

高功率窄线宽光纤激光器研究进展

郑也^{***}, 李磐, 朱占达, 刘小溪, 王军龙^{*}, 王学锋^{**}

北京航天控制仪器研究所, 北京 100094

摘要 高功率窄线宽光纤激光器在地球科学、光束合成、非线性频率转换等领域有重要的应用价值,近几年已经成为激光领域的研究热点。受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)等非线性效应限制了窄线宽光纤激光器输出功率的提升。随着各种非线性效应抑制技术的发展,窄线宽光纤激光器的输出功率也得到了大幅提升,目前已经达到了千瓦量级。对1 μm 波段高功率窄线宽光纤激光器的研究进行了详细的介绍,重点介绍了限制窄线宽激光器功率提升的非线性效应及其抑制方法、高功率窄线宽光纤激光器的种子源技术以及国内外典型的高功率窄线宽光纤激光器的研究成果。

关键词 激光器; 光纤激光器; 窄线宽; 受激布里渊散射; 光谱展宽; 相位调制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080002

Progress in High-Power Narrow-Linewidth Fiber Lasers

Zheng Ye^{***}, Li Pan, Zhu Zhanda, Liu Xiaoxi, Wang Junlong^{*}, Wang Xuefeng^{**}

Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China

Abstract Narrow linewidth fiber lasers have gained extensive attention as their important applications in geoscience, nonlinear frequency conversion, and beam combining. Unfortunately, the output power of narrow linewidth fiber lasers is limited by nonlinear effects such as stimulated Brillouin scattering (SBS), self-phase modulation (SPM), and four wave mixing (FWM). Lots of methods have been proposed to suppress the nonlinear effects, which boost the output power of narrow linewidth fiber lasers up to kW level. In this paper, we give an overview of the research on high power narrow linewidth fiber lasers at the wavelength of 1 μm . The nonlinear effects and corresponding suppressing methods are introduced, as well as the recent progress and key factors of high power narrow linewidth fiber lasers.

Key words lasers; fiber lasers; narrow linewidth; stimulated Brillouin scattering; spectral broadening; phase modulation

OCIS codes 140.3510; 140.3298; 190.4370; 290.5900

1 引言

由于具有结构紧凑、噪声低、光束质量好、相干性好等优势^[1-2],高功率窄线宽光纤激光器在引力波探测^[3-4]、原子物理^[5-7]、频率转换^[8-11]以及光束合成^[12-14]等领域有着十分重要的应用价值。引力波探测方面,目前高功率窄线宽光纤激光器已经被视为第三代引力波探测的理想光源^[4]。在原子物理领域,高功率窄线宽光纤激光的优越特性使研究人员能够以亚波长精度约束中性原子,从而研究量子气

体中的量子相位跃迁^[5]。在非线性频率转换领域,1064 nm 的窄线宽掺镱光纤激光通过 KTP 倍频晶体后可获得 532 nm 的激光^[9],用作钛宝石激光器的抽运源;1178 nm 的窄线宽掺镱光纤激光倍频后可以产生 589 nm 的黄光,用作天文观测系统中的钠信标光源^[10]。采用光参量振荡器的技术路径,用窄线宽掺镱光纤激光抽运 MgO:PPLN 晶体,通过对抽运光频率进行调谐,可实现 2650~3200 nm 光谱范围内的连续激光输出,用于高分辨率精密光谱学^[11]。在光束合成领域,以高功率窄线宽光纤激光

收稿日期: 2018-01-19; 修回日期: 2018-02-24; 录用日期: 2018-03-07

基金项目: 重大科学仪器设备开发项目(2017YFF0104500)

* E-mail: wjl_casc@126.com; ** E-mail: xuefeng_wang@sina.cn; *** E-mail: zhengye.nol@163.com

器作为合成单元的相干合成和光谱合成技术是实现数万瓦光纤激光的理想解决方案^[15-25],用作定向能激光武器的光源。通过对窄线宽光纤激光进行相干合成,美国空军实验室实现了 5 kW 的光纤激光输出^[18];通过对窄线宽光纤激光进行光谱合成,美国洛克希德·马丁公司先后实现了 30 kW 和 58 kW 的激光输出^[23,25]。

但是,由于具有纤芯面积小、相互作用距离长的特殊结构,激光在光纤中传播时容易产生非线性效应,对光纤激光的性能产生一定的影响^[26]。高功率窄线宽光纤激光器主要面临着受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)、四波混频(FWM)等非线性效应的影响^[27]。SBS 会产生后向传输的斯托克斯光,对激光器存在危害,直接限制窄线宽光纤激光器输出功率的上限;SPM 和 FWM 等非线性效应在某些条件下会在激光放大过程中引起光谱展宽,使激光的谱线宽度不再处于窄线宽范畴。根据非线性效应的产生机理,研究人员对相应的非线性抑制方法进行了广泛的研究,这也使窄线宽光纤激光器的输出功率不断提升,目前已经达到了千瓦量级,对相关的应用研究有巨大的促进作用。

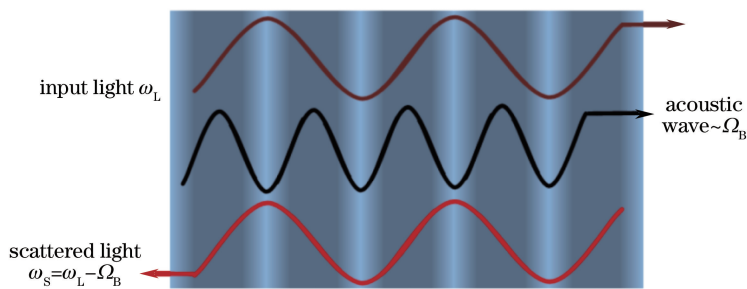


图 1 SBS 物理过程示意图

Fig. 1 Schematic of SBS physics

斯托克斯光可以用峰值位于 $\Omega = \Omega_B$ 处的布里渊增益谱 $g_B(\Omega)$ 来表征^[28],其谱宽与声波的阻尼时间有关,而阻尼时间又与声子寿命有关,因此布里渊增益谱相当窄,带宽小于 100 MHz。增益带宽 $\Delta\nu_B$ 随 $1/\lambda^2$ 变化,对于 1 μm 的信号光, $\Delta\nu_B$ 约为 38 MHz,在斯托克斯位移约 16.5 GHz 处产生峰值布里渊增益。

光纤中 SBS 阈值的表达式为

$$P_{\text{th}} = \frac{21A_{\text{eff}}}{g_B L_{\text{eff}} (1 + \Delta\nu_p / \Delta\nu_B)}, \quad (1)$$

式中: A_{eff} 是纤芯有效模场面积, L_{eff} 是光纤有效长度, g_B 是布里渊增益系数, $\Delta\nu_p$ 为抽运光带宽。根据 SBS 的产生机制以及 SBS 阈值表达式,可以找到

本文对高功率窄线宽光纤激光器的研究进行了全面详细的介绍。首先介绍了限制窄线宽光纤激光器输出功率扩展的非线性效应及相应的抑制方法,接下来对适用于高功率窄线宽光纤激光器的种子源技术方案进行介绍,最后介绍了高功率窄线宽光纤激光器的国内外研究进展并进行总结与展望。

2 窄线宽光纤激光器中的非线性效应

在高功率窄线宽光纤放大器中,光纤传输的功率高,纤芯截面积小,传输光在光纤中的相互作用距离很长,在激光放大过程中极易产生 SBS、SPM、FWM 等非线性效应。

在窄线宽光纤放大器中,SBS 的阈值低,产生的后向斯托克斯光破坏力强,容易损坏光学元件,是限制窄线宽光纤放大器输出功率提升的主要因素。SBS 过程可以经典地描述为抽运波和斯托克斯波通过声波进行的非线性相互作用,如图 1 所示,抽运波通过电致伸缩产生声波,声波反过来调制介质的折射率。抽运波感应的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运波,由于以声速移动的光栅的多普勒位移,散射光产生了频率下移^[27]。

相应的 SBS 抑制方法^[29-31],主要有以下几种。

1) 增大光纤的模场面积以降低信号光的功率密度。在普通传能光纤中,入射光的 SBS 阈值与其在纤芯内的有效模场面积成正比,与光纤的有效长度成反比,如果使用纤芯直径较大的光纤,可降低入射光的功率密度,起到抑制 SBS 的作用。与此类似,在单频光纤放大器中使用模场面积较大的增益光纤,同样可以提高信号光的 SBS 阈值^[32]。此外,使用大纤芯的稀土掺杂的增益光纤,在同等级纤芯掺杂浓度下,有利于提高抽运光的吸收效率,缩短增益光纤的长度,进一步提高 SBS 的阈值。

2) 减小增益光纤长度。SBS 过程是一个受激放大的过程,SBS 光在后向传输的过程中,会被 SBS

抽运光持续放大,若整个放大器的增益光纤较短,SBS光得不到足够的放大,则不会达到阈值。在稀土离子掺杂单频放大器中,可使用高掺杂的增益光纤以缩短光纤长度,提高SBS的阈值^[33]。

3) 降低纤芯中光波场和声波场的重叠度。SBS效应是光波场和声波场相互作用的结果,改变纤芯内的掺杂成分及掺杂分布,使光场和声场在不同的区域传播,可以降低光场和声场的重叠度,达到分离声光模式的目的,从而有效降低纤芯的SBS增益系数,提高SBS阈值^[34-35]。在普通光纤的纤芯中,光波模和声波模有相同的分布,重叠因子接近1,若在纤芯中掺入一些特殊物质,如氧化铝,增加了光波模的折射率但降低了声波模的折射率,这就使得光波模始终被约束在纤芯区域,而声波模则主要在包层区,减少了它们之间相互作用的机会^[36-37]。

4) 展宽SBS的增益谱。光纤中SBS效应的中心频移与纤芯内的声速有关,光纤中SBS中心频移也会随着位置的不同而发生改变^[38]。纤芯中的声速与光纤的密度有关,通过在光纤上施加一定的温度^[39-40]或应力控制^[41-45],可以改变纤芯内的密度分布,进而改变其中的SBS中心频移,将本来只有几十兆赫兹的带宽展宽,从而使SBS的增益降低,布里渊散射光得不到有效放大。

