

## 激光与光电子学进展

## 基于光谱展宽的高功率窄线宽激光器研究进展

石梦悦<sup>1</sup>, 吴勇<sup>1</sup>, 李洁<sup>1</sup>, 方志伟<sup>1</sup>, 王嘉瑾<sup>1</sup>, 慕桓<sup>2</sup>, 义理林<sup>1\*</sup><sup>1</sup>上海交通大学电子信息与电气工程学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240;<sup>2</sup>杭州爱鸥光学科技有限公司, 上海 200240

**摘要** 高功率窄线宽连续光纤激光器在科学研究、工业加工和军事国防领域具有广泛的应用价值。在保证激光器输出质量的前提下,不断提升输出功率是高功率激光器不懈追求的关键目标之一。受激布里渊散射效应是制约激光功率提升的关键因素之一,本文针对受激布里渊散射效应展开,重点介绍基于光谱展宽的非线性效应抑制方法的不同方案与效果,综述利用相位调制展宽种子源光谱的发展历程,分析当前存在的问题并展望该技术的发展前景。

**关键词** 激光器; 高功率窄线宽连续光纤激光器; 光谱展宽; 相位调制; 受激布里渊散射效应

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222419

## Research Progress of High-Power Narrow-Linewidth Lasers Based on Spectral Broadening

Shi Mengyue<sup>1</sup>, Wu Yong<sup>1</sup>, Li Jie<sup>1</sup>, Fang Zhiwei<sup>1</sup>, Wang Jiajin<sup>1</sup>, Mu Huan<sup>2</sup>, Yi Lilin<sup>1\*</sup><sup>1</sup>State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;<sup>2</sup>AIOPTICS Technology Co., Ltd., Shanghai 200240, China

**Abstract** High-power narrow-linewidth continuous-wave fiber lasers have a wide range of application values in scientific research, industrial processing, and military defense. On the premise of ensuring the output quality, continuously improving the output power is one of the key goals of high-power lasers. This research focuses on the suppression of the stimulated Brillouin scattering effect, which is one of the key factors restricting the laser power improvement. Various methods of nonlinear effect suppression and the corresponding performances are introduced, especially the spectral broadening method. In addition, the current problems and the development prospects of this technology are analyzed.

**Key words** lasers; high-power narrow-linewidth continuous-wave fiber laser; spectral broadening; phase modulation; stimulated Brillouin scattering effect

## 1 引言

全光纤高功率窄线宽连续激光器具有光束质量高、可靠性好、电光转换效率高、体积小和热管理方便等优点<sup>[1]</sup>,在相干合成、非线性频率转换等科学研究,工业加工和军事攻防领域具有重要的应用<sup>[2-4]</sup>。1 μm 波段高功率窄线宽激光器可用于铝合金等金属的厚板焊接,提升熔透深度<sup>[5]</sup>,此外,还可通过倍频晶体转化为绿光,因金属材料对绿光的吸收率远大于中红外,其较高的输出能量密度能有效提高激光切割、焊

接等过程的加工效果<sup>[6]</sup>。以美国、日本、德国等为首的工业发达国家把光纤激光加工列入国家级发展计划中<sup>[7]</sup>。在军事领域,高功率连续光纤激光器作为激光攻防的核心部分,具有能量高度集中、发射快速灵活、抗电磁干扰、持续工作能力强等优越性能,在光电对抗、防空和战略防御中发挥独特的作用。2021年8月,美国陆军首次研制和演示 50 kW 高功率激光武器,这是陆军防空和导弹防御现代化战略的重要部分。未来,激光武器将作为战略装备,用于攻击战略导弹与卫星,是国土防御与争夺制天权的有效手段。为满足

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-28; 录用日期: 2022-11-15; 网络首发日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金(62205198, 62025503)、中国博士后科学基金面上项目(2021M702096)

通信作者: \*lilinyi@sjtu.edu.cn

上述应用需求,需要多路光纤激光进行相干或光谱合成,以输出具有极高功率的激光,因而对单个激光器性能提出更高的要求,即保证输出光束质量的前提下,不断提高发射功率,这也是当前高功率激光器的主要研究目标。

直接振荡器结构的窄线宽连续激光器具有较优的激光模式分布,但谐振腔提升了激光功率密度,对有源光纤的损伤阈值要求较高,导致输出功率受限。以一定波长的激光输出作为种子源,其功率在主动振荡器功率放大(MOPA)结构中被进一步放大,可以形成更高的功率输出<sup>[8]</sup>。MOPA结构易于调控且功率提升性能显著,被认为是高功率连续光纤激光器的首选结构<sup>[9-10]</sup>,还可用于纳秒脉冲光放大,提升激光雕刻的质量和效率<sup>[11]</sup>。理想情况下,激光器输出功率与泵浦功率或增益系数呈近线性关系,然而,当输出功率不断提升时,受光纤中多种非线性效应的影响,例如交叉相位调制、受激拉曼散射效应、受激布里渊散射(SBS)效应和四波混频,输出功率曲线进入非线性区并呈现增益压缩现象,进而限制最高功率输出并降低功率转化效率。其中,光纤中的SBS效应阈值最低,成为限制激光器最高输出功率的瓶颈问题。

传统的SBS效应抑制方法有四种,包括使用有效模式面积较大的光纤,控制温度或应力梯度以改变布里渊增益谱,降低光纤的有效长度或增加种子线宽。其中,利用相位调制拓宽种子源带宽的方案具有操作简单可控、功率提升效率高等特点,成为抑制大功率光纤激光器中SBS效应的研究热点。近几年,研究人员分析了种子源展宽后的相对强度噪声演变<sup>[12]</sup>、泵浦模式<sup>[13-14]</sup>和调制类型<sup>[15]</sup>等因素的影响,以提高激光性能。特别是外相位调制的驱动信号控制是保证激光质量和最大输出功率的关键步骤之一。此外,近年的研究发现,当激光功率进一步增加时,正向输出会产生时域自脉冲现象<sup>[16]</sup>。饱和吸收、受激拉曼散射和受激布里渊散射效应均可引起大功率掺镱光纤激光器中的自脉冲效应,其特性与增益光纤的模场特性相关。其中,SBS效应具有较低的阈值,在功率放大过程中容易产生弛豫振荡,形成一系列纳秒量级的脉冲串,进而引发自脉冲效应<sup>[17]</sup>。相位调制信号的随机脉冲容易刺激后向一阶SBS效应,触发前向二阶斯托克斯光,随着激光功率的增加,正向随机脉冲急剧增加,其具有峰值功率高、脉宽短、随机性强等特点,超高的瞬时能量将严重威胁高功率激光系统的安全<sup>[18-19]</sup>。

本文从高功率窄线宽激光器中SBS效应的抑制方法出发,对比不同抑制方案的效果,重点针对1 μm波段的高功率激光,介绍种子源外相位调制信号的不同设计与优化对激光器功率阈值的影响,并对未来的发展趋势进行讨论,为高功率激光器的相关研究提供参考。

## 2 高功率激光器中受激布里渊散射效应抑制方法

基于MOPA结构的全光纤高功率激光是由种子源产生所需频率的激光,经过多级功率预放大后,采用掺镱光纤进行主放大处理,该过程可将种子光功率从几十瓦量级提升至千瓦量级,SBS效应极易在此过程中产生。根据SBS效应产生过程的耦合方程,可以得到光纤中SBS效应阈值公式<sup>[20]</sup>为

$$P_{th} \propto 21 \frac{A_{eff} \cdot (1 + \Delta\nu_s / \Delta\nu_B)}{g_{SBS}(\Omega_B) \cdot L_{eff}} \ln(G), \quad (1)$$

式中: $A_{eff}$ 为光纤有效模场面积; $\Delta\nu_s$ 为光谱带宽; $\Delta\nu_B$ 为SBS增益谱带宽; $\Omega_B$ 为声波频率, $g_{SBS}(\Omega_B)$ 为SBS增益谱的峰值; $L_{eff}$ 为有效光纤长度; $G$ 为光纤放大器的线性增益系数。可见,对于窄线宽高功率光纤激光器,即 $\Delta\nu_s$ 较小,SBS阈值越小,越容易发生SBS效应从而降低激光器的有效输出功率。从式(1)可以总结出以下四种提升SBS效应阈值的方法:

1)增大光纤有效模场面积。2004年,Alegria等<sup>[21]</sup>利用30/400 μm大模场掺镱共掺光纤,将线宽为13 kHz的分布反馈式激光种子源输出功率放大到83 W,该方案保障放大后激光具有窄线宽的同时,提高了SBS效应的阈值。2007年,Gray等<sup>[22]</sup>采用MOPA结构,利用线宽为3 kHz、输出功率为100 mW的种子光,在8.5 m长、纤芯直径为39 μm的大模场Al-Ge梯度掺杂光纤中,实现100 W的单频激光输出。2020年,Valero等<sup>[23]</sup>采用纤芯直径为35 μm的无暗化光纤,基于MOPA结构实现中心波长为976 nm,最高功率为39 W的激光输出。尽管使用大模场面积的光纤可以有效抑制SBS效应,但是受限于光纤和激光器类型,同时受光子暗化效应的影响,激光输出功率有限,进而限制其在工业领域的应用。

2)改变布里渊增益谱。通过施加温度、应力等手段,可有效降低布里渊增益峰值,从而提高SBS效应阈值。2009年,Liu<sup>[24]</sup>分析了包含增益光纤和传能光纤情况下,温度梯度对SBS效应阈值的影响,在0 °C时获得更高的SBS阈值。2013年,中国科学院上海光学与精密机械研究所的Zhang等<sup>[25]</sup>,理论分析并实验验证了对增益光纤施加20个应力梯度,辅以相应的温度分布,SBS效应的阈值提升了7倍。但为获得更好的阈值提升效果,需要更大范围的应力和温度控制,增加系统负担,同时受光纤承受能力的限制,SBS效应的最大阈值提升有限,不适用于军事上光纤激光器的输出功率提升。

