侧的顶部和底部中间位置,优化比例积分(Proportional Integral, PI)参数后,最外层屏蔽层一天内的温度抖动峰峰值在0.4 mK以内。如图6所示,分析控温前后的温度频域噪声发现,对于噪声较大的10 mHz以下的低频温度噪声降低了2个量级以上。通过连续改变温度值测得零膨胀温度点为18.5°C,由于受控体太大且泊尔贴的功率不足,而实验室温度约为24°C,在偏离实验室温度较大的情况下难以将温度稳定的控制在1 mK以内。因此实验中将温度控制在21°C,该处对应的膨胀系数约为 $2 \times 10^{-9}/\text{K}$ 。据此可以推得该温控结果对应于激光频率不稳定性秒稳达到了 3×10^{-18} ,百秒内均低于参考腔的热噪声极限(1×10^{-16})。

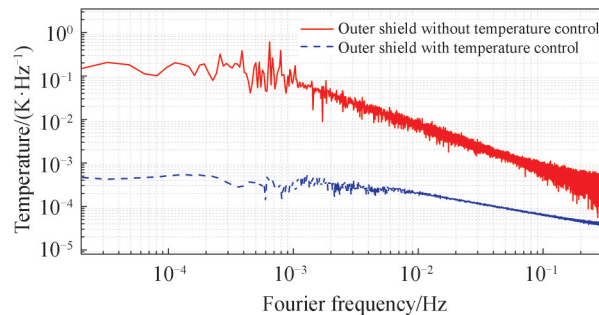


图6 最外层屏蔽层控温前后各频段温度衰减效果

Fig. 6 Temperature attenuation effect of each frequency band before and after temperature control of outermost shielding layer

2.3 激光功率稳定

当激光频率锁定于参考腔时,腔内光功率与腔的精细度成正比。由于超稳激光中使用的参考腔腔镜反射率非常高,对应的精细度高达几十万,即使非常微弱的人射光也会导致腔内非常大功率的共振光。而参考腔腔镜镀膜具有一定的吸收率,因此造成的热效应会引起腔镜镀膜的热胀冷缩,致使参考腔腔长不稳定^[27]。

系统使用的30 cm长腔精细度高达434 000,对应的反射率为99.999 28%。当耦合入腔的激光功率为10 μW 时,超稳腔腔内的功率达到1.37 W。该腔的基膜高斯光束半径为320 μm ,则光强高达426 W/cm^2 ,腔镜镀膜材料为 SiO_2 和 Ta_2O_5 组成的介质膜,吸收率约为 10^{-6} 量级,热膨胀系数约为 $6.5 \times 10^{-5}/\text{K}$ 。文献^[27]详细分析了由于功率抖动导致腔镜镀膜的热膨胀效应,将系统中的参数代入计算可以得出,当入射光有5%的抖动时,对应的激光频率不稳定性只能达到 10^{-13} 量级。

由于腔后的透射光与腔内光功率成一定的比例关系,因此将测量用的光电探测器置于腔后可以准确反映腔内光功率的抖动^[21]。实验中测量了参考腔对功率抖动的敏感度,如图7(a)所示。将参考腔锁定后,来回转动腔前的二分之一波片从而改变入腔光功率,同时用另一超稳激光系统作为参考测量功率变化导致的