5) 展宽种子源谱线宽度,降低布里渊增益峰值。布里渊增益峰值几乎与抽运波长无关,给定石英光纤的固有参数,对于宽带宽抽运,其峰值增益降至原来的 $\Delta\nu_B/(\Delta\nu_B + \Delta\nu_p)$,其中 $\Delta\nu_p$ 为抽运光带宽, $\Delta\nu_B$ 为布里渊增益带宽。当 $\Delta\nu_p \gg \Delta\nu_B$ 时,SBS阈值增大很多。通过射频信号可以对单频激光进行相位调制使其光谱展宽,然后再进行放大可以提升SBS阈值^[46-47]。此种情况下,输出激光不再是单频激光,而是变成了线宽为吉赫兹量级的窄线宽激光。

除了SBS之外,高功率窄线宽光纤激光器中另一个需要特别重视的是光谱展宽现象,它主要归因于SPM、交叉相位调制(XPM)、四波混频等非线性效应^[48-50]。非线性光学介质中,介质的折射率与入射光的光强有关,这一现象通过SPM来实现^[51]。SPM是指光场在光纤中传输时因光强变化而产生的自身相移,其大小可由光场相位的变化来表示,即

$$\phi = \bar{n}k_0L = (n_1 + n_2 |E|^2)k_0L, \quad (2)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$; L 为光纤长度;右边第二项 $\phi_{NL} = n_2k_0L |E|^2$ 是由SPM引起的与光强有关的非线性相移。对于连续波,光谱特性与种子源的时域稳定性相关^[52],时域上振幅为常量的种子源能够在放大

过程中抑制SPM,避免了光谱展宽现象的出现,从而保持了原有的窄谱线特性。XPM是指多个具有不同波长、传输方向或偏振态的光场同时传输时,由一种光场强度的变化引起其他光场的非线性相移。XPM总是伴随着SPM产生,XPM的出现会在光纤中引起一系列的非线性效应。

四波混频过程起源于介质的束缚电子对电磁场的非线性效应,是四个光电场相互作用的三阶非线性光学过程^[53-54]。光纤中通过四波混频可以实现不同波长之间功率的转换。四波混频的发生需要频率和波矢的匹配,后者通常称为相位匹配,只有当相位匹配几乎为零时,才会发生显著的四波混频过程,不过当波长间距很小时,可以认为相位能够匹配得很好。四波混频将强抽运波的能量转移给相对抽运频率发生了上、下频移的两个波,产生了新的纵模分量,使得频谱发生展宽。理论上可以从减少纵模数和破坏相位匹配条件两个方面抑制四波混频,不过尚需进一步的实验研究加以验证。

在高功率窄线宽光纤激光器的研究中,要综合考虑SBS、SPM、FWM等非线性效应,选择合适参数的种子源和放大级增益光纤。接下来介绍高功率窄线宽光纤激光器的种子源技术。

3 单频激光相位调制谱线展宽技术

高功率窄线宽光纤激光器一般采用主振荡放大(MOPA)结构,包含种子源和放大器两部分,输出激光特性与种子源特性息息相关。能够有效抑制SBS效应的窄线宽种子源主要有窄线宽多纵模振荡种子源、放大自发辐射(ASE)源窄带滤波种子源、随机激光窄带滤波种子源、单频激光相位调制种子源。

相关的研究表明,对于窄线宽多纵模振荡种子源、ASE源窄带滤波种子源、随机激光窄带滤波种子源,尽管可以有效抑制SBS,但是在放大过程中会出现光谱展宽现象,输出激光的谱线宽度与输出功率呈线性递增的关系,导致最终输出激光的谱线宽度不再满足窄线宽的要求^[55-60]。中国科学院上海光学精密机械研究所通过ASE源窄带滤波获得了中心波长1064.8 nm、功率60 mW、谱线宽度0.07 nm的窄线宽种子源,通过三级放大结构将功率放大至1.5 kW,在放大过程中输出激光的谱线宽度与功率呈线性增长的关系,在1.5 kW时输出激光的谱线宽度展宽至0.8 nm^[55];国防科技大学通过随机激光窄带滤波获得了中心波长1080 nm、功率0.71 W、谱线宽度88 pm的种子源,通过两级放大将功率放

大至 1.01 kW, 在放大过程中输出激光的谱线宽度线性增加至 212 pm^[56]; 天津大学采用谱线宽度 25 GHz 的多纵模振荡种子源, 通过两级放大将种子源功率放大至 2 kW, 输出激光谱线宽度展宽至 75 GHz^[58]; 中国工程物理研究院谱线宽度 0.06 nm 的多纵模振荡种子源, 通过一级放大将种子源功率放大至 2.9 kW, 输出激光谱线宽度展宽至 0.31 nm^[59]; 中国电子科技集团 11 所将谱线宽度 0.04 nm 的多纵模振荡种子源放大至 823 W, 输出激光谱线宽度展宽至 0.08 nm^[60]。上述研究中, 窄线宽多纵模振荡种子源的光谱展宽可以归因于 FWM, 而 ASE 源窄带滤波种子源和随机激光窄带滤波种子源的光谱展宽则归因于 SPM, 主要是由于种子源在时域上存在一定的强度噪声, 引起了主放大级中增益光纤折射率的变化。这些种子源方案的光纤激光器的输出光谱线宽是线性增加的, 在满足一定线宽要求的前提下不利于输出功率扩展, 所以并不适合作为高功率窄线宽光纤激光器的种子源。

单频激光相位调制种子源是一种时域稳定的窄线宽光源, 被认为是 MOPA 结构高功率窄线宽光纤激光器的最佳种子源技术方案, 目前公开报道的千瓦级窄线宽光纤放大器均采用单频激光相位调制种子源。

基于单频激光相位调制抑制光纤中 SBS 效应的研究最早出现在通信光纤领域^[61-63]。1996 年 Korotky 等^[62] 申请了基于单频激光相位调制产生的多频光源用于光纤中 SBS 抑制的美国专利。他们利用铌酸锂相位调制器对激光信号进行外调制, 通过改变施加在相位调制器上的调制信号的幅度和频率, 获得了频率间隔大于光纤中 SBS 线宽的等幅度多频激光输出。相比于原激光信号, 总的激光功率均分在不同的频率上, 使得信号光的谱功率密度明显降低, 对应的 SBS 增益变小, 从而能够有效提高通信光纤系统的 SBS 阈值。随着光纤激光向着高能化方向发展, 相位调制法用于高功率光纤放大器中 SBS 抑制的研究也得到越来越多的关注。此外, 施加在相位调制器上的信号也不再局限于正弦信号, 射频高斯白噪声 (WNS)、伪随机序列码 (PRBS) 等信号对单频激光的相位调制都得到了大量的研究。

单频激光相位调制线宽展宽的基本结构如图 2 所示, 单频激光器经过电光相位调制器 (EOM), 向 EOM 施加不同的电压信号进行不同的相位调制, 从而展宽单频激光的线宽, 然后进入后续的多级放

大系统, 获取高功率窄线宽光纤激光。相比于窄线宽多纵模振荡种子源、ASE 源滤波种子源以及随机激光滤波种子源, 这种调制出的种子源在放大过程中不容易出现 SPM、FWM 等非线性效应, 保证了高功率时的光谱线宽和纯度。

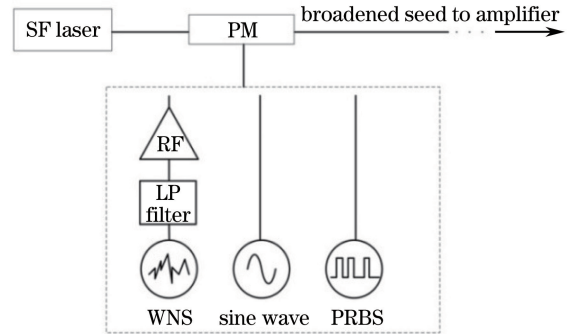


图 2 单频激光相位调制示意图

Fig. 2 Schematic of single-frequency laser phase modulation

正弦相位调制是一种最基本的相位调制方法, 因为理论上任何加载的电信号调制都可以通过傅里叶变换等效成无数个正弦信号的叠加。通过信号发生器对单频激光器施加正弦相位调制, 单频激光经正弦相位调制后变为多波长激光, 实现了谱线宽度的展宽, 从而提高了光纤放大过程中 SBS 的阈值^[64-65]。

单频输入光和施加的正弦调制信号的表达式分别为

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (3)$$

$$E_M = E_{M0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (4)$$

式中: E_0 、 ω_0 、 φ_0 、 E_{M0} 、 ω_1 、 φ_1 分别为输入光和调制信号的振幅、角频率、初相位。

对单频光施加单级正弦调制信号进行相位调制, 得到调制光波的表达式为

$$E_1 = E_{10} \cos[\delta_1 (\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_0 t + \varphi_0], \quad (5)$$

式中: $\delta_1 = \pi E_{M0} / V_\pi$ 为调制幅度, V_π 为相位调制器的半波电压。

输出光场可以按第一类贝塞尔函数展开:

$$E_1(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} j^n J_n(\varphi_0) \exp(-jn\varphi_0) \exp[-j(\omega_0 + n\omega_m)t]. \quad (6)$$

单频激光经过正弦相位调制后, 输出为多波长激光; 各相邻波长激光之间角频率间隔为 ω_1 , 各波长成分的振幅由第一类贝塞尔函数决定, 与调制信号的调制幅度 δ_1 有关; 调制形成的多波长光谱线特性由调制频率和调制幅度综合决定。正弦相位调制只能产生有限的谐波数量, 而且产生的谐波振幅不

均匀,不能充分利用整个光谱宽度,在SBS抑制上存在一定的局限性。

WNS是一种非周期性电信号,通过一个带通滤波器控制带宽,再通过一个射频放大器提供适当的电压,放大后的射频信号用于驱动EOM,对单频激光进行相位调制,从而展宽了种子激光的谱线线

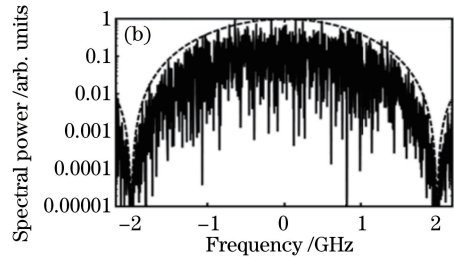
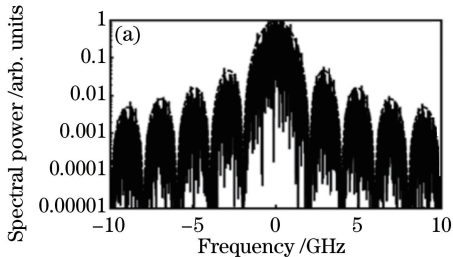


