

激光与光电子学进展

短腔型超窄线宽低噪声光纤激光技术综述

邹萌^{1,2}, 肖何^{1,2}, 宋青果^{1,2}, 肖翔鹏^{1,2}, 沈凯², 孙琪真^{1,2}, 闫志君^{1,2*}¹华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074;²华中科技大学无锡研究院, 江苏 无锡 214174

摘要 随着激光雷达、引力波探测和光学原子钟等新技术的兴起和研究的不断深入,光学精密测量覆盖的应用领域的广度和深度都在拓展,传统自由运转的激光器其稳定性难以满足高精密度测量的应用要求。超窄线宽、超低噪声和长期稳定的光源已成为该领域迫切追求的目标。光纤激光器具备结构紧凑、易于集成化和极限线宽窄等特点,通过噪声抑制和稳频技术输出超稳定、超窄线宽激光,近年来逐渐成为热点研究方向。本文从光纤激光器的噪声理论出发,介绍了光纤激光器的噪声来源、分类及测试方法,基于噪声理论,分类总结了光纤激光器强度噪声和频率噪声不同抑制技术的原理、发展历程及现阶段进展,并对窄线宽光纤激光器的发展趋势做了展望。

关键词 激光器; 超窄线宽激光; 光纤激光器; 噪声抑制; 稳频技术

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221579

Review of Short Cavity Ultra-Narrow Linewidth Low Noise Fiber Laser Technology

Zou Meng^{1,2}, Xiao He^{1,2}, Song Qingguo^{1,2}, Xiao Xiangpeng^{1,2}, Shen Kai²,
Sun Qizhen^{1,2}, Yan Zhijun^{1,2*}¹School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan 430074, Hubei, China;²Wuxi Research Institute, Huazhong University of Science and Technology, Wuxi 214174, Jinagsu, China

Abstract With the rising and research deepening of new technologies such as laser radar, gravitational wave detection, and optical atomic clock, The breadth and depth of applications covered by optical precision measurement are expanding, the stability of the traditional free operation of the laser is difficult to meet the application requirements, ultra-narrow linewidth, low noise, and long-term stability of light source has become the urgent goal in this field. Fiber laser has the characteristics of compact structure, easy integration, and narrow limit line width. Through noise suppression and frequency stabilization technology, fiber laser can output ultra-high stability and ultra-narrow linewidth laser. In recent years, ultra-narrow line width fiber laser has gradually become a hot research direction. In this paper, starting from the theory of noise of fiber laser, the noise source, classification, and testing method of fiber laser are introduced, based on the theory of noise, the principle of different intensity and frequency noise suppression technology, development course, and the current progress of fiber laser are summarized, respectively, and the development tendency of narrow linewidth fiber laser is discussed.

Key words lasers; ultra-narrow linewidth laser; fiber laser; noise suppression; frequency stabilization technology

1 引言

窄线宽激光器具有线宽窄、相干性好、信噪比(SNR)高等特点,广泛应用在相干光通信、高灵敏度光传感和激光雷达等领域。极高的相干性可以有效提高信号探测和传输距离,利用其噪声低、线宽窄的特

点,可以用在密集波分复用和相干光通信方面,有效提高传输容量,特殊波长的窄线宽激光器还可以用于原子及分子光谱检测^[1-3]。目前商用的窄线宽激光器线宽普遍在 kHz 量级,频率稳定度最小在 10^{-12} @1 s 量级,虽然满足绝大多数民用需求,但随着诸如引力波探测^[4]、光学原子钟^[5-6]及光频梳^[7]等高精度光学测量科

收稿日期: 2022-05-12; 修回日期: 2022-06-21; 录用日期: 2022-07-11; 网络首发日期: 2022-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(62075071)、国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(61922033)

通信作者: *yanzhijun@hust.edu.cn

研项目的兴起,现有的窄线宽激光器其性能指标不足以支撑高精密光学测量,亟须发展频率稳定度小于 10^{-15} @1 s,线宽小于 1 kHz 甚至 mHz 的超稳激光器。因此,追求更高稳定度的激光器已成为当前研究热点,图 1 总结了不同线宽和频率稳定度的激光应用领域分布。

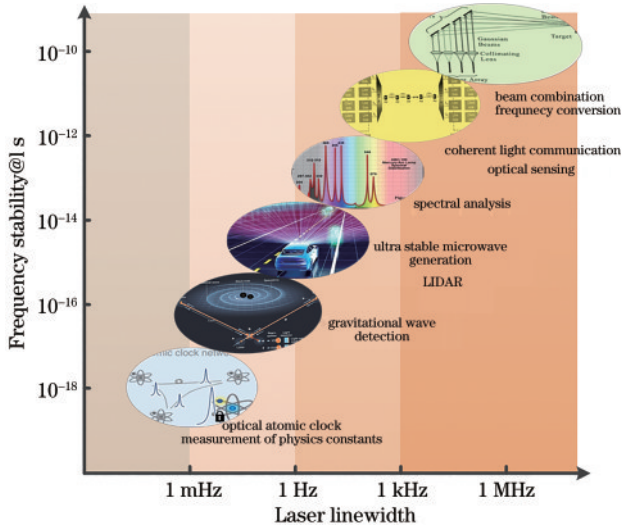


图 1 不同线宽和频率稳定度的激光应用领域分布图

Fig. 1 Laser application field distribution with different line widths and frequency stabilities

传统体激光器不仅体积庞大,而且受限于激光晶体,波长选择范围有限,相比而言,光纤激光器结构紧凑,转换效率高,极限线宽更窄,且工作波长可以通过改变掺杂灵活选择,在高度集成化和全波段范围通用的发展趋势下,光纤激光器势必会成为优先选择。光纤激光器结合不同的选模技术可以实现窄线宽激光输出。对于环形腔光纤激光器,通过在腔内引入法布里-珀罗(FP)干涉腔、光纤光栅或 Sagnac 环腔等窄带滤波器,可以输出窄线宽激光,但由于较长腔长,其纵模间隔小、受环境影响容易出现跳模现象、稳定性较差。相比环形腔,线形腔光纤激光器可通过缩短腔长,使纵模间隔大于增益带宽,从而实现单纵模窄线宽激光输出,而且线形腔系统体积更紧凑、稳定性更好、更利于工程

化。基于瑞利散射(RS)或受激布里渊散射(SBS)的线宽压缩机制,也可以将光纤激光器的线宽压缩至几十 Hz,但这类光纤激光器同样具有系统体积较大、抗环境干扰能力较差的缺点^[8-9]。综合各方面特点,短腔型线形腔光纤激光器最具备产品化的潜力,目前市面上主流的窄线宽光纤激光器产品都是采用的线形腔结构。

线形腔光纤激光器分为分布布拉格反射式(DBR)和分布反馈式(DFB)两种结构,其中 DBR 光纤激光器是由一段有源光纤和两个具有相同布拉格波长的光纤光栅构成,而 DFB 光纤激光器是通过在有源光纤上直接写入一个 π 相移光纤光栅而形成,这两种激光器输出激光都是窄线宽、低噪声的高相干光。对 DBR 光纤激光器来说,两端光栅相当于谐振腔的两个腔镜,光在两端集中反馈,满足谐振条件的各个纵模的损耗没有差异,在增益范围内容易产生多纵模振荡,且会形成模式竞争,导致输出激光不稳定。对 DFB 光纤激光器来说,谐振腔就是 π 相移光纤光栅,DFB 光纤激光器依靠增益区内部的 π 相移光纤光栅实现与光波长相关的分布式反馈,满足谐振条件的各纵模将有不同损耗,与增益谱线叠加后,只有净增益最大的纵模才能实现激射,同时实现激光反馈与激光模式选择,因此输出激光频率稳定性好,更易获得稳定的单纵模输出。

国外窄线宽光纤激光器的研制机构或生产厂家主要有丹麦 NKT Photonics 公司、美国 Orbits Lightwave 公司,以及法国 iXblue 公司等。国内主要有上海瀚宇公司、珠海横琴东辉公司、山东省科学院和中国科学院上海光学精密机械研究所等。不同厂家采用的技术方案及产品指标见表 1,其中丹麦 NKT Photonics 公司采用 DFB 线形腔结构,X15 和 E15 系列激光器线宽可达 100 Hz 以下,相位噪声尤其是低频段噪声水平是最低的。国内上海瀚宇公司采用同样的结构,其激光器产品线宽在 1 kHz 左右,和 NKT 还存在一定差距。另外,美国的 Orbits Lightwave 公司采用虚拟环形腔结构,将激光器相对强度噪声(RIN)降到了 -180 dB/Hz 以下,是目前最低水平,但是这种结构相对较复杂,技术工艺难度较大,成本昂贵。

表 1 不同窄线宽光纤激光器研制厂家方案及指标对比

Table 1 Comparison of schemes and indexes of different narrow linewidth fiber laser manufacturers

Product model	Technical proposal	Linewidth / kHz	Noise level	RIN peak / (dBc·Hz ⁻¹)	SNR /dB	PER /dB
Denmark NKT X15 ^[10]	DFB	<0.1	0.6 μ rad/Hz ^{1/2} @10 Hz	<-100	>50	>23
			0.3 μ rad/Hz ^{1/2} @100 Hz			
			0.4 μ rad/Hz ^{1/2} @1 kHz			
Denmark NKT E15 ^[10]	DFB	<0.1	32 μ rad/Hz ^{1/2} @10 Hz	<-100	>50	>23
			3.2 μ rad/Hz ^{1/2} @100 Hz			
			0.3 μ rad/Hz ^{1/2} @20 kHz			
Denmark NKT C15 ^[10]	DFB	<15	355 μ rad/Hz ^{1/2} @10 Hz	<-120	>65	>23
			36 μ rad/Hz ^{1/2} @100 Hz			
			3.5 μ rad/Hz ^{1/2} @20 kHz			

表 1 (续)

Product model	Technical proposal	Linewidth / kHz	Noise level	RIN peak / (dBc·Hz ⁻¹)	SNR /dB	PER /dB
France iXblue IXC-CLFO ^[11]	DFB	<10	<30 Hz/Hz ^{1/2} @1 kHz 70 μrad/Hz ^{1/2} @100 Hz	<-80	>50	>20
Shanghai Hanyu CoSF-D-Er ^[12]	DFB	1	7 μrad/Hz ^{1/2} @10 kHz 0.7 μrad/Hz ^{1/2} @100 kHz	-145	60	20
Shanghai Hanyu CoSF-D-EY ^[12]	DFB	10	300 μrad/Hz ^{1/2} @100 Hz 20 μrad/Hz ^{1/2} @10 kHz 8 μrad/Hz ^{1/2} @100 kHz	-115	60	15
Zhuhai Hengqin Donghui ^[13]	DBR	3	<-120 dB(rad/Hz ^{1/2})	-105	60	>23
Shandong Academy of Sciences ^[14]	DFB	3	Frequency fluctuation is less than 20 MHz Power fluctuation is less than 0.5%	<-110	—	—
America Orbits Lightwave ^[15]	Virtual ring cavity	<0.2	30 Hz/Hz ^{1/2} @100 Hz 20 Hz/Hz ^{1/2} @1 kHz 1 Hz/Hz ^{1/2} @100 kHz	-180	>80	>23

Note: PER is polarized extinction ratio.

