

## 激光与光电子学进展

## 单纵模激光器强度噪声抑制技术研究进展

刘相宏<sup>1,2</sup>, 张锐<sup>1\*</sup>, 田小程<sup>1</sup>, 夏汉定<sup>1</sup>, 周丹丹<sup>1</sup>, 孙宇鑫<sup>3</sup>, 徐善辉<sup>3</sup><sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;<sup>2</sup>中国工程物理研究院研究生院, 北京 100088;<sup>3</sup>华南理工大学物理与光电学院, 广东 广州 510640

**摘要** 在光通信、光学传感、精密测量、量子技术及原子物理等多个领域的需求牵引下,单纵模连续波激光器的输出稳定性和噪声特性需要进一步提升。本文针对单纵模激光器噪声中对输出功率稳定性起主要影响作用的强度噪声进行了讨论,阐述了其主要来源和产生机理,在此基础上对比分析了国内外当前主要的单纵模激光器强度噪声抑制技术和方法。为了提升大型激光装置前端系统中单纵模光纤激光器的输出稳定性,开展了基于半导体光放大器的强度噪声抑制技术研究,实现了强度噪声的有效抑制。

**关键词** 激光器; 单纵模激光器; 强度噪声; 噪声抑制

中图分类号 TN242

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222500

## Progress of Intensity Noise Suppression Technology of Single Longitudinal Mode Laser

Liu Xianghong<sup>1,2</sup>, Zhang Rui<sup>1\*</sup>, Tian Xiaocheng<sup>1</sup>, Xia Handing<sup>1</sup>, Zhou Dandan<sup>1</sup>,  
Sun Yuxin<sup>3</sup>, Xu Shanhui<sup>3</sup><sup>1</sup>Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;<sup>2</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China;<sup>3</sup>School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China

**Abstract** In order to meet the wide demands of single longitudinal mode continuous wave laser in various fields such as optical communication, optical sensing, precision measurement, quantum technology, and atomic physics etc., the stability and signal-to-noise ratio of the single longitudinal mode laser has to be improved. This paper discusses the intensity noise which plays a major role in output stability of a single longitudinal mode laser, and shows its main source and generation mechanism. On this basis, combined with comparative analysis of various methods, this paper gives the recent developments of suppression means of intensity noise. Aimed at improving output stability of single longitudinal mode fiber laser in high power laser facility, relevant study using semiconductor optical amplifier is given, which suppressed the intensity noise.

**Key words** lasers; single longitudinal mode laser; intensity noise; noise suppression

## 1 引言

单纵模激光器具有稳定性好、线宽窄、相干性好等特点,在光通信<sup>[1]</sup>、光学传感<sup>[2]</sup>、精密测量<sup>[3]</sup>、量子技术<sup>[4]</sup>及原子物理<sup>[5]</sup>等领域有着广泛应用。近年来,引力波信号探测的成功也使精密测量技术成为关注热点<sup>[6]</sup>。

而在诸多应用中,噪声问题极大地影响了探测、传感等技术的精度和灵敏度<sup>[7]</sup>,因此,一台低噪声的单频光纤激光器成为了提高技术成熟度的关键和重要的技术需求。同样地,高稳定单纵模激光器在惯性约束聚变(ICF)中也有着重要的应用。激光聚变过程大体上分为四步:激光辐照加热、压缩、聚变点火和聚变燃

收稿日期: 2022-09-08; 修回日期: 2022-11-11; 录用日期: 2022-12-12; 网络首发日期: 2023-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(62075201)

通信作者: \*zhangrui8s-1@caep.cn

烧<sup>[8-9]</sup>。激光辐照加热过程中,无论是直接还是间接驱动方式,都需要高稳定的高功率、高光束质量激光束。前端系统负责为装置输出一定能量、高稳定的精密整形脉冲,是整个激光装置的“种子源”,有着十分重要的地位。经前端系统精密整形、分束放大后的激光对后续系统的光束质量、稳定性和全装置功率平衡都有着巨大的影响,因此提高前端系统的稳定性是 ICF 激光驱动器提升功率平衡控制能力的重要一环。为了进一步提升大型激光装置的精密控制水平,需要进一步提升前端系统的源头——单纵模激光器的稳定性。

激光器的强度噪声指激光器的输出功率波动情况,与功率稳定性不同,通常在频域描述<sup>[10]</sup>。通过频域分析,该激光器强度噪声的频率在几百 kHz 到数 MHz 附近。大型激光装置前端系统典型技术路线为:由单纵模光纤振荡器产生连续激光,由任意波形发生器驱动的波导幅度调制器对该激光信号进行脉冲精密整形。由于任意波形发生器驱动的幅度调制器产生整形门信号,从单纵模光纤振荡器输出的连续激光信号中选取脉冲,门外则消光,若脉冲门内单纵模振荡器强度瞬时变化,则会导致输出脉冲能量不稳定。由于幅度调制器选取的位置不连续,该输出信号为后续系统无法补偿的随机信号,需要从激光产生的源头进行控制。因此,为了进一步提升前端系统源头单纵模激光器的稳定性,需要对其强度噪声进行抑制。

定义相对强度噪声(RIN)来描述激光器输出强度的波动,RIN以噪声功率谱密度和平均功率比值的平方项作为定义。

$$\text{RIN}(f) = \frac{S_{\delta P}(f)}{\bar{P}^2}, \quad (1)$$

式中: $S_{\delta P}(f)$ 为输出激光功率波动的谱密度; $\bar{P}$ 为激光器输出的平均功率。

抑制强度噪声的首要任务,就是探明强度噪声的来源和产生机理。再以此为基础,研究抑制强度噪声的方法。根据不同频段,强度噪声的来源也有所不同,主要可以分为低频、中频和高频三类。

低频段的技术噪声主要由外部干扰、抽运源的功率起伏等引起。主要来源于机械振动、声学噪声和热噪声等外部环境扰动。这些扰动在频域上都有着各自的分布,声学噪声主要分布在几十 Hz 到几十 kHz 的频率范围,振动主要存在于 Hz 到百 Hz 频率范围,温度波动引起的强度噪声在 Hz 以下的低频范围比较明显。单纵模激光器具有全光纤化的特性,对于外部的环境扰动,尤其是振动和温度变化极为敏感,这些微小的扰动会导致激光器产生诸多变化。例如,激光腔的应变、泵浦偏振和中心波长的改变、输出功率变化等,会导致激光器产生强度波动,带来强度噪声。为了解决这一部分噪声问题,主要采用被动抑制技术。被动抑制主

要体现在封装设计和精密温控设计两方面。对于封装设计,激光器的隔震系统必须要具有高质量和高挠度特性,才能抑制低频振动。同时,对于实际的系统而言,还要考虑激光器质量和尺寸的限制。外界环境温度变化会引起光纤折射率与光纤长度的改变,单位温度改变下的相对变化量分别称为热光系数和热膨胀系数。激光器的发射频率与腔长、折射率有关,温度波动是激光频率噪声的重要影响因素。此外,温度变化也会改变光纤光栅的中心波长,当腔内的低反光栅与高反光栅的中心波长发生较大偏离时,输出功率会明显下降,甚至会导致激光器失谐,难以形成激光振荡。因此,对激光器进行精密温控有利于获得低频率噪声与强度噪声的单纵模激光输出。

中频段的弛豫振荡是引起单纵模激光器输出功率起伏的最主要原因,也是强度噪声的主要来源<sup>[11-12]</sup>。其来源于增益介质内反转粒子与激光腔内光子非线性相互作用而引起的激光振荡,表现为光强在某些频段内随时间呈现阻尼振荡的变化,在该频率周围相对较窄的频率间隔内的 RIN 增强,也即 RIN 谱中常见的弛豫振荡峰,该频率一般位于几十 kHz 到数 MHz 之间。该频段的噪声相比于抑制技术噪声的被动抑制技术,需要更多地对系统本身的结构或器件进行改进与调试,即主动抑制技术。该技术通过在原有系统中加入新的调制器件或设计新的光路结构来完成噪声抑制工作。