图3 sinc^2 函数轮廓功率谱密度示意图

Fig. 3 PSD schematic of the sinc^2 function

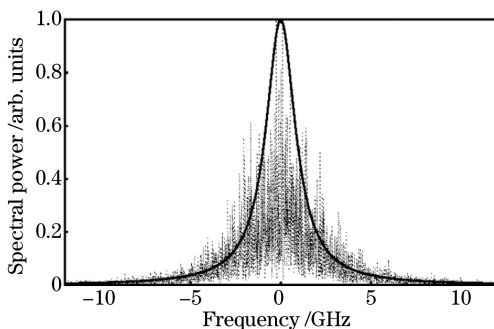


图4 洛伦兹轮廓功率谱密度示意图

Fig. 4 PSD schematic of the Lorentz profile

洛伦兹轮廓调制信号的SBS抑制效果优于 sinc^2 函数轮廓调制信号。所以在WNS调制时,要对低通滤波器和射频放大器的参数进行优化设计,使展宽后的线型尽量满足洛伦兹分布,这样更有利于抑制SBS。

PRBS和WNS的调制方式有很大的区别。PRBS相位调制产生的功率谱密度呈 sinc^2 函数包络,存在分离的周期性特性,时钟频率决定了 sinc^2 包络的尺寸,包络中分离的光谱分量的数量由

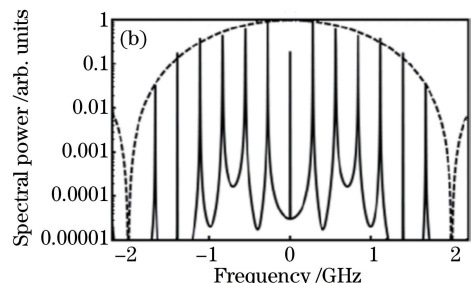
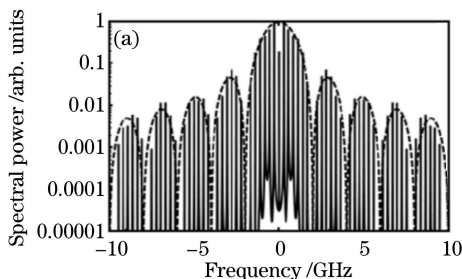


图5 PRBS调制功率谱密度轮廓图

Fig. 5 PSD profiles of PRBS modulation

宽^[66-68]。白噪声相位调制出的光谱是连续的,线型取决于滤波情况,可以实现很强的SBS阈值的提升。带通滤波器和射频放大器的组合保证获得理想的线型和线宽。调制后的功率谱密度(PSD),一种为图3所示 sinc^2 函数轮廓,另一种为图4所示洛伦兹轮廓。

PRBS模式数决定^[69]。模式数一般为 $2^n - 1$,其中 n 值为移位寄存器的长度,用于产生伪随机序列码的模式数。 n 个比特数的值只能是0或者1,而 $2^n - 1$ 包含除去全为0的情况外,所有0或者1的组合情况,0和1分别代表调制深度0和 π 。

图5所示为一个2 GHz调制频率的 $2^3 - 1$ 的PRBS调制的光场的归一化功率谱密度。光谱包含一系列间距为 $\Delta\nu = \nu_{\text{pm}} / (2^n - 1)$ 的模式,其中 ν_{pm} 是PRBS的调制频率。此时的模式间距为 $2 \text{ GHz} / (2^3 - 1) = 0.29 \text{ GHz}$ 。整个 sinc^2 函数包络在调制频率的整数倍数处为零。

PRBS调制后的线宽近似等于PRBS的时钟频率,当调制后的 sinc^2 函数包络中相邻边带的间距明显大于自发布里渊带宽时,SBS阈值不会继续提升,所以要对调制频率和模式数进行适当的调节,保证最佳的SBS抑制。

实际情况下,施加给电光相位调制器的电压存在上限,影响了正弦相位调制的调制深度,从而限制了SBS抑制效果。相比于正弦相位调制,WNS和

PRBS 是更为优化的抑制 SBS 的相位调制方法^[70]。在选定的最佳模式条件下,对于给定的光纤长度和信号光线宽,PRBS 调制抑制 SBS 的效果优于 WNS 调制。此外,在信号光线宽接近布里渊频移(16 GHz)时,信号光线宽和布里渊频移的光谱重叠会为布里渊过程提供放大的机会,从而降低 SBS 阈值。对于 WNS 调制,这种放大不可控制;但是对于 PRBS 调制,可以通过精细调节时钟频率来控制这种放大,从而使 PRBS 调制有更为广阔的前景,可以将线宽进一步展宽以提升 SBS 阈值^[71]。

4 高功率窄线宽光纤激光器最新进展

近年来,高功率窄线宽光纤激光器得到了国内外众多研究单位的广泛关注,取得了显著的研究成果。引力波探测和原子物理领域要求线宽为严格的单频,而频率转换和光束合成领域则可以将线宽要求放宽至吉赫兹量级。所以从单频(低于布里渊带宽)和吉赫兹两个方面介绍高功率窄线宽光纤激光器的研究进展。高功率单频光纤激光器研究中,主

要是从优化增益光纤参数的角度抑制 SBS 效应,目前已经达到了数百瓦的输出功率。高功率吉赫兹量级光纤激光器研究中,除了优化增益光纤参数之外,还需要对种子源的技术方案进行优化,目前已经实现了千瓦量级的输出功率。

4.1 高功率单频光纤激光器研究进展

2007 年,美国康宁公司设计了一种高 SBS 阈值增益光纤,通过改变纤芯中的掺杂物成分及浓度,降低了纤芯中光场和声场的重叠度,纤芯和内包层直径分别为 $39\ \mu\text{m}$ 和 $420\ \mu\text{m}$ 。采用空间耦合结构进行双向抽运,以 8.5 m 此种光纤作为主放大级增益光纤,实验结构如图 6 所示,最终实现了 502 W 的单频激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.4$ ^[72]。

2007 年,英国南安普顿大学对中心波长 1060 nm、功率约 80 mW、线宽 60 kHz 的单频激光进行放大,实验结构如图 7 所示,主放大级基于反向抽运的空间耦合结构,采用自主研发的 $49\ \mu\text{m}/650\ \mu\text{m}$ 模场非保偏光纤作为增益光纤,最终实现了 511 W 的单频激光输出^[73]。

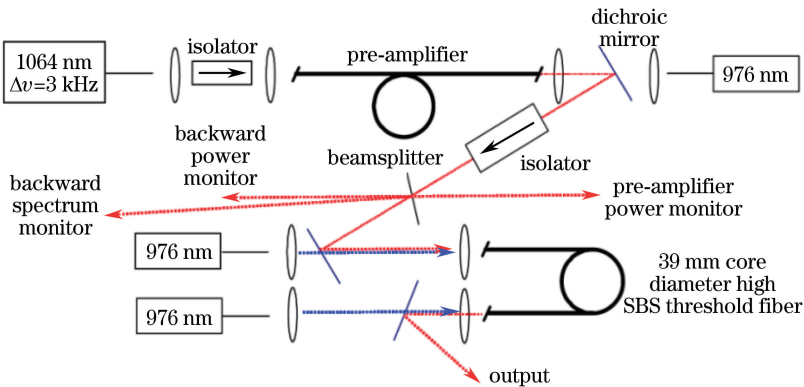


图 6 双向抽运 502 W 单频输出光纤激光器结构示意图

Fig. 6 Schematic of bidirectional pumping fiber laser with 502 W single-frequency output

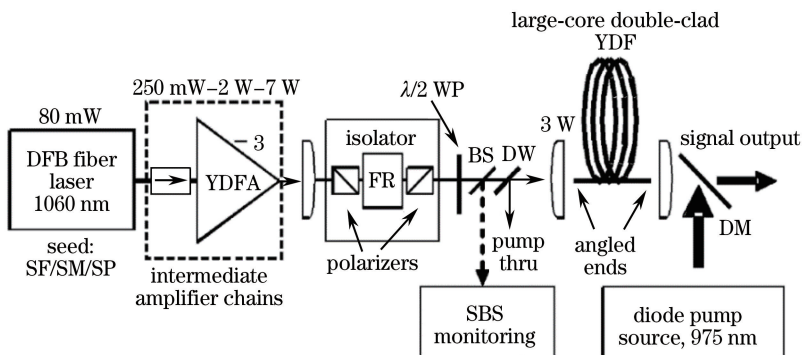


图 7 反向抽运 511 W 单频输出光纤激光器结构示意图

Fig. 7 Schematic of reverse pumping fiber laser with 511 W single-frequency output

美国空军实验室在高功率单频光纤激光器方面的研究取得了一定的成果^[74-75]。2011年,他们采用声场裁剪的光子晶体光纤作为增益光纤,采用反向抽运结构对增益光纤施加温度梯度,如图8所示,结合了多种SBS抑制技术,大大提高了SBS阈值,最终实现了494 W输出, $M^2 < 1.3$ ^[74];2014年,他们对声场裁剪的光子晶体光纤进行了优化设计,将纤芯分成7个独立排布的掺杂区,可以产生三个横向声场,同时抑制SBS和模式不稳定性,最终实现了811 W的单频激光输出, $M^2 < 1.2$,这是公开报道的单频光纤激光的最高输出功率^[75]。

以上研究都是基于空间耦合结构,结构更为紧

凑、稳定性更高的全光纤单频激光器的输出功率同样得到了很大的提升。2013年,中国科学院上海光学精密机械研究所张磊等^[44]对单模光纤施加合适的应力分布,并辅以温度梯度,主放大级采用3.9 m $10 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 保偏光纤,实现了171 W的单频激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.02$,这是单模光纤中单频激光的最高输出功率,实验结构如图9所示^[44]。

2013年,国防科技大学对中心波长1064 nm的单频激光器进行放大,主放大级采用2.8 m保偏高掺杂的 $30 \mu\text{m}/250 \mu\text{m}$ 光纤,实现了332 W单频线偏光纤激光输出,光束质量因子 M^2 约为1.4,实验结构如图10所示^[76]。