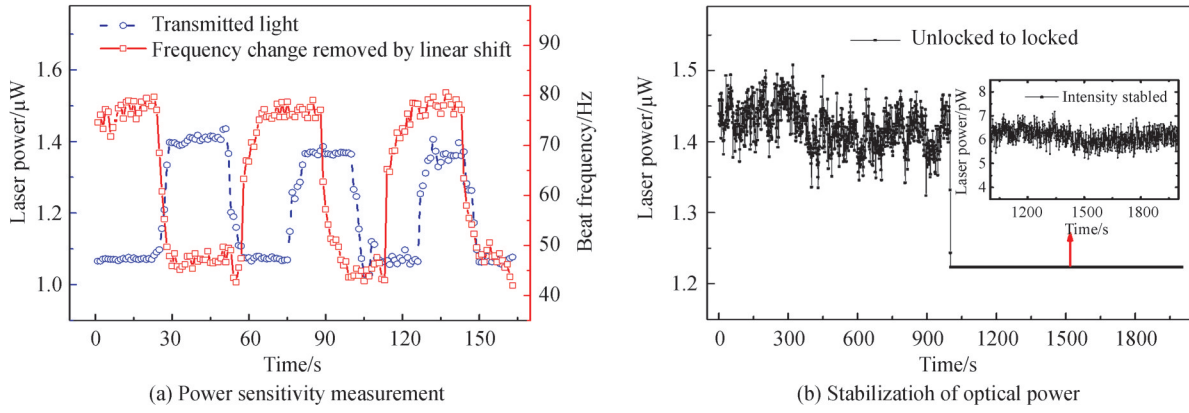


图7 光功率敏感度测量

Fig. 7 Measurement of optical power sensitivity

光频率变化,计算得到该参考腔的功率敏感度 $k_T = 85 \text{ Hz}/\mu\text{W}$ 。

为了将功率不稳定贡献的噪声降低到热噪声极限以下,需要将功率抖动降低到0.01%以下。腔后功率一般只有 $1 \mu\text{W}$ 甚至更低,因此需要使用本底噪声小、放大倍数大的探测器。这里使用 Thorlabs 的 APD410A/M,其散粒噪声为^[21]

$$\sigma_{\text{SN}}(\tau) = \sqrt{\frac{h\nu_0}{\eta P \tau}} \quad (2)$$

式中, h 为普朗克常数, ν_0 为激光频率, P 为光功率, η 为探测器量子效率, τ 为积分时间。实验中 $P=1.2 \mu\text{W}$,量子效率 $\eta = \frac{I_{\text{sc}}(\text{A})}{P(\text{W})} \times \frac{1240}{\lambda(\text{nm})} \times 100\% \approx 94\%$,激光波长 $\lambda=698 \text{ nm}$ 。将以上参数代入式(2),得到 $\sigma_{\text{SN}}(\tau) = 5.02 \times 10^{-7} / \sqrt{\tau}$ 。

探测器的散粒噪声对激光频率稳定度的影响 $\sigma_{y,\text{SN}}(\tau)$ 可表示为

$$\sigma_{y,\text{SN}}(\tau) = \frac{P}{\nu_0} k_T \sigma_{\text{SN}}(\tau) \quad (3)$$

可计算得到 $\sigma_{y,\text{SN}}(\tau) \approx 12 \times 10^{-19} / \sqrt{\tau}$ 。另外测试了光电探测器的暗电流噪声,将其转换为激光的频率不稳定度,对应的秒级稳定度达到了 1.7×10^{-20} 。因此该探测器的本底噪声对应的激光频率噪声远远小于参考腔的热噪声极限。将功率抖动噪声反馈给PI控制器后驱动AOM2实时补偿,控制前后的功率如图7(b),从图中可以看出,功率抖动降低了5个量级左右,对应的激光频率不稳定度达到了 $2.4 \times 10^{-19} @1 \text{ s}$,比热噪声极限小了近3个量级。

2.4 其他噪声

如图1所示,试验装置中使用的波导型相位调制器两端带有1.5 m长的保偏光纤会引入相位噪声,在光纤出光处放置一个半透半反镜,返回部分光再次经过光纤由此携带2倍的相位噪声^[20]。如图8(a)所示,光纤处于实验室自然状态下,相位噪声大于10 s时其阿伦方差大于系统的热噪声极限。返回的远端光与未经过光纤的本地光拍频后与AOM1的驱动频率出差频获得误差信号,然后将误差信号反馈给压控振荡器(VCO)改变AOM1的驱动频率,使之抵消由光纤引入的位相噪声^[28]。抑制后的噪声对应的阿伦方差在百秒内都小于 2×10^{-18} 。30 cm腔与另外一套系统进行拍频比对中使用的20 m长单模光纤同样会引入光纤相位噪声,如图8(a)所示,评估了该项噪声对应的激光频率不稳定度小于 2×10^{-16} (1~100 s)。与抑制EOM两端保偏光纤方案相同,20 m长光纤的相位噪声抑制后小于 2×10^{-18} (1~100 s)。

由于调制过程中边带不对称以及标准具效应等会引入剩余幅度调制(Residual Amplitude Modulation: RAM)噪声,使得鉴频信号的信噪比达不到散粒噪声极限,降低了稳频激光的稳定性。通常测量误差信号的电压值 V_{RAM} 即为RAM噪声,则RAM导致的频率噪声为^[26]

