

2 μm 波段 DBR 光纤激光器的超稳腔 PDH 稳频技术刘孝兵^{1,2}, 王彬³, 姚波^{2,4}, 杨秀梅^{2,5}, 岳春歌^{2,5}, 毛庆和^{2,4,5*}¹安徽大学物质科学与信息技术研究院, 安徽 合肥 230039;²中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 光子器件与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230031;³中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026;⁴先进激光技术安徽省实验室, 安徽 合肥 230037;⁵中国科学技术大学环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026

摘要 报道一种可用于超稳腔 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频的 2 μm 波段分布 Bragg 反射(DBR)光纤激光器及其频率锁定结果。该绝热封装的光纤激光器配备主动温度控制和压电陶瓷(PZT)频率调谐装置,可满足超稳腔 PDH 稳频应用。通过周期极化铌酸锂(PPLN)晶体倍频,采用 PDH 稳频技术将研制的 1950 nm 光纤激光器频率稳定到了 1 μm 波段超稳腔频率参考上。针对 DBR 光纤激光器中 PZT 频率调谐机制只反馈调节腔长,容易在稳频过程中产生激光器跳模进而导致频率失锁的问题,笔者提出并演示了一种对 DBR 光纤谐振腔实施基于超稳腔频率参考的实时温度控制方案,并采用该方案实现了对 DBR 光纤激光器超过 4 周的长期频率锁定。该方案对于实现 DBR 光纤激光器的长期频率锁定具有较高的参考价值。

关键词 激光器; 光纤激光器; 分布 Bragg 反射; PDH 稳频; 超稳腔; 温度控制

中图分类号 TN249 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230690

1 引言

激光光源应用广泛,但自由运转激光器易受外界振动和温度变化等的影响,导致激光频率抖动和漂移。为满足精密测量^[1]、精密光谱^[2]及量子信息^[3]等领域对激光光源的应用需求,必须设法稳定激光频率。激光稳频技术分为主动和被动两类。被动稳频采用隔温、隔振、真空屏蔽等方法来减小外界环境扰动对激光频率稳定度的影响,可使激光频率稳定度达到 10^{-8} 量级。主动稳频则通过将激光频率与标准频率参考进行实时比对来获取误差信号,再由伺服反馈控制系统根据误差信号产生控制信号,驱动激光器的频率调谐执行器件,实现对激光频率的锁定,获取超稳激光。迄今为止,人们已提出并实现了饱和吸收稳频^[4-5]、超稳腔 Pound-Drever-Hall(PDH)稳频^[6-11]以及光学频率梳稳频^[12]等多种主动稳频技术,其中的超稳腔 PDH 稳频因具有锁定精度高、技术成熟等优势而被广泛应用。

近年来,人们相继发展出了分布 Bragg 反射(DBR)、分布反馈(DFB)以及复合环形腔单纵模光纤激光器,这些单纵模光纤激光器都具有窄线宽和低噪声的特性。特别地,研究人员为长期单纵模运转的 DBR 和 DFB 光纤激光器发展出了快速频率调谐机

制,于是,人们就自然地希望基于这类光纤激光器发展性能更为优越的超稳激光源。例如,2012年,德国物理技术研究院的 Kessler 与美国实验天体物理研究所的 Martin 等^[13]采用超稳腔 PDH 稳频技术,实现了 1.55 μm 波段 DFB 光纤激光器的稳频,获得的频率稳定性和激光线宽分别为 1.6×10^{-16} @1 s 和 40 mHz。2017年,德国联邦理工学院的 Matei 等^[14]采用超稳腔 PDH 稳频进一步将 1.55 μm 波段 DFB 光纤激光器的频率稳定到 4×10^{-17} @1 s,线宽窄化至惊人的 5 mHz。2017年,中国科学院国家授时中心的姜海峰课题组^[15]实现了对 1.55 μm 波段 DFB 光纤激光器的超稳腔 PDH 稳频,锁定后激光频率稳定度达到了 7×10^{-16} @1 s,线宽小于 185 mHz。2021年,本课题组^[16]采用超稳腔 PDH 稳频,实现了对自研 1.55 μm 波段 DBR 光纤激光器的锁定,激光频率稳定度达到了 6×10^{-16} @1 s,线宽窄至 280 mHz。由此可见,DBR 和 DFB 型单纵模光纤激光器都已实现了超稳腔 PDH 稳频。

从迄今报道的基于光纤激光器的超稳腔 PDH 稳频激光源来看,所用单纵模光纤激光器大多为 DFB 结构。这是因为 DFB 光纤激光器的谐振腔和光纤光栅腔镜在结构上属于同一个整体,当它用于超稳腔 PDH

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-05-04; 录用日期: 2023-05-17; 网络首发日期: 2023-07-04

基金项目: 科技创新 2030“量子通信与量子计算机”重大项目(1-2)、中国科学院 B 类战略性先导科技专项(XDB21010300)

通信作者: *mqinghe@aiofm.ac.cn

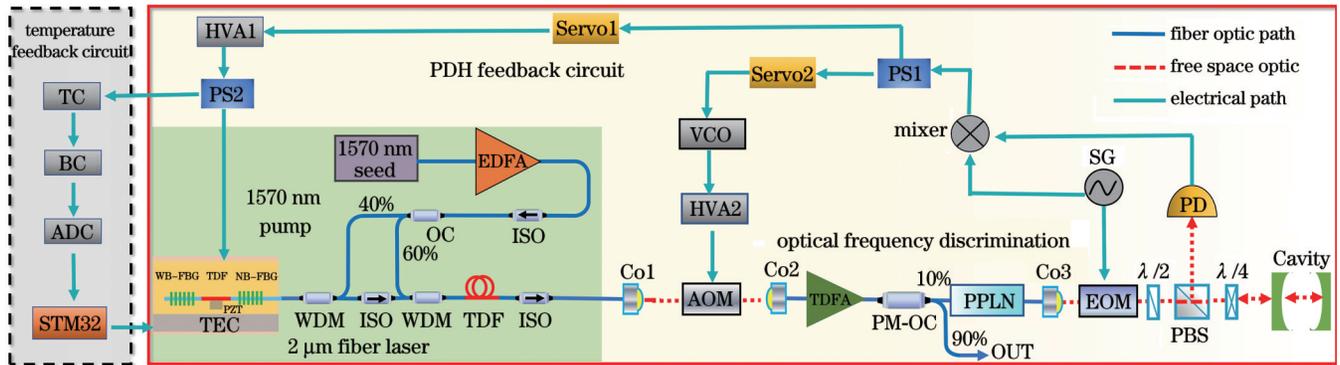
稳频时,利用频率调谐执行器件,如压电换能器(PZT),就可同时对谐振腔长度和光纤光栅腔镜进行反馈控制,从而十分有利于获得长期锁定的超稳激光。但是,相比于DFB光纤激光器,DBR光纤激光器只要通过简单的光纤熔接就可制作完成,无须在稀土掺杂光纤上刻写光栅结构,即不要求稀土掺杂光纤具有光敏性,这使得DBR光纤激光器在激光波段、波长灵活性等方面更具优势,因而对DBR型光纤激光器实现超稳腔PDH稳频更具实用价值。但是,DBR光纤激光器通常采用PZT作为频率调谐执行器件,利用PZT调节腔长,使激光纵模频率快速调谐并锁定至频率参考上。而对于DBR光纤谐振腔以及其中用作窄带腔镜的光纤Bragg光栅(FBG),则采用独立的主动温控,因此外部环境变化和DBR内部产热等因素可能会导致FBG中心波长产生微小漂移,影响超稳腔PDH稳频的DBR光纤激光器的长期运行效果。因此,如何解决基于超稳腔PDH稳频的DBR型光纤激光器的长期锁定问题,依然值得深入研究。

