

信号光谱宽特性对单频光纤放大器 SBS 阈值的影响

杨磊¹, 郑加金^{1,3}, 郝丽云², 周军^{2*}, 韦玮¹

¹南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023;

²南京先进激光研究院先进全固态激光技术研发中心, 江苏 南京 210038;

³南开大学光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津, 300071

摘要 受激布里渊散射(SBS)效应是影响单频窄线宽光纤激光放大器功率提高的重要因素。以白噪声作为射频信号源,采用相位调制技术,设计并搭建了一套三级主振荡功率放大全光纤激光系统。分析和研究了信号光频谱宽度与光纤放大器系统 SBS 阈值之间的关系,通过改变白噪声信号的幅值,实现精确控制信号光谱宽,获得了中心波长为 1030.93 nm、线宽为 0.9 GHz、平均功率为 90 W 的窄线宽准连续激光输出,相应的 X 方向与 Y 方向的光束质量因子分别为 1.28 和 1.27。该研究为实现高功率单频窄线宽光纤激光器的产业化提供了可靠的理论和实验基础。

关键词 激光器; 光纤激光器; 相位调制; 受激布里渊散射

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901009

Influence of Signal Spectral Width Characteristic on SBS Threshold of Single Frequency Fiber Amplifier

Yang Lei¹, Zheng Jiajin^{1,3}, Hao Liyun², Zhou Jun², Wei Wei¹

¹School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

²Nanjing Institute of Advanced Laser Technology, Advanced all Solid State Laser Technology Research and Development Center, Nanjing, Jiangsu 210038, China;

³Ministry of Education Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Nankai University, Tianjin, 300071, China

Abstract The stimulated Brillouin scattering (SBS) effect is an important factor affecting the power boost of single frequency narrow line width fiber laser amplifiers. Utilizing white noise as the radio frequency signal source, an all fiber laser system with three stage master oscillator power amplifier is designed and built by phase modulation technique. The relationship between the spectral widths of the signal light and the SBS thresholds of the fiber amplifier system is analyzed and studied. By changing the amplitudes of the white noise signal, the spectral widths of the signal can be accurately controlled, and the narrow line width quasi continuous laser output with a central wavelength of 1030.93 nm, a line width of 0.9 GHz and an average power of 90 W is obtained. The corresponding X direction and Y direction of the beam quality factors are 1.28 and 1.27, respectively. This research provides a reliable theoretical and experimental basis for the industrialization of high power single frequency narrow line width fiber lasers.

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

OCIS codes 140.3490; 060.2320; 140.3510

收稿日期: 2017-05-08; 收到修改稿日期: 2017-05-12

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2016147)、江苏省科技支撑计划(BE2014001-1)、南京邮电大学国自基金孵化基金(NY215143)、光学信息技术科学教育部重点实验室(南开大学)开放基金资助项目

作者简介: 杨磊(1991—),男,硕士研究生,主要从事单频窄线宽光纤激光器等方面的研究。

E-mail: 18705192007@163.com

导师简介: 郑加金(1977—),男,博士,副教授,主要从事光电子材料与器件、光纤光子学等方面的研究。

E-mail: zhengjj@njupt.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: junzhousd@mail.siom.ac.cn

1 引 言

光纤激光器与传统激光器相比,具有光-光转换效率高、光束质量好、散热方便及结构紧凑等优点^[1]。受激布里渊散射(SBS)是光纤中一种非常重要的非线性效应,它是介质内通过强激光的电致伸缩作用产生强感应声场对入射光进行非线性散射,由于其阈值较低,在光纤中极易产生,因此光纤系统中作为信号载体的入射光易产生能量损耗,并且其后向散射光有可能对光源造成损害,从而限制进入光纤功率及系统的传输距离。对于单频光纤激光器来说,SBS效应的阈值低,也使得窄线宽光纤激光器的功率提高受限^[2]。因此如何有效抑制SBS效应以提高窄线宽光纤激光器的功率成为近年来相关领域的研究热点。

国内外众多科研机构对光纤激光器中SBS效应进行了大量卓有成效的研究,提出了如增大光纤有效模场面积^[3-4]、提高光纤掺杂浓度^[5-6]、增加光纤温度梯度或应力梯度^[7-8]等方法抑制SBS效应^[9-11]。但这些方法或仅在小功率范围内抑制SBS效应,或虽能有效地抑制SBS效应,但会产生过多的高阶模式,使窄线宽光纤激光器的光束质量下降。在高功率窄线宽光纤激光器中,相位调制技术可以有效抑制SBS效应,且不影响输出激光的光束质量,近年来成为国内外研究的热点^[12-13]。通过对电光调制器(EOM)加载射频(RF)电压信号,改变信号光的谱宽特性,降低光纤中的功率谱密度,提高SBS阈值,从而达到提高光纤激光输出功率的目的。