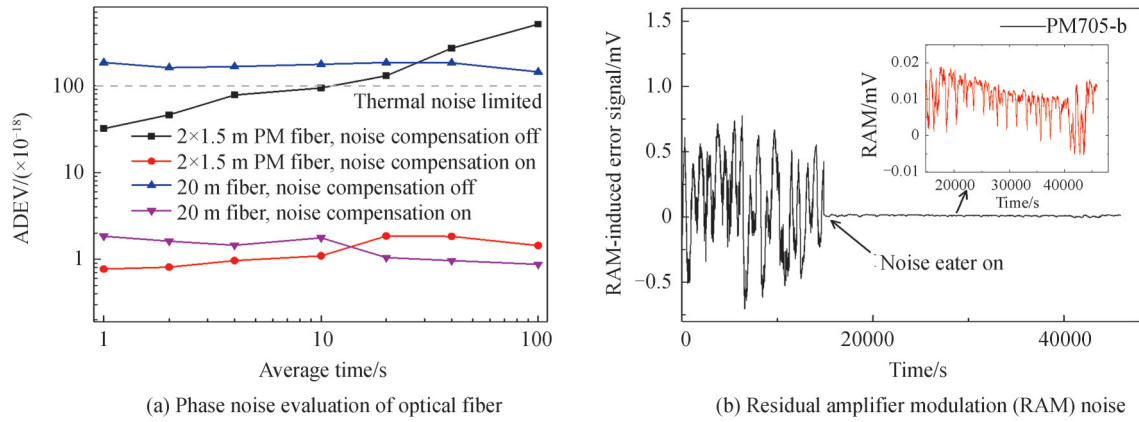


图8 光学技术噪声评估
Fig. 8 Optical technology noise evaluation

$$f_{\text{RAM}} = \frac{V_{\text{RAM}}}{D} \quad (4)$$

式中, D 是误差信号的斜率即鉴频系数。 D 值越大, 则激光频率对 RAM 越不敏感。鉴频系数可表示为

$$D = -8P_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \frac{1}{\Gamma} \quad (5)$$

式中, P_0 为耦合入腔的光功率, β 为调制深度, $J_0(\beta)$ 和 $J_1(\beta)$ 为 0 阶和 1 阶贝塞尔函数, Γ 是腔线宽。通过提高系统的调制深度和模式匹配效率, 系统中 $D \approx 10 \text{ mV/Hz}$ 。实验中使用高精度数字万用表 (Keithley 2002) 采集了未锁定时的误差信号电压值, 如图 8(b), 未抑制时峰峰值约为 1 mV。根据式 (4), 未抑制的 RAM 导致的频率噪声大于热噪声极限, 因此有必要采取措施降低 RAM。

系统中采用了以下措施降低 RAM: 1) 在电光调制器前放置高消光比的偏振片, 调节入射光的偏振与电光晶体的 z 轴夹角; 2) 控温, 将 EOM 置于特定形状的铝盒中, 并将温度控制在一天时间波动在 10 mK 以内, 降低由于温度波动导致的长期漂移; 3) 选用波导型电光调制器, 波导型的电光调制器具有半波电压低、易于反馈控制等特点, 实验中所使用的型号为 PM705-b 的电光调制器半波电压只有 4 V 左右, 无需使用高压放大器, 使用实验室自制的 PI 控制电路反馈抑制 RAM 噪声。如图 8(b), 通过上述措施抑制后的噪声比未抑制时降低了约两个量级, 对应的频率不稳定性百秒内小于 3×10^{-16} , 十秒内均小于长腔的热噪声极限 (1×10^{-16})。

3 拍频比对与分析

与实验室一套基于 10 cm 光学参考腔的超稳激光系统进行拍频, 10 cm 参考腔为全 ULE 腔, 该系统在基膜时的热噪声极限为 9.6×10^{-16} 。为了更加准确地测量锁定于 30 cm 腔的激光频率不稳定性, 将 10 cm 腔锁定于 HG_{02} 模, 根据文献 [29] 引入 g 因子计算 FP 腔高阶模热噪声极限的方法, 计算得出该模式下对应的热噪声为 8×10^{-16} 。10 cm 腔系统在拍频比对的过程中控制在 26°C , 同样置于型号为 TS-300 的隔振台上。两套系统置于不同的光学平台上, 光学平台均离地高 1.2 m 左右。