高频段的量子噪声又称散粒噪声,在高于弛豫振荡频率处,光纤激光器强度噪声逐渐降低,并趋于量子噪声极限。其来源于(光电探测时)激光能量量子化过程中产生的光子涨落,在整个频谱范围内产生本底白噪声<sup>[12]</sup>。

综上所述,对于低频段和高频段,单纵模激光器强度噪声相对来说都较少,而中频段是强度噪声的主要来源,需要进行特殊处理和抑制。本文对国内外现有的主要强度噪声抑制技术进行了对比分析,结合大型激光装置前端系统单纵模光纤激光器输出稳定性提升需求,开展了强度噪声抑制技术研究。

## 2 强度噪声测量及产生机理

### 2.1 强度噪声的测量

强度噪声的测量对于其抑制来说至关重要,测量强度噪声以评估噪声性能是抑制噪声的基础和前提。

目前常见的强度噪声测量方法有两种:1)基于射频频谱分析仪的直接测量法,即通过光电探测器将激光器输出光的强度噪声转换为直流电流的波动,将需要测量的 RIN 转变为电信号<sup>[13]</sup>,即可使用频谱分析仪进行测量;2)基于快速傅里叶变换的数字测量法。直接测量方法如图 1 所示。

除待测激光器外,测量系统包括光电探测器(PD)、放大器与傅里叶频谱分析仪(FFT analyzer)。



图 1 基于射频频谱分析仪的直接测量法

Fig. 1 Direct measurement method based on radio frequency spectrum analyzer

激光器的 RIN 通过 PD 后强度解调成电信号, 经过放大后连接傅里叶频谱分析仪进行谱分析。光电探测器输出的高斯型电噪声信号主要包括热噪声、散弹噪声、激光器的相对强度变化形成的电噪声。热噪声与探测器的直流电流无关, 散弹噪声与之成正比, 而 RIN 对应的电噪声与探测器的直流电流的平方成正比, 也就是说, 只要探测器电流足够大, RIN 对应的电噪声将占光电探测器输出信号的绝大部分, 其他噪声可忽略。通过傅里叶变换直接得出光电探测器输出的电噪声信号大小, 测得探测器的直流电流, 即可求出 RIN 值。

数字测量法是使用采集卡直接采集探测器输出的直流分量, 也就是将图中的频谱仪用数据采集卡和计算机代替, 然后通过计算机软件直接完成对 RIN 的计算。但是该方法测量精度较低, 除弛豫振荡峰外的其他噪声成分基本分辨不出来, 因此在研究中多用直接测量法。尽管如此, 在空间引力波探测、空间激光测距、激光通信等领域, 因系统长期稳定观测的需求, 对所用光源低至 MHz 范围的强度噪声提出了严格的指标要求, 若采用上述测量方案, 则因频谱分析仪低频本底噪声的限制, 难以实现 MHz 频段强度噪声的有效评估。为满足该类应用的需求, 采用数字测量方案以得到低频段的强度噪声功率谱。

基于上述特性不难发现, 对于较宽的频段而言, 为了获取完整的强度噪声性能信息, 采用单一的测量方法难以实现。2021 年, 张骥等<sup>[14]</sup>提出了一种分段测量后进行噪声谱拼接以测量宽频段完整强度噪声的方案。其基于迈克耳孙光纤干涉仪并结合了频谱分析仪和快速傅里叶变换分析仪等仪器, 规范地测量出了单频激光在 mHz 到 MHz 宽频段内的频率和强度噪声特性。

## 2.2 强度噪声的产生机理

通过上述测量手段可测得单纵模激光器强度噪声信息, 便于强度噪声的分析和处理。同时, 也需要厘清强度噪声产生机理, 才能帮助我们找到针对性的抑制措施。

目前对于单纵模激光器强度噪声的研究主要集中在中频段的弛豫振荡峰和低频段的技术噪声, 其分析以速率方程为基础, 以此来描述谐振腔内光场的变化<sup>[15-16]</sup>, 即单位体积内反转粒子数的变化和单位体积内谐振腔内光子数的变化, 并讨论各参数的微扰导致的输出功率变化。因泵浦激励作用而发生的粒子跃迁过程主要集中在两个能级之间, 上转换过程以及激发

态吸收均被忽略。另外, 速率方程模型成立的另一个前提是激光噪声远高于极限噪声。基于以上假设的单纵模光纤激光器速率方程为

$$\begin{cases} \frac{dn_2}{dt} = (1 - n_2)(W_p + W_A) - n_2 \left( W_E + \frac{1}{\tau_2} \right) \\ \frac{dq}{dt} = W_E N_0 n_2 - (1 - n_2) W_A N_0 - \frac{q}{\tau_c} \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $n_2$  为激发态粒子数密度占总粒子数密度比;  $q$  为腔内光子数密度;  $W_p$ 、 $W_A$ 、 $W_E$  分别为泵浦吸收、信号吸收和信号发射概率;  $N_0$  为总的离子浓度;  $\tau_2$ 、 $\tau_c$  分别为荧光寿命和腔内光子寿命。速率方程通过描述反转粒子和腔内光子密度随时间的变化, 表征了整个能级系统能量的改变。而在这一过程中, 泵浦吸收、反转粒子数密度、腔内光子数密度以及腔内损耗等并非固定不变的值, 在长时间的工作中, 这些项的取值会在某一固定值的上下出现波动, 从而使得激光器输出功率出现波动带来强度噪声。因此可以把强度噪声看作是稳态下的微小扰动, 则可以对这些项作微扰处理:

$$W_p(t) = W_{p0} + \delta W_p(t), \quad (3)$$

$$n_2(t) = n_{20} + \delta n_2(t), \quad (4)$$

$$q(t) = q_0 + \delta q(t), \quad (5)$$

$$\gamma(t) = \gamma_0 + \delta \gamma(t), \quad (6)$$

式中:  $\gamma$  为腔内损耗。再将各项代回速率方程中去, 采用一级微扰近似进行傅里叶变换, 可得单纵模光纤激光器相对强度噪声为

$$\text{RIN}(f) = \left| H_p(f) \right|^2 \frac{S_{\delta W_p}}{W_{p0}^2} + \left| H_l(f) \right|^2 \frac{S_{\delta \gamma}}{\gamma_0^2}, \quad (7)$$

式中:  $H_p(f)$ 、 $H_l(f)$  分别为泵浦扰动和腔内损耗的传递函数;  $S_{\delta W_p}$ 、 $S_{\delta \gamma}$  分别为泵浦扰动和腔内损耗的功率谱密度。根据计算结果可以看出, 泵浦扰动 (如泵浦光强度波动、波长变化等) 和腔内损耗是导致弛豫振荡现象的主要原因。

## 3 强度噪声主动抑制技术

强度噪声的来源多样, 因此往往需要多种抑制措施结合来实现整个激光器的强度噪声抑制。其中, 主要技术措施分为被动抑制技术和主动抑制技术。被动抑制技术采用封装隔震、精密温控等措施, 用于解决低频段的技术噪声问题。主动抑制技术通过在原有系统中加入新的调制器件或设计新的光路结构来完成强度噪声中占主要份额的弛豫振荡带来的中频段噪声的抑

制,是单纵模激光器强度噪声抑制的重点和难点,因此这里主要讨论主动抑制技术。

### 3.1 基于光电反馈抑制强度噪声

光电反馈法是抑制单纵模激光器强度噪声最常用的方法之一,其原理示意图如图 2 所示。

早在 20 世纪 90 年代就有人利用该技术实现了激光器的强度噪声抑制,其原理是利用光电探测器探测待

稳定激光,并将其转化成电信号,接着光电反馈电路对该电信号进行幅度和相位控制处理。处理后的信号可以反馈控制泵浦激光器的驱动电流或调节输出激光强度调制器[如声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)、液晶噪声衰减器等],从而抑制强度噪声。其中,激光强度调制器虽然在功率控制速度上有一定优势,但由于插入损耗等因素,其对激光输出功率有明显衰减。