本文将报道本课题组自主设计研制的可用于超稳激光源的 $2\ \mu\text{m}$ 波段DBR光纤激光器及其超稳腔PDH频率锁定结果。通过对DBR光纤激光器谐振腔进行严格绝热封装和主动温度控制,并赋予其基于PZT的快速频率调谐机制,该光纤激光器可以用于超稳腔PDH稳频。利用PPLN晶体倍频,对研制的 $1950\ \text{nm}$ 光纤激光器成功实现了基于超稳腔的PDH频率锁定。本文提出并演示了一种利用PZT反馈控

制电压触发产生温度控制信号,对DBR光纤谐振腔实施基于超稳腔频率参考的实时温度控制方案,实现了对这类DBR光纤激光器PDH超稳腔的长期频率锁定。

2 实验方案与原理

图1为本课题组自主研制的 $2\ \mu\text{m}$ 波段单纵模光纤激光器及其超稳腔PDH稳频结构示意图。该单纵模光纤激光器采用中心波长为 $1949.86\ \text{nm}$ 以及反射率和反射带宽分别为 99.19% 和 $0.35\ \text{nm}$ 、 75% 和 $0.07\ \text{nm}$ 的两只单模FBG构成光纤DBR腔结构,低反和高反FBG分别在PM1550和SM-28光纤上刻写而成。通过将低反FBG慢轴反射峰与高反FBG反射峰对齐,使DBR激光器只在慢轴方向上形成单纵模振荡,从而获得了线偏振激光输出^[17]。所用掺铯光纤的型号为SM-TSF-5/125,吸收系数为 $340\ \text{dB}@1560\ \text{nm}$,长度为 $1.4\ \text{cm}$,本课题组自研的 $1570\ \text{nm}$ 光纤激光器由 $1570\ \text{nm}/1950\ \text{nm}$ 保偏光波分复用器(PM-WDM)提供泵浦。该光纤激光器的泵浦阈值为 $90\ \text{mW}$,在 $187\ \text{mW}$ 泵浦功率下输出的 $1949.89\ \text{nm}$ 单纵模激光功率可达 $13.5\ \text{mW}$ 。为赋予该 $1950\ \text{nm}$ 种子激光器快速频率调谐能力,在掺铯光纤侧面胶合粘贴了一只可沿光纤轴向拉伸的PZT,其压电系数为 $0.267\ \mu\text{m}/\text{V}$ 。这样,通过调节PZT电压就可以对DBR腔长进行可控的精细调节,进而精密调谐激光频率。



WDM: wavelength division multiplexer; ISO: isolator; OC: optical coupler; PM-OC: polarization-maintaining optical coupler; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; WB-FBG: wide band fiber Bragg grating; NB-FBG: narrow band fiber Bragg grating; TDFA: thulium-doped fiber amplifier; Co: collimator; PZT: piezoelectric transducer; TEC: thermoelectric cooler; AOM: acousto-optic modulator; EOM: electro-optic modulator; SG: signal generator; Servo: servo control; PBS: polarization beam splitter; PD: photodetector; $\lambda/2$: half-wave plate; $\lambda/4$: quarter-wave plate; Cavity: ultra-stable optical cavity; PPLN: periodically poled lithium niobate; PS: RF power splitter; HVA: high voltage amplifier; VCO: voltage controlled oscillator; TC: transformer circuit; BC: bias circuit; ADC: analog-digital converter.

图1 $2\ \mu\text{m}$ 波段单纵模光纤激光器及其超稳腔PDH稳频结构示意图。其中,黄色区域表示处在黄铜块内的DBR光纤谐振腔,淡绿色区域表示聚四氟乙烯绝热封装盒,淡黄色区域表示PDH反馈环路,灰色区域表示温度反馈回路

Fig. 1 Schematic diagram of our $2\ \mu\text{m}$ single-longitudinal-mode fiber laser and its PDH frequency stabilization structure based on ultra-stable optical cavity. The yellow area represents the DBR fiber resonator located inside a brass block, the light green area represents the polytetrafluoroethylene insulated packaging box, the light yellow area represents the PDH feedback loop, and the gray area represents the temperature feedback circuit

为抑制外界环境振动和温度变化等对激光纵模谐振频率稳定性的影响,先将该激光器的 DBR 谐振腔(包括具有窄带宽特性的 FBG 腔镜)整体封装在导热性能良好的黄铜块内,再将其安装在聚四氟乙烯盒中。该聚四氟乙烯盒底板开有与半导体制冷片(TEC)大小和形状一致的孔洞,将 TEC 制冷片的致冷面穿过该孔洞与黄铜块贴合,二者之间均匀涂抹了一层导热硅脂,以实现良好的热传导。并且,使用绝热棉对聚四氟乙烯盒表面及开孔处进行了严格的包裹密封,还用绝热胶对 TEC 制冷片与聚四氟乙烯盒之间的缝隙进行了填充,以提高聚四氟乙烯盒的绝热封装效果。进一步,将安装有 DBR 光纤激光器的聚四氟乙烯盒置于中空铝盒中,铝盒底板的上下表面分别与 TEC 制冷片的散热面和光学平台用导热胶粘贴,因而该铝盒也起着 TEC 热沉的作用。其他五面再用隔音棉密封,以减小外界音频噪声的影响。这样,DBR 谐振腔就实现了绝热封装,并配备了 TEC 温控。