3)减小光纤有效长度。在增益光纤中掺杂介质,可减小增益光纤的有效长度,进而提升SBS效应的阈值。2010年,Shi等<sup>[26]</sup>使用长度仅为15 cm、纤芯直径为25 μm的保偏双包层大模场掺镱共掺磷酸盐玻璃光

纤(LC-EYFP),获得了峰值功率为 1.2 kW,近衍射极限的脉冲激光输出。在连续光纤激光器方面,Wang 等<sup>[27]</sup>使用 1.5 m 长的高掺镱大模场光纤,搭建全光纤 MOPA 系统,最终实现了光束衍射倍率  $M^2$  为 1.3,功率为 31 W 的 1064 nm 波长单频激光输出。相比于脉冲输出,高功率连续激光输出需要更高的增益系数,实际应用中增益光纤长度通常在米量级,持续高能量累积对增益光纤等的耐辐射能力等提出更高的要求,单纯通过减小有效长度的方法,获得的激光功率阈值提升效果有限,难以满足千瓦量级的应用需求。

4) 相位调制展宽种子源线宽。2009 年,哈尔滨工业大学的 Liu 等<sup>[28]</sup>描述了相位调制种子光条件下,增大种子源的线宽可抑制 SBS 效应,实现高功率的激光

输出。2016 年,国防科技大学 Ma 等<sup>[29]</sup>采用三级相位调制进行频谱展宽,实现 1890 W 功率输出,最大线宽为 45 GHz。通过相位调制展宽种子光线宽,降低平均功率的同时不会改变种子源总功率,可以有效降低 SBS 效应的峰值功率,阈值提升较高,十分适合 MOPA 结构的高功率光纤激光器。

总结上述几种 SBS 效应抑制方案的优缺点,如表 1 所示。综合考虑制作工艺复杂度、SBS 效应阈值提升度及可操作性等因素,在有效带宽内,利用相位调制拓宽种子源带宽的方案具有操作简单、可控度高、功率提升效率高等特点,成为抑制大功率光纤激光器中 SBS 效应的研究热点。因此,下一节将详细介绍不同相位调制格式的激光器性能。

表 1 SBS 效应抑制方案的优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of SBS effect suppression schemes

Method	Threshold improvement	Advantage	Disadvantage
Increasing effective mode field area	Moderate	Single-mode output	Limited by fiber and laser system types
Changing temperature or stress gradient	Low	Single-mode output	Relatively low threshold, and difficult to implement
Reducing effective length	Moderate	Easy to implement, and suitable for pulsed lasers	Low power damage threshold
Spectral broadening based on phase modulation	High	High threshold, and easy to control	Laser linewidth depends on modulation signal

### 3 种子源相位调制光谱展宽方案对比

基于相位调制的种子源光谱展宽方法对提高 MOPA 结构光纤激光放大系统中的 SBS 效应阈值具有显著的效果。传统的调制方案包括正弦信号调制、白噪声源(WNS)调制和伪随机二进制序列(PRBS)调制,调制后的输出频谱幅度包络根据贝塞尔函数的形式展开。近几年,调 P 序列、多频信号、啁啾调制等新型方案被提出,以提升种子源光谱的调节灵活性,优化光谱谱型并提高激光器功率阈值。本节将对上述多种相位调制方案进行详细的介绍与比较。

#### 3.1 正弦信号调制

2011 年,Fibertek 公司<sup>[30]</sup>采用双音信号相位调制对种子光进行频谱展宽,如图 1 所示,相位调制带宽仅为 450 MHz,主放大器级使用 35  $\mu\text{m}$  大纤芯、掺镱含量较高的光纤,实现了 1 kW 的激光输出和近衍射极限的光束质量  $M^2 < 1.4$ ,内量子效率  $> 83\%$ ,实验结果如图 2 所示,此功率运行下尚未达到 SBS 阈值。尽管使用正弦信号进行频谱展宽较易实现,但受限于相位调制器的调制深度与可承受微波功率,展宽带宽有限且展宽后为完全分离的频谱,SBS 阈值提升能力有限。

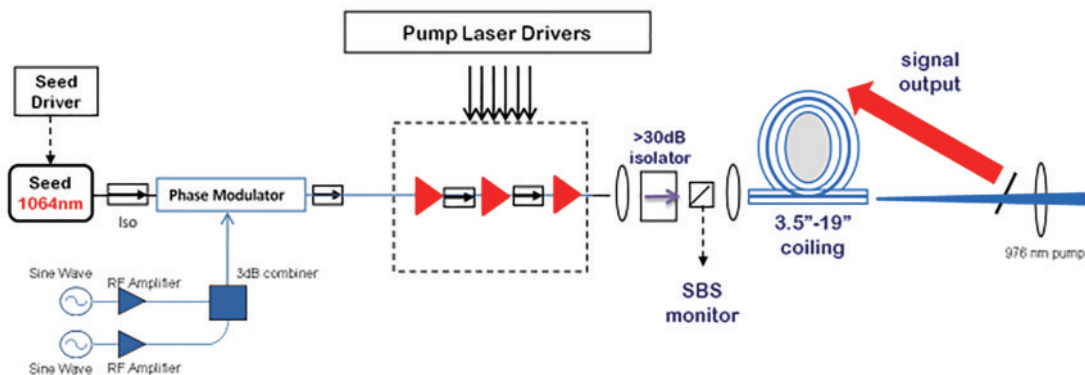


图 1 MOPA 结构的 kW 级激光功率放大实验框图<sup>[30]</sup>

Fig. 1 Experimental setup of kW-level laser power amplification based on MOPA structure<sup>[30]</sup>

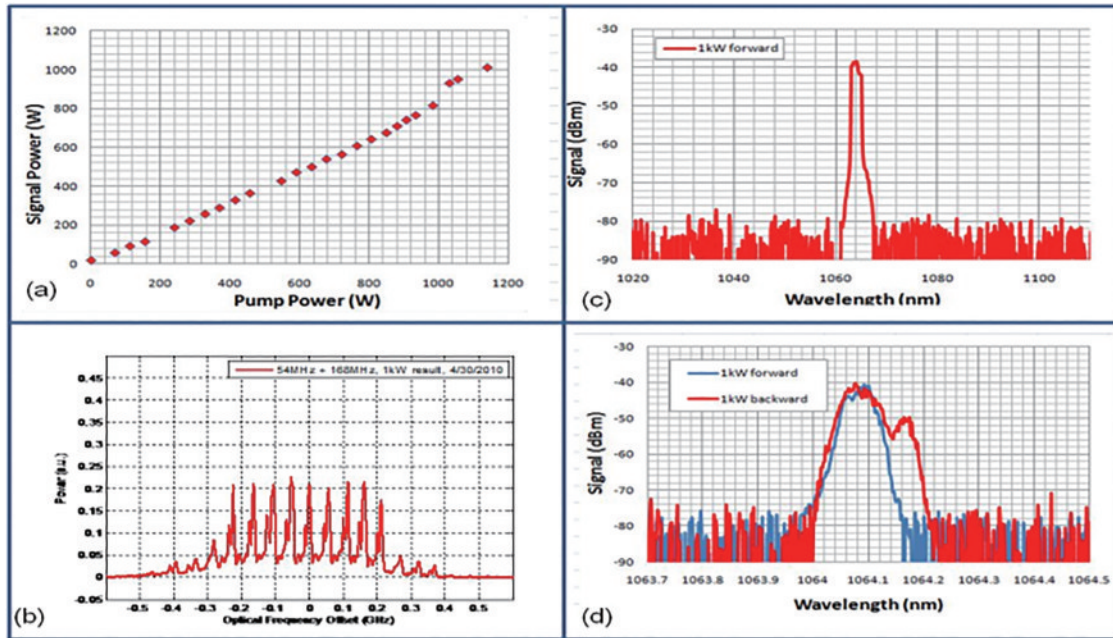


图 2 实验结果<sup>[30]</sup>。(a) MOPA 结构 kW 级激光功率;(b) 相位调制种子源的高分辨率光谱;(c)(d) 1 kW 正向和反向传播信号的频谱  
Fig. 2 Experimental results<sup>[30]</sup>. (a) kW-level laser power based on MOPA structure; (b) high resolution spectrum of phase modulated seed sources; (c) (d) spectra of forward and backward propagating signal at 1 kW

### 3.2 白噪声调制

白噪声源(WNS)的输出功率谱在整个频段内是连续的,成为光谱展宽的优良选择<sup>[31]</sup>。2007年,美国的奥兰公司申请一份关于利用白噪声作为相位调制驱动信号抑制SBS效应的专利<sup>[32]</sup>,随后,WNS调制被广泛研究并应用于工业生产中。2017年,国防科

技大学Su等<sup>[33-34]</sup>针对单频激光器经相位调制展宽后,功率放大过程中的偏振态优化问题,将线宽为20 kHz、中心波长为1064 nm的单频线偏振激光输出信号,经白噪声相位调制展宽,结合由四个电光晶体组成的偏振控制器进行偏振态控制,经过三级掺Yb光纤放大器进行功率放大,整体实验结构如图3(a)

