

## 基于级联相位调制的 4.9 kW 窄线宽单纤光纤激光器

曹婧<sup>1,2</sup>, 陈晓龙<sup>2</sup>, 杨依枫<sup>2</sup>, 李炳霖<sup>1,2</sup>, 刘兆和<sup>2</sup>, 郭晓晨<sup>2</sup>, 汪贺<sup>1,2</sup>, 孟俊清<sup>1,2\*</sup>, 何兵<sup>1,2\*\*</sup><sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光及应用技术重点实验室, 上海 201800;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 高功率窄线宽光纤激光器在遥感测量、引力波探测、光束合成等领域中应用广泛,但硅基光纤中的受激布里渊散射效应限制了其输出功率。对单频种子源进行相位调制以展宽线宽是常见的抑制受激布里渊散射的方法。然而,单一机理的射频相位调制对受激布里渊散射效应的阈值提升能力有限,已经不能满足近 5 kW 的激光功率需求。分析了伪随机二进制序列和正弦信号级联的相位调制对光谱展宽和受激布里渊散射效应抑制的影响,搭建了级联相位调制的高功率窄线宽光纤激光器,采用四级功率放大结构,在 46 GHz 均方根线宽下,实现了 4.93 kW 激光输出,中心波长为 1067.5 nm,斜率效率为 78%,光束质量为  $M^2 < 1.2$ 。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 受激布里渊散射; 相位调制

中图分类号 TN248.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221426

## 1 引言

随着单根光纤输出功率的不断提高,高功率光纤激光器在光通信、材料加工、医学、军事等领域中得到广泛应用。IPG Photonics 公司<sup>[1]</sup>和中国工程物理研究院<sup>[2-3]</sup>都实现了单纤 20 kW 的输出功率。为了进一步提升目标处的激光功率,研究者提出了激光光束合成技术。激光光束合成技术包括相干合成和光谱合成,两种合成技术均要求单路激光线宽窄,以保证合成效果。此外,遥感测量、非线性频率转换、引力波探测等领域<sup>[4-7]</sup>对窄线宽光纤激光器的需求也逐年提升,推动着窄线宽光纤激光器向更高谱亮度方向发展。

数千瓦级功率、GHz 量级线宽的窄线宽光纤激光器被广泛应用在相干及光谱合成技术中,但是其受到非线性效应、模式不稳定等物理因素的影响,功率拓展受限,其中,受激布里渊散射(SBS)是影响高功率窄线宽光纤放大器功率定标放大的主要因素。当入射光功率超过 SBS 阈值,后向斯托克斯光功率急剧增加,易对种子、隔离器等器件造成损伤。目前,SBS 抑制技术集中在两大方向:一个是 SBS 抑制光纤的设计和制备,另一个是光场的相位调制技术。SBS 抑制光纤主要包括大模场光纤以及新型光纤。2007 年,Gray 等<sup>[8]</sup>使用谱宽为 3 kHz 的光纤激光器作为信号源,主放大级增益光纤纤芯直径为 39  $\mu\text{m}$ 。该梯度掺杂 Al-Ge 光纤的长度为 8.5 m,实现了 502 W 功率输出。然而,随着纤芯的增大,光纤中存在多种模式,横模不稳定现

象<sup>[9]</sup>随之出现,严重影响了光束质量,阻碍了功率的进一步提升。近年来,特殊设计的新型光纤被广泛应用在高功率光纤激光器中。2020 年,Lai 等<sup>[10]</sup>搭建了全光纤单频光纤放大器,增益介质采用具有强泵浦吸收的大模场长锥形光纤,综合抑制了受激布里渊散射、模式不稳定和放大自发辐射效应,实现了 550 W 近衍射极限单频激光输出。2021 年,Pulford 等<sup>[11]</sup>在搭建的窄线宽激光器中使用掺镱的 25  $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$  全固态光子带隙光纤作为增益介质,同时采用伪随机二进制序列(PRBS)相位调制对种子源进行展宽,有效抑制了模式不稳定和 SBS。该激光器在 8 GHz 线宽下实现了 1.37 kW 激光输出。通过设计新型光纤,可以实现对 SBS 的有效抑制,但是其加工难度大,掺杂物的成分和浓度难以准确控制,容易产生噪声干扰。此外,改变光纤温度场<sup>[12]</sup>和应力场<sup>[13]</sup>分布也是 SBS 抑制方案中较为常见的方法。然而,该方案需要考虑不同光纤部分的温度和应力,大大增加了系统的复杂度,实际应用较为困难。

近年来,为了实现更加简单有效的 SBS 抑制,研究者致力于对窄线宽光纤激光器的单频种子源进行相位调制,常见的相位调制有正弦相位调制<sup>[14]</sup>、白噪声相位调制<sup>[15]</sup>、PRBS 相位调制<sup>[16]</sup>、平顶光谱相位调制<sup>[17]</sup>、分段抛物线相位调制<sup>[18]</sup>等。在正弦相位调制方面,2011 年,Fibertek 公司运用二级正弦调制将 3 dB 线宽展宽到 0.45 GHz,主放大级采用自制的高掺镱大模场光纤,实现了 1 kW 输出,光束质量  $M^2 < 1.4$ <sup>[14]</sup>。2016