为满足诸如多节点远距离量子纠缠实验^[18]等对稳频激光功率的要求,利用光纤放大器对种子激光进行功率提升。采用两级保偏光纤放大器提升种子激光功率,其中,第一级光纤放大器与种子激光器共用泵浦源,该泵浦源为自行研制,中心波长为 1570 nm,输出功率约为 490 mW,经 6:4 光纤耦合器(OC)后分别为第一级光纤放大器和种子激光器提供泵浦。第一级光纤放大器的增益光纤吸收系数为 27 dB/m@793 nm,长度约为 3 m,净输出功率为 55 mW。第一级光纤放大器的输出激光经空间准直后再经过声光调制器(AOM),然后耦合至第二级光纤放大器,进一步将激光功率提升至 850 mW,再由 9:1 的保偏光耦合器(PM-OC)分束,其中的 10% 用于稳频,剩余的 90% 用于量子实验。AOM 的插入损耗约为 2 dB,它既可使输入激光产生 80 MHz 的频移,又可作为 PDH 稳频的高频段频率调谐执行器件。

超稳腔由具有超低膨胀系数(ULE)的材料制成,腔长为 10 cm,自由光谱范围(FSR)和精细度分别为 1.5 GHz 和 15000。受腔镜高反膜的限制,超稳腔的工作波段为 1.0 μm 。为此,将频移放大后的 1950 nm 激光通过带尾纤的 PPLN 晶体模块(济南量子技术研究院)进行倍频。倍频后的 975 nm 激光准直后经相位调制器(EOM)产生 20 MHz 的调制边带,再由二分之一波片调控偏振态,透射通过保偏分束器(PBS)后耦合进入超稳腔。经超稳腔返回的带有误差信号的激光经四分之一波片调控偏振态后,由 PBS 反射端口出射,并由光电探测器(PD)探测。探测产生的电信号与 EOM 调制信号混频解调后,得到 PDH 稳频的误差信号。该误差信号经功分器(PS1)后,分别由两路伺服控制器产生高低频段的控制信号,这两种频段的信号分别驱动 AOM 和 PZT。通过改变 AOM 频移量和 DBR 腔长,最终可对 PM-OC 90% 端口输出的激光频

率实现超稳腔 PDH 稳频输出。

对于该 DBR 光纤激光器,尽管通过调节绝热封装聚四氟乙烯盒的控制温度,可使激光频率处于期望的频率附近,再通过对绝热封装聚四氟乙烯盒实施独立的主动温度控制,并经超稳腔的 PDH 稳频,就可以实现对 DBR 光纤激光器的频率锁定;但是,这种对绝热封装盒的独立主动温度控制,只能实时地补偿外部环境缓慢变化和 DBR 光纤激光器内部产热等因素的影响,使 DBR 腔中的 FBG 温度保持相对“恒定”。而与此相反,通过 PDH 反馈控制回路实时调整 PZT 电压从而调节 DBR 激光腔长,可将起振的激光纵模频率实时锁定到超稳腔频率参考上。如此一来,这种对绝热封装盒的独立主动温度控制就可能难以满足 DBR 腔模频率按需主动反馈锁定到超稳腔频率参考上而对 FBG 中心频率提出的要求,甚至会出现 PZT 加载电压过大而导致的激光器跳模失锁的情况,影响激光器的长期锁定工作。

事实上,当温度升高(降低)时,DBR 腔长变长(缩短),纵模间隔变小(变大),激光频率红移(蓝移),同时,FBG 的周期变大(变小),中心频率红移(蓝移)。尽管二者的频率变化量不同,但随温度变化的方向一致。由此可见,当激光器锁定后,聚四氟乙烯盒内 DBR 腔的控制温度与锁定系统产生的 PZT 控制电压的变化一致,于是,就可将聚四氟乙烯盒内 DBR 腔的主动温度控制也参考到超稳腔频率标准上,即可利用锁定系统产生的 PZT 控制电压来产生绝热封装盒的温度控制信号。若对 PZT 上的电压设定上下限,则当 PZT 电压超过上限(下限)时,通过温度控制器主动降低(升高)腔内温度,就可避免 PZT 加载电压过大而导致的可能跳模,实现对 DBR 光纤激光器的长期锁定。

基于 PZT 反馈控制电压信号的聚四氟乙烯盒温度反馈控制方案如图 1 左侧虚线框所示。先采用变压和直流偏置电路将 PZT 控制电压转换到模数转换器的工作电压范围内,并将其转换成数字电压信号,再由单片机对该数字电压信号进行运算和处理;当数字电压幅度超过设定的阈值电压后,单片机产生温度控制触发信号,该信号经温度控制 PID 模块后,驱动 TEC 主动控制单元,实现对聚四氟乙烯盒的温度反馈控制。

3 结果与讨论

自由运转光纤激光器输出特性的优劣是衡量能否实施 PDH 稳频的前提,为此,笔者对一级光纤放大后的 2 μm 单频光纤激光特性进行了测试。图 2(a)为不同温度下由光谱分析仪(AQ6735)测得的输出激光光谱。随着控制温度从 15 $^{\circ}\text{C}$ 升高到 35 $^{\circ}\text{C}$,激光波长由 1949.36 nm 调谐到 1950.42 nm,波长调谐范围为 1.06 nm,实测波长随温度的调谐系数为 0.05 nm/ $^{\circ}\text{C}$ 。并且,在 15~40 $^{\circ}\text{C}$ 范围内,输出激光都处于稳定的单纵模运转状态,利用自由光谱范围(FSR)为 1.5 GHz

的 F-P 扫描干涉仪(SA200-18B)进行测试,结果显示激光器均处于图 2(b)所示的典型单纵模运转状态。通过对激光腔内的 PZT 施加不同频率和幅度的三角波电压,测得了 PZT 频率调谐机构的频响特性,如图 2(c)所示。结果显示,响应带宽约为 8 kHz,对应的频率调

谐系数约为 34 MHz/V, PZT 的最大频率调谐量约为 1.6 GHz@52 V。由以上测试结果可见,笔者设计研制的 2 μm 波段 DBR 光纤激光器在自由运转下,无论是波长调谐、单纵模稳定运转特性,还是 PZT 频率调谐响应带宽及调谐量,均可满足超稳腔 PDH 稳频的要求。