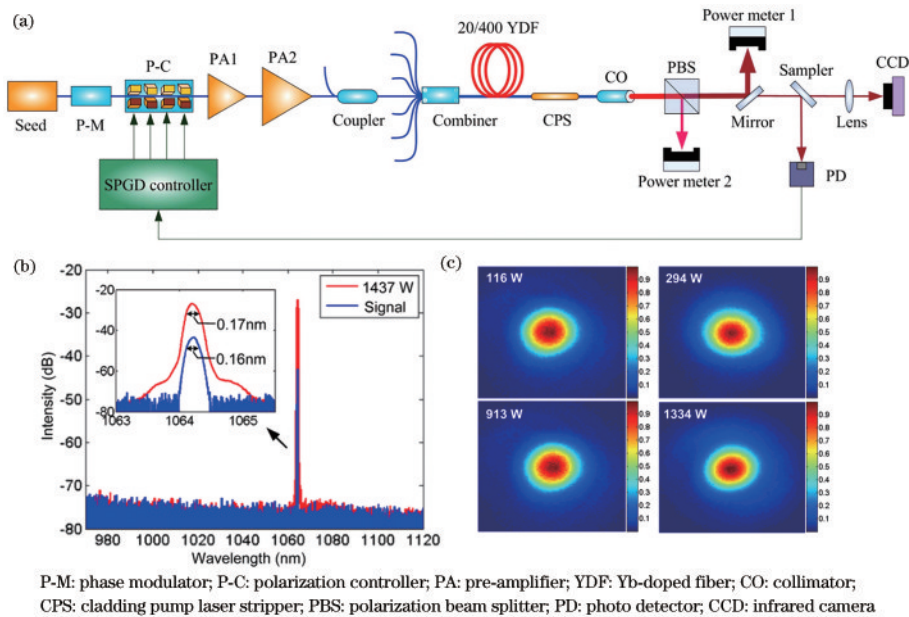


图 3 白噪声相位调制结合SPGD算法偏振控制的高功率窄线宽激光功率放大实验与结果图<sup>[34]</sup>。(a)实验框图;(b)相位调制后单频激光器输出和功率放大后激光输出光谱图;(c)线偏振激光束的远场强度分布

Fig. 3 Experimental setup and results of high-power narrow-linewidth laser power amplification with white noise phase modulation combined with SPGD algorithm polarization control<sup>[34]</sup>. (a) Schematic diagram of experimental setup; (b) single frequency laser output after phase modulation and laser output spectrum after power amplification ; (c) far field intensity distributions of the linear polarized laser beam

所示。其中,前两级光纤放大器分别为纤芯/内包层直径为 6/125  $\mu\text{m}$  和 10/125  $\mu\text{m}$  的双包层掺 Yb 光纤,将激光功率放大至 18 W。主放大器为 15 m 长,纤芯/内包层直径为 20/400  $\mu\text{m}$  的双包层掺 Yb 光纤,采用单向泵浦的方式。激光输出信号的一部分被光电探测器(PD)接收,采用随机平行梯度下降法(SPGD)进行偏振态优化,结合现场可编程门阵列(FPGA)实现相应算法的数模转换,以对偏振控制器进行控制。最终获得激光器输出信号线宽约 0.17 nm,最大输出功率为 1437 W,此时,泵浦功率为 1764 W,偏振消光比大于 11.1 dB,对应的光对光转化效率为 81.0%。相位调制后单频激光器输出和功率放大后激光输出信号光谱图如图 3(b)所示,图 3(c)为功率放大后,输出线偏振激光束的远场强度分布图,光束质量在供电期间保持得非常好。

2020 年,中国工程物理研究院应用电子研究所 Wang 等<sup>[19]</sup>采用白噪声相位调制方法,研究 MOPA 结构激光器功率放大过程中 SBS 效应和自脉冲效应的抑制方法。通过实验比较不同的 WNS 相位调制模式的功率放大效果,单频激光种子注入时,和单级 WNS 调制相比,具有相似激光输出线宽的级联 WNS 调制呈现出更好的自脉冲抑制效果,因此时调制信号的光谱尖峰一定程度上被抑制。实验采用梅花形弯曲的模式选择装置,稳定大功率窄线宽光纤放大器系统的模式,如图 4(a)所示。采用级联 WNS,32 GHz 线宽的激光放大功率阈值为 2.5 kW,偏振消光比(PER)的测量值大于 14 dB,且光束品质因数  $M^2$  低于 1.3,如图 4(b)、(c)所示。但作为随机噪声,WNS 的频谱和带宽可控度较低,带宽调节通过添加不同带宽的低通滤波器实现。

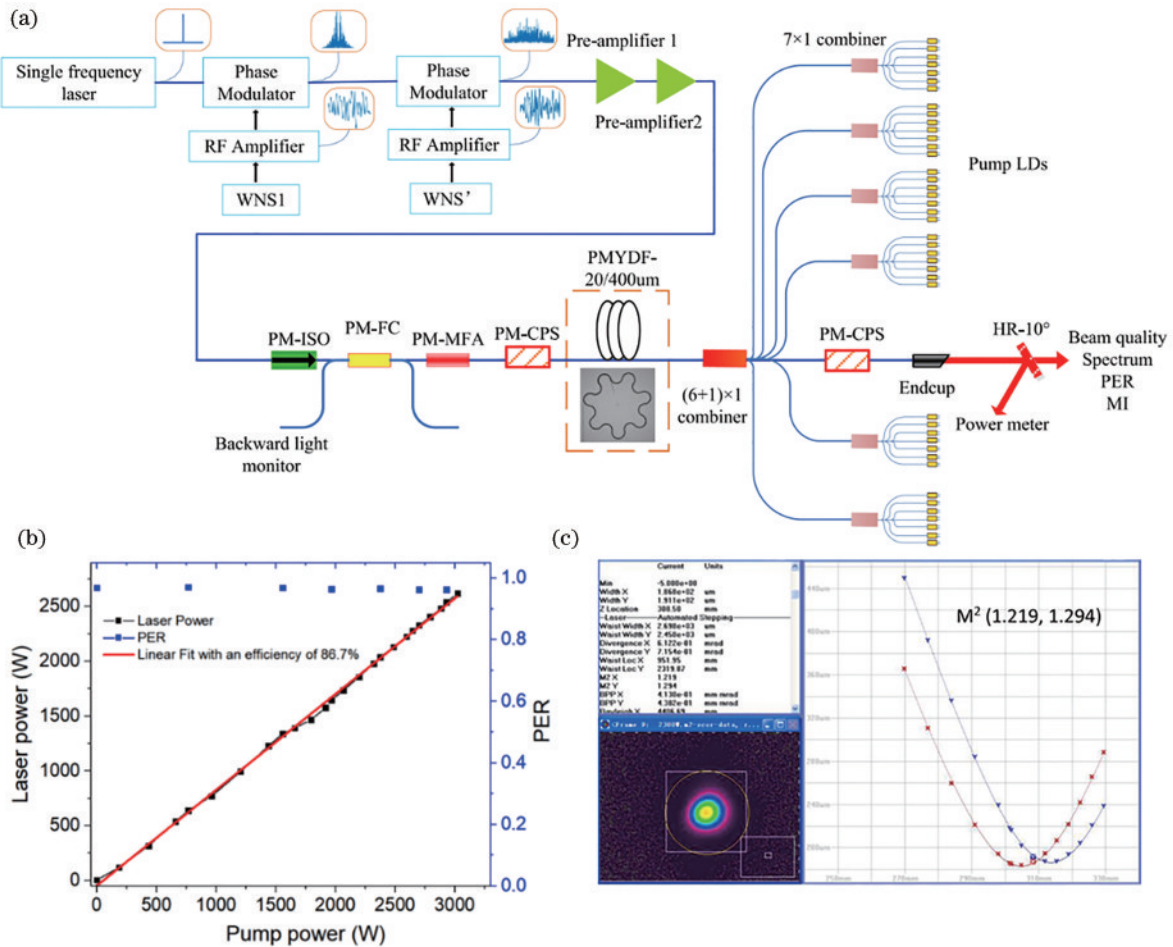


图 4 基于级联 WNS 调制的单频大功率窄线宽光纤放大器系统实验结构和结果图<sup>[19]</sup>。(a)实验结构图;(b)激光放大功率和 PER 随泵浦功率的关系图;(c) 2540 W 的光束质量测量图

Fig. 4 Experimental setup and results of single frequency high-power narrow-linewidth fiber amplifier system based on cascaded WNS modulation<sup>[19]</sup>. (a) Experimental setup; (b) laser amplification power and PER versus pump power; (c) measured beam quality at 2540 W

### 3.3 伪随机序列调制

伪随机二进制序列(PRBS)是一个经典的序列,其中“0”和“1”比特以相等且随机的概率出现,其频谱

分布是具有类高斯包络的频率梳,具有等间距的离散光功率谱密度,谱线间距是调制频率和模式长度的函数。PRBS 的频谱特征和白噪声非常接近,在一定宽

度的频域里保持均匀的功率密度谱,法国戴高乐大学和美国加州大学的研究人员最早开始 PRBS 用于高功率激光器种子源调制信号的研究<sup>[35-36]</sup>。之后,美国空军基地的 Zeringue 等<sup>[37-39]</sup>搭建实验平台验证 PRBS 信号在高功率激光器中抑制 SBS 效应的效果,在输出线宽为 6 GHz 的情况下,最大输出功率达到 1 kW。次年,该组研究人员改进 PRBS 序列,将线宽降低至 3 GHz,输出功率提升至 1.17 kW。2015 年,Anderson 等<sup>[40]</sup>研究发现,对于给定的光纤长度和信号线宽,PRBS 调制可以提供比 WNS 更好的频谱控制能力和 SBS 效应阈值增强因子。

2020 年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Liu 等<sup>[41]</sup>报道了基于 PRBS 相位调制,通过理论仿真和

实验验证调节 PRBS 谱线间隔,提升窄线宽光纤放大器输出功率的可行性,PRBS 调制信号的优化频谱如图 5 所示。采用如图 6 所示的四级掺杂 Yb 光纤放大器实验结构,在序列长度为 9 时,采用 2.2 GHz 低通射频滤波器,将调制信号频率间隔优化为 12.7 MHz,分别将布拉格反射 (DBR) 和分布式反馈 (DFB) 二极管激光输出信号功率放大至 1.2 kW 和 1.27 kW,系统展现出良好的 SBS 效应抑制效果。WNS 和 PRBS 相位调制技术在一定程度上抑制了 SBS 效应,提高了大功率窄线宽光纤激光器的输出功率。但 WNS 和 PRBS 所获得的光谱是高斯形,谱型的调节灵活度较低,实验研究表明,近矩形的光谱具有更佳功率阈值提升效果<sup>[42-43]</sup>,这为后续的光谱优化方案提供了思路。