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2022-12-05; 录用日期: 2023-01-12; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 中国科学院青年创新促进会(2020252)、国家重点研发计划(2018YFB0504500)

通信作者: \*jqmeng@siom.ac.cn; \*\*bryanho@siom.ac.cn

年,国防科技大学采用三级正弦调制(三级调制频率分别为 17 GHz、6 GHz 和 100 MHz),将 SBS 阈值提高了 18 dB,实现了 1.89 kW 线偏振激光输出,3 dB 带宽为 45 GHz,光束质量  $M^2 < 1.3$ <sup>[19]</sup>。然而,单一的正弦调制仅能产生有限的谱线数目,对 SBS 的阈值提升能力有限,已经不能满足激光器的功率发展需求。

白噪声相位调制可将光谱带宽展宽至数十 GHz,级联后甚至可将光谱展宽至百 GHz,通过使用窄带低通滤波器可以实现对线宽的自由控制。2019 年,中国工程物理研究院采用白噪声相位调制对单频种子源光谱进行展宽,当 3 dB 线宽为 13 GHz 时,输出功率为 1.5 kW,当将 3 dB 线宽进一步展宽至 32 GHz 时,实现了 2.62 kW 激光输出,光束质量  $M^2 < 1.3$ <sup>[15]</sup>。该系统的功率提升受限于模式不稳定。该研究机构在 2021 年运用二级白噪声展宽,在 1064 nm 波长下将光纤放大器功率提高到 5.07 kW,信噪比为 35 dB,最大输出功率下 3 dB 带宽为 98 GHz,光束质量接近衍射极限<sup>[20]</sup>。2019 年,本课题组采用正弦和白噪声混合相位调制,并综合使用双向泵浦、缩短光纤长度等方法,在 3 dB 线宽为 0.181 nm 时实现了 3.01 kW 激光功率输出<sup>[21]</sup>。2022 年,国防科技大学对中心波长为 1064 nm 的线偏振单频激光器进行白噪声相位调制,实现了 4515 W 激光输出,3 dB 带宽为 87.4 GHz,系统中没有观察到 SBS 效应,最高功率下偏振消光比为 10.3 dB<sup>[22]</sup>。

然而,由于白噪声是非周期信号,激光线宽将围绕基频均匀展宽。当线宽展宽较大时,布里渊增益谱易与后向瑞利散射光发生重叠,导致 SBS 自注入效应。这将为 SBS 过程提供种子光,使得 SBS 阈值降低。Flores 等<sup>[23-25]</sup>在 2014 年发现白噪声相位调制下 SBS 增强因子受光纤长度的影响较大,而 PRBS 相位调制可以通过改变模式长度来减轻长度依赖性。通过减小光纤长度、优化 PRBS 模式长度可以实现比白噪声相位调制更好的 SBS 抑制效果。随后,该课题组采用时钟频率为 2.88 GHz、模式为 PRBS9(即 PRBS 码型为 9)的信号对种子源进行相位调制。实验中采用低通滤波器对 PRBS 信号中的高阶旁瓣进行滤波,最终滤波后的 SBS 阈值比不滤波提高了 12.4%。2016 年,林肯实验室基于自研的镀金光纤,使用 PRBS 相位调制技术,实现了保偏光纤放大器 3.1 kW 功率输出,光束质量  $M^2 < 1.2$ ,线宽为 12 GHz<sup>[16]</sup>。nLight 公司选用商售 20  $\mu\text{m}/40 \mu\text{m}$  非保偏光纤,使用模式为 PRBS7(即 PRBS 码型为 7)的信号对种子源进行相位调制,在 20 GHz 线宽下实现了 2.6 kW 的输出,光束质量  $M^2 < 1.05$ <sup>[26]</sup>。2020 年,本课题组通过优化 PRBS 信号谱线间隔,分别调制了分布式布拉格反射(DBR)和分布式反馈(DFB)单频种子源,在 2.2 GHz 低通滤波器滤波下实现了 1.2 kW 和 1.27 kW 的输出,光束质量  $M^2 < 1.2$ <sup>[27]</sup>。

在小于 50 GHz 线宽范围内,采用单一的 PRBS 调制技术提高 SBS 阈值时,其阈值增强因子不能满足需

求,需尝试级联相位调制方法,实现 50 GHz 线宽范围内的功率定标放大。本文理论分析了 PRBS 相位调制的大模场光纤系统对 SBS 阈值的影响,通过选择合适的滤波器截止频率和 PRBS 调制频率、调制深度参数,实现了对 SBS 较好的抑制。通过仿真,研究了正弦相位调制的调制频率和调制幅度对激光光谱的影响。在理论研究的基础上,搭建了基于级联相位调制的窄线宽光纤激光器系统。采用 PRBS 和正弦两级相位调制,单频种子源均方根线宽被展宽至 46 GHz,四级放大结构实现了功率为 4.93 kW 的窄线宽激光输出,工作波长为 1067.5 nm,系统斜率效率为 78%,光束质量  $M^2 < 1.2$ 。