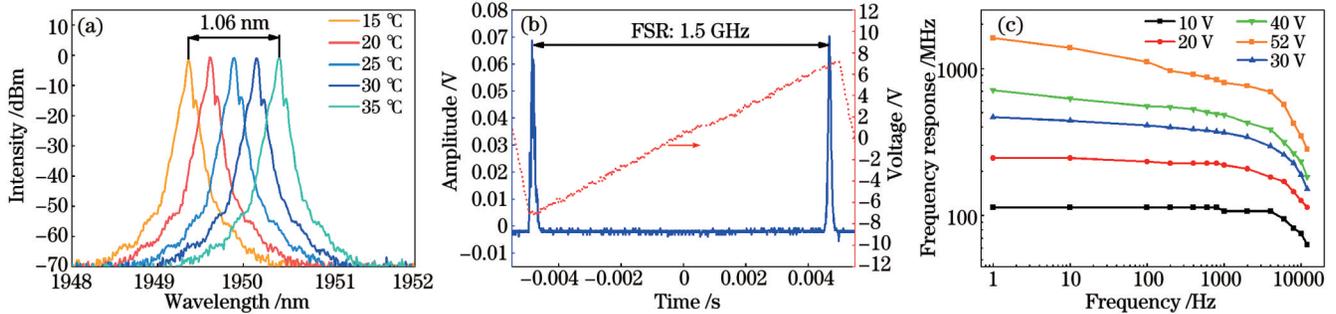


图 2 实测的单纵模光纤激光器的输出特性。(a)输出激光波长的温度调谐特性;(b)由 F-P 扫描干涉仪测量的单纵模特性;(c)PZT 频率调谐机制的响应特性

Fig. 2 Measured output characteristics of our single-longitudinal-mode fiber laser. (a) Temperature tuning characteristics of the output laser wavelength; (b) single-longitudinal-mode oscillating characterized by F-P scanning interferometer; (c) response characteristics of PZT frequency tuning mechanism

采用温度调谐将激光频率预调至期望频率附近,同时利用 Servo1 对 PZT 施加三角波扫描电压信号,使激光频率扫描范围大于超稳腔的自由光谱范围 (1.5 GHz),就可以通过 PD 探测获得 PZT 扫描过程中由超稳腔谐振峰产生的误差信号。图 3(a)是由示波器测得的误差信号。可见,激光载波和 EOM 产生的两个调制边带在扫过超稳腔透射峰时,均会产生误差

信号,但载波产生的误差信号的幅度最高(600 mV)。随后,逐渐减小扫描电压幅度,同时调节 PZT 的直流偏置电压,使激光载波频率处于超稳腔透射峰频率附近,并用载波误差信号产生高低频段反馈控制信号,分别驱动 AOM 和 PZT,最终使激光频率处于锁定状态。频率锁定后,测得的误差信号如图 3(b)所示,这表明光纤激光器已处于频率锁定状态。

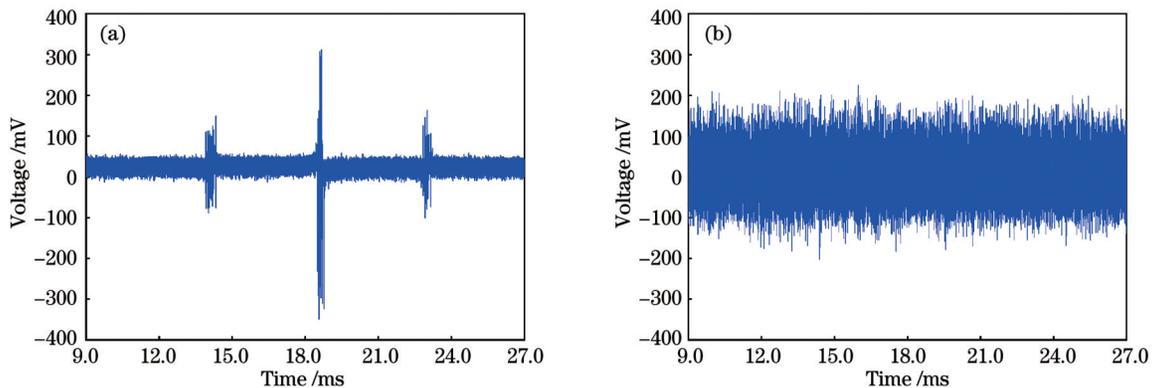


图 3 由示波器测得的误差信号。(a)频率锁定前的误差信号;(b)频率锁定后的误差信号

Fig. 3 Error signals recorded by an oscilloscope. (a) Error signal before frequency locking; (b) error signal after frequency locking

图 4(a)是在 PM-OC 的 90% 输出端口处测得的 1950 nm 激光器锁定前后的频率噪声功率谱。在自由运转下,受环境因素和电学噪声的影响,激光器在 10~100 kHz 频段范围内出现了多个噪声“尖峰”,而经 PDH 稳频后,这些噪声“尖峰”的幅度大幅降低。在 10~100 Hz 频率范围内,激光器频率噪声相比自由运转状态下降了 3~4 个量级,其中在 18 kHz 附近频率噪声被抑制到最低,达到 0.08 Hz²/Hz。若仅考虑自发辐射噪声引起的线宽展宽,该频率噪声数据隐含着锁定后的激光线宽可低至百 mHz^[19]。这表明经 PDH 稳频

后激光器的频率噪声得到了很好的抑制,同时也表明本课题组研制的 2 μm 波段 DBR 光纤激光器能够满足 PDH 超稳腔的稳频要求。

尽管如此,判断激光器是否处于频率锁定状态以及稳频性能优劣更直接的证据是,直接测量锁定后的激光器线宽和频率稳定度。遗憾的是,实验室仅有一套 PDH 稳频装置,且缺少与已用于 PDH 稳频的性能相同的 2 μm 波段 DBR 光纤激光器,从而无法通过直接测量拍频谱来获取锁定后的激光器线宽和频率稳定度。为此,笔者利用安装运行在 20 km

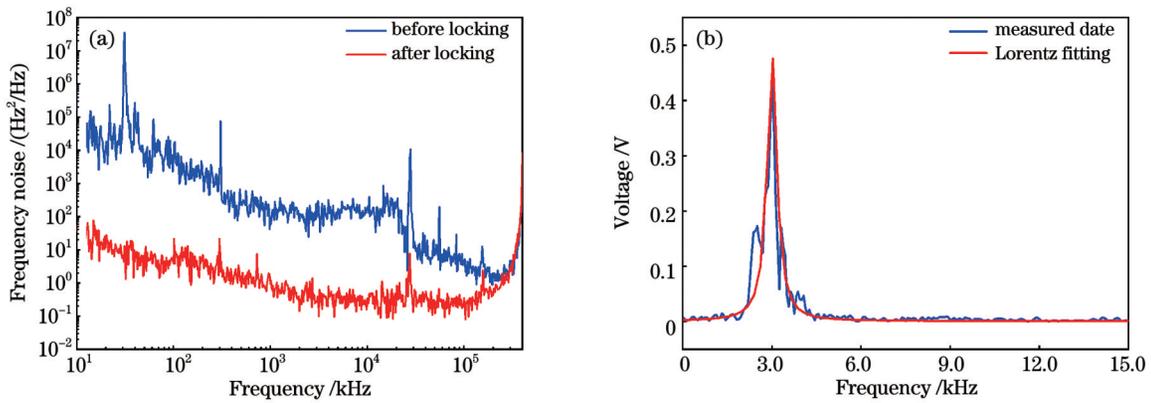


图4 频率噪声功率谱和拍频谱。(a)测得的激光器频率锁定前后的频率噪声功率谱;(b)利用快速傅里叶变换分析仪(FFT)采集到的两束 1342 nm 稳频激光之间的拍频谱数据及其洛伦兹拟合