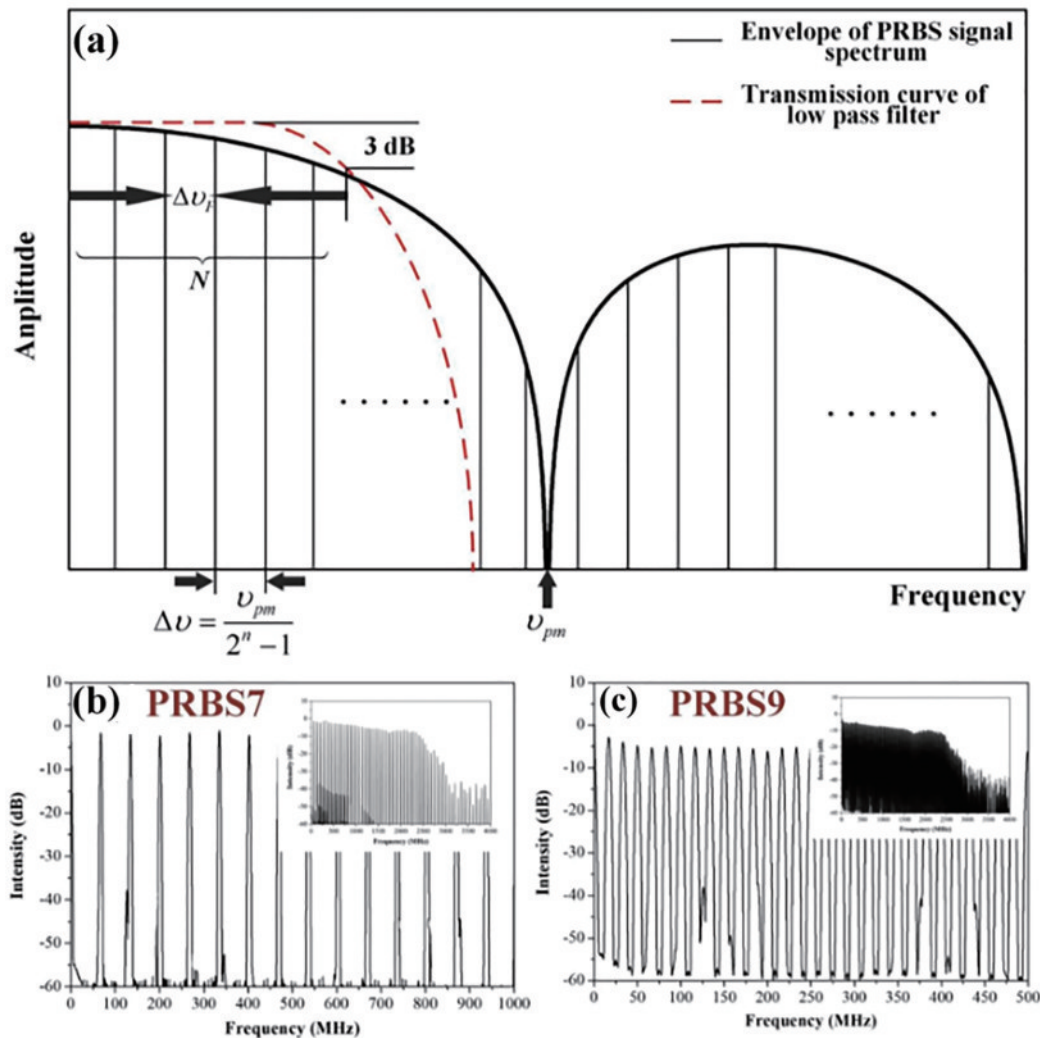


图 5 PRBS 调制信号优化<sup>[41]</sup>。(a) PRBS 调制信号和低通滤波后相位调制信号的频谱;(b) 调制频率为 8.5 GHz 的 PRBS7 经 2.2 GHz 低通滤波后的测量频谱图(插图:4 GHz 宽频谱图);(c) 调制频率为 8.5 GHz 的 PRBS9 经 2.2 GHz 低通滤波后的测量频谱图(插图:4 GHz 宽频谱图)

Fig. 5 PRBS modulation signal optimization<sup>[41]</sup>. (a) Spectrum of PRBS modulated signal and phase modulated signal after low-pass filtering; (b) measured spectrum of PRBS7 with 8.5 GHz modulation frequency after 2.2 GHz low-pass filtering (insert: wide spectrum of 4 GHz); (c) measured spectrum of PRBS9 with 8.5 GHz modulation frequency after 2.2 GHz low-pass filtering (insert: wide spectrum of 4 GHz)

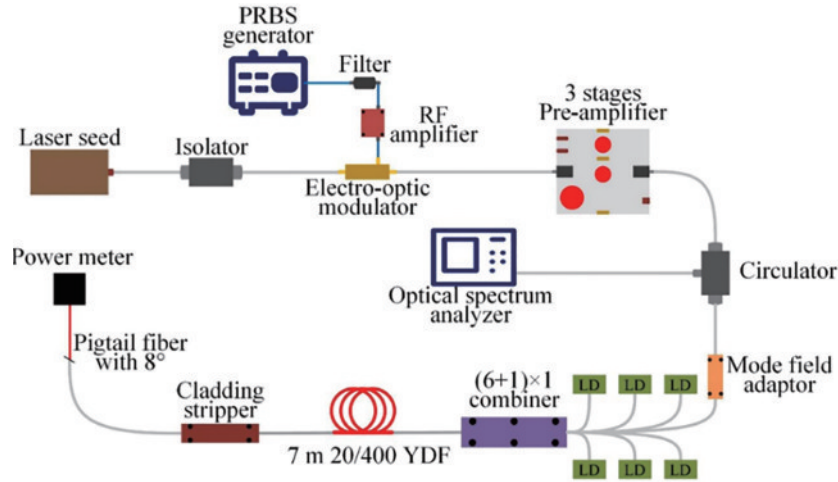


图 6 四级掺杂 Yb 光纤放大器实验框图

Fig. 6 Experimental structure of the four-stage Yb-doped fiber amplifier

### 3.4 调 P 序列调制

2020 年起,本课题组基于高阶相位调制和种子源展宽光谱优化,探索激光器功率提升新方案。通过增加相位调制深度,可以激发更多的高阶边带,利用单个相位调制器即可获得具有宽带宽的展宽信号。当 PM 由大功率单频电信号驱动时,会产生一系列高阶调制边带,如图 7(a)所示,在这种情况下,得到的信号频谱是完全离散的。当使用具有类高斯包络的高功率电信号驱动 PM 时,种子源线宽变宽并具有类高斯包络,如图 7(b)所示。理论上,使用相位调制方法,只是改变了光信号的相位信息,而幅度信息保持不变。基于 MOPA 结构的多级放大后,种子源的功率可以大大提

高。SBS 效应作为具有最低阈值的非线性效应,只要带宽内单个频点的信号功率高于其他信号,在放大过程中会优先被激发。因此,具有平坦的带内频谱和陡峭的带外滚降曲线的种子源展宽光谱具有更高的 SBS 效应阈值,同时减少带外功率的浪费。理想情况下,如果电驱动信号具有近似矩形的频谱,则种子源经过高阶相位调制后的频谱也接近于矩形。但由于信号发生器、电放大器(EA)和 PM 在不同频率下的非线性响应,在高频处电信号的功率会有所降低,进而影响 PM 后频谱的平坦度,如图 7(c)所示。具有近三角形包络的驱动信号,可以补偿高频下的低响应度,并实现近矩形展宽频谱,如图 7(d)<sup>[44]</sup>所示。

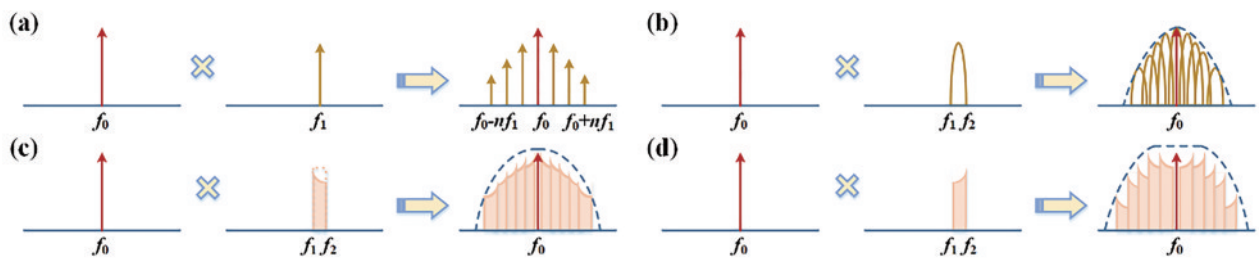


图 7 利用不同电驱动信号进行高阶相位调制以拓宽种子源带宽的原理<sup>[44]</sup>。(a) 单频信号; (b) 白噪声; (c) 具有矩形包络的宽带信号; (d) 具有陡峭三角形包络的宽带信号

Fig. 7 Principle of the high-order phase modulation to broaden the seed source bandwidth using various electrical driving signals<sup>[44]</sup>.