鉴于此,本文以白噪声作为RF信号源,采用相位调制技术,搭建了中心波长为1030.93 nm的一套三级主振荡功率放大(MOPA)全光纤激光系统,通过调节白噪声幅值精确地控制信号光谱宽,获得了线宽为0.9 GHz、平均功率为90 W的准连续窄线宽激光输出,相应的X方向与Y方向的光束质量因子分别为 $M_x^2=1.28, M_y^2=1.27$ 。在此过程中,重点研究了频谱宽度对放大器系统SBS阈值的影响。该工作有望为实现高功率单频窄线宽光纤激光器的产业化提供可靠的理论与实验依据。

2 实验装置

白噪声相位调制窄线宽光纤激光器系统结构如图1所示,整个系统包括白噪声相位调制信号源和三级MOPA功率放大的两个子系统。其中信号源部分包括窄线宽单频种子源激光器、隔离器(ISO)、白噪声发生源(WNS)、可调微波衰减器、RF放大器、EOM。其中种子源中心波长为1030.93 nm,线宽小于10 MHz,最高输出为50 mW;WNS产生频率带宽为2 GHz幅值不等的随机电压噪声,最大输出功率为20 dBm;RF放大器可在频率带宽为0~500 MHz内放大49 dB的射频电压;EOM的相位调制带宽为10 GHz,半波电压为2.5 V,最大输入RF电压为40 V,最大承受光功率为20 dBm;可调微波衰减器带宽为10 GHz,最高可衰减20 dB。

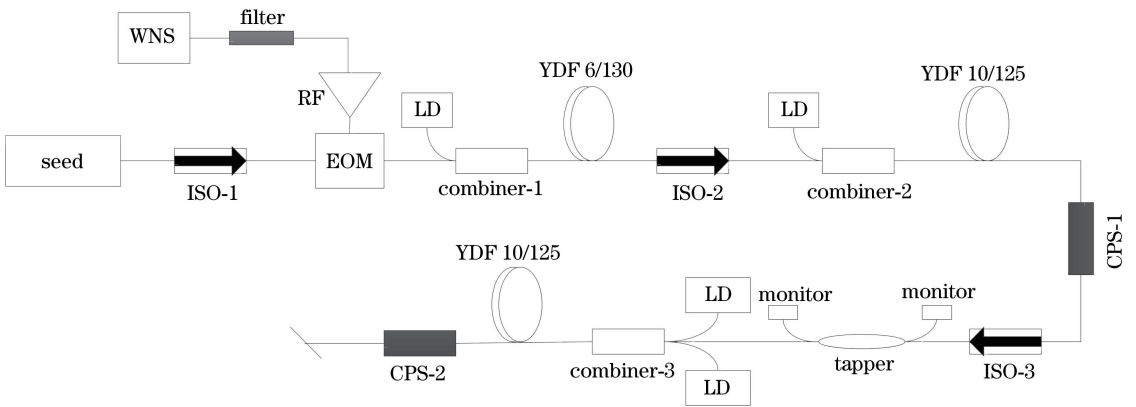


图1 光纤激光器实验原理示意图

Fig. 1 Schematic of experimental principle of fiber laser

放大级部分采用三级MOPA结构,第一级结构包括激光二极管(LD)、抽运合束器、增益介质光纤、ISO。其中,抽运源为一个最大输出功率为3 W、中心波长为975 nm的LD;抽运合束器最大承受功率为3 W,输出光纤纤芯和包层直径分别为6 μm和125 μm;增益介质光纤采用长度为6 m、吸收系数为1.8 dB/m、纤芯和包层直径分别为5 μm和130 μm的掺Yb³⁺双包层光纤(YDF)。第二级结构包括LD、抽