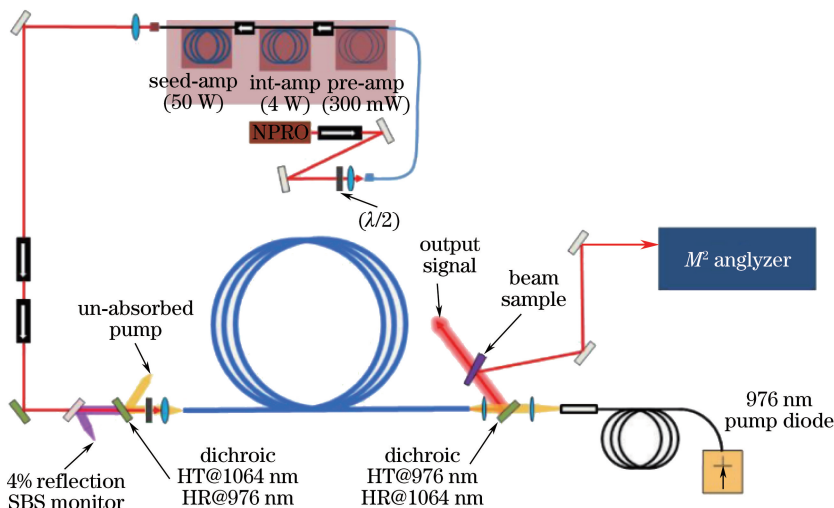


图8 双向抽运声场裁剪光纤单频激光器结构示意图

Fig. 8 Schematic of bidirectional pumping fiber laser with tailored sound field

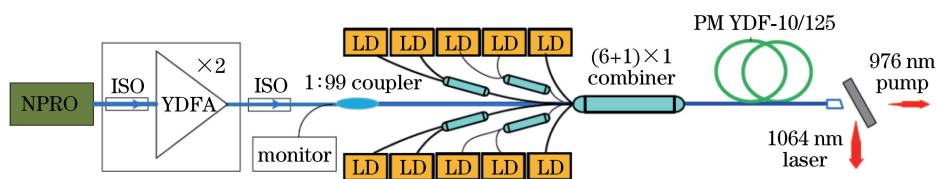


图9 171 W单频激光放大实验结构示意图

Fig. 9 Schematic of single frequency laser amplification system with 171 W output

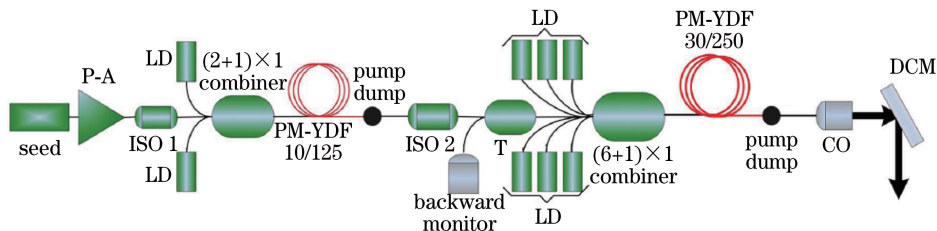


图10 332 W单频激光放大实验结构示意图

Fig. 10 Schematic of single frequency laser amplification system with 332 W output

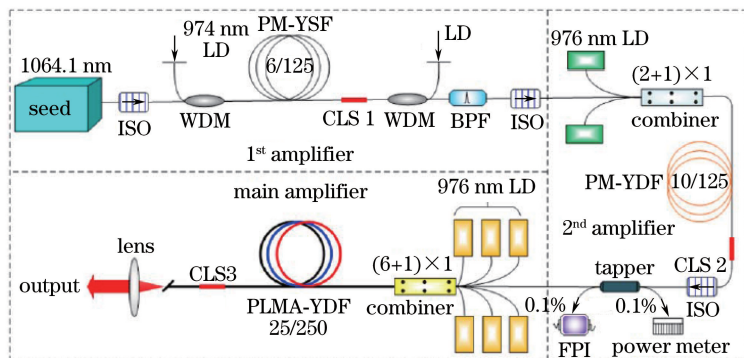


图 11 414 W 全光纤线偏单频激光放大实验结构示意图

Fig. 11 Schematic of full-fiber linearly polarized single frequency laser amplification system with 414 W output

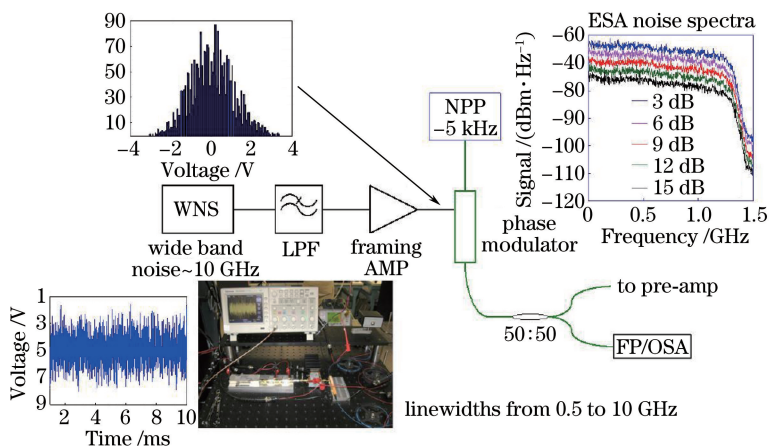


图 12 Nufern 公司白噪声相位调制控制种子源线宽实现结构示意图

Fig. 12 Schematic of controlling seed linewidth by white noise phase modulation in Nufern

2017 年,国防科技大学采用高掺杂的芯径 $25\ \mu\text{m}$ 的增益光纤,同时施加纵向应力场,实现了 414 W 全光纤单频线偏光纤激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.34$,这是全光纤结构单频激光的最高功率,实验结构如图 11 所示^[77]。

4.2 高功率吉赫兹级线宽光纤激光器研究进展

在某些领域(比如光束合成)并不要求严格单频的光源,吉赫兹量级的谱线宽度即可满足要求。通过对单频激光器进行相位调制获得吉赫兹线宽的种子源,然后再通过多级光纤放大器实现高功率激光输出。接下来介绍输出功率大于 1 kW 的吉赫兹线宽光纤激光器的研究进展。

2007 年,美国 Nufern 公司研究人员利用单频激光基于高速相位调制的方法将单频种子光的线宽展宽至 7 GHz,在三级功率放大器中实现了千瓦量级的功率输出^[78]。2010 年,该研究团队采用白噪声相位调制的方法对单频激光器的线宽进行展宽,相位调制的实验结构如图 12 所示,通过调节噪声源和滤波器可实现 0.5~10 GHz 的线宽调节范围,主放

大级采用 9 m $25\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 非保偏光纤,线宽为 3.5 GHz 时,实现了输出功率为 1.01 kW 的窄线宽光纤激光,光束质量因子 $M^2 = 1.15$ ^[79]。

2010 年,美国诺斯罗普·格鲁曼公司通过一个电光相位调制器对 1064 nm 单频激光器(NP Photonics)进行相位调制展宽至 25 GHz,将功率放大至 1.43 kW,并且应用到相干合成技术中,如图 13 所示,放大过程中没有出现光谱展宽和 SBS^[80]。

2011 年,美国 Fibertek 公司采用两个正弦信号组合对中心波长为 1064 nm 的单频激光器进行相位调制,主放大级采用芯径 $35\ \mu\text{m}$ 的高掺杂光纤,采用空间耦合结构,如图 14 所示,实现了功率为 1 kW、线宽为 450 MHz 的激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.4$ ^[81]。

美国 IPG 公司是光纤激光领域的领头羊,他们在高功率窄线宽光纤激光器方面进行了深入的研究^[9,82]。2014 年,基于通过频率转换获得单模绿光的需求,他们对窄线宽光纤激光器进行研究,报道称他们已经研制出 2 kW、25 GHz 的单模窄线宽光纤

激光器,但并未给出细节^[9]。文中给出了 1 kW 窄线宽光纤激光器方案,其实验结构如图 15 所示,采用噪声相位调制的方法,将单频激光线宽展宽到

20 GHz,图 15 下半部分为具体的相位调制线宽展宽过程,最终获得了 1.06 kW 的窄线宽光纤激光输出,此外,他们将整套激光系统集成成为一个

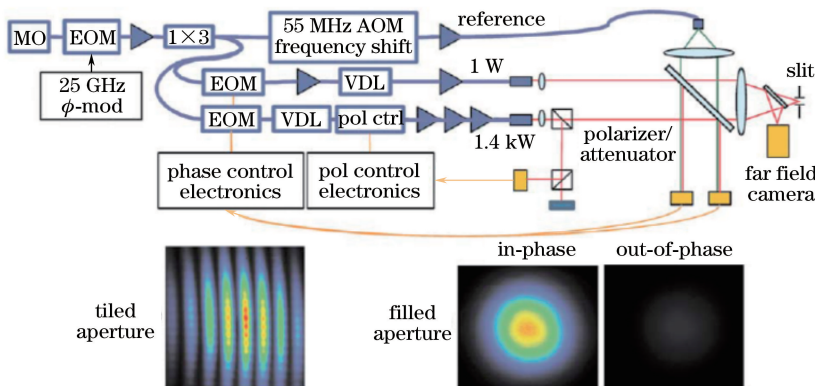


图 13 诺斯罗普·格鲁曼公司1.43 kW 主动相干合成结构示意图

Fig. 13 Schematic of the 1.43 W active coherence structure from Northrop Grumman Corporation