(a) A single-frequency signal; (b) white noise; (c) a broadband signal with a rectangular-like envelope; (d) a broadband signal with a steep triangle-like envelope

高阶相位调制下光谱的谱型控制难度较大,本研究利用任意波形发生器(AWG)的高精度可控性,设计可编程电驱动信号,以灵活控制展宽频谱形状和带内功率分布。通过改变二进制序列“0”和“1”在时域的序列分布,可以形成由“0”和“1”在时域和频域的特分布组成的多种信号。序列中相邻比特之间的反转概率(从“0”到“1”或从“1”到“0”)被定义为  $P$ ,这种序列类型被定义为反转概率可调的调  $P$  序列。对于完全随机

分布的序列,反转概率为 0.5。对于固定分布为“010101...”的序列,其反转概率为 1。在二进制序列中,信号的频域分布由时域中“0”和“1”的分布决定,信号功率谱分布与翻转概率  $P$ <sup>[45]</sup> 的关系可以表示为

$$P(f) = \frac{1}{B} \frac{\sin^2(\pi f/B)}{(\pi f/B)^2} \cdot \frac{4P(1-P)}{1 + (1-2P)^2 - 2(1-2P)\cos(2\pi f/B)}, \quad (2)$$

式中:  $B$  为信号速率,  $f$  为频率。不同  $P$  值下的调  $P$  序列幅度包络仿真如图 8<sup>[44]</sup> 所示。  $P$  值越高, 高频成分的幅度越高, 低频成分的幅度越低。该方法具有实现简单, 调节方便的优点, 通过改变信号速率和幅度, 可以修改

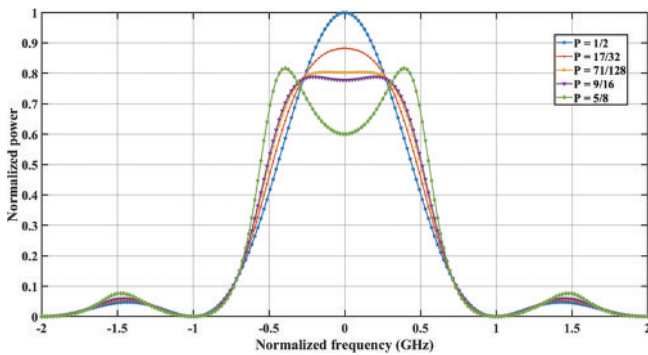


图 8 不同  $P$  值下的调  $P$  序列幅度包络仿真图<sup>[44]</sup>

Fig. 8 Amplitude envelope simulation diagram of  $P$ -turning sequence under different  $P$  values<sup>[44]</sup>

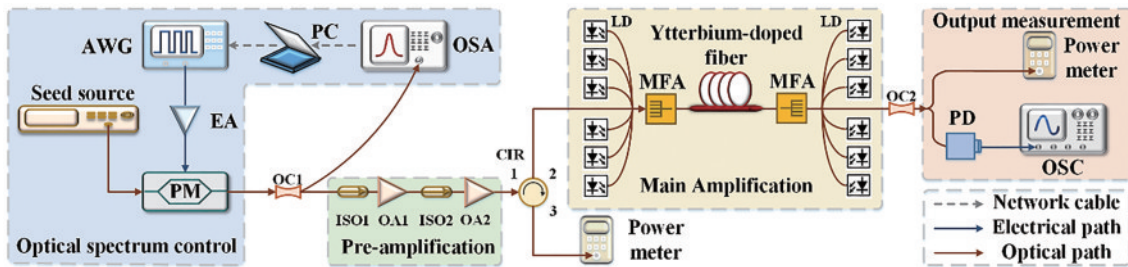


图 9 采用种子源光谱展宽和多级放大的高功率窄线宽激光器实验结构<sup>[44]</sup>

Fig. 9 Experimental setup of the proposed high-power narrow-linewidth fiber laser based on seed source spectrum broadening<sup>[44]</sup>

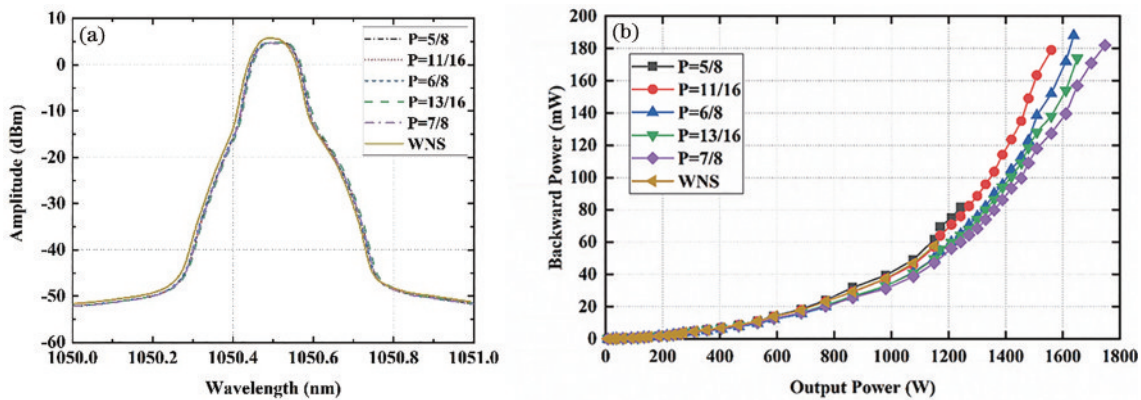


图 10 实验结果。(a) 不同  $P$  值下, 展宽后的种子源光谱图; (b) 级联白噪声与调  $P$  序列调制下, 激光器输出信号与反向回光信号的关系图<sup>[44]</sup>

Fig. 10 Experimental results. (a) Broadened optical spectra of the seed source different  $P$  values; (b) relationship between laser output signal and reverse return signal under the modulation of cascaded white noise and  $P$ -turning sequence<sup>[44]</sup>

进一步地, 本研究提出了使用 FPGA、DAC 代替 AWG, 如图 11(a)<sup>[46]</sup> 所示, 和单级相位调制器组成紧凑且低成本的光谱展宽模块, 可以实现调  $P$  序列的实时生成, 通过改变  $P$  值、信号速率和幅度, 即可实现对种子源展宽光谱的带宽和谱型进行实时调控。将级联 WNS 和模块生成的实时调  $P$  调谐序列用作驱动电信

指定带宽内高低频分量的功率分布, 有效提升种子源的带宽和谱型调整灵活性。

采用种子源光谱展宽和多级放大的高功率窄线宽激光器实验结构如图 9<sup>[44]</sup> 所示, 当电驱动信号速率为 2.5 Gb/s 时, 翻转概率  $P$  值为 5/8、11/16、6/8、13/16、7/8 时, 任意波形发生器输出信号作为相位调制器驱动电信号, 实验获得展宽后的种子源光谱图如图 10(a)<sup>[44]</sup> 所示, 此时信号带宽约 27 GHz。与级联白噪声调制相比, 相同带宽下, 激光器输出信号与反向回光信号的关系如图 10(b)<sup>[44]</sup> 所示。级联白噪声调制获得的激光器功率为 1150 W, 对应的反向功率为 57.6 mW。当  $P$  值为 5/8 时, 激光器输出功率为 1243 W, 此时的反向功率为 81.6 mW, 随着  $P$  值的增加, 激光器输出功率逐渐增加, 当  $P$  值为 7/8 时, 获得最高输出功率为 1748 W, 此时观察到自脉冲效应, 对应的反向功率为 182 mW。相同带宽下, 多次测试下激光输出功率变化幅度为 2%, 验证了该方案的激光功率稳定性。

号, 在相同的加宽带宽下测量 MOPA 激光系统的输出功率。不同带宽下, 激光器的正向输出功率和反向功率之间的关系如图 11(b) 所示。插图显示了示波器 (OSC) 观察到的自脉冲现象。当展宽带宽为 10 GHz 时, 使用级联 WNS 作为调制信号, 通过示波器观察到自脉冲效应时激光器的正向输出功率为 1068 W, 反向



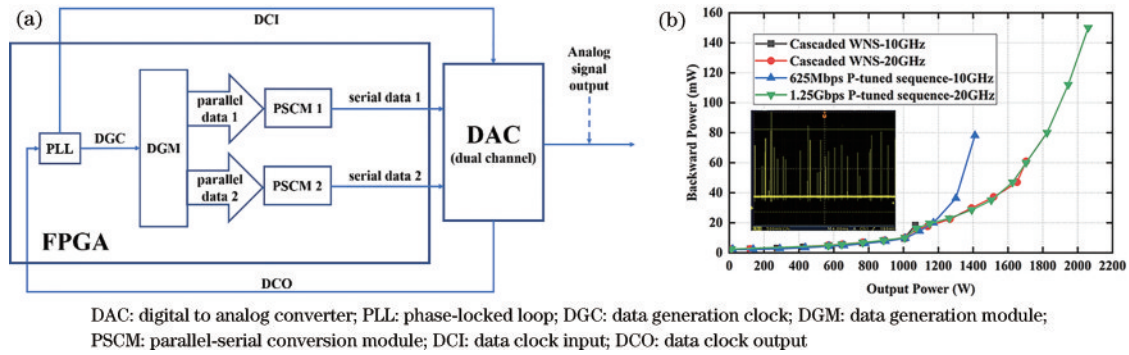


图 11 实验结果。(a)FPGA 和 DAC 信号生成模块;(b)分别以级联 WNS 和  $P=7/8$  的实时调  $P$  序列作为驱动信号,激光器正向输出功率和反向功率(插图:示波器观察到的自脉冲现象)<sup>[46]</sup>

Fig. 11 Experimental results. (a) FPGA and DAC signal generation module; (b) forward output power and reverse power of the laser using cascaded WNS and real-time  $P$ -turning sequence with  $P=7/8$  as driving signals, respectively (inset: self-pulse phenomenon observed by OSC)<sup>[46]</sup>

功率仅为 18.4 mW。相比之下,实时调  $P$  序列调制方案的输出功率为 1410 W,对应的反向功率为 95 mW。当种子源展宽带宽为 20 GHz 时,实时调  $P$  序列调制方案实现了 2060 W 的最大输出功率,与相同展宽带宽的级联 WNS 调制方案相比,功率增加了 356 W。激光器最大功率的提升充分证明了该方案的有效性和实用性,为实现紧凑、灵活、标准化的光谱展宽模块奠定了基础。

### 3.5 啁啾信号调制

2017 年,美国陆军研究实验室的 White 等<sup>[47]</sup>利用啁啾种子源打乱激光器和斯托克斯波之间的相干性,以提升高功率光纤放大器中 SBS 效应的阈值。采用