Fig. 4 Frequency noise power spectra and beat spectrum. (a) Measured frequency noise power spectra of the laser before and after its frequency is locked; (b) collected beat spectral data between two frequency-stabilized 1342 nm lasers using an FFT and the Lorentz fitting curve obtained from these data

之外(中国科学技术大学先进技术研究院)的性能相近的另一台 PDH 超稳腔锁定的 1950 nm 光纤激光器,对本文报道的锁定后的 DBR 光纤激光器的线宽和频率稳定度进行间接评估。进行实际评估时,采用两束 1950 nm 超稳激光作为泵浦光,将两束线宽约为 75 Hz 的 795 nm 超稳激光经下转换变频至 1342 nm, 20 km 之外的 1342 nm 激光经中国电信光缆传输至本实验室,通过测量两台 1342 nm 激光器之间的拍频谱来评估锁定后的 DBR 光纤激光器的线宽和频率稳定度。

利用快速傅里叶变换分析仪(FFT)实测了两台 1342 nm 激光器之间的拍频谱。在长达 1 h 的测量时间内,拍频谱的中心频率存在约 6 kHz 的晃动,且拍频谱的形状随其中心频率晃动而略微偏离钟形,因而难以精确测量出稳定的拍频谱。但是,若考虑到长距离光纤传输、参与变频的 4 台超稳激光器频率抖动的影

响,这种带有 6 kHz 中心频率晃动的拍频谱依然足以表明本文的 DBR 光纤激光器确已实现了基于超稳腔的 PDH 稳频,否则拍频谱中心频率的晃动将远超 6 kHz。当将 FFT 的扫描时间取 32 ms 时,可以测得典型的短时拍频谱(重复测量所得拍频谱之间的主要差异是中心频率晃动),如图 4(b)所示。对图 4(b)中的拍频谱进行洛伦兹拟合,可得 1342 nm 激光器的 3 dB 线宽约为 266 Hz。扣除所用 795 nm 超稳激光的贡献,可评估出锁定后的 1950 nm 激光器的线宽约为 255 Hz,该结果远大于根据图 4(a)中激光器频率锁定后的频率噪声功率谱预测的激光线宽,从而反映了这种间接测量带来的测量误差。

图 5(a)是由锁定到铷原子钟的频率计数器(门控时间为 100 ms)测得的两台 1342 nm 激光器的拍频信号随时间的变化。可以清晰看出,2 h 内拍频抖动在 7 kHz 以内。根据图 5(a)中拍频信号随时间变化的数

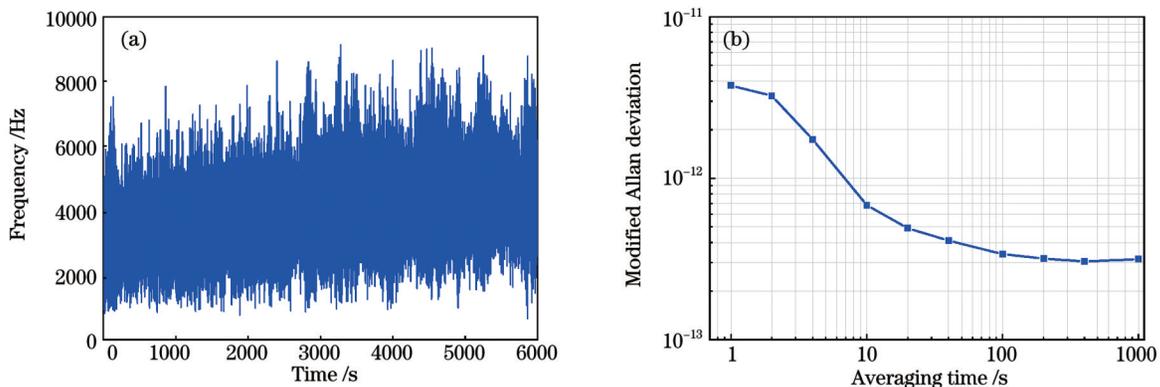


图5 拍频信号随时间的变化以及 Allan 偏差。(a)由锁定到铷原子钟的门控时间为 100 ms 的频率计数器测得的两台 1342 nm 激光器之间拍频信号随时间的变化,其中一台 1342 nm 激光器输出的激光经 20 km 电信光缆传输到本实验室;(b)由(a)中频率随时间抖动的数据计算得到的 Allan 方差

Fig. 5 Variation of beat frequency signal with time and its Allan variance. (a) Beat frequency signal between two 1342 nm frequency-stabilized lasers as a function of time measured by a frequency counter locked to rubidium atomic clock with a gating time of 100 ms. In the measurement, the output laser from one 1342 nm laser is transmitted to our lab through a 20 km telecommunications optical cable. (b) Allan variance calculated from the frequency jitter data over time recorded in Fig. 5(a)

据,可以计算出 1342 nm 激光器的 Allan 偏差,如图 5(b) 所示。可见,1342 nm 激光器的频率稳定度为 $3.76 \times 10^{-13} @ 1000 \text{ s}$ 。该频率稳定度包含了长距离光纤传输、参与变频的 4 台超稳激光器频率抖动的影响,但至少表明了本文锁定的 1950 nm 激光器的频率稳定度优于 $3.76 \times 10^{-13} @ 1000 \text{ s}$ 。

上述对锁定后的 DBR 光纤激光器线宽和频率稳定度的间接评估结果表明,测得的线宽和频率稳定度均不高。其原因在于:1)间接评估包含了长距离光纤传输、参与变频的 4 台超稳激光器频率抖动的影响,以及两台超稳腔、两对不同波长激光器之间的差异;2)基于远程量子纠缠实验目的,笔者选用了精细度仅为 15000 的超稳腔(比通常用于 PDH 稳频的超稳腔精细度至少低 1 个量级),导致稳频效果难以与更高精度超稳腔的锁定结果相媲美^[20]。但是,间接评估结果依然足以表明以下几点:1)笔者研制的 $2 \mu\text{m}$ 波段 DBR 光纤激光器已实现了基于超稳腔 PDH 的稳频;2)尽管间接评估得到的线宽约为 255 Hz,但若与图 4(a) 所示的频率噪声抑制结果相结合,实际锁定后的激光线宽应远小于 255 Hz;3)由于已实现了频率稳定,因此可在此基础上研究这种 DBR 光纤激光器基于超稳腔的 PDH 稳频的长期锁定效果,而这才是本文的主要