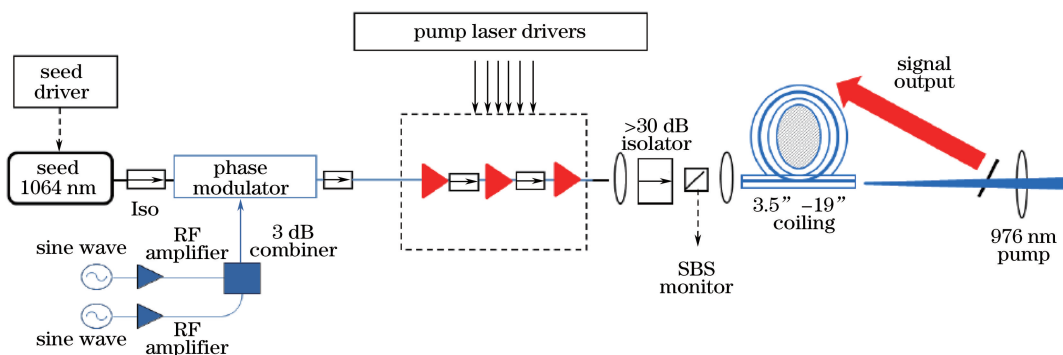


图 14 双正弦信号相位调制千瓦级激光器结构示意图

Fig. 14 Schematic of kW-level laser with phase modulation by dual-sine signals

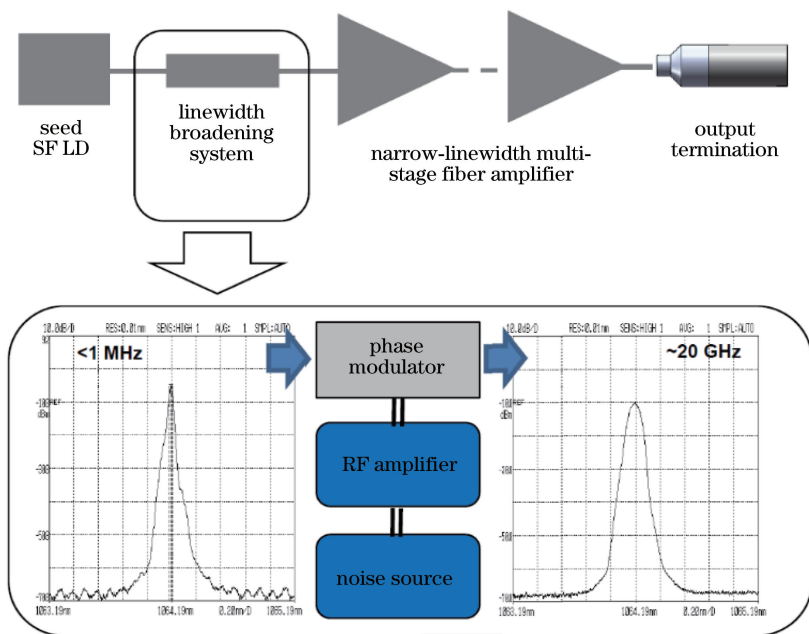


图 15 白噪声相位调制 20 GHz、1 kW 窄线宽光纤激光器结构示意图

Fig. 15 Schematic of 20 GHz and 1 kW fiber laser realized by white noise phase modulation

532 mm×332 mm×52 mm 的紧凑型模块,总质量小于12 kg。2016年,IPG公司通过相位调制将单频激光器的线宽展宽至约15 GHz,实现了中心波长在1030~1070 nm范围内、输出功率大于1.5 kW(1032 nm 1.8 kW,1064 nm 1.4 kW)、线宽小于15 GHz、光束质量因子 $M^2 < 1.1$ 、插拔效率达到40%的整机化窄线宽光纤激光器^[82]。

美国空军实验室在高功率窄线宽光纤激光器方面开展了广泛的研究,对多种SBS抑制方法的理论和实验进行了探索,在千瓦量级窄线宽光纤激光器的研究中取得了一系列成果^[69,83-91]。2013年,该研究团队通过PRBS相位调制对单频种子源展宽,模式数为 $2^5 - 1$,时钟频率为6 GHz,主放大级采用20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤作为增益光纤,实现了6 GHz、1 kW的激光输出^[69];2014年,他们采用1036 nm宽带激光和1064 nm窄带激光合在一起作为种子源,通过增益竞争的方式抑制放大过程中的SBS,主

放大级采用25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤作为增益光纤,最终获得了500 MHz、600 W、中心波长1064 nm的窄线宽光纤激光^[87];同年,他们采用PRBS对中心波长为1064 nm的单频激光器进行相位调制,模式数为 $2^5 - 1$,时钟频率为3 GHz,主放大级采用8 m非保偏25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤,实现了1.17 kW、线宽3 GHz的激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.2$,实验结构如图16所示^[88],并且将其成功应用在相干合成中,实现了5 kW的共孔径相干合成^[18]。

2016年,美国空军实验室采用1038 nm宽带激光和1064 nm窄带激光增益竞争的种子源,主放大级采用10 m非保偏25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤,实现了中心波长为1064 nm、输出功率为1 kW、线宽为2.5 GHz的激光输出,与单频情况相比,SBS阈值提升了15 dB,实验结构如图17所示^[89]。同年,他们采用模式数为 $2^6 - 1$ 、时钟频率为5 GHz的PRBS进行相位调制,在20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 和25 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$

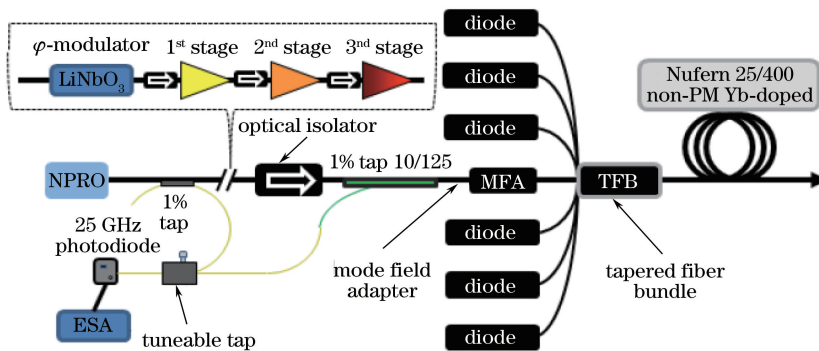


图16 PRBS相位调制种子源放大实验结构示意图

Fig. 16 Schematic of seed amplification with PRBS phase modulation

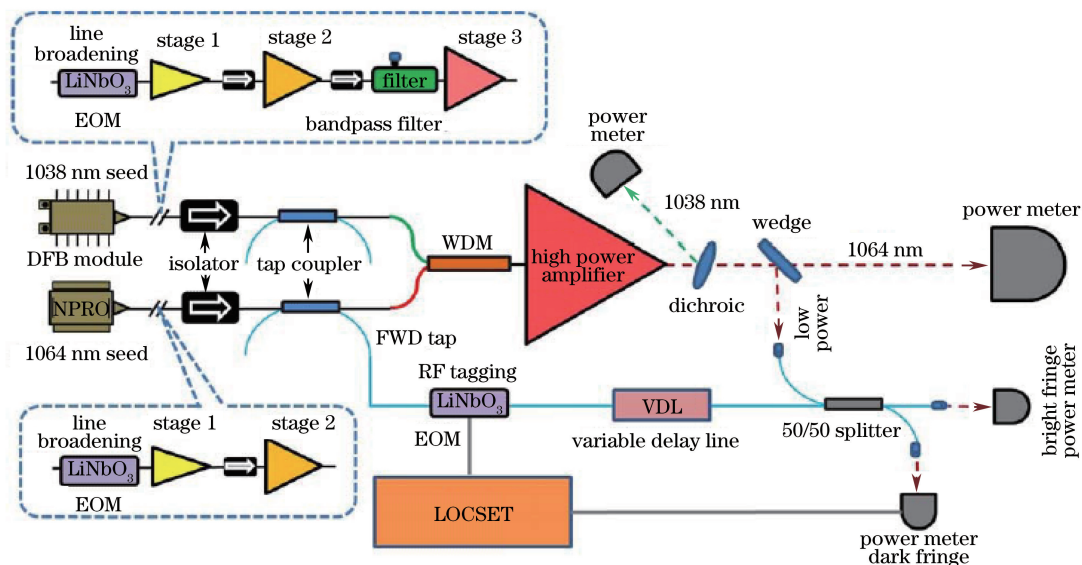


图17 宽带1038 nm与窄带1064 nm增益竞争种子源放大结构示意图

Fig. 17 Schematic of seed amplification with gain competition of 1038 nm wide-band laser and 1064 nm narrow-band laser

的增益光纤中分别实现了 1470 W 和 1480 W 的激光输出,光束质量因子 $M^2 < 1.1$ ^[90]。

美国空军实验室朝着线宽更窄的千瓦级光纤激光器的方向继续研究。他们采用 PRBS 与温度梯度相结合的 SBS 抑制方法,PRBS 的模式数为 $2^4 - 1$,时钟频率为 2 GHz,将一部分光纤缠绕在温度低的线圈上,另一部分增益光纤缠绕在温度较高的线圈上,以此对增益光纤施加一阶温度梯度从而展宽 SBS 增益谱,两种 SBS 抑制方法的有效结合使得 SBS 阈值进一步提升,最终实现了 2 GHz、1 kW 的激光输出,这也是公开报道的千瓦级全光纤激光器的最窄谱线宽度。这对于光谱合成技术是十分重要的工作,极大地拓展了可合成的通道数,为实现更高功率的合成激光奠定了基础^[90]。

此外,美国空军实验室还对高功率窄线宽光纤激光器的波长进行了拓展。2016 年,他们采用 PRBS 对中心波长为 1034 nm 的单频激光种子源进行相位调制,模式数为 $2^8 - 1$,时钟频率为 3.5 GHz,主放大级采用 6.4 m 非保偏 20 $\mu\text{m}/400 \mu\text{m}$ 光纤,

实现了中心波长为 1034 nm、输出功率为 1 kW、线宽为 3.5 GHz 的激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.1, 1.2$,ASE 抑制在 40 dB 以下,与单频情况相比(SBS 阈值为 44 W),SBS 阈值提升了 14 dB。该研究成果意味着高功率窄线宽掺镱光纤激光器向短波长迈进了一大步,从而拓宽了光束合成系统中子光束阵列的波长,为增加合成通道数乃至总合成功率带来巨大的空间^[91]。

美国麻省理工学院(MIT)林肯实验室的研究团队关于高功率窄线宽光纤激光器的研究也有显著的成果^[92-93]。2016 年,他们采用 PRBS 相位调制的方法将中心波长为 1066 nm 的单频激光器的谱线宽度展宽至 12 GHz 作为种子源,以自主研发的金涂层高掺杂大模场光纤作为增益光纤,在抑制非线性效应的同时提升了增益光纤的热承受性,采用双向抽运的空间耦合结构,如图 18 所示,最终实现了 3.1 kW 的窄线宽激光输出,光-光效率达到了 90%,光束质量因子 $M^2 < 1.15$,可以作为相干合成和光谱合成的理想光源^[93]。