移除外镜后的垂直腔表面发射二极管激光器产生啁啾信号,引入光电反馈环路线性化啁啾频率的同时,稳定输出功率。通过如图 12(a)所示的基于啁啾二极管激光器(ChDL)的 SBS 效应抑制实验结构,测量获得不同啁啾频率下的激光器反向功率与正向输出功率如图 12(b)所示。在  $5 \times 10^{17}$  Hz/s 的啁啾频率和 19 m 长的传输光纤下,获得 SBS 效应阈值达 1.6 kW,结果显示阈值功率与光纤长度无关。相比之下,仅仅使用带宽为 40 GHz 的种子源更容易引起反向功率的尖峰,获得的功率阈值约 1.3 kW。研究进一步提出,对于多个功率放大器的相干合成,可以采用移相器补偿静态和动态的路径长度差异以稳定相位随时间的线性抖动。

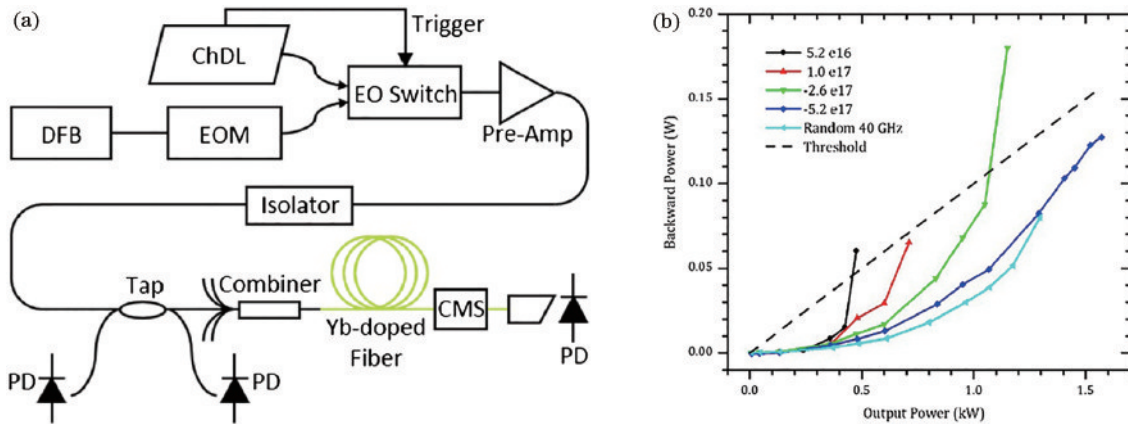


图 12 基于啁啾二极管激光器(ChDL)的 SBS 效应抑制实验框图与结果图<sup>[47]</sup>。(a)实验框图,分布式反馈布拉格(DFB)激光器、光电调制器(EOM)、光电二极管(PD)、包层模式剥离器(CMS);(b)不同频率啁啾调制的种子源以及由随机相位调制产生的带宽为 40 GHz 的种子源,放大后激光反向功率与正向输出功率图

Fig. 12 Experimental setup and results with chirped diode laser (ChDL) to suppress SBS effect<sup>[47]</sup>. (a) Experimental setup, distributed feedback Bragg (DFB) laser, electro-optic modulator (EOM), photodiodes (PD), and cladding mode stripper (CMS);

(b) backward power versus output power for various chirps, and for a seed with a bandwidth of 40 GHz, produced by random phase modulation

上述方案适用于周期为  $\mu\text{s} \sim \text{ms}$  量级的啁啾信号调制下,光谱带宽为 1~100 nm 的种子光功率放大过程的 SBS 效应抑制<sup>[48-49]</sup>。对于周期为 10~100 ns 的啁

啾调制与光谱合束所需的亚纳米级光谱,2019 年,White 等<sup>[43]</sup>进一步研究了分段抛物线相位的啁啾调制方案,图 13(a)为锯齿和三角形啁啾信号,图 13(b)

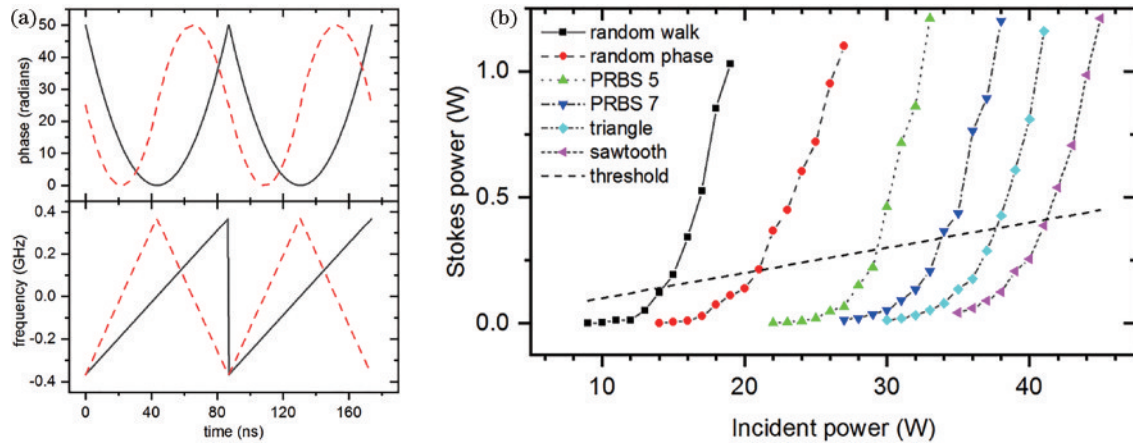


图 13 仿真结果。(a)锯齿(实线)和三角形(虚线)频率啁啾的相位(上)和频率(下)随时间变化;(b)不同调制格式下,激光功率与后向斯托克斯波功率的仿真图<sup>[43]</sup>

Fig. 13 Simulation result. (a) Phase (above) as a function of time, and frequency (below) as a function of time for the sawtooth (solid line) and triangle (dashed line) frequency chirp; (b) simulation diagram of laser power and backward Stokes wave power under different modulation formats<sup>[43]</sup>

为不同调制格式下,激光功率与后向斯托克斯波功率的仿真图。仿真采用 9 m 长无源光纤,当带宽被定义为包含总功率 85% 的频率范围,在 1.5 GHz 调制带宽下,激光功率放大过程中,周期为 23 ns 的抛物线相位啁啾调制的种子光阈值高出伪随机序列调制下阈值的 1.4 倍,所需要的最大相移约为 30 rad。结果显示,锯齿或三角形线性频率啁啾调制可以提高 SBS 效应阈值,并实现紧凑的展宽频谱。但是,扫频周期、相位和放大过程的光纤长度需要通过精确的计算匹配。

### 3.6 其他

当前,绝大多数种子源的展宽光谱幅度包络局限于高斯或平顶形,对于具有最高激光功率阈值的种子源光谱类型探索不足,仍需对驱动信号进行优化设计。自定义多频信号具有包括幅度、频率、频率间隔、带宽和相位等多维度的设计能力,可以实现展宽频谱和带内功率分布的高精度控制。不同带宽和形状的多频驱动信号的幅度包络仿真如图 14 所示,可以实现带宽可调节的矩形、三角形、弧形频谱包络。为了补偿光电器件在高频下的弱响应性,驱动信号的高频分量应该比低频分量具有更高的幅度。该方案具有更多维度、更高精度的谱型

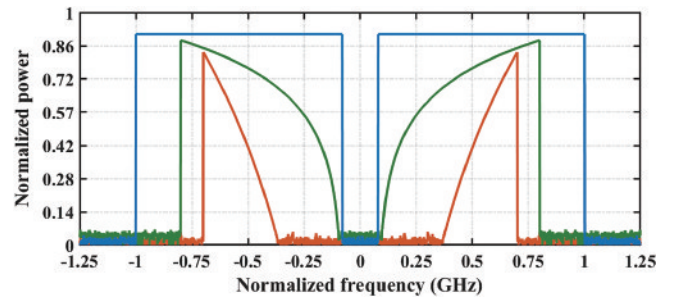


图 14 不同带宽和形状的多频驱动信号的幅度包络仿真图  
Fig. 14 Envelope simulation of multi-tone driving signals with different bandwidths and shapes

调节空间,可拓展至任意谱型的信号设计。

多频信号具有多维控制灵活性,但驱动信号带宽通常在 GHz 量级,频率间隔为 kHz 或 Hz,大大增加了设计复杂度。本研究进一步提出二值化多频信号以保持可配置的调谐性,同时降低设计复杂性<sup>[50]</sup>。二值化多频信号的时域和频域仿真图如图 15 所示。首先,根据目标频谱类型和带宽预设多频驱动信号;然后,设置幅度阈值,幅度高于阈值的频率分量设置为 1,否则设置为 0,经过二值化处理后,带内平坦度和频谱连续性

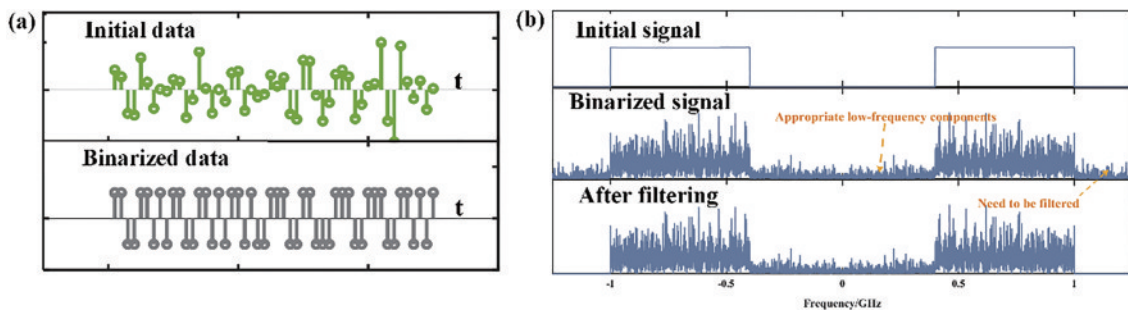


图 15 二值化多频信号的时域和频域仿真图。(a)时域;(b)频域

Fig. 15 Time-domain and frequency-domain simulation diagrams of the binarized multi-tone signals. (a) Time-domain; (b) frequency-domain