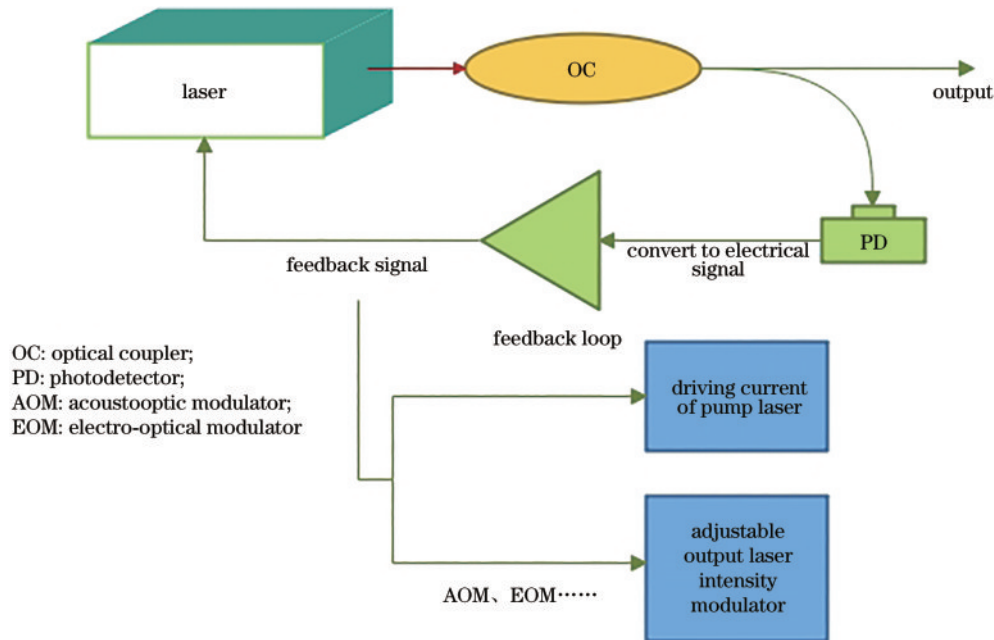


图 2 基于光电反馈抑制强度噪声原理图

Fig. 2 Schematic diagram of suppressing intensity noise based on photoelectric feedback

1993年,哈佛大学 Ball 等<sup>[17]</sup>基于该技术,通过将反馈电路加入到单纵模分布式布拉格反射(DBR)光纤激光器中,对一台光纤激光器的强度噪声进行了有效抑制,使其弛豫振荡峰降低了 30 dB。国内,1992年重庆大学应用物理系的郑宇进等<sup>[18]</sup>报道了一种双棱镜胶合紧凑型迈克耳孙干涉仪,利用该干涉仪与 PZT 压电陶瓷片组成光学双稳态器件,通过光电反馈来实现稳定激光光强的目的。2006年,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的高兰兰等<sup>[19]</sup>通过光电反馈技术实现了高稳定的全固体绿光激光器,并指出该方法有结构简单、成本低、调节难度小等优点。2015年,华南理工大学 Xiao 等<sup>[20]</sup>利用光电反馈技术对磷酸盐光纤激光器的低频强度噪声和弛豫振荡峰同时进行了抑制,其将低频段范围的强度噪声抑制了约 20 dB,而弛豫振荡峰处的强度噪声也抑制了 22 dB。2017年,慕尼黑大学的 Huber 等<sup>[21]</sup>提出了一种基于声光调制器的有源强度噪声抑制系统,用于红外激光源的有源强度噪声抑制。由于中红外光谱缺乏足够灵敏的宽带探测器或有源宽带光学元件,直接产生稳定的中红外激光非常困难,所以该研究旨在稳定驱动源本身。同时,其反馈环路的误差信号由近红外脉冲驱动源产生,以降低对用于中红外辐射的灵敏度较低的液氮冷却碲化镉

汞光电探测器的需求。

2012年,安徽大学张飞等<sup>[22]</sup>研发了光电反馈电路,对掺铒光纤激光器中低频噪声进行了抑制,并解决了传统电路中的一些问题。实验装置如图 3 所示,通过在 PD2 和泵浦电路驱动之间加入光电反馈装置,光电反馈电路的输出叠加到半导体激光器的恒流驱动电路上。工作时,激光器输出信号被光电探测器探测,并由前置放大器将电流转化为电压,经过电容隔直,再通过比例放大电路和移相电路将信号耦合到泵浦驱动电路上。其中,比例放大电路和移相电路均设置为可调。通过调节设置的变阻器即可改变反馈电路的增益和反馈信号的相位。

由于反馈回路中泵浦抽运噪声传递函数在弛豫振荡频率处有 180°的相位变化,因此反馈回路需引入相位补偿电路以防止反馈回路产生自激振荡。根据仿真和实验可以得到加和不加反馈电路的激光器在不同频率波段的强度噪声对比,图 4(a)和(b)分别为在 200 kHz 和 20 kHz 条件下的实验结果。可以看出,通过加入光电反馈电路,掺铒光纤激光器中低频段的强度噪声得到了有效抑制,并解决了传统电路中光电反馈降低强度噪声时弛豫振荡峰会移向高频,导致高频强度噪声骤增的问题。同时指出,不同腔长、不同掺杂光纤环形

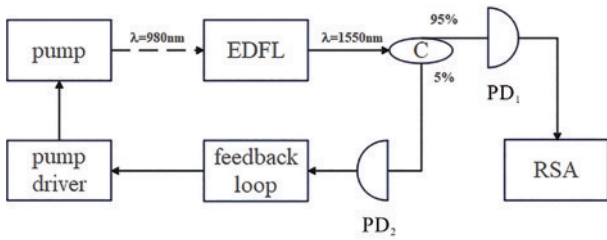


图 3 光电反馈电路抑制掺铒激光器噪声示意图<sup>[22]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of suppressing erbium-doped laser noise by photoelectric feedback circuit<sup>[22]</sup>

腔结构的掺铒光纤激光器的弛豫振荡频率不同,但利

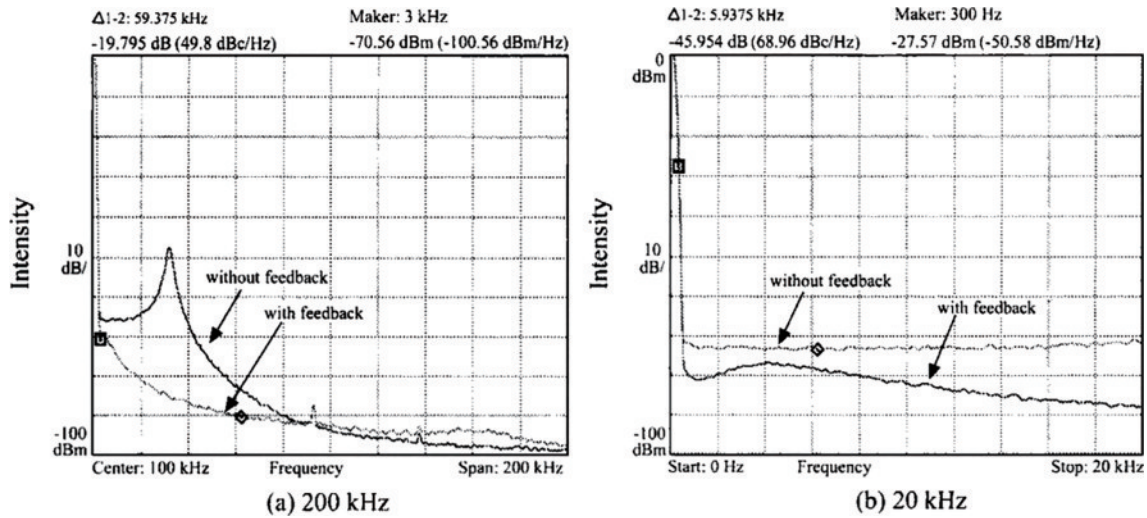


图 4 加入反馈电路前后噪声对比图像。(a) 200 kHz; (b) 20 kHz<sup>[22]</sup>

Fig. 4 Noise comparison image before and after adding feedback circuit. (a) 200 kHz; (b) 20 kHz<sup>[22]</sup>