目的。

尽管本文的 $2 \mu\text{m}$ 波段 DBR 光纤激光器已通过超稳腔 PDH 稳频获得了频率稳定的“超稳”激光,但是在实验中发现,激光器稳频锁定运转数小时后会经历随机的频率失锁。图 6(a) 是激光器处于锁定状态时记录到的 PZT 控制电压信号。当激光器保持频率锁定时,该 PZT 控制电压信号随时间小幅变化,反馈调节腔长进而锁定激光频率。而当该 PZT 控制电压信号高于某一电压值(41 V)时,锁定系统将不再产生 PZT 控制电压信号,导致激光频率失锁。从图 6(a) 记录的三条 PZT 控制电压信号随时间变化的曲线可以看出,激光器处于频率锁定状态的时长随机变化。为寻找激光器失锁的原因,笔者利用 F-P 扫描干涉仪实时监测了激光器的纵模特性。实验发现,当激光频率失锁时,激光器也恰好发生了跳模。图 6(b) 是 F-P 扫描干涉仪捕捉到的频率失锁瞬间激光器发生跳模的情况。这种频率失锁的原因正如第 2 小节所述,对绝热封装盒的独立主动温度控制,难以满足 DBR 腔模频率因要主动反馈锁定到超稳腔频率参考上而对 FBG 中心频率提出的新要求,最终导致 PZT 因加载电压过大而使激光器跳模,影响激光器的长期锁定工作。

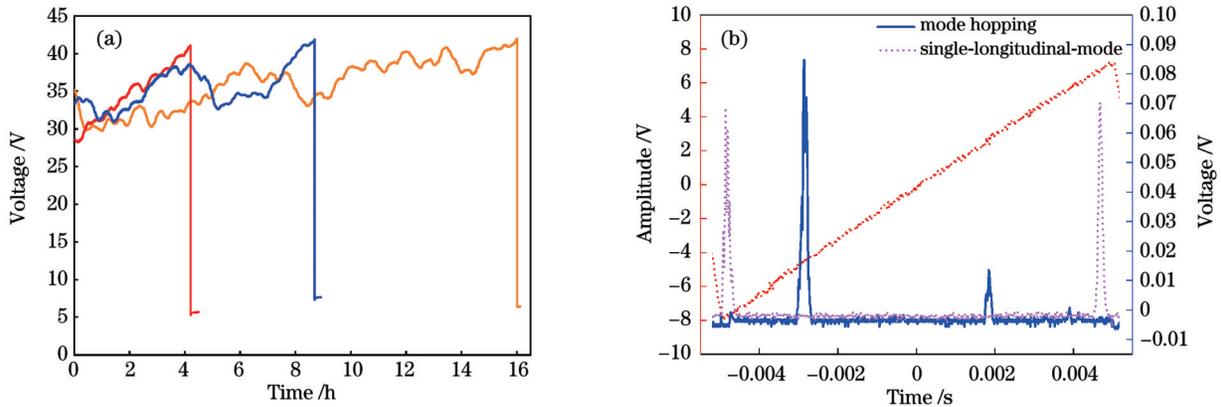


图 6 PZT 控制电压以及频率失锁瞬间激光器的纵模振荡行为。(a) 激光器处在频率锁定状态下记录的 PZT 控制电压;(b) 由 F-P 扫描干涉仪捕捉到的频率失锁瞬间激光器的纵模振荡行为

Fig. 6 PZT control voltage signal and single-longitudinal-mode oscillating behavior of the laser at the moment when the laser frequency just loses the locked state. (a) Recorded PZT control voltage signal when the laser frequency is locked; (b) single-longitudinal-mode oscillating behavior of the laser captured by an F-P scanning interferometer at the moment when the laser frequency just loses the locked state

为消除这种激光器跳模带来的激光频率失锁,采用图 1 所示方案,利用 PZT 反馈控制电压信号触发产生温度反馈控制信号,实现对聚四氟乙烯盒基于超稳腔频率参考的实时温度控制。实验发现,由于将聚四氟乙烯盒内 DBR 腔的主动温度控制参考到了超稳腔频率标准,图 6 所示的频率失锁或跳模现象不再发生。图 7(a) 是采用数字万用表(GDM-9061)记录的 160 h 内的 PZT 反馈控制电压信号,图 7(b) 是由光电探测器后接数字万用表在超稳腔透射端采集到的 240 h 内的

电压随时间的变化情况。可见,不再发生激光频率失锁。事实上,基于 $2 \mu\text{m}$ 波段 DBR 光纤激光器的 PDH 超稳腔稳频激光器已用于量子纠缠实验中,且已连续运行超过了 4 周,目前依然处于锁定运行中。由此可见,如果将聚四氟乙烯盒内 DBR 腔的主动温度控制参考到超稳腔频率标准,就可以使 DBR 光纤激光器中 FBG 的中心频率为了适应基于超稳腔 PDH 锁定 DBR 腔模频率的要求而调谐,进而确保 DBR 光纤激光器的长期 PDH 超稳腔频率锁定。

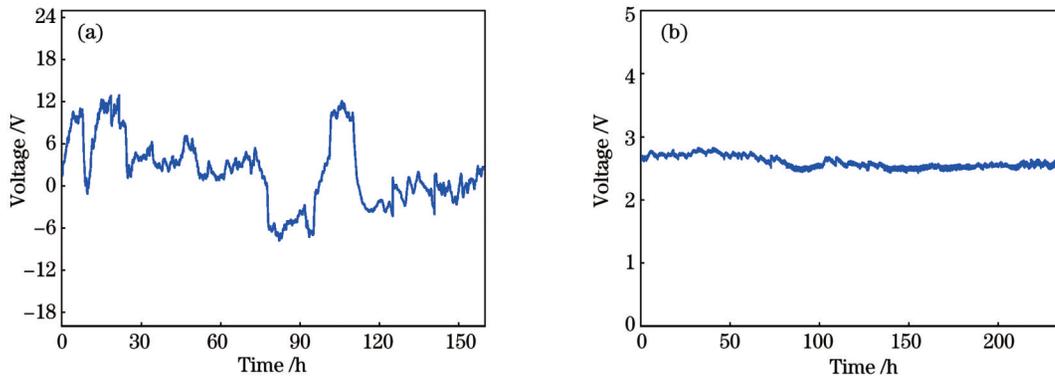


图7 电压随时间的变化。(a)采用数字万用表记录的160 h内PZT反馈控制电压信号;(b)由光电探测器后接数字万用表在超稳腔透射端采集到的240 h内电压随时间的变化