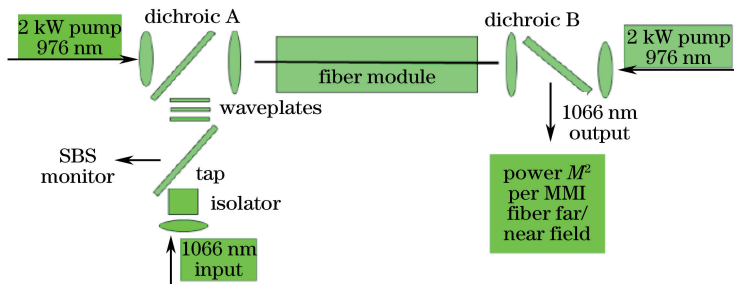


图 18 MIT 空间耦合高功率窄线宽光纤激光器实验结构示意图

Fig. 18 Schematic of the high-power narrow-linewidth fiber laser with spatial coupling structure obtained by the MIT research group

德国耶拿大学在高功率光纤激光以及光纤激光光束领域进行了大量的研究,由于窄线宽光纤激光器在光束合成中的重要性,他们对高功率窄线宽光纤激光器开展了一系列研究^[94-97]。2010 年,该研究团队通过对中心波长 1055 nm、输出功率约 35 mW 的外腔半导体激光器(ECDL)种子源的电流进行噪声调制,展宽种

子源的谱线宽度以抑制 SBS,通过两次预放将种子源功率放大至 30 W,主放大级采用纤芯直径为 42 μm 的光子晶体光纤,实验结构如图 19 所示,最终获得了 1.25 kW 的输出激光,谱线宽度小于 80 pm^[94]。

2015 年,德国耶拿大学通过正弦和白噪声组合相位调制将种子激光线宽展宽至 45 GHz,主放大级

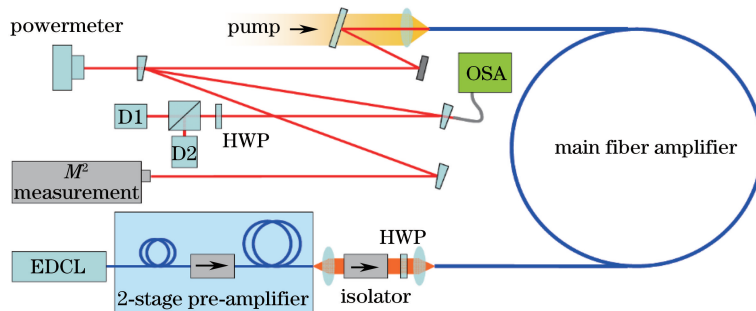


图 19 基于光子晶体光纤的高功率窄线宽光纤激光器结构示意图

Fig. 19 Schematic of the high-power narrow-linewidth fiber laser based on photonic crystal fiber

采用芯径 $20\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.06 的增益光纤,实现了 2.3 kW 的近衍射极限激光输出,两个方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.3 和 1.15^[95]。2016 年,为了克服模式不稳定性对功率扩展的影响,该研究团队采用自主研制的芯径 $24.5\ \mu\text{m}$ 、数值孔径 0.04 的

增益光纤,用相位调制的方法将单频外腔半导体激光器线宽展宽至 170 pm 作为种子源,利用反向抽运的空间耦合结构进行高功率放大,实验结构如图 20 所示,最终实现了 3 kW 的窄线宽(45 GHz)激光输出,光束质量因子 $M^2 = 1.3$ ^[96]。

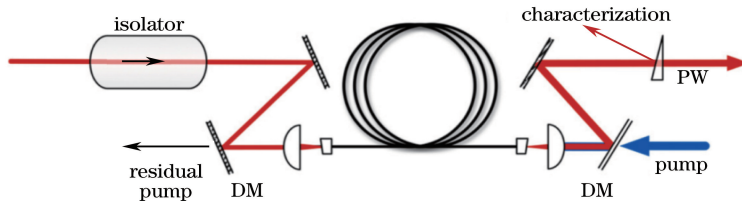


图 20 耶拿大学窄线宽光纤放大器结构示意图

Fig. 20 Schematic of the narrow-linewidth fiber laser obtained by Jena University

2017 年,该研究团队继续推进高功率窄线宽光纤激光器的研究。他们设计了纤芯直径 $23\ \mu\text{m}$ 、包层直径 $460\ \mu\text{m}$ 的低数值孔径光纤,降低了纤芯中掺杂离子的浓度以降低热负载,从而提升模式不稳定性的阈值,实验结构仍采用图 20 所示反向抽运空间耦合结构,通过相位调制的方法将 1067 nm 的单频外腔半导体激光器展宽至 180 pm 作为种子源,通过两级预放大至 10 W,采用长度为 30 m 的上述特制光纤作为主放大级的增益光纤,最终实现了 3.5 kW 的激光输出, $M^2 = 1.3$,这是公开报道的吉赫

兹量级窄线宽光纤激光器的最高输出功率^[97]。

国内主要是国防科技大学、中国科学院上海光学精密机械研究所以及中国工程物理研究院等单位对高功率窄线宽光纤激光器进行研究^[98-103]。国防科技大学于 2016 年对 1064.4 nm 单频激光器进行级联正弦相位调制展宽,主放大级采用 $8.5\ \text{m}$ 保偏 $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 光纤,实验结构如图 21 所示,实现了 45 GHz、1890 W 的激光输出。相比于单频放大, SBS 阈值提升了 18 dB。输出功率为 1520 W 时,两个方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.19 和 1.27^[98]。

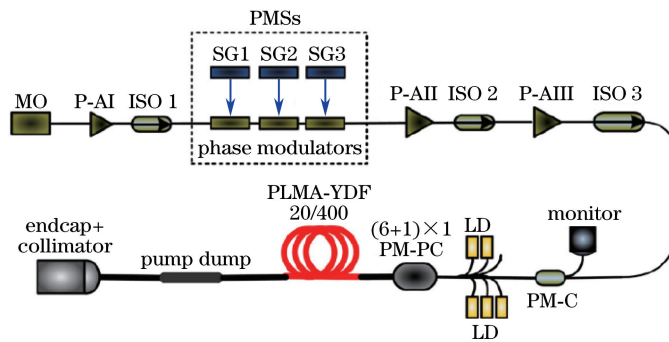


图 21 国防科技大学三级正弦调制种子源放大实验结构图

Fig. 21 Schematic of the three-stage sine wave modulated seed amplification system obtained by National University of Defense Technology, China

2017 年,他们继续对窄线宽光纤激光器的功率提升进行研究,采用白噪声相位调制的方式,将 1064 nm 单频激光的谱线宽度展宽至 0.255 nm (68 GHz),通过两级预放大器将功率提升至 17 W,主放大级采用 $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 光纤作为增益光纤,以柱状代替盘状的缠绕方式抑制模式不稳定性,如图 22 所示,最终实现了 2.43 kW 的窄线宽光纤激光输出,整个放大过程中,谱线宽度保持在 0.255 nm,没有发生展宽,输出功率仅受限于抽运源功率^[99]。

在高功率窄线宽光纤激光器研究中取得了一定的进展,采用白噪声相位调制的方法对单频激光器进行线宽展宽,实验结构如图 23 所示,最终实现了 11.6 GHz、1.5 kW 的高功率窄线宽光纤激光输出,与单频激光直接放大相比, SBS 阈值提高了 57 倍^[100]。此后他们对线宽调控进一步探索,将单频激光线宽展宽至约 50 GHz,主放大级采用 $10\ \text{m}$ $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 光纤,最终实现了 2.5 kW 近衍射极限窄线宽激光输出^[101],并成功将其应用于千瓦光谱合成系统中,保证了良好的合成光束质量^[102]。

2016 年,中国科学院上海光学精密机械研究所

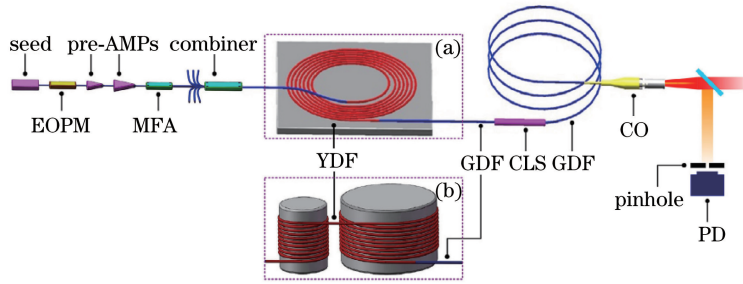


图 22 国防科技大学 2.43 kW 窄线宽光纤激光器结构示意图

Fig. 22 Schematic of the 2.43 kW narrow-linewidth fiber laser obtained by National University of Defense Technology, China

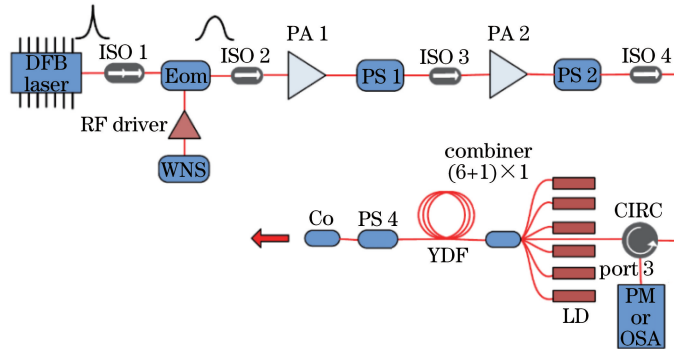


图 23 上海光学精密机械研究所高功率窄线宽光纤激光器结构示意图

Fig. 23 Schematic of the high-power narrow-linewidth fiber laser obtained by Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, China

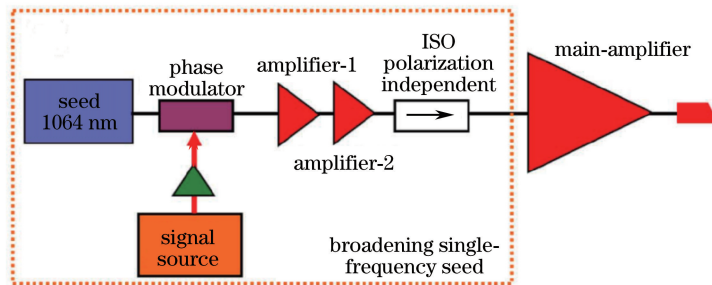


图 24 中国工程物理研究院 6.5 GHz、1 kW 光纤激光器结构示意图

Fig. 24 Schematic of the 6.5 GHz, 1 kW fiber laser obtained by China Academy of Engineering Physics