### 3.2 基于模清洁剂抑制强度噪声

采用环形腔对激光器强度噪声进行抑制是一种简单、有效的方法,因其具有过滤高频噪声的特性,已成功用于固态激光器强度噪声抑制实验,这种环形腔被称为模清洁剂。模清洁剂除了可以抑制激光器强度噪声外,还能够改善半导体激光器出射激光光束质量。其装置一般是在输出激光通过模清洁剂后再通过分束器射入光电探测器(PD)中,光电探测器的信号经过伺服系统之后调节激光功率,从而实现强度噪声抑制。在激光器的强度噪声抑制中,常用的模清洁剂为三镜环形腔结构。2022年,王晓慧等<sup>[23]</sup>通过三镜腔模清洁剂的特性推导了反射及透射光场中振幅和相位两个正交分量的噪声转化函数。同时,其指出三镜腔模清洁剂相比于常用的两镜腔等其他形式的模清洁剂有着两个独特的优势:1)三镜腔模清洁剂的入射光和反射光空间分离;2)它具有更好的激光偏振滤波特性<sup>[24]</sup>。三镜腔的模清洁剂如图 5 所示。输入镜  $M_1$  和输出镜  $M_2$  为两个相同的平面高反镜,  $M_3$  为凹面全反镜。通过理论分析可得模清洁剂输出强度噪声谱  $V_{out}(\omega)$  和输入强度噪声谱  $V_{in}(\omega)$  的关系<sup>[25]</sup>,表示为

用上述反馈电路,只需适当调节移相电路就能使其强度噪声得到较好的抑制。

光反馈抑制强度噪声的方案结构相对简单、易于集成、成熟可靠,同时可以有效提升输出激光的功率稳定性。该方法的缺点在于反馈带宽有限,难以获得大频率范围内的强度噪声整体抑制,并且反馈电路的加入,会带来新的电学噪声。但这种基于光电反馈的强度噪声抑制方法发展最早,因此也最为成熟完善,在许多系统中都得以应用。同时也可以很好地和其他调制器件相结合,更好地对强度噪声进行抑制,其重点在于反馈电路的优化设计,以及解决反馈带宽有限带来的问题。

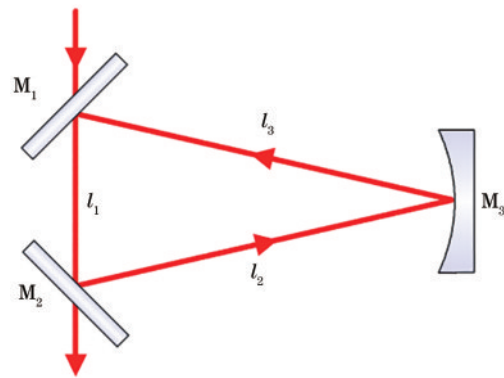


图 5 模清洁剂结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of mode cleaner structure

$$\frac{V_{out}(\omega) - 1}{V_{in}(\omega) - 1} = \frac{4k_1^2}{k^2 + \omega^2}, \quad (8)$$

式中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为分析频率;  $k$  为内腔总损耗,  $k_1$ 、 $k_2$  分别为  $M_1$  和  $M_2$  的腔内损耗率。实验中  $M_1$  和  $M_2$  为相同镜片,故有  $k_1 = k_2$ 。又因为一般激光器输出的强度噪声总高于量子噪声极限,即  $V_{out}(\omega) > 1$ ,因此在所有分析频率上,模清洁剂都能对强度噪声起到抑制作用,并且频率越高,抑制幅度越大。

基于模清洁剂抑制强度噪声的技术方案在高频段具有显著的强度噪声抑制效果,可以用于满足引力波探测系统中激光干涉仪对激光强度噪声的苛刻要求。在 2004 年,美国加州理工学院的 Nocera<sup>[26]</sup>采用模清洁剂,在 40~100 Hz 范围内实现了较为理想的噪声抑制输出结果以满足引力波天文台的强度噪声要求。而后在 2006 年,德国的 Seifert 等<sup>[27]</sup>为进一步满足二代引力波探测器的性能要求,通过模清洁剂对高功率固体激光器进行强度噪声抑制,从而在 10 Hz~20 kHz 频段内得到了接近量子噪声极限的激光输出。

在国内,2015 年田晓等<sup>[28]</sup>利用模清洁剂过滤高频噪声的特性对铯原子光钟的光晶格光源——813 nm 半导体激光器的强度噪声进行了抑制,且发现部分频率噪声被转化为了强度噪声。未经过模清洁剂的激光强度噪声在分析频率 30 MHz 内无法达到散粒噪声极限,经过模清洁剂后,激光强度噪声在约 8 MHz 达到散粒噪声极限。通过强度噪声抑制,可使 813 nm 半导体激光器用于铯冷原子光晶格装载实验,并且减小了光晶格噪声对势阱囚禁冷原子的影响。

该方法虽然在高频段具有十分显著的强度噪声抑制效果,但由于光学元件数量较多且体积较大,整个系统较为庞大,难以控制和调试。在实际应用中,为了有效降低输出激光的强度噪声,模清洁剂所对应的无源腔的线宽应尽可能窄。目前获得窄线宽的技术方案主要有两种:1)增加无源腔的腔长;2)提高腔的精细度。增加腔长会在一定程度上降低整个系统的机械稳定性,从而带来技术困难,而提升腔的精细度必然减小透射效率,因此在设计模清洁剂腔时,要兼顾强度噪声抑制幅度和透射激光功率两方面的要求是不得不面对的问题。同时,模清洁剂还存在着频率噪声转化为强度噪声的问题。因此,模清洁剂简单地加入到光路结构中很难对各频段的强度噪声起到理想的抑制效果。

### 3.3 基于注入锁定的强度噪声抑制

注入锁定是指外部光信号注入激光器,当注入光波长与被注入激光器波长处于锁定范围内时,被注入激光的自由振荡模式被抑制,其输出的频率被锁定在外部注入激光的频率上<sup>[29]</sup>。注入锁定技术不仅可以压窄线宽,还可实现强度噪声的抑制,其原理是利用一台高性能激光器,将其注入至需要进行强度噪声抑制的从激光器中,当二者频率谐振时,注入激光信号会被不断放大,从而使激光器的噪声性能发生显著改善。注入锁定的激光器结构简单、性能良好,已经得到较为广泛的应用。诸如,光谱纯度的提高<sup>[30]</sup>、光学频率梳的产生<sup>[31]</sup>以及光纤振动传感<sup>[32]</sup>等。

1995 年,斯坦福大学的 Farinas 等<sup>[33]</sup>选择了一台弛豫振荡峰经过抑制的低功率单频钇铝石榴晶体激光器作为主激光器,对另一台作为从激光器的低功率钇铝石榴晶体激光器进行注入锁定,通过实验发现在注入锁定之后,从激光器弛豫振荡峰处的强度噪声得到了