本文从光纤激光器噪声理论出发,分析了光纤激光器的噪声来源、分类及测试方法,在此基础上,展开介绍了不同噪声的抑制方法及其发展历程,对近年来光纤激光线宽压缩技术和研究进展做了总结分析,并对窄线宽光纤激光技术的发展趋势做了展望。

2 光纤激光器噪声理论

光纤激光器的噪声分为强度噪声和频率噪声,分别对应输出激光功率和频率的波动。在精密测量领域,任何一种波动都会直接导致探测精度或分辨率的下降,因此必须对光纤激光器的噪声进行抑制,本节首先对激光器的噪声理论进行分析。激光器输出激光的电场矢量可以表示为

$$E(t) = E_0 \exp(\omega_0 t + \phi_0), \quad (1)$$

式中: E_0 代表光强; ω_0 代表频率; ϕ_0 代表初始相位。理想状态下,稳定的单频激光器的输出光强和光波频率及相位是恒定不变的,但实际上泵浦功率波动、谐振腔内损耗波动、自发辐射及端面散射等因素,会导致振幅和相位的随机起伏。其中振幅的随机起伏称为强度噪声,频率和相位的随机起伏称为频率或相位噪声。

2.1 光纤激光器强度噪声来源及测试方法

2.1.1 强度噪声来源分析

光纤激光器的强度噪声指的是激光器输出功率的波动情况,一般用RIN来描述,RIN表征单位频率范围内激光器输出功率相对波动情况,数学定义为

$$N_{\text{RIN}} = \frac{\Delta P^2}{P^2} \quad (\text{dB/Hz}), \quad (2)$$

式中: ΔP 为单位带宽内的噪声功率,即噪声功率谱密度; P 为激光平均功率。

根据频段不同,光纤激光器的强度噪声可以分为三类:

1) 低频段技术噪声,主要来源于环境振动、声学噪声和热噪声。其中,振动和声学噪声会使激光腔产生应变,从而改变腔内反馈光强大小和光栅中心波长,引起光强波动。振动噪声主要分布在Hz到百Hz频段,声学噪声主要分布在几十Hz到几十kHz频段;温度波动则会造成泵浦光的波动和激光腔长的改变,引起输出光功率波动,热噪声主要分布在Hz以下频段。

2) 中频段弛豫振荡噪声,弛豫振荡是光纤激光器特有的现象,也是光纤激光器的主要强度噪声来源。它来源于激光上能级粒子和腔内光子的相互作用,当激光上能级粒子寿命远大于腔内光子寿命时,就会产生弛豫振荡,表现为在某频段内光强呈现阻尼振荡的变化,弛豫振荡峰一般位于几十kHz到数MHz之间。弛豫振荡主要受泵浦波动和腔内损耗的影响。

3) 高频段量子噪声,随着频率升高,光纤激光器强度噪声逐渐趋于不变,此时的强度噪声对应量子噪声极限,也叫散粒噪声,来源于光量子波动,散粒噪声表现为一种白噪声,在整个频段内均匀分布,单频光纤激光器一般在几十MHz频率处接近量子噪声极限,量子噪声可根据理论公式计算,具体公式为

$$N_{\text{RIN-SH}} = \frac{2h\nu}{P}, \quad (3)$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为激光频率。

2.1.2 强度噪声测试方法

对于中高频段的噪声,可以采用频谱仪直接测试,前提是频谱仪和光电探测器的底噪要小于激光器的噪声。测量系统结构示意图如图2所示,待测激光



图 2 频谱仪直接测量 RIN 示意图

Fig. 2 Schematic diagram of direct measurement of RIN by spectrograph

(LUT)经可调谐衰减器(VOA)衰减后输入到光电探测器(PD)转换成电信号,然后接入频谱仪(ESA)进行分析,同时记录PD输出电信号的电压直流分量和频谱仪的分辨率带宽,就可以由下式计算出相对强度噪声值。

$$N_{\text{RIN}} = 10 \lg \frac{P(f)}{\frac{U^2}{R} W_{\text{RBW}}}, \quad (4)$$

式中: $P(f)$ 为频谱仪测得的电信号的频谱幅度,单位为W; U 为PD输出电信号的电压直流分量; W_{RBW} 为ESA的分辨率带宽。

对于kHz以下低频段的强度噪声测量,由于ESA和PD的本底噪声已远远大于激光器的噪声,无法采用ESA直接测量,须采用更低噪声的频谱分析设备或者采用数字万用表记录电压波动数据,再经快速傅里叶变换得到强度噪声频谱。同时,为避免环境波动对PD带来附加噪声,往往还需要对PD进行主动控温和隔震封装等措施。

2.2 光纤激光器相频噪声来源及测试方法

2.2.1 相频噪声来源分析

理想单频光纤激光器的频谱仅有一个频率成分,谱线是单一的线条,但实际由于相频噪声的存在。单频激光器的频谱谱线往往具有一定的宽度,这个宽度的大小反映了激光器的相位或频率噪声水平,所以压缩激光线宽实质上也就是抑制激光频率噪声。激光器的频谱特性可以用线宽来简洁直接地描述,但要知道噪声详细的频谱信息,则需要用频率或相位噪声功率谱密度(PSD)来描述。激光器的相位波动功率谱密度定义为偏离中心频率单位带宽内的均方相位起伏,单位为 rad^2/Hz 或者 $\text{rad}/\text{Hz}^{1/2}$,相位噪声则定义为偏离中心频率单位带宽内的信号功率和信号总功率之比,单位为 dBc/Hz 。激光器的频率波动谱密度则定义为偏离中心频率单位带宽内频率波动的均方值,单位为 Hz^2/Hz 或者 $\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。对于激光器较长时间的频率稳定性,通常用阿伦方差或者阿伦标准差来表征,其数学表达式为

$$\sigma_y(t) = \sqrt{\frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2}, \quad (5)$$

式中: N 为采样次数; y_i 表示第 i 次采样的值。阿伦标准差表示两个相邻采样点的标准差的期望,得到阿伦标准差 $\sigma_y(t)$ 后,除以激光频率 ν 就是激光频率稳定度或者频率不稳定性。

根据肖洛-汤斯理论^[16-17],对于激光器,一旦谐振腔确定,激光器就存在一个理论的极限线宽,来源于自发辐射,极限线宽值由谐振腔的参数和腔内的增益和损耗共同决定,单频光纤激光器的极限线宽可以表示为

$$\Delta\nu_s = \frac{n_{2l}}{\Delta n_l} \frac{2\pi(\Delta\nu_c)^2 h\nu}{P_0} \approx \frac{n_{2l}}{\Delta n_l} \frac{2\pi(\Delta\nu_c)^2 h\nu_0}{P_0}, \quad (6)$$

式中: $\Delta\nu_c = \frac{1}{2\pi\tau_R} = \frac{c\delta}{2\pi L}$ 表示无源谐振腔的本征线宽,它和腔内的光子寿命 τ_R 、腔长 L 以及腔内损耗 δ 有关。该极限噪声是一种白噪声,均匀贡献于整个频率噪声谱,幅值一般小于 $1 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ 。

对于光纤激光器,当光纤与周围环境处于热平衡时,光纤内部仍存在温度梯度,会影响输出激光频率,称为基本热噪声。Foster等^[18]对光纤激光器建立理论模型,采用无限包层边界条件,推导出基本热噪声的功率谱分布为

$$T^2(f) = \frac{k_b T^2}{4\pi k_c} \times \text{Re} \left[\exp \left(\frac{ik_1^2 MFD^2}{2} \right) E_1 \left(\frac{ik_1^2 MFD^2}{2} \right) \right], \quad (7)$$

式中: k_b 为玻尔兹曼常数; $k_1 = \sqrt{\frac{fC_v}{2k_c}}$, $C_v = 1.67 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 为硅的热容量, $k_c = C, D$ 是石英的导热率, D 是热扩散率。实验测得噪声幅值接近 $10 \text{ Hz}/\text{Hz}^{1/2} @ 10 \text{ kHz}$,与理论相符。

除了基本热噪声,由于泵浦源的噪声引起光纤激光器谐振腔内的温度波动,也会引入激光器频率噪声,称为自热噪声。Foster等^[19]基于频域建立模型分析了不同泵浦波长和不同泵浦功率下的频率噪声,并进行了实验验证,结果表明确实存在自热效应使光纤激光器频率噪声随泵浦功率提高而恶化。

在上述三种频率噪声中,自热噪声是最主要的噪声源。

2.2.2 相频噪声测试方法

由于光频频率极高,在 10^{14} Hz 量级,难以直接测量,需要采取一定的鉴频手段才能得到频率抖动大小。光纤干涉仪可以将光的频率或相位差转化成光强变化,因而一般采用基于光纤干涉仪的相位解调方案来检测光频抖动,其测量系统如图3所示。

待测激光经过非等臂干涉仪后,两臂光场的相位差为

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n \Delta L \nu}{c}, \quad (8)$$

式中: ν 为光频; n 为光纤折射率; c 为光速; ΔL 为臂长差。引入频率抖动项和环境波动造成的腔长变化项,得到:

$$\Delta\Phi(t) = \frac{2\pi n \Delta L \nu}{c} \left(\frac{\delta\nu}{\nu} + \frac{\delta L}{L} + \frac{\delta n}{n} \right). \quad (9)$$

可见,干涉仪系统可以将光频抖动转换为干涉仪

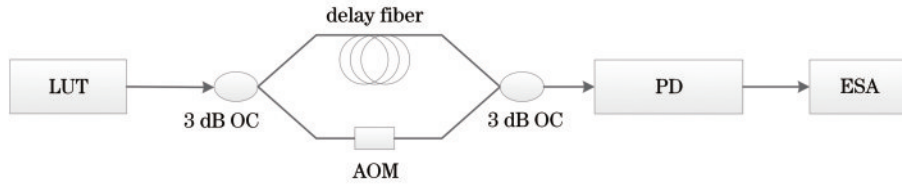


图 3 基于光纤干涉仪的激光相位噪声测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of laser phase noise measurement system based on optical fiber interferometer

输出信号的相位抖动,且臂长差 ΔL 越大,鉴频灵敏度越高。

干涉仪外差信号相位波动大小为

$$\Delta\Phi(t, \tau) = \Phi_s(t + \tau) - \Phi_s(t), \quad (10)$$

式中: τ 为光纤延时时间。经傅里叶变换得到

$$\Delta\Phi(f) = \Phi(f) [1 - \exp(-j2\pi f\tau)]. \quad (11)$$

由此可以得到外差信号的相位噪声功率谱 $S_{\Delta\phi}(f)$ 与待测激光的相位噪声功率谱 $S_{\phi}(f)$ 的关系为

$$S_{\phi}(f) = \frac{S_{\Delta\phi}(f)}{|1 - \exp(-j2\pi f\tau)|^2} = \frac{S_{\Delta\phi}(f)}{4 \sin^2(\pi f\tau)}. \quad (12)$$

再得到频率噪声和相位噪声的关系为

$$S_v(f) = f^2 S_{\phi}(f). \quad (13)$$

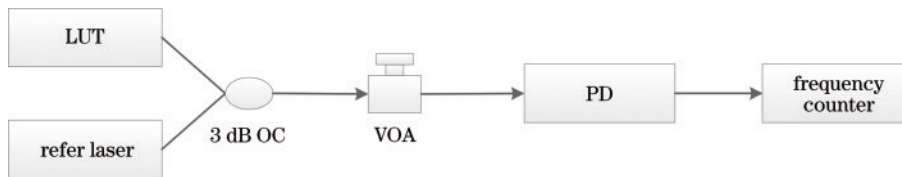


图 4 拍频法测量激光器低频相位噪声系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of laser low frequency phase noise measurement system by beat frequency method

3 光纤激光器噪声抑制技术

3.1 光纤激光强度噪声抑制技术

光纤激光器的强度噪声主要来源于泵浦功率的波动、谐振腔的热扰动和振动,所以对泵浦源、有源光纤及光栅区进行恒温控制和隔振封装,可以一定程度上抑制强度噪声。在此基础上,光纤激光器的强度噪声抑制主要通过反馈控制或非线性放大的手段实现,包括基于光电反馈、饱和吸收效应和注入锁定三种方案。

3.1.1 基于光电反馈抑制激光强度噪声

光电反馈的思想是通过实时调制泵浦输出或腔内损耗的方式来抑制激光器强度噪声,具体方案如图 5 所示,通过提取部分输出光,经过 PD 将光信号转换为电信号,并与一个稳压参考电源输出电信号做差分,差分信号经过放大和低通滤波,再经过比例积分控制电路(PID)反馈给激光器泵浦驱动,通过实时调节驱动电流大小来减小激光功率波动。实验表明,这种方法可以明显降低激光器低中频强度噪声,对 10 kHz 以下频段强度噪声抑制达到 10 dB~20 dB,对弛豫振荡峰值抑制达到 30 dB 以上,典型值可降到 -120 dB/Hz 以

获得待测激光器的相位噪声和频率噪声功率谱后,分别除以测量带宽 B ,就可以得到相位噪声和频率噪声功率谱密度。

对于 1 Hz 以下低频段的频率噪声测量,受限于测量仪器的带宽,采用光外差拍频法,如图 4 所示,即用一台已知低噪声的参考激光器和待测激光拍频,通过频率计数器记录拍频信号的频率波动数据,计算出阿伦方差,进而得到频率稳定度,或者经过快速傅里叶变换(FFT)计算出频率噪声。该方法要求两者光频相差不大,不能超过频率计数器的测量带宽。根据平方和的噪声叠加原理^[20],即 $S_{v1}^2(f) + S_{v2}^2(f) = S_v^2(f)$,已知参考光源的频率噪声,就可以获得待测激光的频率噪声谱。

下,激光器 24 h 长期不稳定性可降到 0.1% 以内^[21-26]。受限于电学系统的固有带宽和电学噪声,光电反馈对激光低中频强度噪声抑制效果明显,但对高频噪声抑制程度有限。