## 2 基本原理

PRBS 相位调制生成的是周期离散功率谱,频谱是调制频率和 PRBS 模式长度的函数,PRBS 典型的模式是  $2^n - 1$ ,  $n$  代表的是该模式下移位寄存器的长度, $2^n - 1$  模式包含除 null 模式之外的所有可能的  $n$  位(0 和 1)的组合。在实验中,0 和 1 分别代表调制深度 0 和  $\pi$ 。PRBS 相位调制即通过差值为  $\pi$  的快速相位变换,抑制 SBS 的产生和增长。在 PRBS 相位调制技术中,通常还会采用低通滤波器对 PRBS 信号进行滤波,通过内符号干涉效应打断单周期内的驻留时间<sup>[28]</sup>,进一步提升 SBS 抑制能力。PRBS 相位调制光场信号的光谱包络为  $\text{sinc}^2$  函数线型,如图 1 所示,其中,竖线为 PRBS 光谱所呈现的周期性离散光频梳,实线即为  $\text{sinc}^2$  包络,虚线为低通滤波器的传输曲线,对应的光谱可表示为

$$I_{L,m} = A \text{sinc}^2\left(\frac{m\Delta\nu}{\nu_{\text{pm}}}\pi\right), \quad (1)$$

式中: $A$  为调制系数; $\Delta\nu$  为谱线间隔; $\nu_{\text{pm}}$  为调制频率; $m$  为离散的频率分量,取不为 0 的整数。

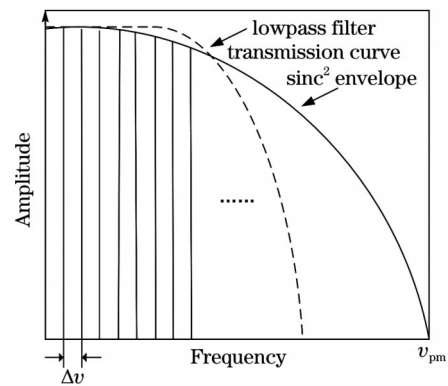


图 1 低通滤波后的 PRBS 相位调制光谱

Fig. 1 PRBS phase modulation spectrum after lowpass filtering

PRBS 相位调制光谱是一系列等间距的离散谱线,谱线间隔为  $\Delta\nu = \nu_{\text{pm}} / (2^n - 1)$ 。基于本课题组前期的理论工作<sup>[29-30]</sup>,当滤波器截止频率与调制频率  $\nu_{\text{pm}}$

的比值为 0.53、调制深度为  $0.55\pi$  时,单位光谱线宽对 SBS 的抑制最大,此时光谱如图 2 所示,呈现出近平顶的形态。均方根光谱带宽 (GHz) 为 PRBS 码率 (GHz) 的 84% 左右。然而,受限于 PRBS 的相位调制器的码率,若要实现均方根光谱带宽超过 40 GHz,需要码率超过 47 GHz 的码型发生器,对器件要求过高。因此本文采用 PRBS 相位调制级联正弦信号实现混合相位调制,进一步展宽光谱,以达到进一步抑制 SBS 的目的。

对单色场进行正弦相位调制时,调制函数<sup>[31]</sup>可表示为

$$\varphi(t) = \gamma \sin(\Delta\omega t), \quad (2)$$

式中: $\gamma$ 为调制幅度; $\Delta\omega$ 为调制频率; $t$ 为时间。

正弦相位调制后的光场分布为

$$\begin{aligned} \tilde{E}_L(0, t) = A_L^0 \{ & J_0(\gamma) \cos(\omega t) + J_1(\gamma) \cos[(\omega + \Delta\omega)t] - J_1(\gamma) \cos[(\omega - \Delta\omega)t] + J_2(\gamma) \cos[(\omega + 2\Delta\omega)t] - \\ & J_2(\gamma) \cos[(\omega - 2\Delta\omega)t] + \dots \}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $J_n$ 是第一类  $n$  阶贝塞尔函数。由式(3)可知,调制后的光谱在正弦信号频率整数倍处激发出离散边带,中心频率两旁的边带对称,第  $n$  条边带的功率谱密度可表示为

$$P_{L,n} \propto J_n^2(\gamma). \quad (4)$$

单频激光经正弦调制后频谱将出现数条边带,且在基带两边呈对称分布。图 3 中展示了不同调制幅度和调制频率下的激光光谱。由图 3(a)、(b)可知,随着

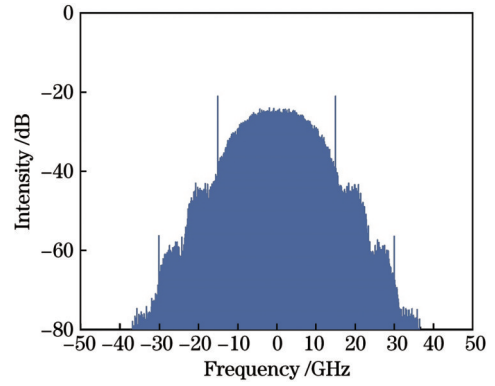


图 2 当滤波器截止频率与调制频率的比值为 0.53、调制深度为  $0.55\pi$  时 PRBS 相位调制后的频谱图

Fig. 2 Spectrum after PRBS phase modulation when ratio of filter cutoff frequency to modulation frequency is 0.53 and modulation depth is  $0.55\pi$