有效抑制。

2008 年任民等<sup>[34]</sup>采用较强的外部光注入锁定技术,实验获得了法布里-珀罗激光器的最佳强度噪声抑制。在自由运转法布里-珀罗激光器的弛豫振荡峰周围,最大抑制可达 9 dB,并展示了注入光功率和失谐频率如何影响强度噪声抑制效果。此外,实验研究了最佳抑制范围和稳定锁定范围之间的关系,即两个范围随着注入光功率的增加而增大,但在相同注入光功率下,稳定锁定范围允许更大的失谐频率。通过实验可以得到,想要得到最佳的强度噪声抑制需要两个条件,即合适的失谐和相对较强的注入功率。在 -4 dBm~9 dBm 的不同注入功率水平下,测量了一组用于最佳噪声抑制和稳定锁定的临界失谐频率值。通过比较稳定锁定范围和最佳抑制范围得出:最佳噪声抑制现象发生在稳定锁定范围的一部分;后者允许在相同的注入光功率下有较大的失谐频率;随着注入光功率的增加,这两个范围都会扩大,但其下限之间的差距也会增大。

2022 年胡康永等<sup>[35]</sup>通过采用不同的谐振器对 DFB 激光器进行自注入锁定,对不同参数进行测量,揭示了影响激光器自注入锁定稳定性的因素。根据实验得知,谐振模式跳变、偏振态模式跳变以及外界温度和振动引起的锁定环路的相位变化是影响自注入锁定稳定性的主要因素,并且使用不同类型的谐振腔进行锁定时,主导的影响因素也不相同。因此通过控制这些因素可以很好地改善注入锁定激光器的稳定性。同时,文中指出外界因素尤其不可忽视,一方面会引起反馈光相位变化导致锁定失稳,另一方面会引起谐振模式跳变以及谐振波长和谐振光的偏振态变化导致锁定跳变。因此采用片上集成,将激光器与谐振腔封装在密闭模块内等方式对外界干扰进行控制,不仅能通过强度噪声的被动抑制来降低外界噪声源的影响,还能大大提高注入锁定的稳定性。

基于注入锁定的强度噪声抑制方法无须引入额外的控制和探测系统,使得整体结构相对简单,便于搭建和操作。但该方法的前提是存在一个强度噪声性能优异的激光器,且其中心频率与待优化的单纵模光纤激光器相近,这一前提使得该方法的应用相对困难且应用范围变得更窄。

### 3.4 基于光放大器的强度噪声抑制

增益自调制法利用半导体光放大器或者光纤放大器的增益饱和效应,使通过的激光增益自调制,可降低功率波动大小,以此来达到抑制噪声的目的,该方案可实现全光纤化,集成度高。

半导体光放大器(SOA)的原理与掺稀土光纤放大器相似但也有不同,其放大特性主要取决于有源层的介质特性和激光腔的特性。它虽也是粒子数反转放大发光,但发光的媒介是非平衡载流子即电子空穴而非稀有元素。其整体结构分为有源区和无源区。

有源区为增益区,由如 InP 这样的半导体材料制成,且 SOA 带有抗反射涂层来防止放大器端面的反射<sup>[36]</sup>。半导体光放大器快速发展于 20 世纪 90 年代末,随着量子阱、超晶格技术的发展而日趋成熟,具有体积小、非线性系数高、能够实现集成等优点。半导体光放大器的发光机制是将非平衡载流子注入到半导体结构

中而产生发光,此处的非平衡载流子是指电子空穴对。半导体光放大器对输入光信号进行放大的示意图如图 6 所示,注入聚焦透镜将输入光信号耦合进半导体光放大器的有源层,外部电路提供电流,使半导体光放大器对输入光提供光学增益,实现激光信号的放大。

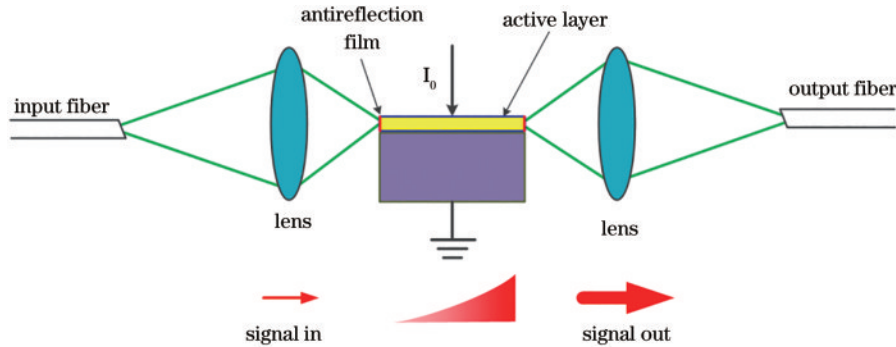


图 6 半导体光放大器对输入光信号进行放大的示意图

Fig. 6 Schematic diagram of amplifying input optical signals using SOA

半导体光放大器存在两个工作区,即线性、平坦、恒定增益区和非线性、饱和输出区。半导体光放大器线性区通常用于解决模式畸变、多通道串扰和掺铟光纤放大器中常见的瞬态响应等问题。而利用半导体光放大器非线性工作区的高非线性特性,则可以实现对单纵模激光器强度噪声的抑制。光信号在被放大的同时会引起半导体光放大器中载流子的消耗,当输入光功率足够大时,载流子的恢复速度无法满足光放大过程中所需的载流子消耗,因而会出现增益随注入光功率的增大而减小的现象,即增益饱和和效应。利用该效应可以实现对强度噪声的抑制。如图 7 所示,输入激光经过半导体光放大器后,功率波动较大的激光在非线性放大过程中,减小了激光功率的相对变化范围,从而稳定了输出激光的功率水平,起到了抑制激光器强度噪声的作用。

峰抑制了约 30 dB。2014 年 Danion 等<sup>[38]</sup>结合掺铟光纤放大器与 SOA,实现了最大 20 dB 的强度噪声抑制,抑制带宽大于 3 GHz。2016 年,华南理工大学课题组基于 SOA 在 0.8 kHz~50 MHz 范围内,相对强度噪声最终被抑制在 -150 dB/Hz 的水平,其噪声抑制效果如图 8 所示。

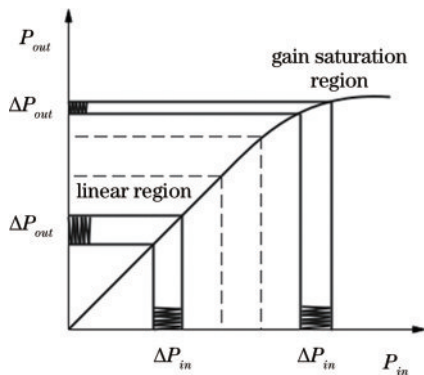


图 7 利用增益饱和效应抑制强度噪声原理图

Fig. 7 Schematic diagram of intensity noise suppression using gain saturation effect

2004 年,南安普敦大学的 McCoy 等<sup>[37]</sup>利用 SOA 抑制了 DFB 单纵模光纤激光器强度噪声,将弛豫振荡

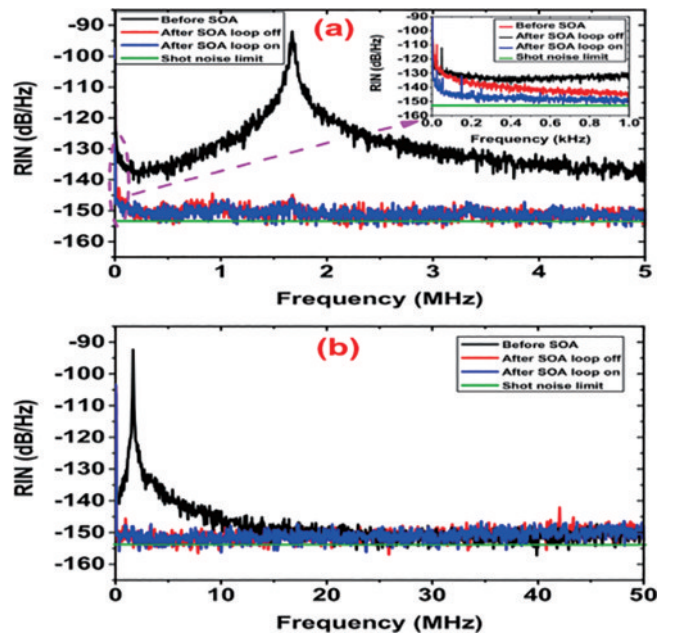


图 8 利用 SOA 抑制前后噪声对比图<sup>[38]</sup>。(a) 0~5 MHz; (b) 0~50 MHz

Fig. 8 Comparison diagram of noise before and after SOA suppression<sup>[38]</sup>. (a) 0-5 MHz; (b) 0-50 MHz