3.1.2 基于饱和吸收效应抑制激光强度噪声

可饱和吸收体对光的吸收具有饱和效应,在饱和区,输入光功率的波动会因增益饱和效应而减小,起到抑制激光强度噪声的作用^[27]。常见的可饱和吸收体有半导体光放大器(SOA)和未泵浦的掺杂光纤,可饱和吸收体可以抑制激光器全频段强度噪声达 20 dB 左右^[28-29],华南理工大学 Feng 等^[30]采用级联的 SOA 抑制 DBR 光纤激光器的强度噪声,在 50 MHz 带宽范围内降低弛豫振荡峰值最大达到 30 dB(图 6),该课题组采用光电反馈闭环控制 SOA 驱动电流,在 50 MHz 带宽范围内降低弛豫振荡峰值最大达到 50 dB,在 1 kHz~50 MHz 范围内 RIN 降到了 -150 dB/Hz 以下,接近噪声极限^[31]。可饱和吸收体抑制强度噪声的同时会对输入光功率有一定吸收,同时还会引入自发辐射噪声,通常在输出端需要加一个宽带滤波器滤除自发辐射噪声。

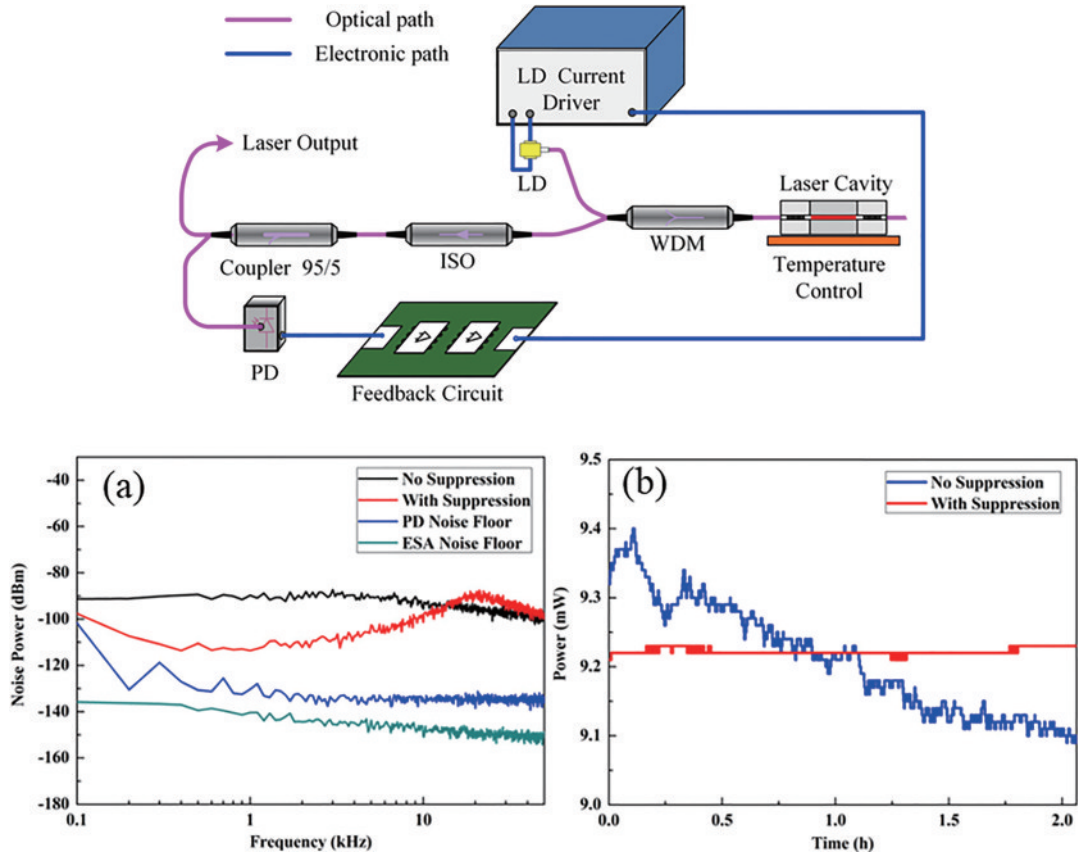


图 5 光电反馈抑制激光器强度噪声系统图和强度噪声及功率稳定性测试结果^[24]

Fig. 5 Photoelectric feedback suppression of laser intensity noise system diagram and intensity noise and power stability test results^[24]

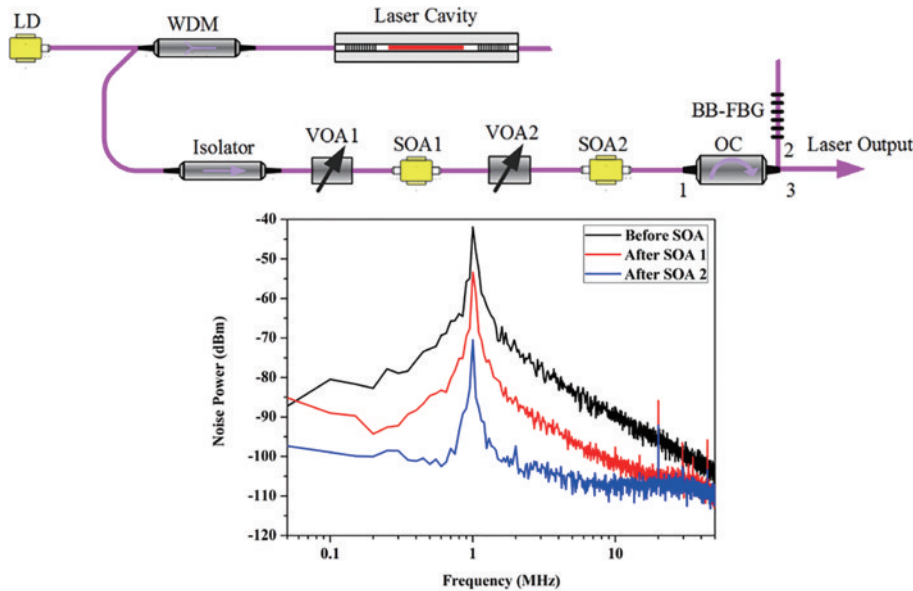


图 6 基于级联 SOA 抑制 DBR 光纤激光器强度噪声光路图及 RIN 测试结果^[30]

Fig. 6 Optical path diagram of DBR fiber laser intensity noise suppression based on cascaded SOA and RIN test results^[30]

3.1.3 基于注入锁定抑制激光强度噪声和频率噪声

注入锁定是一种光反馈的方式噪声抑制技术,通过将稳定的窄线宽激光注入待稳定激光器腔内,或者采用自注入锁定的方式,即提取部分输出激光注入回激光腔内。注入激光器腔内的光会和腔内循环振荡的激光发生混频干涉,当二者频率产生谐振时,注入光信号会被

放大,腔内其他频率的光就会被抑制,输出激光的强度噪声和频率噪声都会减小。Huang 等^[32]理论研究了自注入锁定压缩激光线宽的原理,论证了延长腔内光子寿命有助于压缩激光线宽,并实验验证了延时光纤长度越长,压缩激光线宽越窄,用 101 m 延时光纤自注入锁定 DBR 光纤激光器,将激光线宽压缩到了 200 Hz(图 7)。

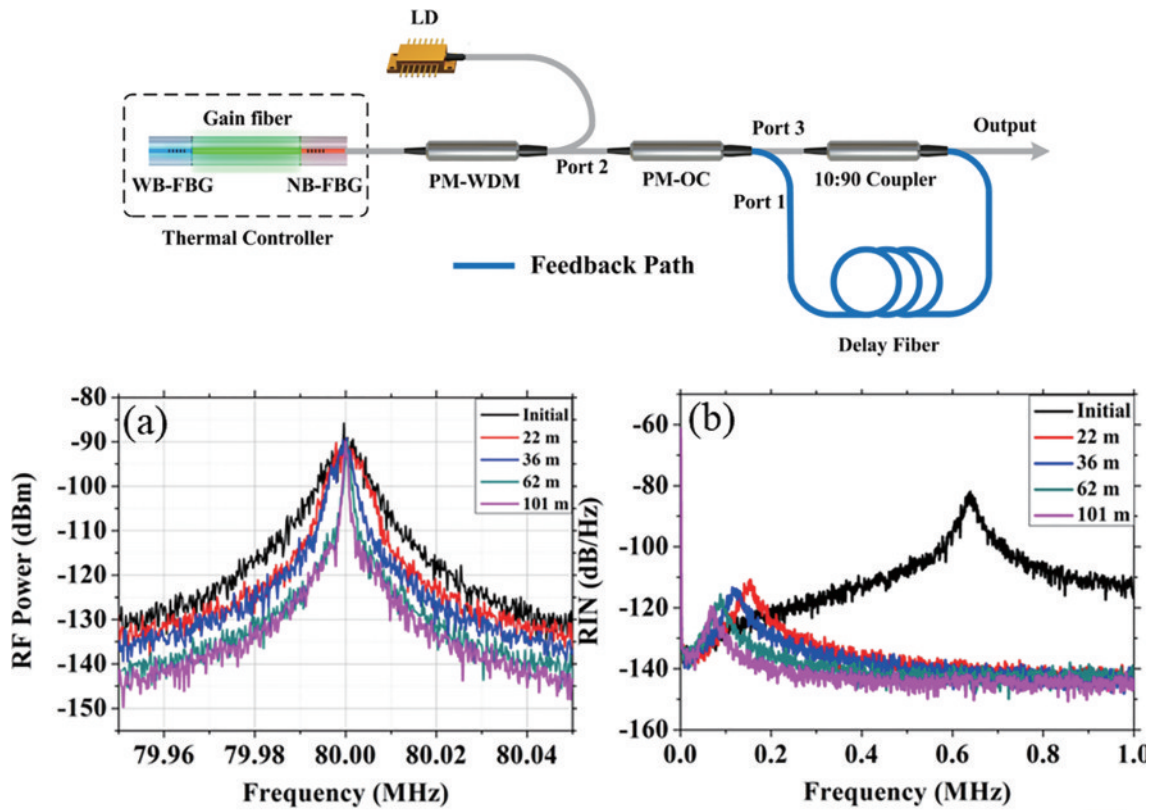


图 7 自注入锁定抑制激光器噪声光路图和不同长度延时光纤激光线宽和 RIN 测试结果^[32]

Fig. 7 Optical path diagram of self-injection locking suppression laser noise and results of laser line width and RIN test with different delay fiber lengths^[32]

Zhao 等^[33]实验研究了自注入锁定对 DFB 光纤激光器的噪声抑制效果,结果表明自注入锁定可以降低弛豫振荡峰值 16 dB,并使弛豫振荡峰向低频移动。Hou 等^[34]采用光纤环作为选模器件,注入锁定 DBR 光纤激光器,将激光弛豫振荡峰值从 -99 dB/Hz 降到了 -119.4 dB/Hz,抑制幅度达 20 dB,激光线宽由 3.96 kHz 压缩到了 540 Hz。Ji 等^[35]采用一个高 Q 值的 MgF_2 基底的回音壁微环腔作为选模器件,注入锁定 DBR 光纤激光器,将激光白噪声降到了 0.4 Hz²/Hz,对应激光极限线宽 12.6 Hz(图 8)。

上述三种方案都可以实现光纤激光器强度噪声抑制,其中:光电反馈可以抑制低中频强度噪声,但会引入电学噪声;可饱和吸收体可以抑制全频段噪声,但会衰减光强,同时引入自发辐射噪声;注入锁定也可以有效抑制强度噪声和频率噪声,但由于反馈环路较长,易受环境波动影响。单采用一种方案很难在全频段对激光器强度噪声进行有效抑制,近年来研究人员多用各种方案结合的方式抑制激光器强度噪声,以弥补不同方案的劣势。陆续的研究结果表明,可以进一步将窄线宽光纤激光器弛豫振荡峰值降到 -120 dB/Hz 以下,全频段强度噪声降到 -150 dB/Hz 以下^[36-37]。2018 年,Zhao 等^[38]结合自注入锁定和 SOA 可饱和吸收体两种手段对 DBR 光纤激光器进行噪声抑制,将弛豫振荡峰值降低了 64 dB,在 75 kHz~50 MHz 宽带范围内

相对强度噪声值降到了 -150 dB/Hz,接近散粒噪声极限,获得激光线宽小于 600 Hz(图 9)。

3.2 光纤激光器频率噪声抑制技术

光纤激光器的线宽压缩过程实质上是激光频率噪声抑制的过程。激光器频率噪声抑制技术发展至今,其主流技术路线和系统方案已基本成型,相关技术统称为稳频技术,按实现方式可分为主动稳频和被动稳频两种方式。另外,控制激光单偏振态输出也是线宽压缩的一种实现方式,本小节分别对不同的稳频技术展开介绍。

3.2.1 被动稳频技术

由激光器的光频表达式 $\nu = c/2nL$,光腔的光程长度决定了激光器输出光频大小,所以稳定激光器光频等同于保持激光腔光程长度的稳定,其影响因素包括腔内温度和应力波动,按稳频实现方式可分为被动稳频和主动稳频,被动稳频是依靠封装技术,减小腔内的温度波动,同时隔绝环境振动。如图 10 所示,不同的封装方式都能达到良好的效果,主要包括:采用真空封装和分段点胶固定光纤光栅的方式,可以隔绝外界温度和沿光纤轴向的振动影响^[39];利用 TEC 模块控制腔内温度恒定,同时采用吸音棉隔绝外界振动^[40];采用吸音棉包裹光纤光栅,内部填充导热硅油或硅脂,最外层采用绝热材料封装,既保证了栅区的散热又隔绝了外界温度和振动的干扰^[41];对于轴向振动的影响,山东省