得到改善;最后,采用数字带通滤波器滤除谐波。通过在时域上调整阈值可以改变不同频率分量的信号幅度,从而控制频谱形状。

当二值化多频驱动信号的带宽从 312.5 MHz 增加到 1.25 GHz 时,展宽带宽从 10 GHz 到 30 GHz 的种子源测量光谱如图 16(a) 所示。受限于商用光谱仪的测量精度,无法观察到精细的光谱形状。本研究进一

步采用自制的高精度光谱测量方案,将频谱测量精度从 GHz 级提高到 MHz 级,为高精度频谱优化提供了依据。通过调谐二值化多频驱动信号的幅度、频率、相位等信息,实现多样化的展宽光谱。图 16(b) 展示了具有三角形、高斯和超高斯形状的展宽光谱,充分证明了二值化多频信号调制的灵活性,为不同场景下的谱型优化奠定基础。

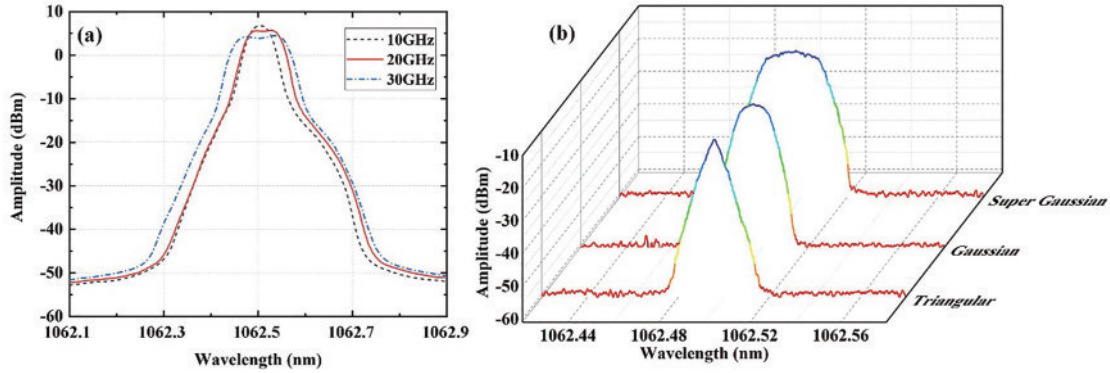


图 16 种子源展宽光谱图。(a)不同带宽;(b)不同形状

Fig. 16 Optical spectra of broadened seed sources. (a) Different bandwidths; (b) different spectrum types

除了上述调制信号设计方案,基于优化算法的驱动信号也被应用到种子光谱展宽的研究中。2018年,南安普敦大学光电子研究中心的 Harish 等<sup>[15]</sup>理论上研究对周期性相位调制进行非线性优化,抑制单模光纤中 SBS 效应的方法。仿真采用非线性多目标 Pareto 优化方法,使用含噪声的时间幅度域有限差分布里渊求解器,找到最佳的相位调制模式。使用 Pareto 优化算法获得的 10 个相位样本在  $\pm\pi$  的调制深度,1 m、1.5 m、2.5 m 和 5 m 四种光纤长度下的 SBS 效应阈值

功率与激光 RMS 线宽的关系如图 17(a) 所示,SBS 阈值和长度的乘积值  $P_{th} \times L$  与激光 RMS 线宽的关系如图 17(b) 所示。仿真结果显示,对于相同的激光线宽,较小的谱线间隔可以提高 SBS 效应阈值。对于给定的线宽,最大调制深度和调制频率对 SBS 效应的阈值影响较小,并且较短的光纤长度具有较高的阈值。该项研究提供了一种光谱展宽调制信号的优化思路,但没有考虑到激光放大机制中的阈值影响,相关研究仍在进行中。

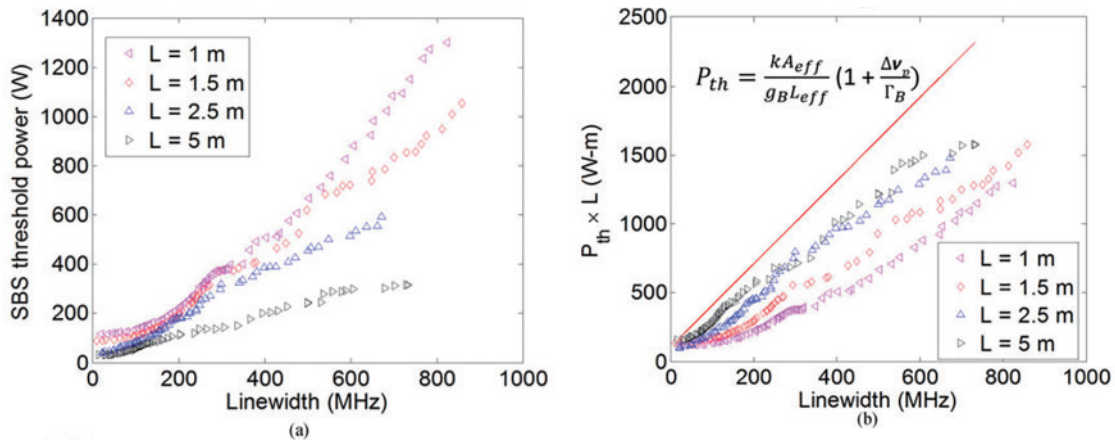


图 17 Pareto 算法优化结果。(a)SBS 效应阈值功率与激光 RMS 线宽的关系图;(b) SBS 阈值和长度的乘积值与激光 RMS 线宽的关系图<sup>[15]</sup>

Fig. 17 Optimization results of Pareto algorithm. (a) Relationship between threshold power of SBS effect and RMS linewidth of laser; (b) relationship between product of SBS threshold and length and RMS linewidth<sup>[15]</sup>

### 3.7 不同信号调制方案对比

不同调制信号下,1  $\mu\text{m}$  波段高功率窄线宽激光器性能比较如表 2 所示,包括单频信号、白噪声、PRBS、调 P 序列、多频信号和啁啾信号调制。其中,单频驱动

信号最容易产生,然而,其完全分离的光谱导致种子源光谱的平均功率较高,对 SBS 效应的抑制性能最差。白噪声具有连续的光谱,但功率谱分布仅限于高斯形状,通常采用级联相位调制的方案来实现具有较大带

表 2 不同调制信号下激光器性能比较

Table 2 Comparison of laser performance comparison of different electrical driving signals

Driving signal	Adjustment factor	Broadened optical spectrum	Advantage	Disadvantage
Sinusoidal signals	Amplitude, frequency	Optical frequency comb with Bessel function distribution	Easy to generate	Completely separated spectrum, high average power
WNS	Amplitude, bandwidth	Gaussian continuous spectrum	Continuous spectrum, tunable bandwidth	Unsatisfactory spectrum, random spikes
PRBS	Amplitude, bandwidth, frequency interval	Gaussian discrete spectrum	Easy to generate, tunable bandwidth	Unsatisfactory and discrete spectrum
Inversion probability-tuning sequence	Amplitude, bandwidth, frequency interval, spectral envelope	Tunable spectrum	Multi-dimensional controllable spectrum regulation, near-rectangular broadened optical spectrum, high in-band flatness, less random spikes	Discrete spectrum
Multi-tone signal	Amplitude, bandwidth, frequency spacing, spectral shape, phase	Controllable spectrum	Multi-dimensional spectral regulation, high in-band flatness, low random pulse	Discrete spectrum
Chirp signal	Amplitude, frequency, period, phase	Tunable spectrum	Multi-dimensional spectral regulation	Discrete spectrum, difficult to achieve period matching

宽的高斯形种子源频谱,一定程度上带来更高的成本。此外,其时域序列的随机性会导致随机尖峰,限制最大激光输出功率。PRBS是具有分离谱线的数字信号,其包络分布类似于WNS,通过控制频率间隔,RRBS的光谱可以实现与WNS调制情况下等效的输出功率,这为种子源光谱展宽提供了一种数字解决方案。

相比之下,调 $P$ 序列除了调整驱动信号的幅度、频率和带宽外,还可以通过调整驱动信号的频谱类型来实现展宽频谱的谱型设计。本文所提出的调 $P$ 序列调制可以通过改变相邻比特的反转概率,简单地修改调制频谱类型,从而显示出更好的非线性抑制性能。随着反转概率 $P$ 的增加,高频分量的能量也增加。调 $P$ 序列易于实现和调节,可以通过改变比特率和幅度实现频谱带宽调节。采用低带宽的单级高阶相位调制,即可实现宽带宽的光谱,可有效降低结构复杂度和尺寸。实验实现了可调谐带宽高达30 GHz的近似矩形光谱展宽,而驱动单带宽低于1.5 GHz。这种频谱控制的灵活性是前三种方案难以实现的。此外,该时间序列是预先设计的,与WNS的高时域随机性相比,在展宽光谱中的随机尖峰要少得多,具有更高的功率阈值和信号稳定性,从而提升激光输出功率的稳定性。

多频驱动信号、啁啾信号具有更多的谱型调节维度,有望改善种子源展宽光谱的带宽、谱型、滚降等特性,从而优化基于MOPA结构的高功率窄带宽光纤激光器系统,相关的谱型优化正在进一步研究中。未来发展需要体积小、功耗低、成本低的高功率激光器,同时具有较高的激光性能,这推动着具有实时可控、结构

紧凑的光谱展宽模块的发展,以满足不同场景的应用需求。

## 4 结束语

前沿科学研究、工业加工以及国防等重要领域的发展不断推动着高功率窄线宽连续光纤激光器的性能提升,技术成熟与产业化转换。本文重点介绍了采用外相位调制进行光谱展宽的种子源,在MOPA结构激光功率放大系统中的性能,调制信号类型从传统的白噪声、PRBS、单频信号,正在向调 $P$ 序列、多频信号、啁啾信号等具有更多维频谱调节灵活度的方向发展。此外,梯度下降法、多目标函数优化等多种算法也逐渐被应用到谱型的优化过程,以分析不同调制谱型对激光功率阈值的影响,兼顾高光束质量、高稳定性的同时,探究高功率激光器的功率极限。随着人工智能的发展,未来有望建立实时激光功率放大模型,实现智能化的种子源光谱设计与优化,为不同的应用场景与需求提供谱型设计思路。

## 参 考 文 献

- [1] 叶玉堂,肖峻,饶建珍,等. 光学教程[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2011.  
Ye Y T, Xiao J, Rao J Z. Optics course[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2011.
- [2] Jeong Y, Nilsson J, Sahu J K, et al. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(3): 546-551.