2018 年,吴宛玲等<sup>[39]</sup>为了进一步提高光纤陀螺精度,利用 SOA 对掺铟光纤光源的强度噪声进行了抑制技术研究,陀螺的零偏稳定性由抑制前的千分之一提

高到万分之五左右。2019 年,天津大学谢田元等<sup>[40]</sup>在传统单环结构的光电振荡器中加入 SOA,利用其自增益调制效应有效减少了光电振荡器的噪声。并且通过实验发现,相较于 0.1 kHz 频段,更接近于中频段的 1 kHz 频段噪声抑制效果更为明显。

利用 SOA 的增益饱和效应来抑制噪声已得到越来越广泛的应用,与此同时,研究者们也致力于改善半导体放大器本身以达到更好的噪声抑制效果。2020 年华中科技大学的兰明文<sup>[41]</sup>通过减小 SOA 的远场发散角,提高了 SOA 与光纤的耦合效率,改善了 SOA 的噪声指数。如图 9 所示,所设计的 SOA 横截面结构由一个常规脊波导和位于脊波导有源区下方的平板层构成。该 SOA 的平板层使得基模被拓展且拉向平板层远离有源区,所以其光场限制因子随之减小,意味着该 SOA 的线性放大区增加、发散角减小。光场限制因子的减小使得其具有相比常规 SOA 更高的信噪比和更低的噪声指数。

2021 年,德国的 Edelmann 等<sup>[42]</sup>提出一种非线性放大系统用于噪声抑制,并通过实验对锁模振荡器噪声抑制达到了 20 dB。由图 10 可知,振荡器在 1 kHz~5 MHz 范围内,噪声频谱密度得到高度抑制。

利用半导体光放大器的增益饱和效应抑制强度噪声方案的优势在于,可以实现性能突出的强度噪声抑制(接近量子噪声极限),同时得益于纳秒量级的离子寿命,可以具备 GHz 频带的噪声处理能力。然而需要注意的是,在利用半导体光放大器对激光器强度噪声进行抑制时,半导体光放大器会引入放大自发辐射(ASE),需要在输出端使用光学滤波器进行处理来提

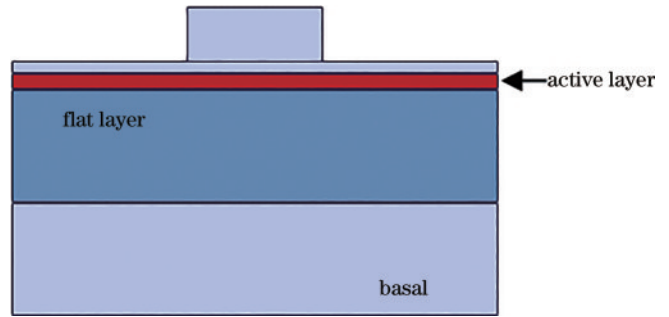


图 9 小远场发散角 SOA 横截面结构

Fig. 9 SOA cross section structure with small far field divergence angle

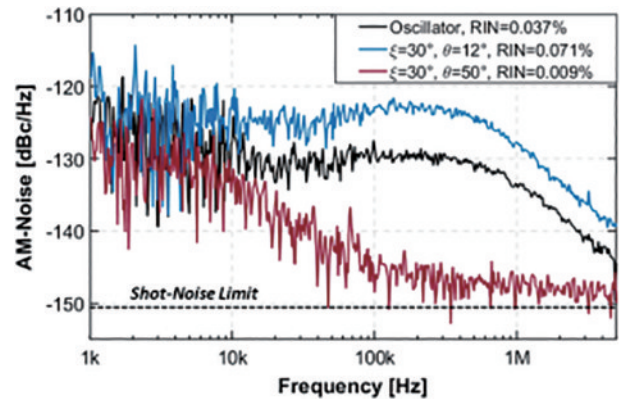


图 10 振荡器噪声频谱密度<sup>[42]</sup>

Fig. 10 Oscillator noise spectral density<sup>[42]</sup>

高被劣化的光信噪比。

综上所述,可以得到上述几种强度噪声抑制方法的优缺点,如表 1 所示。

表 1 几种典型的强度噪声抑制方法的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of intensity noise suppression methods

Item	Advantage	Disadvantage
Photoelectric feedback	Fast power control	Obvious attenuation of laser output power
Mode cleaner	Significant intensity noise suppression effect in high frequency band	Influence on transmitted laser power
Injection locking	No additional detection and control system, simple structure	High stability injection laser itself is difficult to meet the conditions
Optical amplifier	High performance intensity noise suppression	Will introduce amplified spontaneous emission

通过表 1 结合上述国内外强度噪声抑制技术的研究现状及实验结果可以看出,基于半导体光放大器的抑制方法对强度噪声的抑制效果最为显著。由于其具有体积小、非线性系数高、易于集成等优点,较为适用于激光装置前端系统单纵模激光器强度噪声的抑制。

#### 4 基于半导体光放大器抑制单纵模激光器强度噪声研究

助推光学放大器(BOA)是一种典型的半导体光

放大器,由高效的 GaAs/InGaAs 量子阱层结构组成,可设计用于放大所需波段的光信号。其工作原理与 SOA 基本相同,不同的是,BOA 只放大一种偏振态,因此最适合用于输入光偏振态已知的应用场景。对于注入光偏振态未知或存在变化的应用场景,则需要使用对注入偏振态不敏感的 SOA 器件。对于激光器的强度噪声抑制而言,SOA 本身存在偏振相关增益,会对 RIN 抑制产生一定影响,需要在系统中加入偏振控制系统进行调控。目前,BOA 的增益、噪声、带宽和饱和功率指标都优于 SOA,同时基于 BOA 的偏振特性



不需要引入偏振控制系统,可以在一定程度上减少外部系统带来的噪声影响。由于待抑制强度噪声激光器的偏振态已知,因此这里完全可以使用BOA的增益饱和效应来对激光器强度噪声进行抑制,并有效保证输出激光偏振特性。同时,为抑制给半导体光放大器带来不利的 ASE,通过在BOA输出端加入保偏带通滤波器来有效减少 ASE 对输出信号的影响。

按照激光器腔形结构,单频光纤激光器一般分为环形腔和线形腔。环形腔往往需要在腔内插入滤波器或采用复用腔来减少腔内起振的纵模数量,这在增加激光系统复杂程度的同时将引入额外的损耗。相比于环形腔,线形腔激光器的实现更为简单,基于布拉格光栅的 DBR 激光型单频光纤激光器凭借高激光效率、结构紧凑、运转稳定的特点而得到了更为广泛的应用<sup>[43]</sup>。因此,在该实验中采用通过BOA放大器实现强度噪声抑制的 DBR 激光器。