拍频结果和各项噪声如图 9 所示, 图中给出了限制 10 cm 腔激光频率稳定度的主要限制因素 RAM 对应的激光频率不稳定性。由于该 10 cm 腔的腔线宽约为 9.8 kHz, 根据式 (4), 误差信号的斜率 D 约为 30 cm 腔的 10 倍左右, 该系统中 RAM 导致的频率抖动比 30 cm 腔系统大一个数量级, 从而限制了参考系统的激光频率稳定度。比较 30 cm 腔和 10 cm 腔系统的噪声, 发现拍频结果在 4 s 内主要受限于 10 cm 腔的热噪声, 大于 4 s 主要受限于 10 cm 腔系统的 RAM 噪声。从长腔的各项噪声评估结果可以看出, 百秒内 30 cm 腔温度、光纤和功率变化等引入的噪声导致的频率不稳定性都被抑制到了热噪声极限以下, 10 s 以上主要受限于 RAM 噪声, 4 s 以下主要受限于振动噪声, 而 1 s 处振动噪声对应的频率不稳定性约为 3.6×10^{-16} , 拍频频率的秒稳为 8.8×10^{-16} , 一般在拍频比对中认为两套系统中其中一套系统的性能至少是拍频结果的开方, 因此实验中有一台激光器的频率不稳定性至少可以达到 6.2×10^{-16} 。由于 10 cm 腔系统只能达到 8×10^{-16} 的稳定度。综合长腔系统中抑制后的各项噪声, 认为基于 30 cm 腔的系统激光频率不稳定性小于 6.2×10^{-16} 。

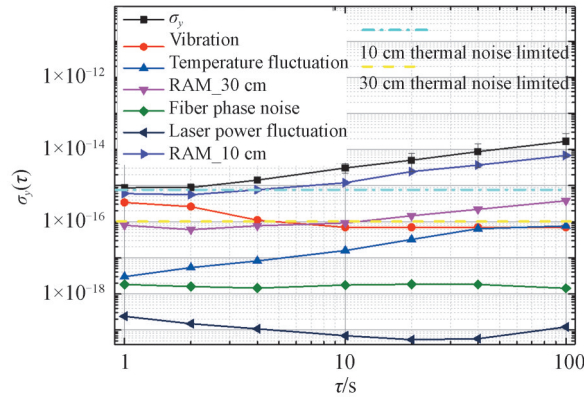


图9 30 cm长腔系统与10 cm参考腔系统拍频结果以及长腔系统中存在的各项噪声评估

Fig. 9 Beat frequency result of that 30 cm long cavity system and the 10 cm reference cavity system and assessment of various noises in the long cavity system

4 结论

锁定于长腔的超稳激光系统可达到的频率不稳定性更低,但同时由于长腔的长度长、体积大,相比短腔振动和温度噪声更大,也更敏感。本文设计了一种弹性的支撑垫片,利用简单的支撑结构将参考腔的振动敏感度降低到了 $6 \times 10^{-10}/g$;使用内部温控的方式减弱了环境温度的耦合,将 10 mHz 以下的温度噪声抑制了两个数量级,百秒内对应的激光频率不稳定性降低到了热噪声极限以下;高精度参考腔受功率抖动的影响更加明显,实验中使用腔后稳定的方法,将功率抖动抑制在 1 pW 以内,相比抑制前降低了 5 个数量级;对光学系统中存在的光纤相位噪声和剩余幅度噪声也进行了抑制并降低到了热噪声极限以下。最终实现了秒稳小于 6.2×10^{-16} 量级的 698 nm 超稳激光,为未来以镱光钟为时间标准的潜在应用提供参考。

参考文献

- [1] GILL P. When should we change the definition of the second[J]. Philosophical Transactions, 2011, 369(1953): 4109-4130.
- [2] GUO Feng, KONG Dehuan, ZHANG Qiang, et al. System development and clock transition spectroscopy detection of transportable 87Sr optical clock[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(9): 0902001.
郭峰,孔德欢,张强,等.可移动型铷原子光钟的系统研制与钟跃迁谱线探测[J].光学学报,2020,40(9):0902001.
- [3] FOX R, SHERMAN J, MA Longsheng, et al. Making optical atomic clocks more stable with 10^{-16} level laser stabilization[J]. Nature Photonics, 2011, 5: 158-161.
- [4] LIU Tao, CHEN Long, ZHANG Linbo, et al. Development of 698 nm ultra-stable lasers[J]. Journal of Time and Frequency, 2016, 39(3): 202-206.
刘涛,陈龙,张林波,等.698nm超稳激光研究进展[J].时间频率学报,2016,39(3):202-206.
- [5] LEVIN Y. Fluctuation-dissipation theorem for thermo-refractive noise[J]. Physics Letters A, 2008, 372(12): 1941-1944.
- [6] NUMATA K, KEMERY A, CAMP J. Thermal-noise limit in the frequency stabilization of lasers with rigid cavities[J]. Physical Review Letters, 2004, 93(25): 250602.
- [7] DIDIER A, IGNATOVICH S, BENKLER E, et al. 946-nm Nd:YAG digital-locked laser at 1.1×10^{-16} in 1 s and transfer-locked to a cryogenic silicon cavity[J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1781.
- [8] OSCAR R. Fundamentals of interferometric gravitational wave detectors[J]. Contemporary Physics, 2018, 59(4): 426-428.
- [9] AMAIRI S, LEGERO T, KESSLER T, et al. Reducing the effect of thermal noise in optical cavities[J]. Applied Physics B, 2013, 113(2): 233-242.
- [10] MATEI D, LEGERO T, HAEFNER S, et al. 1.5 μ m lasers with Sub-10 mHz linewidth[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(26): 263202.
- [11] KESSLER T, HAGEMANN C, GREBING C, et al. A sub-40 mHz linewidth laser based on a silicon single-crystal optical cavity[J]. Nature Photonics, 2011, 6(10): 687-692.
- [12] HÄFNER S, FALKE S, GREBING C, et al. 8×10^{-17} fractional laser frequency instability with a long room-temperature cavity[J]. Optics letters, 2015, 40(9): 2112-2115.
- [13] LI Ye, LIN Yige, WANG Qiang, et al. An improved strontium lattice clock with 10^{-16} level laser frequency stabilization[J]. Chinese Optics Letters, 2018, 16(05): 65-69.
- [14] ZENG Xiaoyi, YE Yanxia, SHI Xiaohui, et al. Thermal-noise-limited higher-order mode locking of a reference cavity