Fig. 7 Variation of voltage with time. (a) PZT feedback control voltage signal recorded within 160 h with a digital multimeter; (b) variation of voltage over time within 240 h collected at the transmission end of the optical cavity with a digital multimeter following a photodetector

4 结 论

本文报道了自主设计研制的可用于超稳激光源的 $2\ \mu\text{m}$ 波段DBR光纤激光器及其PDH超稳腔频率锁定结果。该 $2\ \mu\text{m}$ 波段DBR光纤激光器内置了具有快速频率调谐功能的可调节腔长的PZT,其DBR光纤谐振腔置于配备了具有主动温度控制的二次绝热封装聚四氟乙烯盒中,从而使得该光纤激光器可以用于超稳腔PDH稳频。将 $2\ \mu\text{m}$ 波段激光经PPLN晶体倍频,利用自由光谱范围和精细度分别为1.5 GHz和15000的 $1\ \mu\text{m}$ 波段超稳腔,对研制的1950 nm光纤激光器成功实现了基于超稳腔的PDH频率锁定。针对DBR光纤谐振腔独立主动温度控制导致FBG中心频率难以与PDH超稳腔频率锁定过程中PZT主动反馈锁定腔模频率至超稳腔频率参考相协调,进而导致激光器因跳模而频率失锁的问题,笔者提出并演示了一种利用PZT反馈控制信号触发产生温度控制信号,对DBR光纤谐振腔实施基于超稳腔频率参考的实时温度控制的方案,实现了对这类DBR光纤激光器PDH超稳腔的长期频率锁定,迄今连续频率锁定时长已超过4周。本文提出的这种对DBR光纤谐振腔实施基于超稳腔频率参考的实时温度控制方案对于实现DBR光纤激光器长期超稳腔PDH稳频具有重要的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Sutton A, Shaddock D A. Laser frequency stabilization by dual arm locking for LISA[J]. *Physical Review D*, 2008, 78(8): 082001.
- [2] Ye J, Ma L S, Hall J L. Ultrasensitive detections in atomic and molecular physics: demonstration in molecular overtone spectroscopy[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1998, 15(1): 6-15.
- [3] Yu Y, Ma F, Luo X Y, et al. Entanglement of two quantum memories via fibres over dozens of kilometres[J]. *Nature*, 2020, 578(7794): 240-245.
- [4] 魏珊珊, 刘元煌, 陈群峰, 等. 面向Rb原子精密测量的边带锁定780 nm高功率激光光源[J]. *中国激光*, 2021, 48(7): 0701008. Wei S S, Liu Y H, Chen Q F, et al. Sideband-locked high-power 780 nm laser source for precise measurement based on Rb atoms [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(7): 0701008.
- [5] 亓航航, 杨博文, 赵浩杰, 等. 应用于积分球冷原子钟的窄线宽激光稳频系统[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(15): 1514008. Qi H H, Yang B W, Zhao H J, et al. Narrow linewidth laser frequency stabilization system applied to integrating sphere cold atomic clocks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(15): 1514008.
- [6] Seel S, Storz R, Ruoso G, et al. Cryogenic optical resonators: a new tool for laser frequency stabilization at the 1 Hz level [J]. *Physical Review Letters*, 1997, 78(25): 4741-4744.
- [7] Young B C, Cruz F C, Itano W M, et al. Visible lasers with subhertz linewidths[J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(19): 3799-3802.
- [8] Guan H, Liu Q, Huang Y, et al. A 729 nm laser with ultra-narrow linewidth for probing $4S_{1/2} - 3D_{5/2}$ clock transition of $^{40}\text{Ca}^+$ [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 217-221.
- [9] Wu L F, Jiang Y Y, Ma C Q, et al. 0.26-Hz-linewidth ultrastable lasers at 1557 nm[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 24969.
- [10] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator[J]. *Applied Physics B*, 1983, 31(2): 97-105.
- [11] 陈一路, 冯艳妮, 闫智辉, 等. 利用模糊算法实现光学谐振腔锁定优化(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(12): 20220781. Chen Y L, Feng Y N, Yan Z H, et al. Optimization of optical resonator locking by fuzzy algorithm (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(12): 20220781.
- [12] Jost J, Hall J, Ye J. Continuously tunable, precise, single frequency optical signal generator[J]. *Optics Express*, 2002, 10(12): 515-520.
- [13] 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*, 2012, 6(10): 687-692.
- [14] Matei D G, Legero T, Häfner S, et al. $1.5\ \mu\text{m}$ lasers with sub 10 mHz linewidth[J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(26): 263202.
- [15] Tai Z Y, Yan L L, Zhang Y Y, et al. Transportable 1555-nm ultra-stable laser with sub-0.185-Hz linewidth[J]. *Chinese Physics Letters*, 2017, 34(9): 090602.
- [16] 姚波, 陈群峰, 陈雨君, 等. 基于超稳腔PDH稳频的280 mHz线宽DBR光纤激光器[J]. *中国激光*, 2021, 48(5): 0501014. Yao B, Chen Q F, Chen Y J, et al. 280 mHz linewidth DBR fiber laser based on PDH frequency stabilization with ultrastable cavity

- [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 0501014.
- [17] 刘昊炜. 单纵模窄线宽光纤激光器的设计与研制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- Liu H W. Design and development of a single longitudinal mode narrow linewidth fiber laser[D]. Beijing: University of the Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [18] Wang D, Huang A J, Sun W Y, et al. Practical single-photon-assisted remote state preparation with non-maximally entanglement [J]. Quantum Information Processing, 2016, 15(8): 3367-3381.
- [19] Tran M A, Huang D N, Bowers J E. Tutorial on narrow linewidth tunable semiconductor lasers using Si/III-V heterogeneous integration[J]. APL Photonics, 2019, 4(11): 111101.
- [20] Chen L, Zhang L B, Xu G J, et al. 698-nm diode laser with 1-Hz linewidth[J]. Optical Engineering, 2017, 56(1): 016101.