针对高功率激光装置需求,开展了 1053 nm 波段单纵模光纤激光器强度噪声抑制技术研究。在相同

工作环境下,用功率计对国外商品化DFB光纤激光器和基于BOA进行强度噪声抑制后的单纵模光纤激光器输出功率分别进行了测试。其中,采用BOA进行强度噪声抑制的单纵模光纤激光器测试光路如图 11 所示。信号光源先通过保偏隔离器(PMI),以防止后续光路中返回的光影响激光器的运转状态,然后通过保偏的可调光衰减器(PM VOA)使得BOA对强度噪声的抑制达到最佳作用。通过BOA放大器后再经过保偏带通滤波器(PM BPF)以减少 ASE 带来的影响,而后通过保偏分光隔离器(PMTI)将一部分光信号输出到功率计对其输出功率进行测量,另一部分光信号通过闭环控制链路以起到对BOA的调控作用。其中,TIA为跨阻放大器,将通过PD转换而来的输入电流转变为电压,同时一定程度上抑制光电转换过程中带来的噪声。再通过模数转换器(ADC)将电压值转化为数字信号,输入数字PID控制系统,以实现BOA的调控。

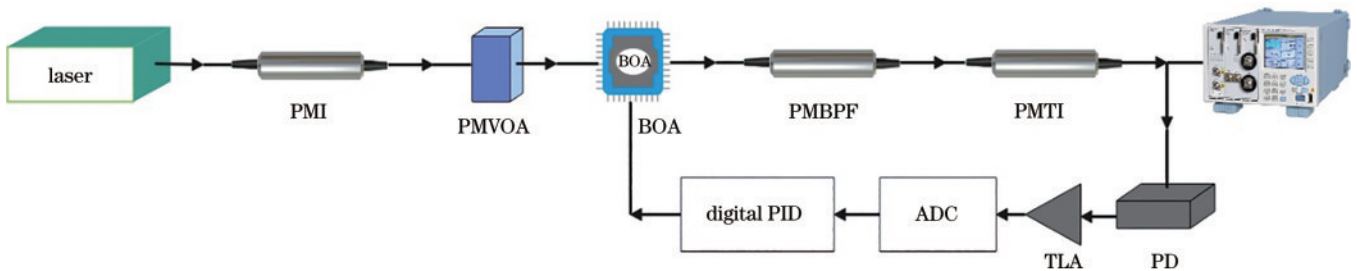


图 11 基于BOA的强度噪声抑制的激光器功率输出测量装置结构示意图

Fig. 11 Structure diagram of laser power output measurement device based on BOA for intensity noise suppression

测得二者输出功率随时间的变化情况如图 12 所示。根据测得的实验数据可分别计算得到DFB激光器和基于BOA强度噪声抑制激光器的峰谷(PV)值与均方根(RMS)值。DFB激光器输出功率平均值为 13.478 dBm, 2 h 内功率起伏 PV 值为 0.131%, RMS

值为 0.0275%。将基于BOA进行强度噪声抑制的国产激光器输出功率调节到相同水平,平均值为 13.478 dBm, 2 h 内功率起伏 PV 值为 0.068%, RMS 值为 0.0089%。

从以上实验结果可以看出,基于半导体光放大器

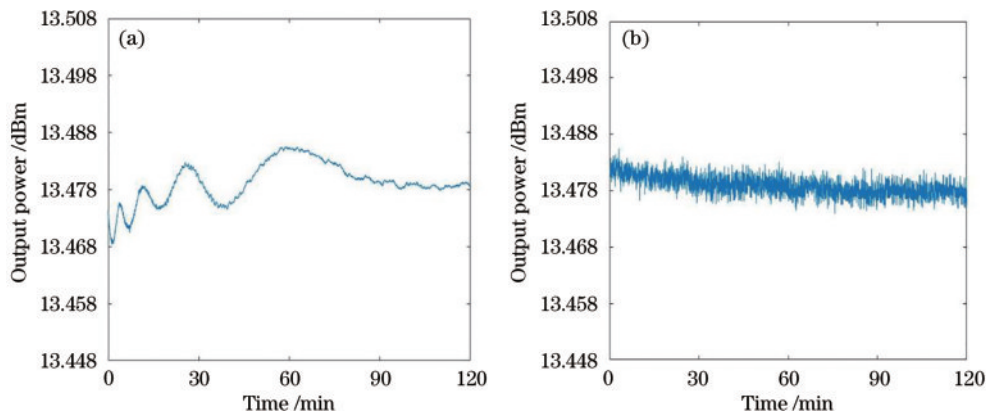


图 12 测得的激光器输出功率。(a) 国外商品化DFB激光器;(b) 基于BOA进行强度噪声抑制后的激光器

Fig. 12 Measured output power of the lasers. (a) Commercialized DFB lasers abroad; (b) laser with intensity noise suppression based on BOA

可以实现对单纵模光纤激光器强度噪声的有效抑制,提升其输出功率稳定性。通过研究也实现了比国外商品化DFB激光器输出功率更加稳定的1053 nm激光输出。

## 5 结束语

单纵模激光器正朝着高功率、超窄线宽、超低噪声等方向深入发展<sup>[44]</sup>。在越来越多的领域得以应用的同时,也都对其高稳定性、低噪声有着强烈的需求。目前单纵模激光器强度噪声有多种抑制技术措施,每种技术都有其优点和不足,需要根据具体应用场景进行选择,从而实现满足系统特定应用需求的强度噪声抑制。为了提升高功率激光装置前端系统中单纵模光纤激光器的输出稳定性,开展了基于半导体光放大器的强度噪声抑制技术研究,通过BOA的增益饱和和效应对单纵模激光器强度噪声实现了有效抑制。之后,考虑加入光电反馈装置以优化BOA本身所带来的噪声问题,同时可以使用注入锁定的激光器充当泵浦源以增强泵浦源的稳定性。为了进一步提升单纵模光纤激光器的输出功率稳定性,还可以在减少环境温度、振动等因素对激光器腔体干扰、改进闭环反馈控制电路的控制精度、优化半导体放大器自身结构等方面作出研究,同时可以考虑多种噪声抑制手段相结合,从而更好地满足应用需求。

## 参 考 文 献

- [1] 张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 等. 基于相位调制-相干检测的模式复用通信实验[J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0306001. Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0306001.
- [2] 章征林, 高磊, 孙阳阳, 等. 分布式光纤传感器应变传递规律研究[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0410001. Zhang Z L, Gao L, Sun Y Y, et al. Strain transfer law of distributed optical fiber sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0410001.
- [3] Mauranyapin N P, Madsen L S, Taylor M A, et al. Evanescent single-molecule biosensing with quantum-limited precision[J]. Nature Photonics, 2017, 11(8): 477-481.
- [4] Braunstein S L, van Loock P. Quantum information with continuous variables[J]. Reviews of Modern Physics, 2005, 77(2): 513-577.
- [5] Endres M, Bernien H, Keesling A, et al. Atom-by-atom assembly of defect-free one-dimensional cold atom arrays[J]. Science, 2016, 354(6315): 1024-1027.
- [6] 张宽收, 卢华东, 李渊骥, 等. 高功率低噪声全固态连续波单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(5): 030006. Zhang K S, Lu H D, Li Y J, et al. Progress on high-power low-noise continuous-wave single-frequency all-solid-state lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(5): 030006.
- [7] 曹春燕, 胡宁涛, 侯庆凯, 等. 光纤水听器远程系统非线性串扰抑制[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1606005. Cao C Y, Hu N T, Hou Q K, et al. Suppression of nonlinear-crosstalk in remotely interrogated optical fiber hydrophone systems[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1606005.
- [8] 前瞻经济学人资讯组. 美国国家实验室成功实现核聚变关键点火步骤 [EB/OL]. (2021-08-18) [2022-09-08]. [https://k.sina.com.cn/article\\_1949671172\\_74359f040010y0oe.html](https://k.sina.com.cn/article_1949671172_74359f040010y0oe.html). Prospective Economist Information Group. Key ignition steps for successful nuclear fusion in the US National Laboratory[EB/OL]. (2021-08-18)[2022-09-08]. [https://k.sina.com.cn/article\\_1949671172\\_74359f040010y0oe.html](https://k.sina.com.cn/article_1949671172_74359f040010y0oe.html).
- [9] 范滇元, 张小民. 激光核聚变与高功率激光: 历史与进展[J]. 物理, 2010, 39(9): 589-596. Fan D Y, Zhang X M. Laser fusion and high power laser: history and progress[J]. Physics, 2010, 39(9): 589-596.
- [10] 李灿. 磷酸盐单频光纤激光器噪声机理及其抑制技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. Li C. Study on noise mechanism and suppression technology of phosphate single frequency fiber laser[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [11] 田中成. 相对强度噪声对微波光子链路性能影响规律研究[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 911-916. Tian Z C. Impact of relative intensity noise to the performance of microwave photonic links[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 911-916.
- [12] 杨中民, 徐善辉. 单频光纤激光器[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 35-37. Yang Z M, Xu S H. Single frequency fiber laser[M]. Beijing: Science Press, 2017: 35-37.
- [13] 张骥. 光纤激光器噪声测量与抑制技术的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 11-04. Zhang J. Research on the noise measurement and suppression technology of fiber laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 11-04.
- [14] 张骥, 魏珊珊, 刘昊炜, 等. 单频激光宽频段频率和强度噪声测量技术[J]. 中国激光, 2021, 48(3): 0301002. Zhang J, Wei S S, Liu H W, et al. Measurement technique for broadband frequency and intensity noise of single-frequency laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(3): 0301002.
- [15] Ding M, Cheo P K. Analysis of Er-doped fiber laser stability by suppressing relaxation oscillation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1996, 8(9): 1151-1153.
- [16] Cranch G A, Englund M A, Kirkendall C K. Intensity noise characteristics of erbium-doped distributed-feedback fiber lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(12): 1579-1587.
- [17] Ball G A, Hull-Allen C G, Livas J. Frequency noise of a Bragg grating fibre laser[J]. Electronics Letters, 1994, 30(15): 1229-1230.