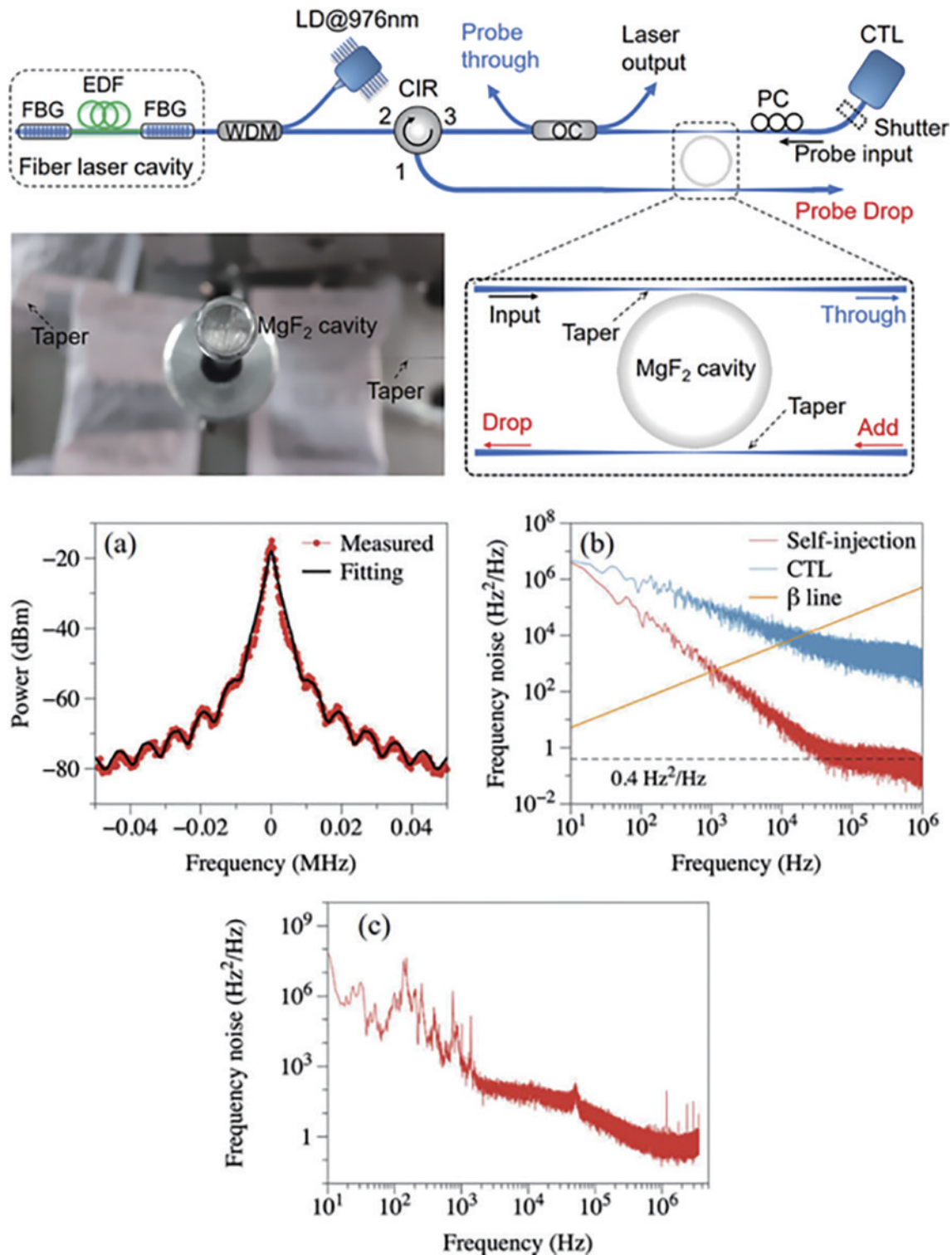


图 8 基于高 Q 值 MgF₂ 回音壁微腔注入锁定抑制 DBR 光纤激光器频率噪声及实验结果^[35]

Fig. 8 Frequency noise suppression of DBR fiber laser based on a high-Q MgF₂ crystalline whispering-gallery-mode resonator injection locking and experimental results^[35]

科学激光研究所采用弧形槽微弯固定光纤光栅的方式,有效减小了轴向振动对光栅长度的影响^[42];丹麦 NKT Photonics 公司采用负热膨胀系数的基座材料,将光纤光栅两端固定在基座上,以抵消温度变化过程光纤光栅的形变量^[43];中国科学院上海光学精密机械研究所采用组合材料的封装方式,通过不同材料在温

度变化下的不同应变来抵消光热效应对栅区光程长度的改变^[44]。

上述被动稳频的方案用于目前商用化的窄线宽激光器产品,可以满足绝大多数的应用场景需求,短期内(1 s)的频率稳定度可以达到 10⁻⁷,但在对光频稳定性有更高要求的场景,比如高灵敏度地震波、引力波探测

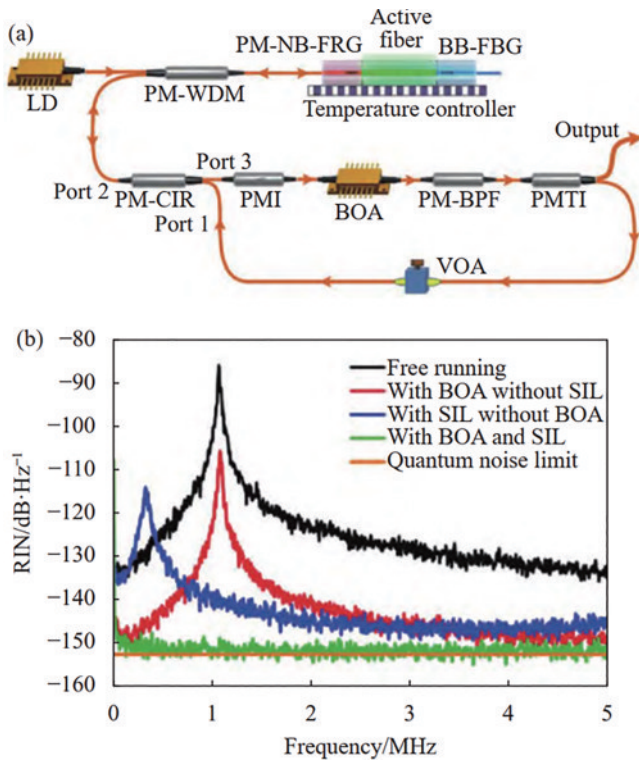


图 9 基于 SOA 和自注入锁定相结合抑制 DBR 光纤激光器强度噪声实验装置示意图及 RIN 测试结果^[38]

Fig. 9 Schematic diagram and RIN test results of experimental device for suppressing intensity noise of DBR fiber laser based on SOA and self-injection locking^[38]

和激光雷达等领域,需要进一步提高激光器频率稳定性,必须通过主动稳频的方式来实现。

3.2.2 主动稳频技术

主动稳频技术的思路是选取一个稳定的参考频率作为标准,当待锁定的激光频率偏离参考频率时,设法进行鉴别并产生能反映这个偏差的信号,然后将鉴频

信号反馈给待锁定的激光系统,通过这种闭环控制使激光器频率始终工作在参考频率上。

在主动稳频技术中,常用的参考频率标准大致分两类,一类是以原子或分子的跃迁谱线中心频率作为参考标准,相关实验研究表明,利用氦原子、碘分子和铷原子跃迁中心频率作为参考频率,可以将光纤激光器长期频率稳定性提升到 $10^{-8} \sim 10^{-14}$ ^[45-49],但是由于原子或分子跃迁频谱范围有限,只能针对特定波长的激光进行稳频,因此主动稳频技术中运用更多的是另一类以光学谐振腔的谐振频率作为参考标准,由于谐振腔的谐振频率成梳状结构,在理论上可以无限延展,因而可以满足不同波长激光器的稳频需求,常用的光学谐振腔包括光纤干涉仪、光纤光栅、微环腔和 FP 腔。早期研究人员采用光纤干涉仪作为稳频参考腔,通过提取干涉仪谐振频率和激光器输出光频的误差信号,反馈给激光器腔长调谐执行机构,可以一定程度上抑制激光器低频段频率噪声,但由于光纤干涉仪系统对环境较敏感,抑制程度有限^[50-53]。中国科学院上海光学精密机械研究所杨飞等^[54]采用光纤光栅作为鉴频器件,并对光纤光栅进行控温隔振处理,通过主动稳频获得了线宽小于 3 kHz,频率长期稳定性优于 2.5 MHz/h 的激光输出。利用高 Q 值的回音壁微腔作为参考腔,可将激光器频率稳定性提升至 10^{-14} ^[55-56]。相比于高精度的 FP 腔,光纤光栅和微腔由于体积更小,有利于工程化,已在商用窄线宽激光器产品(加拿大 TeraXion NLL、美国 OE waves Hi-Q)中被采用,而在引力波探测、光学原子钟等精密测量领域,往往采用低膨胀系数材料(ULE)制成的高精度 FP 腔作为参考腔,具有极佳的热稳定性,稳频后激光频率不稳定性可达到 $10^{-15} \sim 10^{-17}$ ^[57-61]。表 2 列出了不同参考频率标准稳频优缺点及稳定度对比。

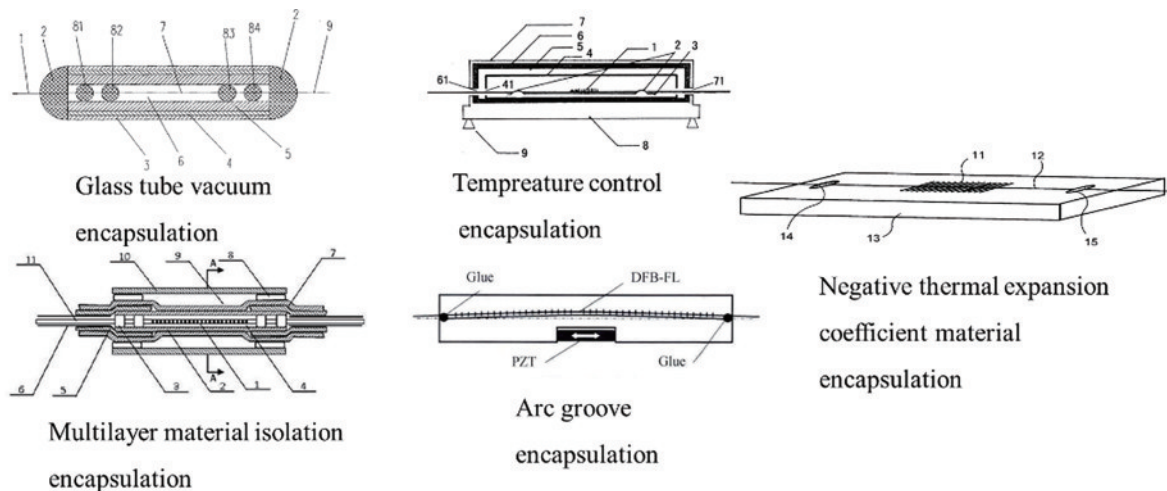


图 10 不同 DFB 光纤激光器封装方案^[39-43]

Fig. 10 Different DFB fiber laser packaging schemes^[39-43]

主动稳频技术主流的方案是 PDH 稳频技术, PDH 稳频技术最早由 Drever 等^[62]1983 年共同提出,其

基本原理如图 11 所示,激光器发出的光经过电光调制器(EOM)调制,产生边频,然后通过偏振分光棱镜

表 2 不同参考频率标准优缺点及频率稳定度对比

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of different reference frequency standards and frequency stability

Reference frequency standard	Advantages	Disadvantages	Frequency stability
Atomic or molecular transition spectral line	Good long-term stability	Limited spectrum	10^{-16} – 10^{-14} [45-49]
Fiber optic interferometer	Wavelength is not restricted	Sensitive to environmental influences	10^{-13} [50-53]
Fiber bragg grating	Compact and easy to integrate	Frequency stabilization is limited	10^{-10} [54]
Micro ring cavity	Compact and easy to integrate	Poor long-term temperature stability	10^{-14} [55-56]
FP cavity	High precision and excellent thermal stability	Poor vibration resistance and not easy to engineer	10^{-17} – 10^{-15} [57-61]