Ultrastable-Cavity-Based PDH Frequency Stabilization for 2 μm DBR Fiber Laser

Liu Xiaobing^{1,2}, Wang Bin³, Yao Bo^{2,4}, Yang Xiumei^{2,5}, Yue Chung^{2,5}, Mao Qinghe^{2,4,5*}

¹*Institute of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230039, Anhui, China;*

²*Anhui Provincial Key Laboratory of Photonics Devices and Materials, Anhui Institute of Optical and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, Anhui, China;*

³*School of Physical Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;*

⁴*Advanced Laser Technology Laboratory of Anhui Province, Hefei 230037, Anhui, China;*

⁵*School of Environmental Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*

Abstract

Objective Ultrastable lasers have important applications in precision measurement, precision spectroscopy, and quantum information. However, it is difficult to meet the requirements of the aforementioned applications using lasers in the free-running state because of frequency jitter and drift caused by external environmental factors. Various active techniques for stabilizing the laser frequency have been proposed and implemented. Among them, the ultrastable cavity Pound-Drever-Hall (PDH) frequency stabilization technology has a high locking accuracy and it is mature with wide application. Single-frequency fiber lasers have undergone rapid development in recent years. Based on the fiber laser's characteristics of narrow linewidth and low noise, ultrastable lasers with superior performance are developed. However, according to current reports, the most widely used ultra-stable laser sources are DFB fiber lasers. Because the resonance cavity and the fiber grating cavity mirror of DFB fiber lasers are integrated into the same structure, the length of the laser resonance cavity and the fiber grating cavity mirror can be simultaneously controlled when used for frequency stabilization of an ultrastable cavity PDH, which is very beneficial for obtaining a long-term locked ultrastable laser. Compared with DFB fiber lasers, DBR fiber lasers have more practical value for achieving ultra-stable cavity PDH frequency stabilization because DBR fiber lasers do not require rare earth-doped fibers to exhibit photosensitivity, are easier to manufacture, and have more advantages in terms of the laser band, wavelength flexibility, and other aspects. However, when DBR fiber lasers are used for ultrastable cavity PDH frequency stabilization, owing to the independent active temperature control of the fiber resonant cavity, coordinating the frequency of the FBG center with the frequency of the ultrastable cavity mode locked by the PZT during the PDH frequency-locking process is difficult. This makes long-term locking of the frequency of the DBR fiber laser difficult due to degradation of the frequency locking owing to laser mode hopping, making it difficult to meet the requirements of special applications, such as quantum entanglement experiments. Therefore, further study is required to achieve long-term locking of DBR fiber lasers based on ultra-stable cavity PDH frequency stabilization.

Methods A home-made 2 μm band DBR single-frequency fiber laser was used as the laser source. In order to quickly tune the frequency of the laser, a PZT that can be stretched axially along the fiber was pasted on the side of the laser resonator. The laser resonator was strictly insulated and equipped with an active temperature control device to reduce the influence of the external environment on the frequency stability of the laser so that it can meet the requirements of ultrastable cavity PDH frequency stabilization. A 1.0 μm band ultrastable cavity with an FSR of 1.5 GHz and a fineness of 15000 was used as the frequency reference, and the 1950 nm laser was locked to a transmission peak of the ultrastable cavity by using the ultrastable cavity PDH frequency stabilization scheme after using PPLN crystal frequency doubling. We experimentally confirmed that it is difficult to achieve long-term locking of ultrastable cavity PDH frequency stabilization based on a DBR single-frequency fiber laser. Therefore, herein, we propose and demonstrate a real-time temperature control scheme for DBR fiber resonators using a PZT feedback control signal to generate temperature control signals based on the frequency reference of the ultrastable cavity. This method first generates a temperature control signal by calculating and processing the PZT feedback voltage using a single-chip microcomputer and then realizes real-time temperature control based on an ultrastable cavity frequency reference for the DBR fiber resonator and its cavity mirror FBG through the temperature control signal, thereby resolving the issue of long-term locking of the DBR fiber laser.

Results and Discussions The quality of the laser output characteristics is a determinant of whether the laser can be locked;

therefore, we first tested the laser output characteristics. Herein, the laser temperature is set to change from 15 °C to 35 °C, the laser wavelength is changed by 1.06 nm [Fig. 2(a)], and when the temperature is stable, the laser can ensure a single-longitudinal-mode operation. The results of single-longitudinal-mode operation measured using the F-P scanning interferometer are shown in Fig. 2(b). By applying triangular wave modulation signals of different frequencies and voltages to the PZT, the measured frequency tuning range of the laser is found to be 1.6 GHz@52 V and the response bandwidth is approximately 8 kHz [Fig. 2(c)]. To characterize the quality of the laser-locking results, the frequency noise is measured before and after laser locking. The measurement results [Fig. 4(a)] show that the laser frequency noise is decreased by to 3–4 orders of magnitude compared with that before locking, reaching a minimum of 0.08 Hz²/Hz@18 kHz. Through indirect beat frequency measurements, the laser linewidth after locking is determined to reach 255 Hz [Fig. 4 (b)], the frequency jitter of the laser reaches approximately 7 kHz within 2 h, and frequency instability reaches 3.76×10^{-13} @1000 s (Fig. 5). Implementing a real-time temperature control scheme based on the frequency reference of the ultrastable cavity for the laser prevents the PZT voltage of the laser from reaching the voltage value at which the laser generates mode hopping [Fig. 7(a)]; thus, the laser will not lose its lock because of mode hopping. By monitoring the light intensity at the transmission port of the ultrastable cavity for 240 h using a photodetector followed by a digital multimeter, it is found that the transmitted light intensity remains relatively stable [Fig. 7(b)], which indicates that the developed laser achieves long-term locking.

Conclusions We report a custom-built 2 μm band DBR fiber laser that can be used as an ultrastable laser source, in which frequency locking was achieved based on ultrastable cavity PDH frequency stabilization. The adiabatic constant-temperature packaging of the laser and built-in PZT with a frequency-tuning function meet the requirements of ultrastable cavity PDH frequency stabilization experiments. After frequency doubling using a PPLN crystal, the 1950 nm fiber laser successfully achieves frequency locking by using a ultrastable cavity with an FSR of 1.5 GHz, a fineness of 15000, and operation in 1 μm band as a frequency reference. DBR fiber lasers are difficult to lock in for a long time when implementing ultrastable cavity PDH frequency stabilization. We propose and demonstrate a scheme for using the PZT feedback control signal to trigger the generation of temperature control signals. Real-time temperature control is implemented based on an ultrastable cavity frequency reference for DBR fiber resonators to achieve long-term frequency locking of such DBR fiber lasers based on ultrastable cavity PDH frequency stabilization. The real-time temperature control scheme based on the frequency reference of the ultrastable cavity for DBR fiber resonators proposed herein provides an important reference point for realizing long-term ultrastable cavity PDH frequency stabilization of DBR fiber lasers.

Key words lasers; fiber laser; distributed Bragg reflection; PDH frequency stabilization; ultrastable optical cavity; temperature control