运合束器、增益介质光纤、包层光滤除器(CPS)、ISO、光分数器。其中 LD 的中心波长为 975 nm、最大输出功率为 27 W;抽运合束器输出光纤纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 125 μm ,最大承受功率为 27 W;增益介质光纤采用长度为 3.5 m、吸收系数为 4.8 dB/m,纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 125 μm 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤;ISO 用来防止反向散射光对前级放大器件产生影响与破坏;光分束器(分光比为 1:99)监测前向输出分光功率和反向散射光功率,用以保证激光器的安全运行。第三级结构包括 LD、抽运合束器、增益介质光纤、CPS。其中抽运源采用 5 支最大输出功率为 60 W、中心波长为 975 nm 的 LD;抽运合束器采用 (6+1) \times 1 结构,输出光纤纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 125 μm ,最大承受功率为 60 W;增益介质光纤采用长度为 3.5 m、吸收系数为 4.8 dB/m、纤芯和包层直径分别为 10 μm 和 125 μm 的掺 Yb³⁺ 双包层光纤;所用 CPS 损伤阈值为 50 W,用于滤除包层中未被增益光纤吸收的多余抽运光,提高输出激光的光束质量和功率稳定性。此外,实验中为保证良好的消光比输出,所用光纤均为熊猫保偏光纤,且所有增益介质光纤均盘绕在半径为 10 cm 的圆柱盘上,以利于散热和滤除高阶模,提高输出激光的光束质量。抽运驱动采用脉冲同步技术,实现重复频率为 500 Hz,占空比为 30%~75%连续可调准连续放大激光输出。

3 理论分析与结果讨论

实验中的 EOM 由铌酸锂晶体构成,其折射率在外电场的作用下发生改变,从而对信号光波的相位进行调制。由 WNS 触发注入到 EOM 的光波称为载波,其场方程可表示为 $E = A \cos(2\pi\nu_0 t)$,其中 A 为载波振幅, ν_0 为载波频率。白噪声相位调制源通过调节衰减器的控制电压,改变其衰减倍数,从而调节加载于 EOM 上的 RF 电压来改变光载波的相位。信号光经过 EOM,与载波相互干涉,使信号光产生若干频带,达到改变信号光的谱宽特性。采用法布里-珀罗(F-P)干涉仪(SA201-B, Thorlabs, 美国)对白噪声相位调制前后的信号光频谱进行了测量,测量结果如图 2 所示。其中图 2(a)为相位调制前信号光的频谱图,图 2(b)是加载于 EOM 上 RF 电压为 2.8 V 时种子源的频谱图。从图 2(a)、图 2(b)可以明显看出,种子信号光经相位调制后,频谱被展宽,表明加载在 EOM 上的白噪声 RF 电压有效地改变了信号光的谱宽特性。

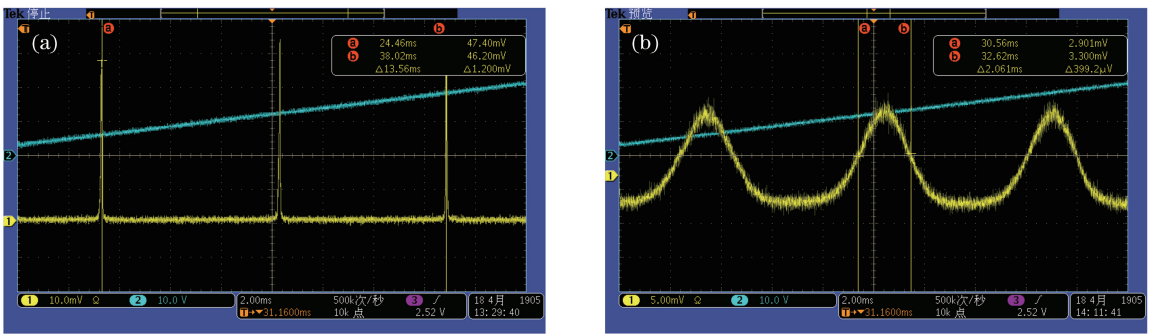


图 2 F-P 干涉仪测试信号光的透射频谱波形。(a)相位调制前;(b)相位调制后

Fig. 2 Transmission spectrum waveform of signal light tested by F-P interferometer.

(a) Before modulation; (b) after modulation

为确定 SBS 效应与光纤激光器信号光输出功率之间的关系,首先对相位调制前的种子信号源进行功率放大,并利用功率计对输出激光及其反向光功率进行测量,结果如图 3 所示。从图中可以明显看出,未进行相位调制时(EOM 未加载白噪声 RF 电压信号),反向光功率随输出信号光功率先呈线性增加,但当输出光功率大于 10.5 W 时,反向光功率出现非线性增长,表明此时开始出现 SBS 效应,此时对应的输出光功率值即为 SBS 阈值。同时也表明,当输出光功率大于 10.5 W 时,必需采取相应措施对 SBS 效应进行抑制。

进行相位调制时,调节衰减器的控制电压,改变其衰减倍数,分别利用示波器和 F-P 干涉仪测试了加载于 EOM 上的白噪声 RF 电压和相应的信号光谱宽,结果如图 4 所示。从图 4 可以明显看出,经相位调制后的信号光谱宽随白噪声 RF 电压的增大而线性变宽,表明在 EOM 的 RF 电压承受范围内,信号光谱宽与白噪声 RF 电压之间具有良好的线性关系,实验测得在最高 RF 电压 32 V 时对应的信号光谱宽为 5.3 GHz。