调制幅度的增加,谱线的相对强度也发生变化。由图 3(a)、(c)可知,当减小调制频率时,谱线间隔和光谱线宽明显减小,谱线数目明显增多。因此,可以通过改变调制频率和调制深度,在一定线宽内得到三单频(基频与  $\pm 1$  级边带等高的光谱形式),即  $J_0 = J_1$ 。本文中正弦相位调制频率为 9.7 GHz,  $\gamma = 0.458\pi$ 。调制后的光谱如图 4 所示,基带与第一边带具有相同的幅值,谱线间隔为 9.7 GHz。

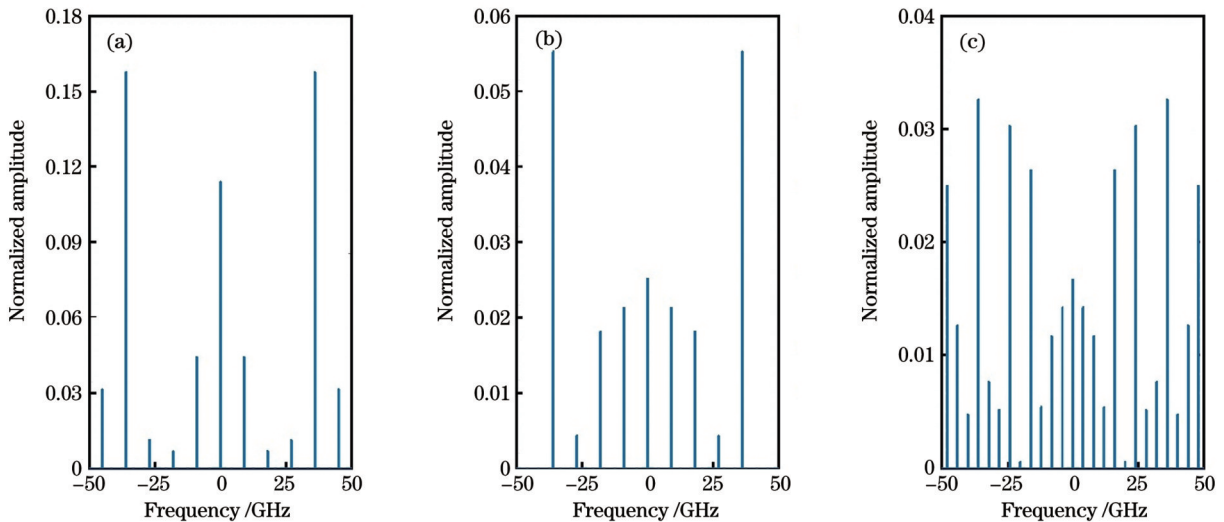


图 3 不同调制频率和调制幅度下的正弦相位调制光谱。(a)调制频率为 9 GHz,调制幅度为  $6\pi$ ; (b)调制频率为 9 GHz,调制幅度为  $3\pi$ ; (c)调制频率为 4 GHz,调制幅度为  $6\pi$

Fig. 3 Sinusoidal phase modulation spectra under different modulation frequencies and modulation amplitudes. (a) Modulation frequency is 9 GHz and modulation amplitude is  $6\pi$ ; (b) modulation frequency is 9 GHz and modulation amplitude is  $3\pi$ ; (c) modulation frequency is 4 GHz and modulation amplitude is  $6\pi$

个级联 PRBS 和正弦相位调制后的光谱如图 5 所示。在正弦调制频谱中,基带与第一边带处产生了三

个相同的 PRBS 调制频谱,频谱间互相重叠,在实现光谱展宽的同时,填补了正弦相位调制时的谱线间隔。



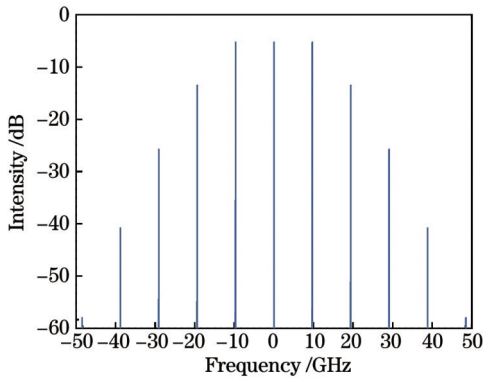


图4 调制频率为 9.7 GHz、调制幅度为  $0.458\pi$  时的正弦相位调制频谱

Fig. 4 Sinusoidal phase modulation spectra when modulation frequency is 9.7 GHz and modulation amplitude is  $0.458\pi$

三单频的正弦相位调制形式使得级联后的调制光谱呈现出比单级 PRBS 相位调制更好的近平顶形态, 获得了更好的 SBS 抑制效果。

### 3 实验及分析

伪随机序列及正弦级联相位调制窄线宽光纤激光器的系统结构如图 6 所示, 其中, CPS 为包层光剥除器, YDF 为掺镱光纤, ISO 为光隔离器, LD 为半导体