- [3] Yu C X, Augst S J, Redmond S M, et al. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2686-2688.
- [4] Kontur F J, Dajani I, Lu Y L, et al. Frequency-doubling of a CW fiber laser using PPKTP, PPMgSLT, and PPMgLN[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 12882-12889.
- [5] 程智伟, 祁百鑫, 张桐, 等. 3D-GH3536/R-GH3128 异种高温合金光纤激光对接焊接工艺研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(22): 2202013  
Cheng Z W, Qi B X, Zhang T, et al. Research on fiber laser butt welding process of 3D-GH3536/R-GH3128 dissimilar superalloy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49s(22): 2202013.
- [6] 王晨阳, 林卿, 吕超, 等. 蓝光辅助红外 MOPA 光纤激光对纯铜薄片点焊的研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(16): 1602008.  
Wang C Y, Lin Q, Lü C, et al. Blue laser-assisted infrared MOPA fiber laser spot welding of pure copper sheets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(16): 1602008.
- [7] 阎吉祥. 激光武器[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.  
Yan J X. *Laser weapons*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [8] 奚小明, 王蒙, 田鑫, 等. 基于单级 MOPA 结构实现 6 kW 全光纤窄谱激光输出[J]. *中国激光*, 2022, 49(11): 1115001.  
Xi X M, Wang M, Tian X, et al. Record high-power narrow-linewidth fiber laser based on one-stage master oscillator power amplification configuration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(11): 1115001.
- [9] Kim J, Yarrow M, Clarkson W. High power single-frequency continuous-wave Nd: YVO<sub>4</sub> master-oscillator power amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2006, 85: 539-543.
- [10] Liem A, Limpert J, Zellmer H, et al. 100-W single-frequency master-oscillator fiber power amplifier[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(17): 1537-1539.
- [11] 张敦港, 罗文殊, 董静, 等. 碳钢 MOPA 光纤激光器雕刻工艺优化[J]. *光学学报*, 2022, 42(20): 2014001.  
Zhang D G, Luo W S, Dong J, et al. Process optimization for MOPA fiber laser engraving of carbon steel[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(20): 2014001.
- [12] Liu W, Ma P F, Lai W C, et al. Evolution of relative intensity noise in high-power narrow-linewidth fiber laser systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6413-6419.
- [13] Li Z B, Huang Z H, Xiang X Y, et al. Experimental demonstration of transverse mode instability enhancement by a counter-pumped scheme in a 2 kW all-fiberized laser[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(2): 77-81.
- [14] Xu Y, Sheng Q, Wang P, et al. 2.4 kW 1045 nm narrow-spectral-width monolithic single-mode CW fiber laser by using an FBG-based MOPA configuration[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(13): 3740-3746.
- [15] Harish A V, Nilsson J. Optimization of phase modulation formats for suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 5100110.
- [16] Zha C W, Peng W J, Wang X J, et al. Self-pulsing in kilowatt level narrow-linewidth fiber amplifier with WNS phase-modulation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 19740-19751.
- [17] 胡妹玲, 张春熹, 王守朝, 等. 掺镱光纤激光器中的自脉冲效应[J]. *中国激光*, 2008, 35(s1): 45-48.  
Hu S L, Zhang C X, Wang S C, et al. Self-pulsing behaviors of Yb-doped fiber lasers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(s1): 45-48.
- [18] Platonov N, Yagodkin R, De La Cruz J, et al. Up to 2.5-kW on non-PM fiber and 2.0-kW linear polarized on PM fiber narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifiers in all-fiber format[J]. *Proceedings of SPIE*, 2018, 10512: 105120E.
- [19] Wang Y S, Feng Y J, Ma Y, et al. 2.5 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber MOPA with cascaded phase-modulation to suppress SBS induced self-pulsing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2020, 12(3): 1502815.
- [20] Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2010, 2(1): 1-59.
- [21] Alegria C, Jeong Y, Codemard C, et al. 83-W single-frequency narrow-linewidth MOPA using large-core erbium-ytterbium co-doped fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, 16(8): 1825-1827.
- [22] Gray S, Liu A P, Walton D T, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [23] Valero N, Feral C, Lhermite J, et al. 39 W narrow spectral linewidth monolithic ytterbium-doped fiber MOPA system operating at 976 nm[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1495-1498.
- [24] Liu A P. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15201-15209.
- [25] Zhang L, Cui S Z, Liu C, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [26] Shi W, Petersen E B, Yao Z D, et al. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2418-2420.
- [27] Wang X L, Zhou P J, Xiao H D, et al. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(8): 591-595.
- [28] Liu Y F, Lv Z W, Dong Y K, et al. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(1): 29-31.
- [29] Ma P, Tao R, Su R, et al. 1.89 kW all-fiberized and polarization-maintained amplifiers with narrow linewidth and near-diffraction-limited beam quality[J]. *Optics Express*,

- 2016, 24(4): 4187-4195.
- [30] Engin D, Lu W, Akbulut M, et al. 1 kW CW Yb-fiber-amplifier with  $<0.5$  GHz linewidth and near-diffraction limited beam-quality for coherent combining application [J]. *Proceedings SPIE*, 2011, 7914: 791407.
- [31] Liu Y K, Su R T, Ma P F, et al.  $>1$  kW all-fiberized narrow-linewidth polarization-maintained fiber amplifiers with wavelength spanning from 1065 to 1090 nm[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(14): 4213-4218.
- [32] Williamson R S III. Laser coherence control using homogeneous linewidth broadening: US07280568B2[P]. 2007-10-09.
- [33] Su R T, Yakun L, Yang B L, et al. Active polarization control of a 1.43 kW narrow linewidth fiber amplifier based on SPGD algorithm[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(4): 045802.
- [34] Su R T, Tao R M, Wang X L, et al. 2.43 kW narrow linewidth linearly polarized all-fiber amplifier based on mode instability suppression[J]. *Laser Physics Letters*, 2017, 14(8): 085102.
- [35] Mussot A, Le Parquier M, Szriftgiser P. Thermal noise for SBS suppression in fiber optical parametric amplifiers [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(12): 2607-2610.
- [36] Coles J B, Kuo B P P, Alic N, et al. Bandwidth-efficient phase modulation techniques for stimulated Brillouin scattering suppression in fiber optic parametric amplifiers [J]. *Optics Express*, 2010, 18(17): 18138-18150.
- [37] Zeringue C, Dajani I, Naderi S, et al. A theoretical study of transient stimulated Brillouin scattering in optical fibers seeded with phase-modulated light[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21196-21213.
- [38] Robin C, Dajani I, Zernique C, et al. Pseudo-random binary sequence phase modulation in high power Yb-doped fiber amplifiers[J]. *Proceedings SPIE*, 2013, 8601: 86010Z.
- [39] Anderson B M, Flores A, Dajani I. Filtered pseudo random modulated fiber amplifier with enhanced coherence and nonlinear suppression[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17671-17682.
- [40] Anderson B, Flores A, Holten R, et al. Comparison of phase modulation schemes for coherently combined fiber amplifiers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27046-27060.
- [41] Liu M Z, Yang Y F, Shen H, et al. 1.27 kW, 2.2 GHz pseudo-random binary sequence phase modulated fiber amplifier with Brillouin gain-spectrum overlap[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 629.
- [42] Yang Y F, Li B L, Liu M Z, et al. Optimization and visualization of phase modulation with filtered and amplified maximal-length sequence for SBS suppression in a short fiber system: a theoretical treatment[J]. *Optics Express*, 2021, 29(11): 16781-16803.
- [43] White J O, Young J T, Wei C L, et al. Seeding fiber amplifiers with piecewise parabolic phase modulation for high SBS thresholds and compact spectra[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2962-2974.
- [44] Shi M Y, Wu Z L, Li J, et al. High-power narrow-linewidth fiber lasers using optical spectrum broadening based on high-order phase modulation of inversion probability-tuning sequence[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 8448-8460.
- [45] Tanemura T, Takushima Y, Kikuchi K. Narrowband optical filter, with a variable transmission spectrum, using stimulated Brillouin scattering in optical fiber[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(17): 1552-1554.
- [46] Shi M Y, Yu M H, Fang Z W, et al. Real-time definite sequence modulation based spectral broadening scheme for high-power narrow-linewidth fiber laser[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(18): 6222-6229.
- [47] White J O, Harfouche M, Edgcombe J, et al. 1.6 kW Yb fiber amplifier using chirped seed amplification for stimulated Brillouin scattering suppression[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): B116-B122.
- [48] Satyan N, Vasilyev A, Rakuljic G, et al. Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback[J]. *Optics Express*, 2009, 17(18): 15991-15999.
- [49] Jayaraman V, Cole G D, Robertson M, et al. Rapidly swept, ultra-widely-tunable 1060 nm MEMS-VCSELs [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(21): 1331-1333.
- [50] Li J, Shi M Y, Wu Y, et al. A flat-top seed source using binarized multi-frequency signals modulation for high-power fiber lasers[C]//2022 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC), July 3-6, 2022, Toyama, Japan. New York: IEEE Press, 2022.