- [J]. Optics Letters, 2018, 43(8): 1690-1693.
- [15] JIN Li, JIANG Yanyi, YAO Yuan, et al. Laser frequency instability of 2×10^{-16} by stabilizing to 30-cm-long Fabry-Pérot cavities at 578 nm[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18699.
- [16] CHEN L, HALL J, YE Jun, et al. Vibration-induced elastic deformation of Fabry-Perot cavities[J]. Physical Review A, 2006, 74(5): 53801-53801.
- [17] DAWKINS S, CHICIREANU R, PETERSEN M, et al. An ultra-stable referenced interrogation system in the deep ultraviolet for a mercury optical lattice clock[J]. Applied Physics B, 2010, 99(s1-2): 41-46.
- [18] SHI Xiaohui, ZHANG Jie, ZENG Xiaoyi, et al. Suppression of residual amplitude modulation effect in the Pound-Drever-Hall locking[J]. Applied Physics B, 2018, 124(8): 153.
- [19] ZHANG Wei, MARTIN M, BENKO C, et al. Reduction of residual amplitude modulation to 1×10^{-6} for frequency modulation and laser stabilization[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1980.
- [20] MA Longsheng, JUNGNER P, YE Jun, et al. Delivering the same optical frequency at two places: accurate cancellation of phase noise introduced by an optical fiber or other time-varying path[J]. Optics Letters, 1994, 19(21): 1777-1779.
- [21] PYKA S. A long optical cavity for sub-Hertz laser spectroscopy[D]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2014: 63-68.
- [22] ZHANG Linbo, LIU Tao, CHEN Long, et al. Development of an interference filter-stabilized external-cavity diode laser for space applications[J]. Photonics, 2020, 7(1): 12.
- [23] LV Shasha, WANG Chun, SHEN Hui, et al. Finite element analysis of acceleration sensitivity of optical cavities supported by soft materials[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 29-36.
吕莎莎,王春,沈辉,等.采用软性材料支撑时光学谐振腔加速度敏感度的有限元分析[J].中国激光,2015,42(1): 29-36.
- [24] JIANG Yanyi. Narrow line width lasers: application to optical clocks [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012: 49-51.
蒋燕义.超窄线宽激光及其在光钟中的应用[D].上海:华东师范大学,2012: 49-51.
- [25] THOMAS L, THOMAS K, UWE S. Tuning the thermal expansion properties of optical reference cavities with fused silica mirrors[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(5): 776-83.
- [26] SANJUAN J, GÜRLEBECK N, BRAXMAIER C. Mathematical model of thermal shields for long-term stability optical resonators[J]. Optics Express, 2015, 23(14): 17892.
- [27] QI Wen, JIANG Yanyi, LI Xueyan, et al. Study on the sensitivity of optical cavity length to light power fluctuation[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(10): 65-69.
- [28] MA Chaoqun, CHEN Guoqing, LI Lei, et al. Recovery of an ultra-narrow linewidth laser over 100 km fiber link[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(12): 1214001.
马超群,陈国庆,李磊,等.100 km 光纤远端复现超窄线宽激光[J].光子学报,2018,47(12): 1214001.
- [29] VINET, JEAN Y. Thermal noise in advanced gravitational wave interferometric antennas: a comparison between arbitrary order Hermite and Laguerre Gaussian modes [J]. Physical Review D: Particles and Fields, 2010, 82(4): 135-139.