中国工程物理研究院于 2017 年采用 NKT 公司的单频激光器作为种子源,利用噪声相位调制将其谱线宽度展宽至 6.5 GHz,通过两级预放将功率放大至 14 W,主放大级采用非保偏 $20\ \mu\text{m}/400\ \mu\text{m}$ 光纤作为增益光纤,实验结构如图 24 所示,最终获得了 1093 W 的输出功率,两个方向的光束质量因子 M^2 分别为 1.1 和 1.25,在放大过程中没有出现光谱展宽^[103]。

上述对两种高功率窄线宽光纤激光器(单频和吉赫兹线宽)的国内外研究进展的介绍汇总于表 1 中。

5 结束语

高功率窄线宽光纤激光器具有广阔的应用前

景,得到了国内外众多科研单位的广泛研究。从表 1 可以看出,目前单频光纤激光器的最高输出功率达到了 811 W,采用的是空间耦合结构,而全光纤结构的单频光纤激光器最高输出功率为 414 W。单频光纤激光器输出功率提升,关键在于增益光纤的参数优化,包括掺杂离子、掺杂浓度、纤芯直径等,这对光纤的研制工艺是较大的挑战,导致单频光纤激光器的输出功率至今尚未突破千瓦大关。由于光束合成技术的迫切需求,吉赫兹线宽光纤激光器近些年得到了广泛的研究,其输出功率的扩展可以从种子源和增益光纤两个方面进行优化,单频激光相位调制种子源被认为是最适于实现高功率吉赫兹线宽光

表 1 高功率窄线宽光纤激光器研究进展汇总

Table 1 Progress summary of high-power narrow-linewidth fiber lasers

Property	Year	Research group	Output power /W	Linewidth /GHz
Single frequency	2007	Corning	502	3×10^{-6}
	2007	University of Southampton	511	$<6 \times 10^{-5}$
	2011	AFRL	811	$<5 \times 10^{-6}$
	2013	SIOM	170	$\sim 1 \times 10^{-6}$
	2013	NUDT	332	
	2016	NUDT	414	2×10^{-5}
GHz linewidth	2010	Nufern	1010	3.5
	2010	Northrop Grumman	1400	25
	2011	Fibertek	1000	0.5
	2014	IPG	2500	20
	2016	IPG	>1500	15
	2016	AFRL	1170	3
	2016	AFRL	1000	2.5
	2016	AFRL	1000	2
	2016	AFRL	1480	5
	2016	Friedrich Schiller University Jena	1400	26
	2016	Friedrich Schiller University Jena	3000	45
	2017	Friedrich Schiller University Jena	3500	49
	2016	MIT	3100	12
	2016	NUDT	1890	46
	2016	NUDT	2430	68
	2016	SIOM	2500	50
2017	CAEP	1093	6.5	

纤激光器的种子光源。吉赫兹线宽光纤激光器的输出功率于 2008 年突破了 1 kW。2016 年以来,研究人员采用不断优化的相位调制技术,并与应力梯度、温度梯度等 SBS 抑制技术相结合,在高功率吉赫兹线宽光纤激光器的研究中取得了丰硕的成果。千瓦级输出功率的光纤激光器线宽最窄可达 2 GHz,而数十吉赫兹线宽光纤激光器的输出功率已经突破了 3 kW。线宽和输出功率这两个指标是光束合成技术的核心所在,窄线宽既保证了良好的合成光束质量,又为光束合成阵列规模的扩展带来了可能性。窄线宽光纤激光器不断向着更窄线宽、更高输出功率的方向发展,这会大大提高光束合成的潜力,使得百千瓦甚至更高输出功率近单模光纤激光的实现成为可能。

参 考 文 献

- [1] Xu S H, Li C, Zhang W N, *et al.* Low noise single-frequency single-polarization ytterbium-doped phosphate fiber laser at 1083 nm [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 501-503.
- [2] Li C, Xu S H, Huang X, *et al.* All-optical frequency and intensity noise suppression of single-

frequency fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2015, 40 (9): 1964-1967.

- [3] Mavalvala N, McClelland D E, Mueller G, *et al.* Lasers and optics: looking towards third generation gravitational wave detectors [J]. *General Relativity and Gravitation*, 2011, 43(2): 569-592.
- [4] Wessels P, Karow M, Kuhn V, *et al.* Single-frequency fiber amplifiers for gravitational wave detection [C] // *CLEO: Science and Innovations 2013*, 2013: CW3M.5.
- [5] Chu S, Bjorkholm J E, Ashkin A, *et al.* Experimental observation of optically trapped atoms [J]. *Physical Review Letters*, 1986, 57(3): 314-317.
- [6] Sané S S, Bennetts S, Debs J E, *et al.* 11 W narrow line width laser source at 780 nm for laser cooling and manipulation of rubidium [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8915-8919.
- [7] Wu T, Peng X, Gong W, *et al.* Observation and optimization of 4 He atomic polarization spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 986-988.
- [8] Thompson R J, Tu M, Aveline D C, *et al.* High power single frequency 780 nm laser source

- generated from frequency doubling of a seeded fiber amplifier in a cascade of PPLN crystals[J]. *Optics Express*, 2003, 11(14): 1709-1713.
- [9] Gapontsev V, Avdokhin A, Kadwani P, *et al.* SM green fiber laser operating in CW and QCW regimes and producing over 550 W of average output power [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 8964: 896407.
- [10] Zhang L, Jiang H W, Cui S Z, *et al.* Versatile Raman fiber laser for sodium laser guide star [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(6): 889-895.
- [11] Ricciardi I, Tommasi E D, Maddaloni P, *et al.* A narrow-linewidth, frequency-stabilized OPO for sub-Doppler molecular spectroscopy around 3 μm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8434: 84341Z.
- [12] August S J, Goyal A K, Aggarwal R L, *et al.* Wavelength beam combining of ytterbium fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 331-333.
- [13] Liu A, Mead R, Vatter T, *et al.* Spectral beam combining of high power fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5335: 81-88.
- [14] August S J, Ranka J K, Fan T Y, *et al.* Beam combining of ytterbium fiber amplifiers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(8): 1707-1715.
- [15] Cheung E C, Ho J G, Goodno G D, *et al.* Diffractive-optics-based beam combination of a phase-locked fiber laser array [J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 354-356.
- [16] Yu C X, August 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.
- [17] Redmond S M, Ripin D J, Yu C X, *et al.* Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(14): 2832-2834.
- [18] Flores A, Dajani I, Holten R, *et al.* Multi-kilowatt diffractive coherent combining of pseudorandom-modulated fiber amplifiers [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(9): 096101.
- [19] Loftus T H, Thomas A M, Hoffman P R, *et al.* Spectrally beam-combined fiber lasers for high-average-power applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(3): 487-497.
- [20] Schreiber T, Wirth C, Schmidt O, *et al.* Incoherent beam combining of continuous-wave and pulsed Yb-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 354-360.
- [21] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* 2 kW incoherent beam combining of four narrow-linewidth photonic crystal fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1178-1183.
- [22] Wirth C, Schmidt O, Tsybin I, *et al.* High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(16): 3118-3120.
- [23] Honea E, Afzal R S, Leuchs M S, *et al.* Advances in fiber laser spectral beam combining for power scaling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9730: 97300Y.
- [24] Zheng Y, Yang Y F, Wang J H, *et al.* 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber super fluorescent sources and their dispersion compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [25] <http://news.lockheedmartin.com/2017-03-16-Lockheed-Martin-to-Deliver-World-Record-Setting-60-kW-Laser-to-U-S-Army>.
- [26] Dawson J W, Messerly M J, Beach R J, *et al.* Analysis of the scalability of diffraction-limited fiber lasers and amplifiers to high average power [J]. *Optics Express*, 2008, 16(17): 13240-13266.
- [27] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. New York: Academic Press, 1997.
- [28] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(10): 1842-1851.
- [29] Yin Z, Yan F P, Liu S, *et al.* Research of stimulated Brillouin scattering effect in 2 μm band single-frequency Raman fiber amplifier [J]. *Navigation and Control*, 2015, 14(1): 100-105.
尹智, 延凤平, 刘硕, 等. 2 μm 波段单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射研究 [J]. *导航与控制*, 2015, 14(1): 100-105.
- [30] Zhao D, Yan F P, Liu S, *et al.* Analysis of the characteristics of the thulium doped fiber amplifier for dual-single-frequency amplification [J]. *Navigation and Control*, 2017, 16(1): 57-63.
赵丹, 延凤平, 刘硕, 等. 掺铥光纤放大器对双单频激光放大的特性分析 [J]. *导航与控制*, 2017, 16(1): 57-63.
- [31] WeBels P, Adel P, Wandt D, *et al.* Novel suppression scheme for Brillouin scattering [J].