而本文实验中,为获得小于 1 GHz 的单频窄线宽激光输出,白噪声 RF 电压调控为 2.8 V,此时对应的信号光谱宽约为 0.9 GHz。

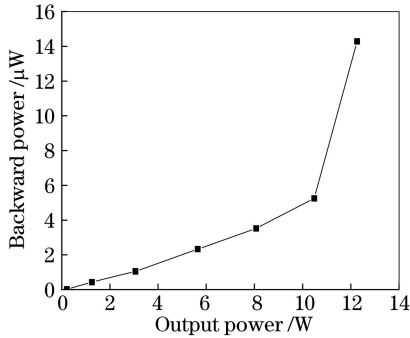


图 3 反向光功率随激光功率的变化关系
Fig. 3 Relationship between reverse optical powers and laser powers

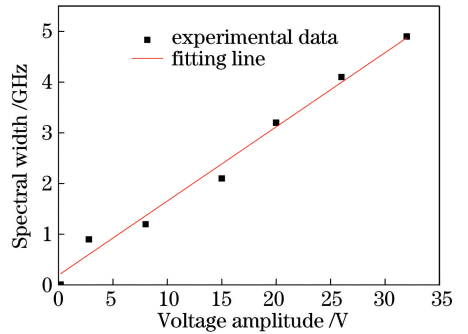


图 4 信号光谱宽与 RF 电压之间的关系
Fig. 4 Relationship between spectral widths of signal light and RF voltages

进一步对相位调制后的信号光进行功率放大,记录光分束器监测的反向光功率出现非线性增长时的输出功率值,由前述分析可知,此值即为 SBS 阈值,同时利用 F-P 干涉仪测量对应的经功率放大输出的信号光频谱宽度,得到 7 组信号光谱宽与 SBS 阈值数据,结果如图 5 所示。从图 5 可以明显看出,相位调制后,SBS 阈值随信号光谱宽增加呈线性增加,表明信号光谱宽的改变对 SBS 阈值的改变有很大影响。本实验控制白噪声 RF 电压为 2.8 V 时对应的信号光谱宽为 0.9 GHz,从图中可知与此对应的 SBS 阈值为 165 W。相比于未进行相位调制的种子源直接放大所对应的 10.5 W 的 SBS 阈值,可知经白噪声相位调制后光纤放大器的 SBS 阈值增大了近 16 倍,从而表明采用白噪声相位调制技术可有效地提高 SBS 阈值,达到提高光纤激光输出功率的目的。出现上述现象的原因在于,白噪声相位调制使信号光谱宽展宽,降低了光纤中的信号光功率密度,从而造成了信号光单个纵模的 SBS 有效增益系数减小,进而输出激光的 SBS 阈值相应提高,最终促使相位调制后的输出功率大幅提高^[13]。

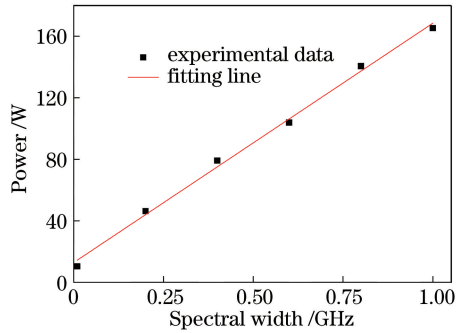


图 5 信号光谱线宽与 SBS 阈值关系图

Fig. 5 Relationship between spectral widths of signal light and SBS thresholds

最后,在种子源输出功率为 40 mW,白噪声 RF 电压为 2.8 V,对应信号光线宽为 0.9 GHz 时,利用功率计测得经三级 MOPA 功率放大后的光纤激光器输出中心波长为 1030.93 nm 准连续激光的平均功率为 90 W,相应的峰值功率约为 165 W,此时的重复频率为 500 Hz,占空比为 55%。采用高分辨率的光谱仪(AQ6370, YoKogawa, 日本)对最高输出功率的光谱进行了测量,输出光谱如图 6 所示,对光谱仪设定 1020~1055 nm 的波长扫频范围,在整个波长扫频范围内只存在放大的信号光,其信噪比高达 40 dB,未见其他噪声。同时采用光束质量分析仪(M2-200s, Ophir-Spiricon, 美国)对输出的激光光束进行了测量,测得 X 方向与 Y 方向的光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.28$, $M_y^2 = 1.27$,相应的激光光斑如图 7 所示。从图 7 可以看出,经白噪声相位调制的光纤激光放大器输出激光的光斑呈高斯型分布,因此可以认为该激光放大器实现了近衍射极限输出。需要说明的是,由于实验所用的包层光滤除器的损伤阈值有限,实验中未进一步提高主放抽运光功率,极大地限制了信号光输出功率的提高。此外,由于 YDF 中的 Yb^{3+} 在 1035 nm 波长附近的发射系