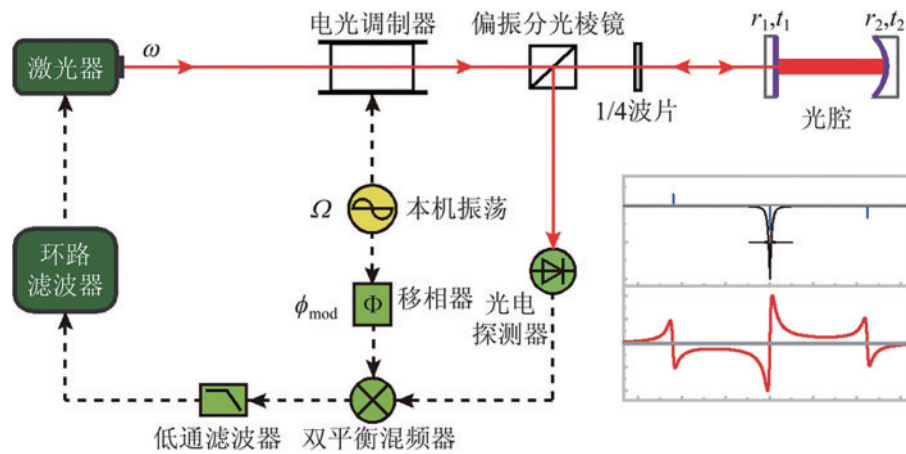


图 11 PDH 稳频技术系统示意图^[63]

Fig. 11 Schematic diagram of PDH frequency stabilization technology system^[63]

(PBS)和四分之一波片提取参考光腔的反射光,反射光经过PD和本地参考光进行混频,移相器的作用是弥补两路信号的相位差。混频信号中包含了激光频率和光腔谐振频率的误差信号,通过低通滤波和放大,提取出误差信号,并反馈控制激光器泵浦驱动,从而将激光频率锁定在谐振腔的谐振频率上。PDH 稳频技术结合频率调制技术和光外差探测技术,产生的鉴频信号不受探测系统噪声限制,信噪比很高。

经过推导,基于光学谐振腔的PDH 稳频技术的鉴频误差信号可以表示为^[64]

$$\epsilon = D\delta\nu \quad (14)$$

D 定义为

$$D = 8 \frac{\sqrt{P_c P_s}}{\Delta\nu_c} \quad (15)$$

式中: P_c 和 P_s 分别为初始激光和调制边带的光功率; $\delta\nu$ 为激光频率和光学腔谐振频率的失谐量; $\Delta\nu_c$ 为谐振腔的线宽。

由此可见,鉴频斜率取决于光功率和谐振腔的线宽,而过大的光功率会带来发热和晶体剩余幅度调制等问题,因此谐振腔的线宽决定了PDH 频率稳定的上限,要获得窄线宽的谐振腔,就必须设法提高谐振腔的精细度或品质因数,这也是PDH 激光稳频技术需要高精度参考光腔的原因所在。另外,剩余幅度调制是PDH 技术的最大技术噪声,必须采取一定手段进行抑制。剩余幅度调制发生在电光相位调制时,由于电光

晶体前后表面的非完全透射,或是入射光不完全和晶体主轴平行,产生了少许幅度调制,这会在PDH 误差信号里产生直流偏置,影响稳频效果。围绕上述影响PDH 稳频技术的关键因素,研究人员近年来陆续取得了突破性成果。

中国科学院大学天文与空间科学学院的Tai等^[65]在2017年采用ULE 玻璃(热膨胀系数非常低,约为 10^{-8})构成的FP腔,精细度为610000,通过垂直刚性安装,使腔长对重力方向上的垂直加速度不敏感,并采用沿布儒斯特角切割的电光调制晶体对激光进行边带调制,以减小剩余幅度调制水平,通过如图12所示的实验装置进行PDH 稳频,得到了线宽小于185 mHz,频率不稳定性 7×10^{-16} (1~10 s)的激光输出。

中国科学院安徽光学精密机械研究所姚波等^[66]在2021年采用ULE 玻璃构成的腔长10 cm,精细度360000的FP超稳腔,并通过真空密闭、隔震及精密控温等措施减小环境波动干扰,采用PDH 稳频技术,其实验装置示意图如图13所示,混频器得到的频率误差信号由伺服控制系统处理后,低频成分反馈至激光器内置PZT 驱动控制器,实现对激光低频段频率波动的补偿,高频成分反馈至AOM 驱动控制器,实现对激光高频段频率波动的补偿,最终得到线宽280 mHz、频率不稳定性达到 6×10^{-16} @1 s和 8×10^{-15} @100 s的超稳激光。

近年来,随着光刻工艺和化学气相沉积工艺的精进,超低损耗的硅基微环腔得以研制成功^[67],美国加州

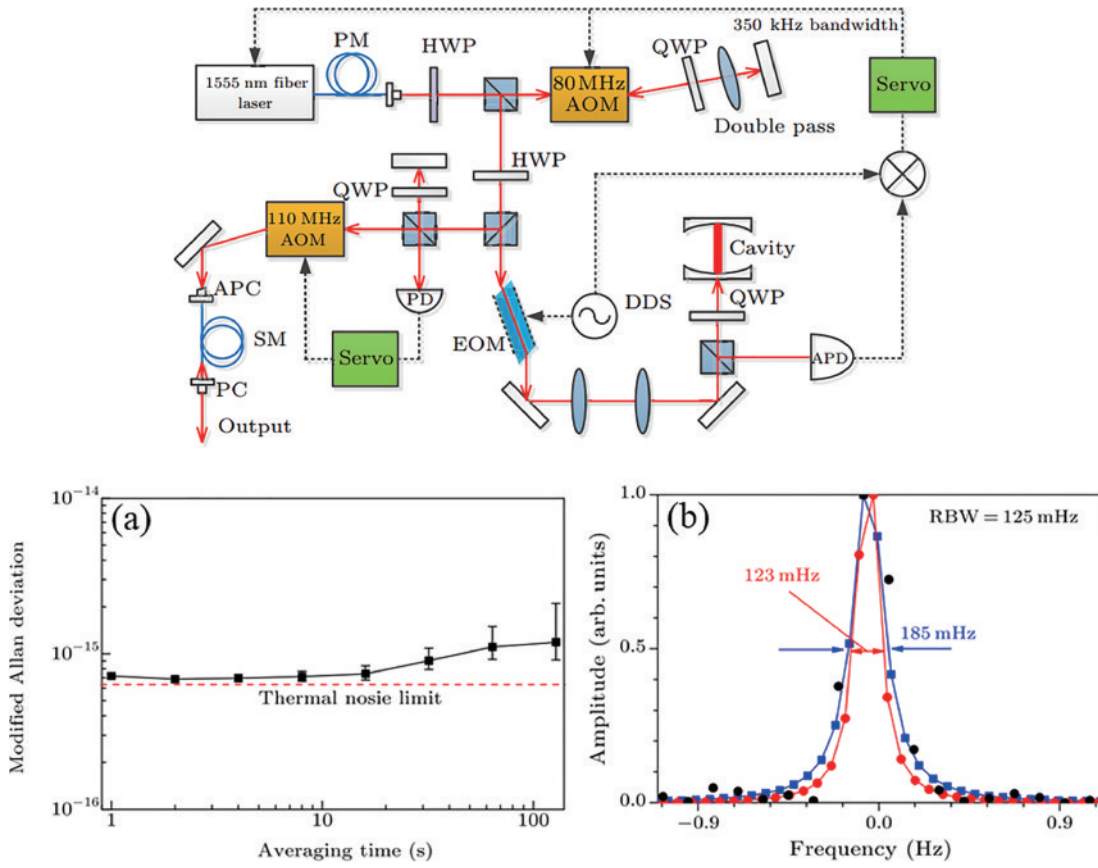


图 12 基于高精度 FP 腔光纤激光器稳频系统及激光频率稳定性和线宽测试结果^[65]

Fig. 12 Frequency stabilization system and laser frequency stability and line width test results based on high precision FP cavity fiber laser^[65]

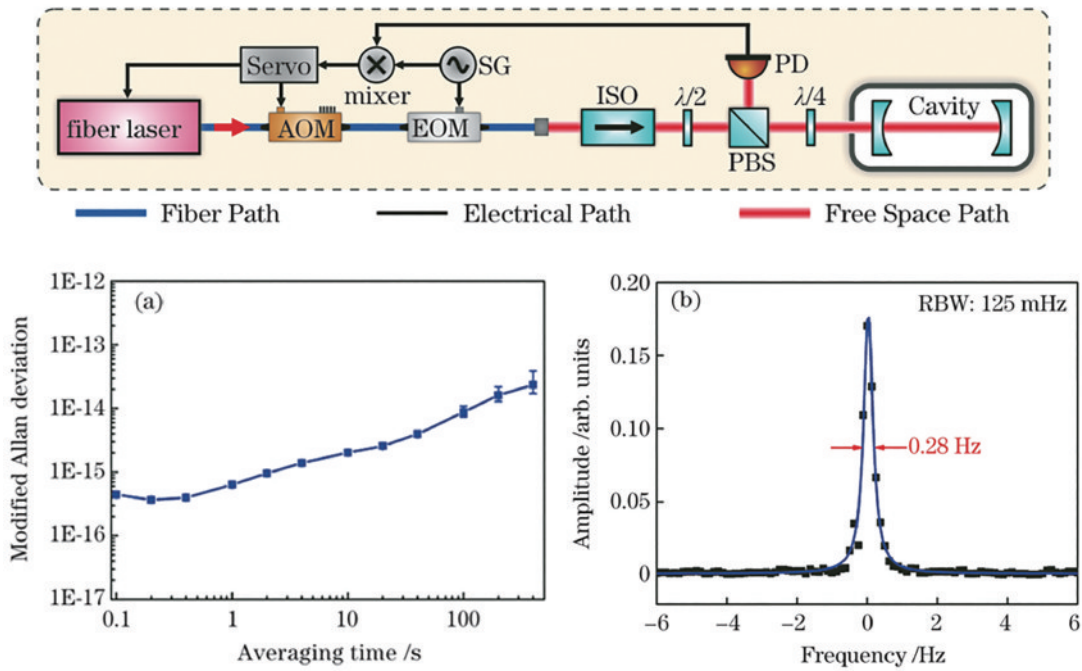


图 13 基于超稳 FP 腔 DBR 光纤激光器稳频系统及激光频率稳定性和线宽测试结果^[66]

Fig. 13 Frequency stabilization system and laser frequency stability and line width test results based on ultra-stable FP cavity DBR fiber laser^[66]