- Optics Express, 2004, 12(19): 4443-4448.
- [32] Alegria C, Jeong Y, Codemard C, *et al.* 83-W single-frequency narrow-line width MOPA using large-core erbium ytterbium co-doped fiber [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(8): 1825-1827.
- [33] 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.
- [34] Mermelstein M D, Andrejco M J, Fini J, *et al.* SBS suppression and acoustic management for high-power narrow-linewidth fiber lasers and amplifiers [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7580: 75801G.
- [35] Robin C, Dajani I. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications [J]. Optics Letters, 2011, 36 (14): 2641-2643.
- [36] Li M J, Chen X, Wang J, *et al.* Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold [J]. Optics Express, 2007, 15(13): 8290-8299.
- [37] Liu T, Tong W J, Zhang F H, *et al.* A new Ge/F-co-doped SMF with enhanced SBS threshold fabricated by PCVD [J]. Chinese Physics Letters, 2011, 28(10): 104211.
- [38] Kovalev V I, Harrison R G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. Optics Letters, 2006, 31(2): 161-163.
- [39] Liu A. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient [J]. Optics Express, 2007, 15 (3): 977-984.
- [40] Hansryd J, Dross F, Westlund M, *et al.* Increase of the SBS threshold in a short highly nonlinear fiber by applying a temperature distribution [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19 (11): 1691-1697.
- [41] Yoshizawa N, Imai T. Stimulated Brillouin scattering suppression by means of applying strain distribution to fiber with cabling [J]. Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(10): 1518-1522.
- [42] Boggio J M C, Marconi J D, Fragnito H L. Experimental and numerical investigation of the SBS-threshold increase in an optical fiber by applying strain distributions [J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(11): 3808-3814.
- [43] Engelbrecht R, Mueller M, Schmauss B. SBS shaping and suppression by arbitrary strain distributions realized by a fiber coiling machine [C] // IEEE/LEOS Winter Topicals Meeting Series, 2009: 248-249.
- [44] 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.
- [45] Engelbrecht R. Analysis of SBS gain shaping and threshold increase by arbitrary strain distributions [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32 (9): 1689-1700.
- [46] 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.
- [47] Flores A, Lu C, Robin C, *et al.* Experimental and theoretical studies of phase modulation in Yb-doped fiber amplifiers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8381: 83811B.
- [48] Soh D, Koplow J P, Moore S W, *et al.* The effect of dispersion on spectral broadening of incoherent continuous-wave light in optical fibers [J]. Optics Express, 2010, 21(18): 22393-22405.
- [49] Bednyakova A E, Gorbunov O A, Politko M O, *et al.* Generation dynamics of the narrowband Yb-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2013, 21(7): 8177-8182.
- [50] Roy V, Piché M, Babin F, *et al.* Nonlinear wave mixing in a multilongitudinal-mode erbium-doped fiber laser [J]. Optics Express, 2005, 13 (18): 6791-6797.
- [51] Kablukov S I, Zlobina E A, Podivilov E V, *et al.* Output spectrum of Yb-doped fiber lasers [J]. Optics Letters, 2012, 37(13): 2508-2510.
- [52] Liu W, Kuang W J, Jiang M, *et al.* Modeling of the spectral evolution in a narrow-linewidth fiber amplifier [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(3): 035105.
- [53] Babin S A, Churkin D V, Ismagulov A E, *et al.* Four-wave-mixing-induced turbulent spectral broadening in a long Raman fiber laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1729-1738.
- [54] Cholan N A, Al-Mansoori M H, Noor A S M, *et al.* Multi-wavelength generation by self-seeded four wave mixing [J]. Optics Express, 2013, 21

- (5): 6131-6138.
- [55] Liu G B, Yang Y F, Lei M, *et al.* 1.5 kW near-diffraction-limited all fiber ASE source with narrow linewidth[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1202009.
刘广柏, 杨依枫, 雷敏, 等. 1.5 kW 近衍射极限全光纤窄带超荧光光源[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1202009.
- [56] Xu J M, Huang L, Jiang M, *et al.* Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. Photonics Research, 2017, 5(4): 350-354.
- [57] Chen X L, Zheng Y, Li X, *et al.* 10.6 GHz linewidth maintained random fiber laser seed source [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(7): 0701005.
陈晓龙, 郑也, 李璇, 等. 10.6 GHz 线宽保持随机光纤激光种子源[J]. 中国激光, 2017, 44(7): 0701005.
- [58] Xu Y, Fang Q, Qin Y G, *et al.* 2 kW narrow spectral width monolithic continuous wave in a near-diffraction-limited fiber laser [J]. Applied Optics, 2015, 54(32): 9419-9421.
- [59] Huang Z H, Liang X B, Li C Y, *et al.* Spectral broadening in high-power Yb-doped fiber lasers employing narrow-linewidth multi-longitudinal-mode oscillators[J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 297-302.
- [60] Hao J P, Zhao H, Zhang D Y, *et al.* kW-level narrow linewidth fiber amplifier seeded by a fiber Bragg grating based oscillator[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4857-4862.
- [61] Aoki Y, Tajima K, Mito I. Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 1988, 6(5): 710-719.
- [62] Korotky S K. Multifrequency lightwave source using phase modulation for suppressing stimulated Brillouin scattering in optical fiber: EP0730190A3 [P]. 1995-03-02.
- [63] Yang J L, Guo Z N, Zha K D. Experimental study of phase modulation for SBS suppression in optical fiber CATV system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(5): 439-442.
杨建良, 郭照南, 查开德. 调相法抑制光纤 CATV 中受激布里渊散射的实验研究[J]. 中国激光, 2001, 28(5): 439-442.
- [64] Liu Y F, Lü 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.
- [65] Wang X L, Zhou P, Leng J Y, *et al.* A 275-W multitone driven all-fiber amplifier seeded by a phase-modulated single frequency laser for coherent beam combining [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(14): 980-982.
- [66] Williamson R S. Laser coherence control using homogeneous linewidth broadening: US20050047454A1 [P]. 2003-08-29.
- [67] Suradeepa V R. Stimulated Brillouin scattering thresholds in optical fibers for lasers linewidth broadened with noise[J]. Optics Express, 2013, 21(4): 4677-4687.
- [68] Anderson B, Robin C, Flores A, *et al.* Experimental study of SBS suppression via white noise phase modulation [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8961: 89611W.
- [69] Robin C, Dajani I, Zernig C, *et al.* Pseudo-random binary sequency phase modulation in high power Yb-doped fiber amplifiers[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8601: 86010Z.
- [70] Anderson B, Flores A, Holten R, *et al.* Beam combining and SBS suppression in white noise and pseudorandom modulated amplifier[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9344: 93441U.
- [71] 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.
- [72] Gray S, Liu A, 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.
- [73] 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.
- [74] Robin C, Dajani I, Chiragh F. Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single-frequency output [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7914: 79140B.
- [75] Robin C, Dajani I, Pulford B. Modal instability-suppressing, single-frequency photonic crystal fiber

- amplifier with 811 W output power [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(3): 666-669.
- [76] Ma P F, Zhou P, Ma Y X, *et al.* Single-frequency 332 W, linearly polarized Yb-doped all-fiber amplifier with near diffraction-limited beam quality [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(20): 4854-4857.
- [77] Huang L, Wu H S, Li R X, *et al.* 414 W near-diffraction-limited all-fiberized single-frequency polarization-maintained fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 1-4.
- [78] Edgcombe J, Bjork D, Galipeau J, *et al.* Kilowatt-level PM amplifiers for beam combining [C] // *Frontiers in Optics*, 2008, 2008: FTuJ2.
- [79] Khitrov V, Farley K, Leveille R, *et al.* kW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7686: 76860A.
- [80] Goodno G D, McNaught S J, Rothenberg J E, *et al.* Active phase and polarization locking of a 1.4 kW fiber amplifier [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1542-1544.
- [81] 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.
- [82] Yagodkin R, Platonov N, Yusim A, *et al.* >1.5 kW narrow linewidth CW diffraction-limited fiber amplifier with 40 nm bandwidth [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972807.
- [83] Dajani I, Zeringue C, Bronder T J, *et al.* A theoretical treatment of two approaches to SBS mitigation with two-tone amplification [J]. *Optics Express*, 2008, 16(18): 14233-14247.
- [84] Dajani I, Zeringue C, Shay T M. Investigation of nonlinear effects in multitone-driven narrow-linewidth high-power amplifiers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 406-414.
- [85] Dajani I, Zeringue C, Lu C, *et al.* Stimulated Brillouin scattering suppression through laser gain competition: scalability to high power [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(18): 3114-3116.
- [86] Zeringue C M, Dajani I, Moore G T. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers through phase modulation: a time dependent model [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 7914: 791409.
- [87] Flores A, Dajani A, Naderi N A. High power, sub-GHz, monolithic fiber amplifier based on phase modulated laser gain competition [C] // *CLEO*, 2014: SW3N.3.
- [88] Flores A, Robin C, Lanari A, *et al.* Pseudorandom binary sequence phase modulation for narrow linewidth, kilowatt, monolithic fiber amplifiers [J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17735-17744.
- [89] Naderi N A, Flores A, Anderson B M, *et al.* Beam combinable, kilowatt, all-fiber amplifier based on phase-modulated laser gain competition [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3964-3967.
- [90] Dajani I, Flores A, Holten R, *et al.* Multi-kilowatt power scaling and coherent beam combining of narrow linewidth fiber lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972801.
- [91] Naderi N A, Dajani I, Flores A. High-efficiency, kilowatt 1034 nm all-fiber amplifier operating at 11 pm linewidth [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 1018-1021.
- [92] Yu C X, Shatrovov O, Fan T Y. All-glass fiber amplifier pumped by ultra-high brightness pumps [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9728: 972806.
- [93] 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.
- [94] Wirth C, Schreiber T, Rekas M, *et al.* High-power linear-polarized narrow linewidth photonic crystal fiber amplifier [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7580: 75801H.
- [95] Nold J, Strecker M, Liem A, *et al.* Narrow linewidth single mode fiber amplifier with 2.3 kW average power [C] // *European Conference on Lasers and Electro-Optics/European Quantum Electronics Conference*, 2015: CJ_11_4.
- [96] Beier F, Hupel C, Nold J, *et al.* Narrow linewidth, single mode 3 kW average power from a directly diode pumped ytterbium-doped low NA fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6011-6020.
- [97] Beier F, Hupel C, Nold J, *et al.* Single mode 4.3 kW output power from a diode-pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14892-14899.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] Liu G B, Yang Y F, Wang J H, *et al.* SBS enhancement factor improvement in 11.6 GHz linewidth, 1.5 kW Yb-doped fiber amplifier [J]. *Chinese Physics Letters*, 2016, 33(7): 074207.
- [101] Yang Y F, Shen H, Chen X L, *et al.* 2.5 kW output near diffraction limit obtained by a full-fiberized high-efficiency narrow-linewidth laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(4): 0419004.
- 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.
- [102] Zheng Y, Yang Y F, Zhao X, *et al.* Research progress on spectral beam combining technology of high power fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(2): 0201002.
- 郑也, 杨依枫, 赵翔, 等. 高功率光纤激光光谱合成技术的研究进展 [J]. *中国激光*, 2017, 44(2): 0201002.
- [103] Wang Y S, Feng Y J, Wang X J, *et al.* 6.5 GHz linearly polarized kilowatt fiber amplifier based on active polarization control [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2760-2765.