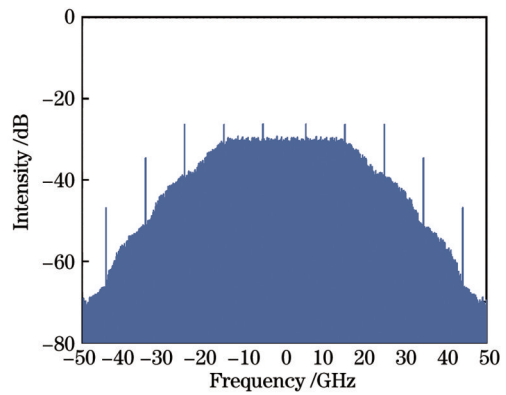


图5 级联 PRBS 和正弦相位调制后的频谱

Fig. 5 Spectrum after cascaded PRBS and sinusoidal phase modulation

激光器, OSA 为光谱仪, MFA 为模场适配器。种子源采用单频光纤激光器, 中心波长为 1067.5 nm, 光谱 3 dB 带宽小于 20 kHz, 输出功率为 10 mW。激光器系统采用四级功率放大结构。前三级预放系统中使用的增益光纤为  $10\ \mu\text{m}/125\ \mu\text{m}$ , 光纤的吸收系数为  $1.9\ \text{dB}/\text{m}@915\ \text{nm}$ , 长度约为 3 m。三级放大输出功率分别为 100 mW、1 W 和 15 W。在第三级预放和主放大级之间采用环形器测量反向传输的散射光光谱。

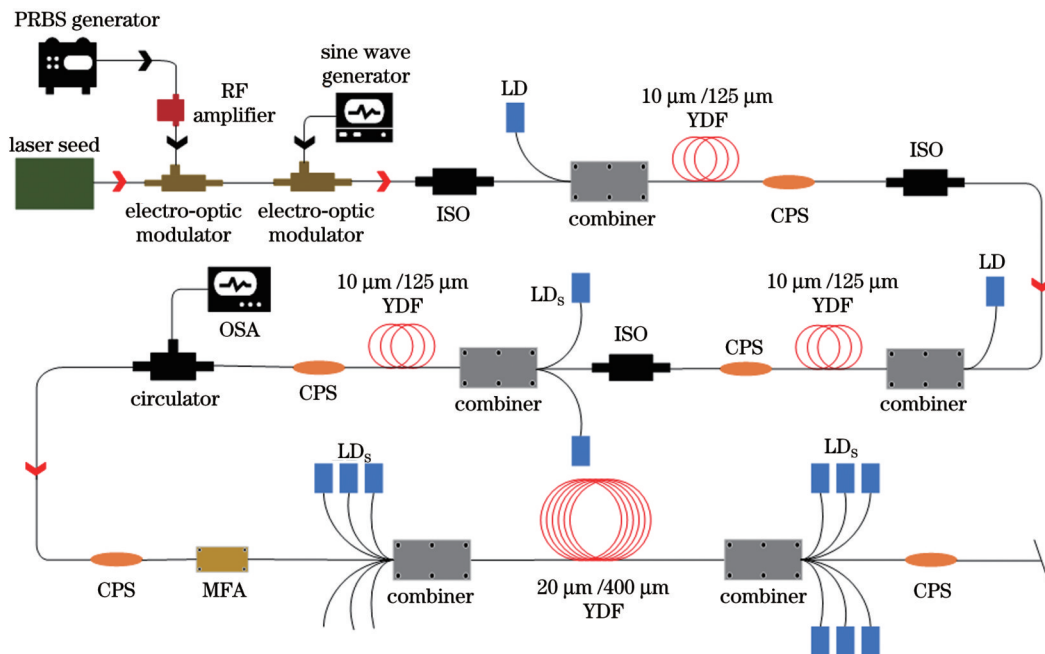


图6 窄线宽光纤激光器系统的结构示意图

Fig. 6 Structural diagram of narrow linewidth fiber laser system

系统预放级包含相位调制系统, 为了实现对 SBS 的抑制, 采用 PRBS 和正弦级联相位调制。PRBS 信号发生器和低通滤波器用于生成具有特定带宽和任意谱线间隔的伪随机二进制序列信号。实验中 PRBS 调制参数如下: 模式为 PRBS9, 调制频率为 15 GHz, 低通滤波器截止频率为 8 GHz。实验中正弦信号调制参

数如下: 调制频率为 9.7 GHz, 调制幅度为  $0.458\pi$ 。主放大级使用 9 支 LD 泵浦源, 中心波长为 976 nm。为更有效地抑制 SBS 和模式不稳定, 系统使用双向泵浦, 前向泵浦与后向泵浦比例约为 2:3。增益光纤的数值孔径(NA)为 0.065, 吸收系数为  $0.4\ \text{dB}/\text{m}@915\ \text{nm}$ , 长度约为 12 m。为消除包层光, 在各级之间连接包层光

剥离器。在种子源和各级预放之间连接光隔离器,防止后向光对前级器件造成损坏。在放大器输出端熔接了高功率包层光剥除器以消除包层中的残余泵光,尾纤切 $8^\circ$ 角输出以避免端面反射。

实验中监测均方根线宽为 20 GHz 和 46 GHz 时的输出功率和后向传输功率。图 7(a) 为实验中均方根线宽为 20 GHz 和 46 GHz 时调制后的激光光谱图。图 7(b) 为两种均方根线宽下的后向光功率及 SBS 阈值。SBS 阈值定义为后向功率与前向输出功率的比值达到  $10^{-4}$  时的前向功率,图 7(b) 中直虚线即为 SBS 阈值线。当线宽为 20 GHz 时,在输出功率为 2.2 kW 处