大学 Brodnik 等^[7]在 2021 年分别采用 Q 值为 2.8×10^7 和 10^8 的氮化硅基底微环腔和熔融硅 FP 腔作为参考

腔, 对外腔式半导体激光器进行二级稳频(图 14), 将激光器线宽压缩到 30 Hz, 得到频率稳定性 2×10^{-13} @

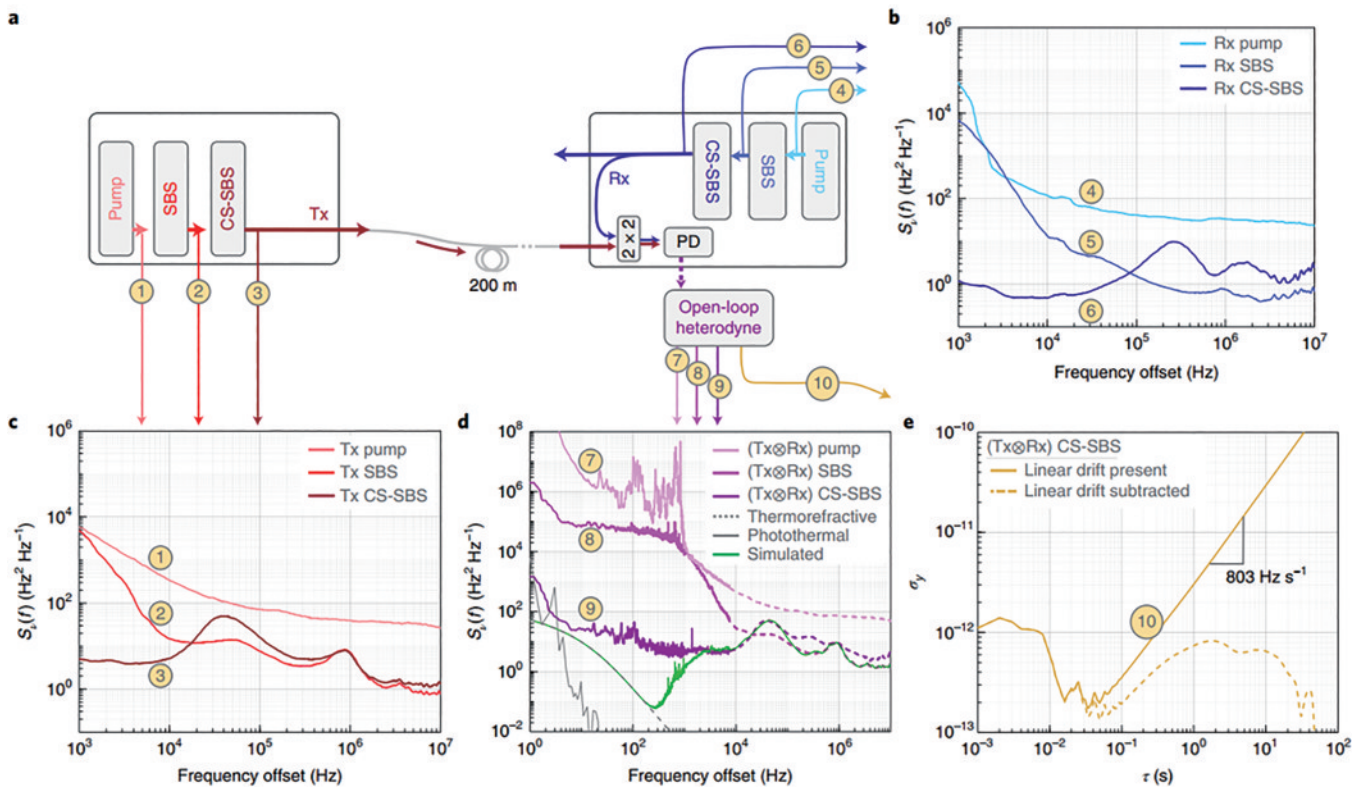
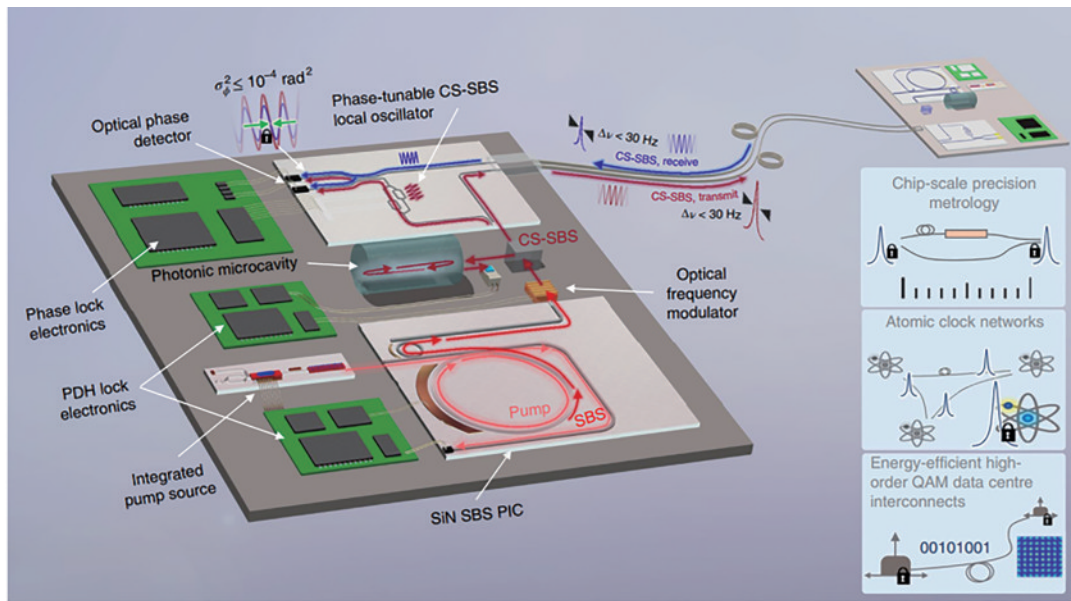


图 14 基于硅基微环腔和熔融硅 FP 腔二级稳频激光系统及激光频率噪声和稳定度分段测试结果^[7]

Fig. 14 Secondary frequency stabilized laser system based on silicon-based microring cavity and fused silicon FP cavity and the fractional test results of laser frequency noise and stability^[7]

50 ms, 该系统结构紧凑, 集成度高, 对研制可搬运稳频激光系统有一定参考价值。

3.2.3 光纤激光单偏振态输出控制技术

由于光纤中双折射的存在, 单频光纤激光器的输出激光其实是由正交方向上的两个偏振模式构成的, 双偏振态会对激光线宽产生一定的展宽, 通过合适的技术手段消除偏振模式竞争, 使激光器输出单偏振激光也是压缩激光线宽的一种手段。Ronnekleiv 等^[68]在

1998 年理论分析了 DFB 光纤激光器中的偏振模式竞争现象和 DFB 光纤激光器单偏振输出的影响因素, 提出光纤激光器中的双偏振态输出与光纤的双折射系数和光栅的耦合系数都有关系, 高双折射系数和低耦合系数都有助于实现单偏振输出。

基于上述理论, 通过在保偏有源光纤上写入相移光栅^[69-70]或者通过飞秒激光逐点刻写的方式在有源光纤上写入相移光栅^[71], 都可以在腔内引入附加的高双

折射,增大两个偏振模式的增益阈值之差,从而达到最终只有一个偏振模式起振的目的,也可以通过在有源相移光纤光栅合适位置施加应力^[72]或者单边打磨的方式抑制一个偏振模式的输出^[73],或是在腔内引入偏振

分光元件使输出激光仅有一个偏振态^[74]。另外,单偏振激光注入锁定^[75]、虚拟环形腔^[76]也都可以实现单偏振激光的输出(图 15)。

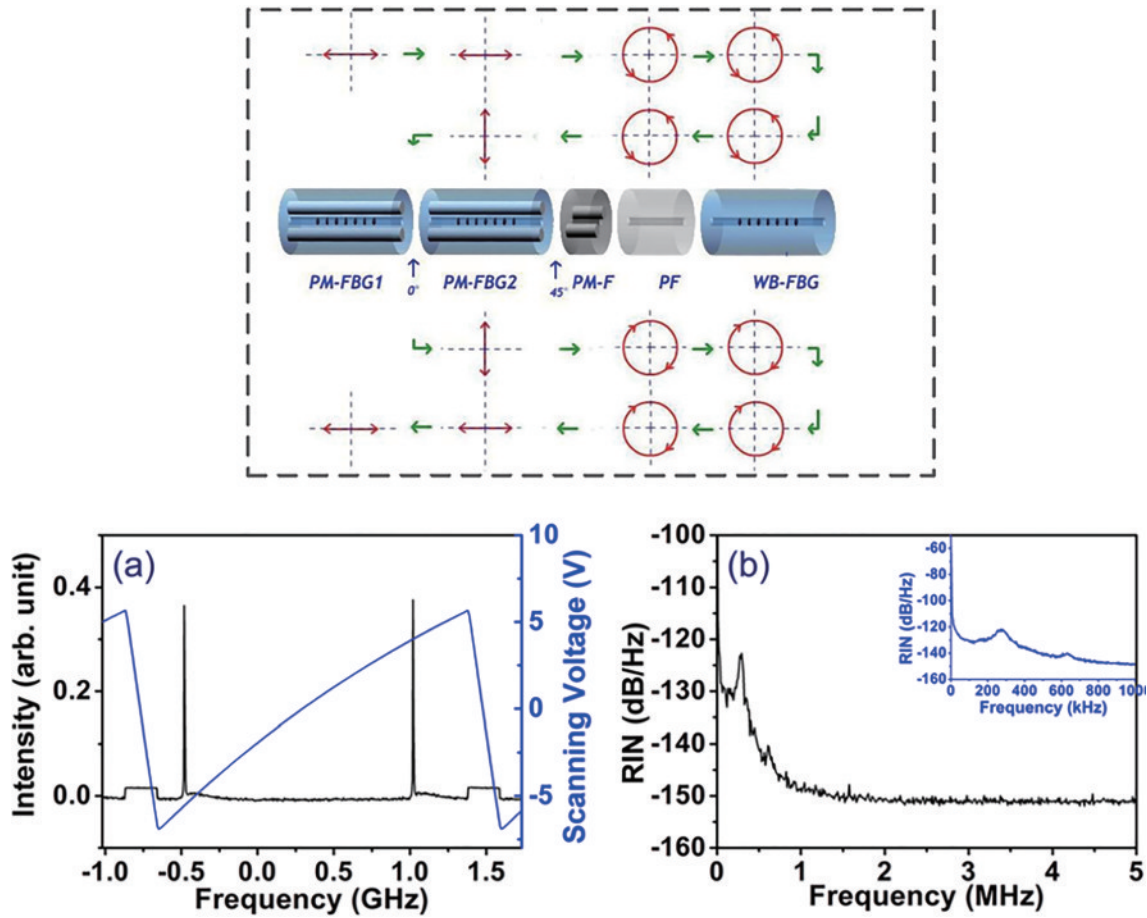


图 15 基于虚拟环形腔的 DBR 光纤激光器及单纵模特性和 RIN 测试结果^[76]

Fig. 15 Virtual ring cavity based DBR fiber laser and single-longitudinal model and RIN test results^[76]

4 超窄线宽光纤激光器的潜在应用

随着超稳激光器稳定度的不断提升,近几年陆续有超稳激光用于超稳微波产生、引力波探测和原子光钟的案例报道,而短腔型超窄线宽、长期稳定的光纤激光器具有结构紧凑、易于集成化的特点,有望实现空间可搬运、长期稳定运转的超稳光源,未来成为这些应用领域的替代光源。

德国 Menlo 系统有限公司结合 194 THz 超稳激光器(线宽 Hz 级、频率稳定度 8.5×10^{-15} @1 s)和超低噪声光频梳,产生了 10 GHz 的微波信号(图 16),微波信号稳定度只受限于超稳激光,其相位噪声低至 -70 dBc/Hz@1 Hz, -160 dBc/Hz@10 kHz^[77]。这种超稳微波信号应用到雷达系统可以提升其分辨率、扩大动态范围,应用到光通信系统可以提升传输带宽,在其他需要低噪声微波源的科学和工程领域都具有较大的潜在价值。

光学原子钟利用原子能级间的跃迁频率作为时钟

基准,钟探测激光扫描获得的原子跃迁谱线的线宽受探测激光线宽的限制,因而钟探测激光的频率稳定度越高,越有利于获得更高频率稳定度的光钟输出,或者说能够大大降低光钟系统的评估时间。所以,钟探测激光的性能直接影响光钟的技术指标,是光钟研究至关重要的关键技术。中国计量科学研究院李焱等^[78]近几年先后研制了百 Hz、Hz 和亚 Hz 量级的超稳定窄线宽激光系统,最近从实验上将半导体激光器光频锁定在 30 cm 长高精度 ULE 参考腔上,得到了频率稳定度为 3×10^{-16} 的超稳激光(图 17),利用输出的超稳激光探测囚禁在光晶格中的铯原子跃迁谱线,得到极化后的最窄谱线线宽约 1 Hz(图 18),为铯原子钟的研究提供了稳定可靠的激光光源。

物理学家们基于超窄线宽激光器和迈克耳孙干涉仪搭建大型激光干涉引力波天文台,探测到了峰值强度为 10^{-21} 的引力波^[4]。该激光干涉仪探测系统简图如图 19 所示,每一个干涉臂上都有一个超长的 FP 腔,由于引力波对空间产生拉伸或收缩,臂长光程长度会发

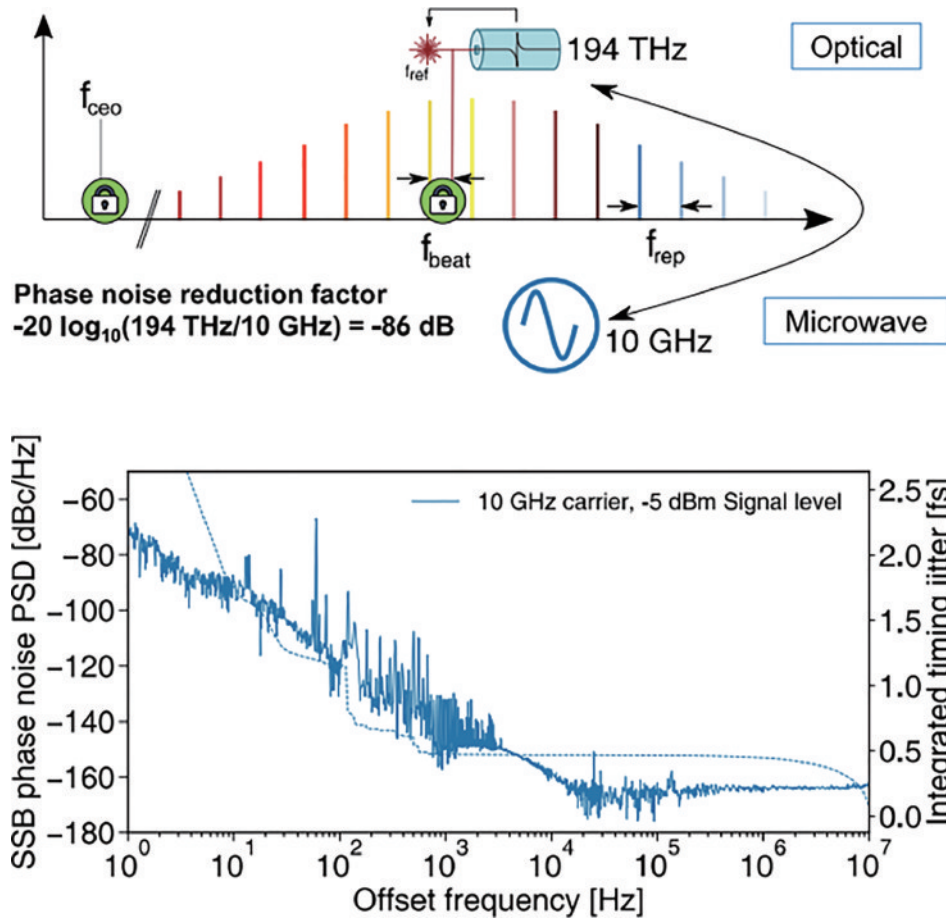


图 16 超稳光源结合光频梳产生超稳微波信号示意图及微波信号相位噪声测试结果^[77]