- [18] 郑宇进, 允自强, 高新, 等. 光学双稳态激光光强稳定器的实验研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1992, 15(5): 107-110.  
Zheng Y J, Yun Z Q, Gao X, et al. Experiment research on laser intensity stablizer with optical bistable property [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1992, 15(5): 107-110.
- [19] 高兰兰, 檀慧明. 高稳定全固体绿激光器光电反馈控制技术[J]. 半导体光电, 2006, 27(5): 605-607.  
Gao L L, Tan H M. Optoelectronic feedback technology for high stability all solid-state green laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2006, 27(5): 605-607.
- [20] 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.
- [21] Huber M, Schweinberger W, Stutzki F, et al. Active intensity noise suppression for a broadband mid-infrared laser source[J]. Optics Express, 2017, 25(19): 22499-22509.
- [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] 王晓慧, 闫红梅, 杨文广, 等. 模式清洁器的噪声转化与输出噪声分析[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0414002.  
Wang X H, Yan H M, Yang W G, et al. Noise conversion of a mode-cleaner cavity and noise analysis of output fields[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0414002.
- [24] Gräf C, Barr B W, Bell A S, et al. Design of a speed meter interferometer proof-of-principle experiment[J]. Classical and Quantum Gravity, 2014, 31(21): 215009.
- [25] 邵朝阳. 模清洁器抑制强度噪声理论的完善和 1560 nm 光纤激光器的外腔倍频实验研究[D]. 西安: 中国科学院国家授时中心, 2014.  
Tai C Y. Perfection of theory of mode cleaner for intensity noise suppression and investigation for extracavity frequency doubling of 1560 nm fibre laser[D]. Xi'an: National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [26] Nocera F. LIGO laser intensity noise suppression[J]. Classical and Quantum Gravity, 2004, 21(5): S481-S485.
- [27] Seifert F, Kwee P, Heurs M, et al. Laser power stabilization for second-generation gravitational wave detectors[J]. Optics Letters, 2006, 31(13): 2000-2002.
- [28] 田晓, 尹默娟, 徐琴芳, 等. 利用模清洁器实现铽光钟的光晶格光源强度噪声的抑制[J]. 时间频率学报, 2015, 38(3): 147-153.  
Tian X, Yin M J, Xu Q F, et al. Suppressing the intensity noise of a lattice laser for a Sroptical lattice clock using the mode-cleaner[J]. Journal of Time and Frequency, 2015, 38(3): 147-153.
- [29] Haroche S, Hartmann F. Theory of saturated-absorption line shapes[J]. Physical Review A, 1972, 6(4): 1280-1300.
- [30] Lim J, Savchenkov A A, Matsko A B, et al. Microresonator-stabilized extended-cavity diode laser for supercavity frequency stabilization[J]. Optics Letters, 2017, 42(7): 1249-1252.
- [31] Voloshin A S, Kondratiev N M, Lihachev G V, et al. Dynamics of soliton self-injection locking in optical microresonators[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 235.
- [32] Zhu X Y, Li X L, Zhang R, et al. Using DFB laser self-injection locked to an optical waveguide ring resonator as a light source of  $\Phi$ -OTDR[J]. Applied Optics, 2021, 60(31): 9769-9773.
- [33] Farinas A D, Gustafson E K, Byer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked, solid-state laser[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1995, 12(2): 328-334.
- [34] 任民, 韩威, 谢亮, 等. 外注入锁定对 FP 激光器强度噪声的抑制[J]. 半导体学报, 2008, 29(11): 2192-2196.  
Ren M, Han W, Xie L, et al. Intensity noise suppression of an FP laser by external injection locking[J]. Journal of Semiconductors, 2008, 29(11): 2192-2196.
- [35] 胡康永, 宋伟宁, 朱旭阳, 等. DFB 半导体激光器自注入锁定失稳因素分析[J]. 半导体光电, 2022, 43(3): 552-556.  
Hu K Y, Song W N, Zhu X Y, et al. Analysis of instability factors of self-injection locking of DFB semiconductor laser[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(3): 552-556.
- [36] 赵书安. 半导体光放大器的原理及应用分析[J]. 金陵科技学院学报, 2005, 21(3): 22-26.  
Zhao S A. Semiconductor optical amplifier principle and application analysis[J]. Journal of Jinling Institute of Technology, 2005, 21(3): 22-26.
- [37] McCoy A D, Fu L B, Ibsen M, et al. Intensity noise suppression in fibre DFB laser using gain saturated SOA [J]. Electronics Letters, 2004, 40(2): 107-109.
- [38] 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.
- [39] 吴宛玲, 那永林. 基于 SOA 的光纤陀螺相对强度噪声抑制研究[J]. 导航定位与授时, 2018, 5(4): 89-93.  
Wu W L, Na Y L. Research on relative intensity noise suppression of fiber optic gyroscope based on the SOA[J]. Navigation Positioning and Timing, 2018, 5(4): 89-93.
- [40] 谢田元, 王菊, 马闯, 等. 基于半导体光放大器的光电振荡器相位噪声抑制的研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1223007.  
Xie T Y, Wang J, Ma C, et al. Research on phase noise suppression of optoelectronic oscillator using semiconductor optical amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1223007.
- [41] 兰明文. 基于波导耦合的小发散角半导体光放大器 and FP 腔激光器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020: 12.  
Lan M W. Study on semiconductor optical amplifier and FP laser diode with small divergence angles based on

- waveguide coupling[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020: 12.
- [42] Edelman M, Hua Y, Şafak K, et al. Nonlinear fiber system for shot-noise limited intensity noise suppression and amplification[J]. Optics Letters, 2021, 46(14): 3344-3347.
- [43] 史伟, 付士杰, 房强, 等. 基于稀土掺杂石英光纤的单频光纤激光器[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(10): 1003001.
- Shi W, Fu S J, Fang Q, et al. Single-frequency fiber laser based on rare-earth-doped silica fiber[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(10): 1003001.
- [44] 杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114002.
- Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114002.