数高于 1030 nm 波长附近的发射系数,因此对 1030 nm 波长的种子信号光进行功率放大时,在 1035 nm 波长附近会出现明显的放大自发辐射(ASE),对光学元器件造成潜在的破坏,影响输出功率的进一步提高。

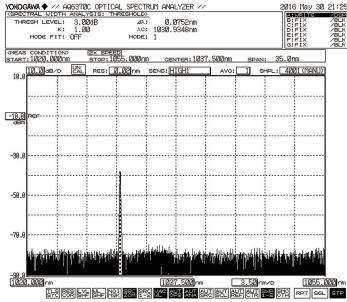


图 6 最高输出功率下的光谱图

Fig. 6 Spectrum under highest output power

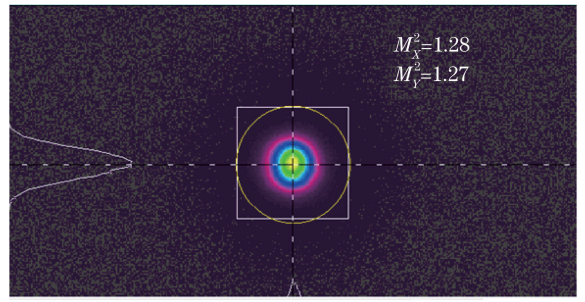


图 7 光束质量测量图

Fig. 7 Test chart of beam quality

4 结 论

采用相位调制技术,以白噪声作为 RF 信号源,设计并搭建了一套三级 MOPA 全光纤激光系统。通过改变白噪声信号的幅值,精确控制信号光谱宽,研究了频谱宽度对放大器系统 SBS 阈值的影响。实验结果表明,白噪声相位调制使信号光谱变宽,降低了信号光在光纤中的功率谱密度,减小了单个纵模的 SBS 有效增益系数,导致相位调制后的 SBS 阈值大幅提高,最终实现了中心波长为 1030.93 nm、线宽为 0.9 GHz、平均功率为 90 W 的窄线宽连续激光输出。相应的 X 方向与 Y 方向的光束质量因子分别为 1.28 和 1.27。基于白噪声相位调制的单频窄线宽光纤激光放大器因包层光滤波器损伤阈值的限制而未能获得更高功率的能量输出,但该研究为实现高功率单频窄线宽光纤激光器的产业化提供了可靠的理论和实验基础。

参 考 文 献

- [1] Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang, *et al.* Research progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(2): 135-138.
楼祺洪, 周 军, 朱健强, 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(2): 135-138.
- [2] 杨依枫, 沈 辉, 陈晓龙, 等. 全光纤化高效率、窄线宽光纤激光器实现 2.5 kW 近衍射极限输出[J]. *中国激光*, 2016, 43(4): 0419004.
- [3] 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.
- [4] Gray S, Liu A, Walton D T, *et al.* 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifiber[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [5] Leigh M, Shi W, Zong J, *et al.* High peak power single frequency pulses using a short polarization-maintaining phosphate glass fiber with a large core[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(18): 181108.
- [6] Shi W, Petersen E B, Yao z, *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.
- [7] Liu A. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with deliver fibers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15201-15209.
- [8] Zhang L, Cui S, Liu C, *et al.* 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5456-5462.
- [9] Robin C, Dajani L. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(14): 2641-2643.
- [10] White J O, Vasilyev A, Cahill J P, *et al.* Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using a linearly chirped diode laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(14): 15872-15881.
- [11] Li Yongqian, An Qi, He Yujun, *et al.* Theoretical and experimental study of power dependence of stimulated Brillouin scattering phase shift[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0906001.
李永倩, 安 琪, 何玉钧, 等. 受激布里渊相移功率依赖性理论与实验研究[J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0906001.

- [12] Ran Yang, Wang Xiaolin, Su Rongtao, *et al.* Research progress of stimulated Brillouin scattering suppression in narrow bandwidth fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 40003.
冉 阳, 王小林, 粟荣涛, 等. 窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射制研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 40003.
- [13] Anderson B, Robin C, Flores A, *et al.* Experimental study of SBS suppression via white noise phase modulation[C]. *SPIE*, 2014, 8961: 89611W.