后向功率开始呈指数型增长,该线宽下的 SBS 阈值约为 3 kW。而在线宽为 46 GHz 的情况下,激光光谱更为平坦,SBS 阈值约为 4.5 kW。由于实验过程中没有观察到明显的 SBS 现象,因此继续提升输出功率至 4.93 kW。图 8 为不同输出功率下的前向光谱图,可以看出,在功率放大过程中,中心波长没有发生明显偏移。在激光器输出功率为 1、2、3 kW 时,均方根线宽分别为 41、43、46 GHz,未出现明显的光谱展宽现象。实验中测量系统单频阈值为 15 W,增强因子为最大输出功率与单频阈值的比值。因此,在最大输出功率为 4.93 kW 时,获得了 328 的增强因子。

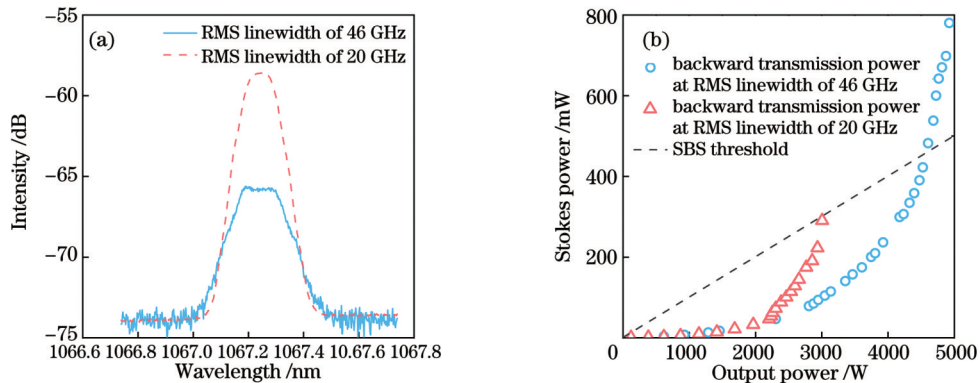


图 7 不同线宽下的光谱图和后向传输功率曲线。(a) 当均方根线宽为 20 GHz 和 46 GHz 时的光谱图; (b) 当均方根线宽为 20 GHz 和 46 GHz 时的后向传输功率图及 SBS 阈值随输出功率的变化

Fig. 7 Spectra and backward transmission power curves under different linewidths. (a) Spectra at root mean square (RMS) linewidths of 20 GHz and 46 GHz; (b) backward transmission power curves at RMS linewidths of 20 GHz and 46 GHz and SBS threshold versus output power

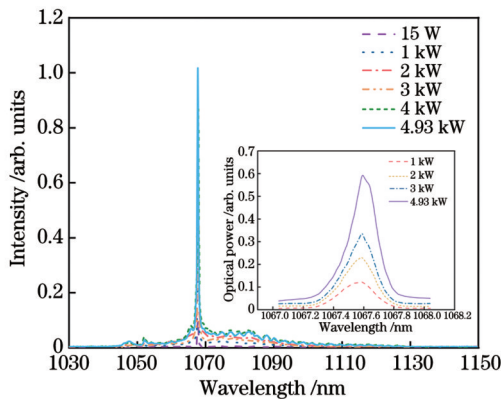


图 8 不同功率下的前向输出光谱图

Fig. 8 Forward output spectra under different powers

最终,当泵浦功率为 6358 W 时,激光器输出功率达到 4.93 kW,输出特性曲线如图 9 所示。激光器输出功率随着泵浦功率的增长呈线性变化,斜率效率为 78%,光束质量  $M^2 < 1.2$ 。实验中未观察到 SBS 效应和横模不稳定现象。

## 4 结 论

分析了 PRBS 相位调制和正弦相位调制展宽激光光谱、抑制 SBS 效应的物理机制。理论研究了 PRBS

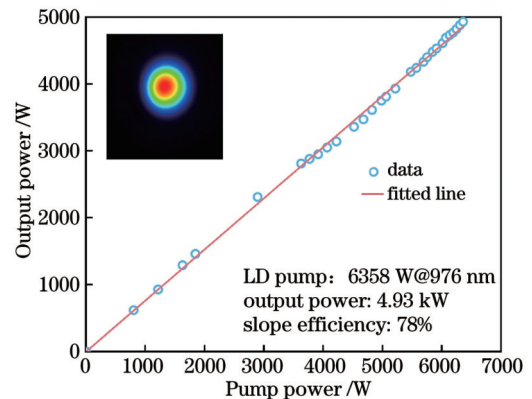


图 9 激光器输出特性曲线

Fig. 9 Laser output characteristic curve

调制频率和模式长度对光谱的影响,在 PRBS 信号最佳滤波器截止频率与调制频率下,实现了单位光谱线宽对 SBS 的最佳抑制效果。通过理论仿真,得到正弦信号的调制深度和调制频率对激光频谱的影响。基于理论指导,实验中搭建了基于级联相位调制的窄线宽单纤光纤激光器。通过级联 PRBS 和正弦相位调制,对种子源光谱进行展宽。对比不同均方根线宽下的 SBS 阈值及输出功率,经四级光纤放大后,在种子源均方根线宽为 46 GHz 时,输出功率达到 4.93 kW。系统