Fig. 16 Schematic diagram of ultra-stable microwave signal generated by ultra-stable light source combined with optical frequency comb and test results of phase noise of microwave signal^[77]

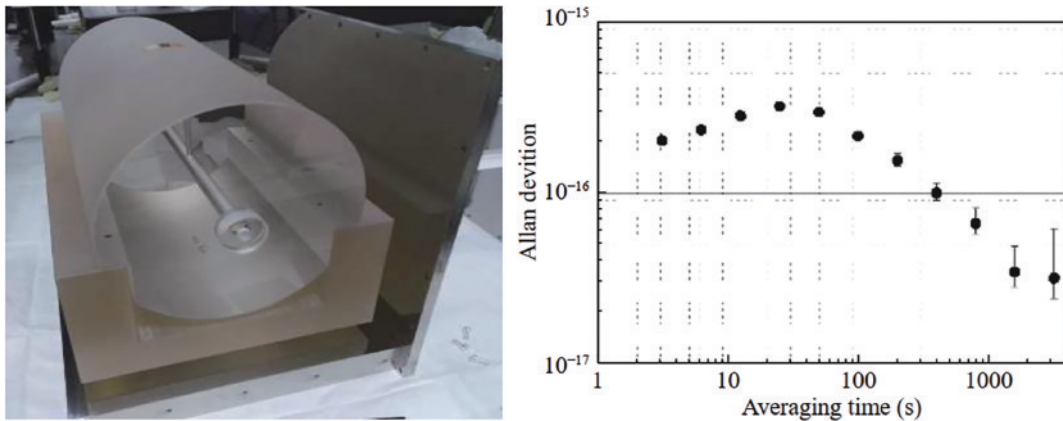


图 17 30 cm 参考 FP 光腔及基于该腔的稳频激光频率稳定度测试结果^[78]

Fig. 17 30 cm reference FP cavity and frequency stability test results of frequency stabilized laser based on the cavity^[78]

生变化,通过探测 FP 腔中激光的相位变化信息,就可以知道臂长的变化量,从而捕获穿过干涉仪的引力波的踪迹。引力波的作用量级一般在 10^{-20} 甚至更小,要想探测到这么小的空间伸缩量,首先需要激光线宽足够窄,光源的频率不稳定性要达到 10^{-15} @1 s 量级,同时激光功率还要足够高,保证长距离稳定相干传输。基于大模场面积光纤,德国汉诺威激光中心和法国波尔多大学相继研制了超低噪声光纤功率放大器模块,

将超稳激光功率放大到几百瓦,同时维持超低噪声特性和良好的长期稳定度,具备了成为下一代引力波探测光源的潜力^[79-80]。

5 发展趋势

参考光学腔作为超窄线宽激光稳频的核心组件,其稳定性直接决定了激光频率稳定性的上限,所以如何进一步提高参考光腔的稳定性仍将会是重点研究方

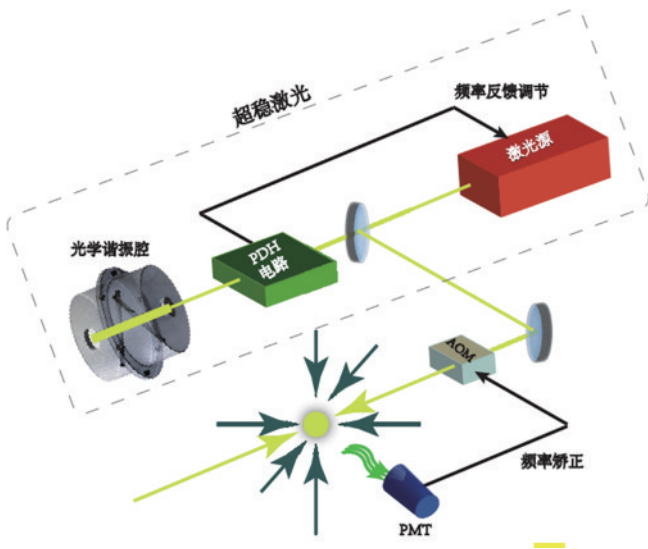


图 18 超稳激光作为原子光钟的钟激光^[78]
 Fig. 18 Clock laser of ultra-stable laser as atomic optical clock^[78]

向。高稳定光学腔不仅要求光腔具有高的精细度,还对光腔的温度稳定性提出了严苛要求,这就涉及到超低损耗的反射镜镀膜技术、超低热膨胀系数材料、精密温度控制和真空绝热封装等技术,在某些特殊领域,为了突破参考腔的热噪声极限,也有人提出利用超窄线

宽的原子跃迁谱线作为鉴频标准,由于原子能级跃迁宽度远小于激光腔线宽,因而可以不受光学腔腔长稳定性限制。另一方面,尽可能降低振动对光腔长度的改变也是不可忽视的工作,包括被动机械阻尼结构隔离振动或者主动反馈控制技术补偿振动^[63]。

在引力波探测方面,往往需要高功率窄线宽的探测光源,而由于腔长较短以及窄带滤波器件的滤波特性,窄线宽光纤激光器输出激光功率普遍较低,经过放大后功率可以得到提升,但也会引入附加噪声,因此如何在不降低输出功率的前提下压缩激光线宽,或者在保证线宽不变的前提下提升激光功率,也是当下窄线宽光纤激光器亟须解决的问题。

窄线宽光纤激光器的另一个发展趋势是高度集成化、可搬运、在空间可靠运转的稳频激光系统,这对譬如高精度空间激光测距、空间引力波探测等应用十分重要,这些场合下往往需要激光系统能稳定工作在各种交通工具或飞行器上^[81],在这类应用中,需要激光器本身及稳频参考腔体积小,结构坚固可靠,随着超低损耗硅基材料和光刻工艺的精进,已有硅基微环腔用于激光稳频的报道^[7],但其长期的温度稳定性还有待验证。类似的集成方案还包括采用光纤光栅作为稳频谐振腔,这样可以集成化光腔和光纤激光器,缩小系统体积,提高可靠性,不过对光纤光栅的封装和温控是难点所在。

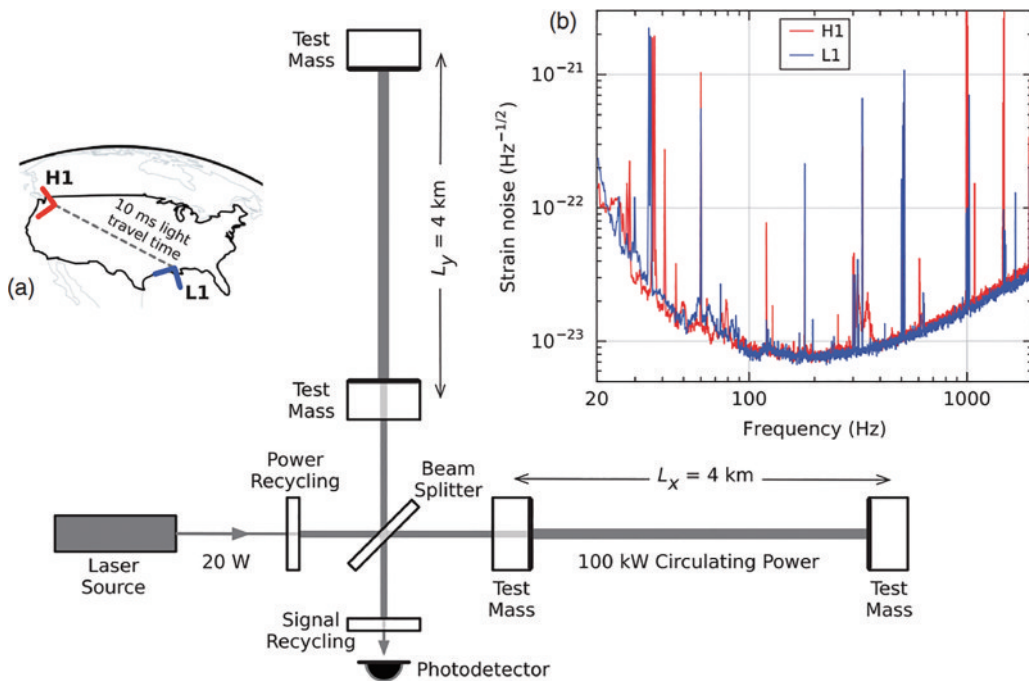


图 19 激光干涉仪探测引力波系统图^[4]
 Fig. 19 Gravitational wave detection system with laser interferometer^[4]

6 结束语

窄线宽光纤激光器作为光纤激光器的一个发展分支,随着近年来光学精密测量领域应用需求的增加,超窄线宽超稳光源相关技术和难题受到了越来越多的关

注,本文综合对比了窄线宽光纤激光器研制厂家的技术方案和指标水平,分析了光纤激光器的噪声理论,基于噪声理论介绍了不同的激光器噪声抑制技术原理和发展历程。其中,光纤激光器强度噪声抑制主要通过基于光电反馈、饱和吸收效应和注入锁定等方式来实

现,不同方案各有优劣,结合不同方案,可以将光纤激光器弛豫振荡峰值降到 -120 dB/Hz 以下,全频段相对强度噪声值降到 -150 dB/Hz 以下,接近噪声极限。光纤激光器的频率噪声通过稳频技术来抑制,被动稳频技术主要从控温隔振封装方面消除环境波动的干扰,单单依靠被动稳频,只能将光纤激光器频率稳定度提升到 10^{-7} 量级,主动稳频技术的主流方案是 PDH 稳频,具有极佳的鉴频系统噪声,主动稳频系统的核心部件是参考光学腔的选择,常用的有微环腔和 FP 腔,得益于 ULE 玻璃材料、硅基光刻工艺和镀膜技术的进步,高 Q 值的光学谐振腔被用于激光器稳频技术,陆续有报道可以将光纤激光器的频率稳定性提升到 $10^{-15} \sim 10^{-17}$,线宽小于 1 Hz。单偏振态激光输出也是压缩光纤激光器线宽的一个方式,通过不同方式增大光纤光栅内部双折射,可以有效抑制双偏振态模式竞争,另外,虚拟环形腔的结构也可以实现单偏振激光输出。

基于参考光学腔稳频的激光器,频率稳定度上限取决于参考光学腔的稳定性,围绕超稳光学腔的相关技术是研究人员未来的攻克方向之一。同时,针对一些特殊应用场景,窄线宽光纤激光器的高度集成化、可搬运也是追求目标之一,可以预测,光纤光栅和参考光学腔线内或片上集成化将会是窄线宽光纤激光器未来的发展方向。

参 考 文 献

- [1] Liu Y L, Zhang W T, Xu T W, et al. Fiber laser sensing system and its applications[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 43-53.
- [2] Ronnekleiv E, Lovseth S W, Kringlebotn J T. Er-doped fiber distributed feedback lasers: properties, applications and design considerations[J]. *Photonics Fabrication*, 2022, 4943: 69-80.
- [3] Qi H F, Song Z Q, Ni J S, et al. An amplified distributed feedback fiber laser for distributed and interference sensing[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10244: 1024412.
- [4] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.
- [5] Campbell S L, Hutson R B, Marti G E, et al. A Fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock[J]. *Science*, 2017, 358(6359): 90-94.
- [6] Ludlow A D, Boyd M M. Optical atomic clocks[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2014, 87(2): 637-701.
- [7] Brodnik G M, Harrington M W, Dallyn J H, et al. Optically synchronized fibre links using spectrally pure chip-scale lasers[J]. *Nature Photonics*, 2021, 15(8): 588-593.
- [8] Zhu T, Bao X Y, Chen L. A single longitudinal-mode tunable fiber ring laser based on stimulated Rayleigh scattering in a nonuniform optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(12): 1802-1807.
- [9] Huang S H, Zhu T, Yin G L, et al. Tens of hertz narrow-linewidth laser based on stimulated Brillouin and Rayleigh scattering[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5286-5289.
- [10] NKT Photonics[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://www.nktp Photonics.com/>.
- [11] iXblue[EB/OL]. [2022-02-03]. <https://www.ixblue.com/Photonics-space/robust-master-laser-systems/>.
- [12] Connet[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://www.shconnet.com.cn/about.shtml>.
- [13] Hengqin Firay Sci-Tech CO., Ltd[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://www.hqfiray.com/>.
- [14] Laser Institute, Shandong Academy of Sciences[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://www.sdlaser.cn/web/home.do>.
- [15] Orbits Lightwave[EB/OL]. [2022-02-03]. <http://www.orbitlightwave.com/>.
- [16] Foster S, Cranch G A, Tikhomirov A. Experimental evidence for the thermal origin of 1/f frequency noise in erbium-doped fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053802.
- [17] Schawlow A L, Townes C H. Infrared and optical lasers[J]. *Naval Engineers Journal*, 1961, 73(1): 45-50.
- [18] Foster S, Tikhomirov A, Milnes M. Fundamental thermal noise in distributed feedback fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2007, 43(5): 378-384.
- [19] Foster S B, Tikhomirov A E. Pump-noise contribution to frequency noise and linewidth of distributed-feedback fiber lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2010, 46(5): 734-741.
- [20] Iiyama K, Hayashi K, Ida Y, et al. Delayed self-homodyne method using solitary monomode fibre for laser linewidth measurements[J]. *Electronics Letters*, 1989, 25(23): 1589-1590.
- [21] Taccheo S, Laporta P, Svelto O, et al. Intensity noise reduction in a single-frequency ytterbium-codoped erbium laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1747-1749.
- [22] 张飞, 朱军, 汪辉, 等. 光电反馈抑制掺铒光纤激光器的低频强度噪声[J]. *量子电子学报*, 2012, 29(3): 311-315. Zhang F, Zhu J, Wang H, et al. Intensity noise of erbium doped fiber laser at low frequency suppression through optoelectronic feedback[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2012, 29(3): 311-315.
- [23] 湛彪, 徐善辉, 莫树培, 等. 短腔单频 DBR 光纤激光器中弛豫振荡噪声抑制的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(9): 090602. Zhan B, Xu S H, Mo S P, et al. Study on the relaxation oscillation suppression in a short-cavity single-frequency DBR fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(9): 090602.
- [24] Li C, Xu S H, Xiao Y, et al. Simultaneously reducing the intensity and frequency noise of single-frequency phosphate fiber laser[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(7): 075802.
- [25] Xiao Y, Li C, Xu S H, et al. Simultaneously suppressing low-frequency and relaxation oscillation intensity noise in a DBR single-frequency phosphate fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(6): 064205.
- [26] Zhang Q, Hou Y B, Wang X, et al. 5 W ultra-low-noise 2 μ m single-frequency fiber laser for next-generation

- gravitational wave detectors[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(17): 4911-4914.
- [27] Yamada M. Analysis of intensity and frequency noises in semiconductor optical amplifier[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(8): 980-990.
- [28] Danion G, Bondu F, Loas G, et al. GHz bandwidth noise eater hybrid optical amplifier: design guidelines[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(14): 4239-4242.
- [29] Pan Z Q, Zhou J, Yang F, et al. Low-frequency noise suppression of a fiber laser based on a round-trip EDFA power stabilizer[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(3): 035105.
- [30] Feng Z M, Li C, Xu S H, et al. Significant intensity noise suppression of single-frequency fiber laser via cascading semiconductor optical amplifier[J]. *Laser Physics Letters*, 2015, 12(9): 095101.
- [31] Zhao Q L, Xu S H, Zhou K J, et al. Broad-bandwidth near-shot-noise-limited intensity noise suppression of a single-frequency fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1333-1335.
- [32] Huang X, Zhao Q L, Lin W, et al. Linewidth suppression mechanism of self-injection locked single-frequency fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 18907-18916.
- [33] Zhao Y J, Wang Q P, Chang J, et al. Suppression of the intensity noise in distributed feedback fiber lasers by self-injection locking[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(10): 739-743.
- [34] Hou Y B, Zhang Q, Wang P. Frequency- and intensity-noise suppression in Yb^{3+} -doped single-frequency fiber laser by a passive optical-feedback loop[J]. *Optics Express*, 2016, 24(12): 12991-12999.
- [35] Ji J R, Wang H T, Ma J, et al. Narrow linewidth self-injection locked fiber laser based on a crystalline resonator in add-drop configuration[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(6): 1525-1528.
- [36] Li C, Xu S H, Huang X, et al. All-optical frequency and intensity noise suppression of single-frequency fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(9): 1964-1967.
- [37] Huang Z P, Deng H Q, Yang C S, et al. Self-injection locked and semiconductor amplified ultrashort cavity single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser at 978 nm[J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 1535-1541.
- [38] Zhao Q L, Zhang Z T, Wu B, et al. Noise-sidebands-free and ultra-low-RIN 1.5 μm single-frequency fiber laser towards coherent optical detection[J]. *Photonics Research*, 2018, 6(4): 326-331.
- [39] 张立喆, 刘翼飞. 光纤激光器用抗环境影响的相移光栅封装结构: CN203859377U[P]. 2014-10-01.
Zhang L Z, Liu Y F. Environmental impact resistant phase shift grating packaging structure for fiber lasers: CN203859377U[P]. 2014-10-01.
- [40] 薛力芳, 李芳, 刘育梁. 分布反馈光纤激光器的封装结构: CN102035125B[P]. 2012-06-27.
Xue L F, Li F, Liu Y L. Packaging structure of distributed feedback fiber laser: CN102035125B[P]. 2012-06-27.
- [41] 宋志强, 王昌, 祁海峰, 等. 分布反馈光纤激光器的封装结构: CN103887688B[P]. 2016-06-15.
Song Z Q, Wang C, Qi H F, et al. Packaging structure of distributed feedback fiber laser: CN103887688B[P]. 2016-06-15.
- [42] 宋志强, 王伟涛, 祁海峰, 等. 分布反馈光纤激光器封装工艺[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 0814005.
Song Z Q, Wang W T, Qi H F, et al. Packaging technology of distributed feedback fiber laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0814005.
- [43] Pedersen J E, Beukema M, Poulsen C V, et al. Packaging of an optical fiber laser: US6603779B2[P]. 2003-08-05.
- [44] Ying K, Liang H, Chen D J, et al. Ultralow noise DFB fiber laser with self-feedback mechanics utilizing the inherent photothermal effect[J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23717-23727.
- [45] Zhao Q L, Zhou K J, Wu Z S, et al. Near quantum-noise limited and absolute frequency stabilized 1083 nm single-frequency fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(1): 42-45.
- [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] 喻晓, 吕梦洁, 张旭, 等. 基于铷原子调制转移光谱技术的 1560 nm 光纤激光器频率锁定研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(3): 0301002.
Yu X, Lü M J, Zhang X, et al. Research on frequency locking of 1560 nm fiber laser based on rubidium atomic modulation transfer spectroscopy technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(3): 0301002.
- [48] 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.
- [49] 洪毅, 侯霞, 陈迪俊, 等. 基于 Rb^{87} 调制转移光谱稳频技术研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(21): 2101003.
Hong Y, Hou X, Chen D J, et al. Research on frequency stabilization technology of modulation transfer spectroscopy based on Rb^{87} [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(21): 2101003.
- [50] Cranch G A. Frequency noise reduction in erbium-doped fiber distributed-feedback lasers by electronic feedback[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1114-1116.
- [51] McRae T G, Ngo S, Shaddock D A, et al. Frequency stabilization for space-based missions using optical fiber interferometry[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(3): 278-280.
- [52] Kéfélian F, Jiang H F, Lemonde P, et al. Ultralow-frequency-noise stabilization of a laser by locking to an optical fiber-delay line[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 914-916.
- [53] Jiang H F, Kefelian F, Lemonde P, et al. An agile laser with ultra-low frequency noise and high sweep linearity[J]. *Optics Express*, 2010, 18(4): 3284-3297.

- [54] 杨飞, 陈迪俊, 潘政清, 等. 光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0902005. Yang F, Chen D J, Pan Z Q, et al. Short linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(9): 0902005.
- [55] Alnis J, Schliesser A, Wang C Y, et al. Thermal-noise-limited crystalline whispering-gallery-mode resonator for laser stabilization[J]. Physical Review A, 2011, 84(1): 011804.
- [56] Lim J, Savchenkov A A, Dale E, et al. Chasing the thermodynamical noise limit in whispering-gallery-mode resonators for ultrastable laser frequency stabilization[J]. Nature Communications, 2017, 8: 8.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] Matei D G, Legero T, Häfner S, et al. 1.5 μm lasers with sub-10 mHz linewidth[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(26): 263202.
- [62] 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.
- [63] 沈辉, 李刘峰, 陈李生. 超窄线宽激光——激光稳频原理及应用[J]. 物理, 2016, 45(7): 441-448. Shen H, Li L F. Lasers with ultra-narrow linewidth: theories and applications of laser frequency stabilization[J]. Physics, 2016, 45(7): 441-448.
- [64] 郇朝阳. 1.5 μm 腔稳超稳激光器关键技术研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2018: 6. Tai Z Y. Research on key technologies of 1.5 μm cavity stabilized ultra-stable laser[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2018: 6.
- [65] Tai O, 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.
- [66] 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.
- [67] Vishnyakova G A, Kryuchkov D S, Zhadnov N O, et al. Ultra-stable silicon cavities for fundamental researches and applications[C]. AIP Conference Proceedings, 2020, 2241(1): 020037.
- [68] Ronnekleiv E, Zervas M N, Kringelbotn J T. Modeling of polarization-mode competition in fiber DFB lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1998, 34(9): 1559-1569.
- [69] Zervas M N, Wilmshurst R, Walker L M B. Twisted hi-bi fiber distributed-feedback lasers with controllable output state of polarization[J]. Optics Letters, 2013, 38(9): 1533-1535.
- [70] Yang C S, Zhao Q L, Feng Z M, et al. 1120 nm kHz-linewidth single-polarization single-frequency Yb-doped phosphate fiber laser[J]. Optics Express, 2016, 24(26): 29794-29799.
- [71] Sun W J, Shi J D, Yu Y J, et al. All-fiber 1.55 μm erbium-doped distributed-feedback laser with single-polarization, single-frequency output by femtosecond laser line-by-line direct-writing[J]. OSA Continuum, 2021, 4(2): 334-344.
- [72] Fan W, Chen B, Li X C, et al. Stress-induced single polarization DFB fiber lasers[J]. Optics Communications, 2002, 204(1/2/3/4/5/6): 157-161.
- [73] Guo K K, He J, Cao S Q, et al. Beat frequency tuning in dual-polarization distributed feedback fiber laser using side polishing technique[J]. Optics Express, 2018, 26(26): 34699-34710.
- [74] Qi Z N, Yin T C, Jiang X G, et al. Narrow-linewidth high-efficiency single-frequency ytterbium-doped fiber laser with highly linear polarization at 1064 nm[J]. Applied Optics, 2021, 60(10): 2833-2838.
- [75] Yamashita S, Cowle G J. Single-polarization operation of fiber distributed feedback (DFB) lasers by injection locking[J]. Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(3): 509-513.
- [76] Mo S P, Li Z B, Huang X, et al. 820 Hz linewidth short-linear-cavity single-frequency fiber laser at 1.5 μm [J]. Laser Physics Letters, 2014, 11(3): 035101.
- [77] Giunta M, Lessing M, Yu J L, et al. Photonic microwave oscillator based on an ultra-stable-laser and an optical frequency comb[C]//Proceedings of the 2020 50th European Microwave Conference, January 12-14, 2021, Utrecht, Netherlands. New York: IEEE Press, 2021: 591-594.
- [78] 李焯, 林弋戈, 王强, 等. 超稳激光技术及其在锶光钟研究中的实现[J]. 计量科学与技术, 2021, 65(5): 62-66. Li Y, Lin Y G, Wang Q, et al. Ultra-stable laser technology and its realization in strontium optical lattice clock[J]. Metrology Science and Technology, 2021, 65(5): 62-66.
- [79] Wellmann F, Steinke M, Meylahn F, et al. High power, single-frequency, monolithic fiber amplifier for the next generation of gravitational wave detectors[J]. Optics Express, 2019, 27(20): 28523-28533.
- [80] Clément D, Germain G, Yves-Vincent B, et al. Ultra-low intensity noise, all fiber 365 W linearly polarized single frequency laser at 1064 nm[J]. Optics Express, 2020, 28(8): 10960-10969.
- [81] 蒋燕义, 毕志毅, 马龙生. 亚赫兹线宽稳频激光技术[J]. 自然杂志, 2019, 41(1): 29-34. Jiang Y Y, Bi Z Y, Ma L S. Sub-hertz-linewidth frequency-stabilized lasers[J]. Chinese Journal of Nature, 2019, 41(1): 29-34.