斜率效率为 78%，光束质量  $M^2 < 1.2$ ，实验中没有观察到明显的 SBS 现象和横模不稳定现象。

## 参 考 文 献

- [1] Shiner B. The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market[C]//2013: Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), June 9-14, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2013: AF2J. 1.
- [2] 林傲祥, 肖起榕, 倪力, 等. 国产 YDF 有源光纤实现单纤 20 kW 激光输出[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0916003.  
Lin A X, Xiao Q R, Ni L, et al. Domestic YDF active fiber realizes single fiber 20 kW laser output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0916003.
- [3] 李峰云, 黎玥, 宋华青, 等. 全国产光纤材料器件实现高 SRS 抑制比 20.88 kW 输出[J]. 中国激光, 2021, 48(21): 2116002.  
Li F Y, Li Y, Song H Q, et al. The national optical fiber material devices achieve high SRS rejection ratio of 20.88 kW output[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(21): 2116002.
- [4] Wei L W, Cleva F, Man C N. Coherently combined master oscillator fiber power amplifiers for Advanced Virgo[J]. Optics Letters, 2016, 41(24): 5817-5820.
- [5] Mourou G, Brocklesby B, Tajima T, et al. The future is fibre accelerators[J]. Nature Photonics, 2013, 7(4): 258-261.
- [6] Bretkopf S, Eidam T, Klenke A, et al. A concept for multiterawatt fibre lasers based on coherent pulse stacking in passive cavities[J]. Light: Science & Applications, 2014, 3(10): e211.
- [7] 周朴, 粟荣涛, 马闳星, 等. 激光相干合成的研究进展: 2011—2020[J]. 中国激光, 2021, 48(4): 0401003.  
Zhou P, Su R T, Ma Y X, et al. Review of coherent laser beam combining research progress in the past decade[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(4): 0401003.
- [8] 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.
- [9] Jauregui C, Stihler C, Limpert J. Transverse mode instability[J]. Advances in Optics and Photonics, 2020, 12(2): 429-484.
- [10] Lai W C, Ma P F, Liu W, et al. 550 W single frequency fiber amplifiers emitting at 1030 nm based on a tapered Yb-doped fiber [J]. Optics Express, 2020, 28(14): 20908-20919.
- [11] Pulford B, Holten R, Matniyaz T, et al. kW-level monolithic single-mode narrow-linewidth all-solid photonic bandgap fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2021, 46(18): 4458-4461.
- [12] Liu A P. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers[J]. Optics Express, 2009, 17(17): 15201-15209.
- [13] 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.
- [14] 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 of SPIE, 2011, 7914: 791407.
- [15] 王岩山, 马毅, 孙殷宏, 等. 2.62 kW, 30 GHz 窄线宽线偏振近衍射极限全光纤激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 1215001.  
Wang Y S, Ma Y, Sun Y H, et al. 2.62-kW, 30-GHz linearly polarized all-fiber laser with narrow linewidth and near-diffraction-limit beam quality[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 1215001.
- [16] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y, et al. Diode-pumped narrow linewidth multi-kilowatt metalized Yb fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2016, 41(22): 5202-5205.
- [17] Panbiharwala Y, Harish A V, Feng Y J, et al. Stimulated Brillouin scattering mitigation using optimized phase modulation waveforms in high power narrow linewidth Yb-doped fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2021, 29(11): 17183-17200.
- [18] 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.
- [19] Ma P F, Tao R M, Su R T, 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.
- [20] Huang Z M, Shu Q, Tao R M, et al. >5 kW record high power narrow linewidth laser from traditional step-index monolithic fiber amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(21): 1181-1184.
- [21] Shen H, Lou Q H, Quan Z, et al. Narrow-linewidth all-fiber amplifier with up to 3.01 kW output power based on commercial 20/400  $\mu\text{m}$  active fiber and counterpumped configuration[J]. Applied Optics, 2019, 58(12): 3053-3058.
- [22] 任帅, 陈益沙, 马鹏飞, 等. 4.5 kW, 0.33 nm 近单模窄线宽保偏光纤激光器[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34(6): 137.  
Ren S, Chen Y S, Ma P F, et al. 4.5 kW, 0.33 nm near single mode narrow linewidth polarization maintaining fiber laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34(6): 137.
- [23] Flores A, Robin C, Lanari A, et al. Pseudo-random binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17735-17744.
- [24] 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.
- [25] Anderson B, Flores A, Dajani I. Enhanced psuedo-random phase modulation for high power fiber amplifiers[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2016: SM1Q.7.
- [26] Kanskar M, Zhang J, Koponen J, et al. Narrowband transverse-modal-instability (TMI)-free Yb-doped fiber amplifiers for directed energy applications[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10512: 105120F.
- [27] 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.
- [28] Liu M Z, Li B L, Yang Y F, et al. Instantaneous response and suppression of SBS process in a short fiber system with binary sequence phase modulation[J]. Optics Letters, 2021, 46(23): 5802-5805.
- [29] 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.
- [30] Li B L, Liu M Z, Yang Y F, et al. Effective Brillouin gain spectra broadening for SBS suppression based on pseudo random bit sequence phase modulation in fiber system[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(6): 1-5.
- [31] 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.

## 4.9-kW Narrow-Linewidth Single-Fiber Laser Based on Cascaded Phase Modulation

Cao Jing<sup>1,2</sup>, Chen Xiaolong<sup>2</sup>, Yang Yifeng<sup>2</sup>, Li Binglin<sup>1,2</sup>, Liu Zhaohe<sup>2</sup>, Guo Xiaochen<sup>2</sup>,

Wang He<sup>1,2</sup>, Meng Junqing<sup>1,2\*</sup>, He Bing<sup>1,2\*\*</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid State Laser and Application Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

### Abstract

**Objective** High-power narrow-linewidth fiber lasers are widely used in coherent synthesis and spectral synthesis; however, their power expansion is limited owing to stimulated Brillouin scattering. Common methods for inhibiting stimulated Brillouin scattering include the design and fabrication of stimulated Brillouin scattering suppression fibers and changing the temperature field and stress field distributions of the fibers. However, these methods entail complicated processing and can easily produce noise. In recent years, phase modulation of the light field has become the main method for suppressing stimulated Brillouin scattering. In the linewidth range of 50 GHz, single-stage phase modulation has a limited threshold boost for stimulated Brillouin scattering. In this study, we report a high-power narrow-linewidth fiber laser based on a cascaded pseudo-random binary sequence and sinusoidal phase modulation. The proposed method is expected to contribute to the power scaling amplification of narrow-linewidth fiber lasers in the 50-GHz linewidth range.

**Methods** In this study, the appropriate pseudo-random binary sequence phase modulation parameters and low-pass-filter cutoff frequency are selected so that the unit spectral linewidth has the greatest suppression of stimulated Brillouin scattering. The effects of the modulation frequency and depth of sinusoidal phase modulation on the laser spectrum are studied. By changing the modulation frequency and depth, a spectral form with a fundamental frequency as high as the sideband of the  $\pm 1$  level is obtained. After cascading the pseudo-random binary sequence and sinusoidal phase modulation, the spectrum shows a near-flat-top morphology, which exhibits good stimulated Brillouin scattering suppression. According to the theoretical research results, a high-power narrow-linewidth fiber laser based on cascaded phase modulation is constructed, and the output powers and stimulated Brillouin scattering thresholds are compared at root mean square (RMS) linewidths of 20 GHz and 46 GHz.

**Results and Discussions** Based on previous research, when the pseudo-random binary sequence phase modulation depth is  $0.55\pi$  and the ratio of filter cutoff frequency to modulation frequency is 0.53, the modulation spectrum exhibits a near-flat-top morphology (Fig. 2). According to theoretical research, the depth of sinusoidal modulation influences the number of spectral lines and the relative intensity of spectral lines, and the results are shown in Fig. 3. As the modulation depth increases, the number of spectral lines increases and the relative intensity of the spectral lines also changes. When the modulation frequency is reduced, the spectral line spacing and spectral linewidth are also significantly reduced. When the sinusoidal modulation frequency is 9.7 GHz and the modulation amplitude is  $0.458\pi$ , the modulation spectrum has three single frequencies (Fig. 4). After cascading the pseudo-random binary sequence and sinusoidal phase modulation, the flatter spectral morphology than that from single-stage pseudo-random binary phase modulation is obtained, and the stimulated Brillouin scattering suppression is better. Based on the above research, a narrow-linewidth laser is built, and the output power and backward transmission power at RMS linewidths of 20 GHz and 46 GHz are monitored in the experiment (Fig. 7). When the RMS linewidth is 20 GHz and the output power is 2.2 kW, the backward power increases exponentially. When the RMS linewidth is 46 GHz, the output power is close to the SBS threshold. Because the stimulated Brillouin scattering phenomenon is not observed in the experiment, the power is increased to 4.93 kW, yielding a stimulated Brillouin scattering threshold enhancement factor of  $\sim 328$ , a system slope efficiency of 78%, and a beam quality factor ( $M^2$ ) below 1.2.

**Conclusions** In this study, the physical mechanism by which the cascaded pseudo-random binary sequence and sinusoidal phase modulation is used to broaden the laser spectrum to suppress stimulated Brillouin scattering is investigated. The effects of pseudo-random binary sequence modulation frequency and mode length on the spectrum are theoretically studied. Under the optimal ratio of the filter cutoff frequency to the pseudo-random binary sequence modulation frequency, the unit linewidth well suppresses stimulated Brillouin scattering. Through theoretical simulations, the influence of the modulation depth and modulation frequency of the sinusoidal signal on the laser spectrum is obtained. Based on theoretical guidance, a narrow-linewidth single-fiber laser based on cascaded phase modulation is built for the experiment. The cascaded pseudo-random binary sequence and sinusoidal phase modulation is used to widen the seed source spectrum. Compared with the stimulated Brillouin scattering thresholds and output powers under different RMS linewidths, the output power finally reaches 4.93 kW after amplification by the four-stage optical fiber when the RMS linewidth of the seed source is 46 GHz. The system slope efficiency is 78% and the beam quality factor  $M^2$  is below 1.2.

**Key words** lasers; fiber lasers; stimulated Brillouin scattering; phase modulation