

# 窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射抑制研究进展

冉阳 王小林 粟荣涛 周朴 司磊

国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 受激布里渊散射(SBS)是窄线宽高功率光纤放大器输出功率的主要限制因素。介绍了目前国内外主要的SBS抑制方案及其研究进展,重点介绍了通过相位调制等方法展宽种子激光线宽以及施加温度、应力梯度和声场裁剪等改变布里渊增益谱的SBS抑制方法。对各种SBS抑制方案进行了对比和总结,为相关研究提供参考。

**关键词** 散射;受激布里渊散射;相位调制;声场裁剪;啁啾;增益谱

中图分类号 O437 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040003

## Research Progress of Stimulated Brillouin Scattering Suppression in Narrow Linewidth Fiber Amplifiers

Ran Yang Wang Xiaolin Su Rongtao Zhou Pu Si Lei

College of Optoelectric Science and Engineering, National University of Defense Technology,  
Changsha, Hunan 410073, China

**Abstract** Stimulated Brillouin scattering(SBS) is the main factor which limits the output power in narrow linewidth high power fiber amplifiers. Present SBS suppression methods and progress at home and abroad are illustrated, phase modulation to broaden the linewidth of the seed laser and the methods through applying gradient of temperature and strain to broaden the SBS gain spectrum are emphatically introduced, as well as some other methods such as acoustically tailored fiber. Finally, different approaches of SBS suppression are summarized and compared, which provides some references in related studies.

**Key words** scattering; Stimulated Brillouin scattering; phase modulation; acoustically tailored; chirp; gain spectrum

**OCIS codes** 290.5900; 060.2320; 190.4370; 140.3570

### 1 引言

高功率窄线宽光纤放大器在遥感测量、引力波探测、非线性频率转换、相干合成等领域有着重要应用<sup>[1-3]</sup>。在高功率窄线宽掺稀土离子光纤放大器中,受激布里渊散射(SBS)由于其较低的阈值特性成为功率提升的首要限制因素。SBS是由于高强度的光传输所激发的后向Stokes波:当抽运功率达到一定水平时,抽运光引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射抽运光,形成后向Stokes光;产生的后向Stokes光与抽运光相干涉并通过电致伸缩效应产生声波,声波场进一步调制介质折射率散射抽运光<sup>[4]</sup>。由于能量守恒,这样的SBS产生过程便限制了前向输出功率。在传能光纤中,后向Stokes波的产生会严重限制光纤输出端的功率;在增益光纤中,后向光场会产生脉动进而引起光纤放大器中的器件损耗。因而,对SBS的抑制成为光纤放大系统中亟待解决的关键问题。

目前为止,国内外对窄线宽光纤放大器中SBS的抑制方案已进行了较为广泛的研究<sup>[5-11]</sup>。可以认为,输出激光线宽小于10 GHz的激光为窄线宽激光。对于严格单频的1 μm光纤激光目前全光纤结构和空间结构最高输出功率分别为332 W和811 W。2013年,国防科学技术大学Ma等<sup>[12]</sup>实现了332 W的近衍射极限单频激光输出,为目前全光纤单频放大器的最高输出功率;2014年,美国空军实验室Robin等<sup>[10]</sup>利用声场裁剪技术实现了811 W的保偏光子晶体光纤放大器的单频输出,是目前为止通过空间结构实现的最高单频激光输

收稿日期: 2014-10-31; 收到修改稿日期: 2014-11-30; 网络出版日期: 2015-04-04

基金项目: 湖南省自然科学基金(14JJ3004)、湖南省教育厅科学研究项目(YB2013B003)

作者简介: 冉阳(1991—),女,硕士研究生,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。E-mail: ran\_yang@163.com

导师简介: 司磊(1971—),男,博士,研究员,主要从事高功率光纤激光器方面的研究。

E-mail: w\_zt@163.com(通信联系人)

出功率。纵观光纤激光单频放大器功率提升的发展过程,实际上是SBS抑制方法不断改进的过程。本文从SBS的产生机理出发,介绍SBS的不同抑制方案并对其进行简单分析,在此基础上总结对比不同的SBS抑制方案的异同点及优缺点,并对高功率窄线宽光纤放大器的功率水平进行展望。

## 2 SBS的产生机理与影响因素

### 2.1 SBS产生的物理过程

从电磁场基本理论而言,SBS是由三阶非线性极化率 $\chi^{(3)}$ 的虚部导致的感应电极化强度所产生。从量子力学的观点看,SBS散射过程可以看成是一个抽运光子湮灭,同时产生一个Stokes光子和一个声频声子<sup>[12]</sup>。为了便于理解,从经典理论的角度分析SBS的产生机理。SBS的产生可以描述为抽运激光和Stokes光通过声波场进行的非线性相互作用。SBS物理过程如图1所示<sup>[4]</sup>,当抽运激光功率达到一定水平时会引起光纤中折射率光栅的产生,该光栅通过布拉格衍射散射抽运光,形成后向Stokes光,后向Stokes光与抽运激光发生干涉,通过电致伸缩效应产生声波,声波场反过来调制介质折射率并增强对抽运激光的后向散射。

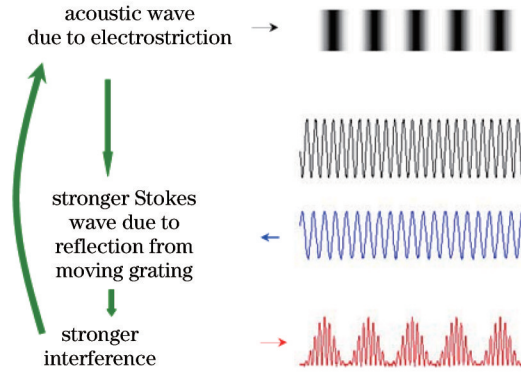


图1 SBS物理过程示意图

Fig.1 Physical process diagram of SBS

Stokes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,若假设声波以 $\exp(-\Gamma_B t)$ 衰减,则布里渊增益谱具有如下洛伦兹形谱线分布<sup>[12]</sup>:

$$g_B(\Omega) = \frac{g_p(\Gamma_B/2)^2}{(\Omega - \Omega_B)^2 + (\Gamma_B/2)^2}, \quad (1)$$

在 $\Omega = \Omega_B$ 处,布里渊增益峰值为<sup>[13]</sup>

$$g_p = g_B(\Omega_B) = \frac{8\pi^2 \gamma_e^2}{n_p \lambda_p^2 \rho_0 c v_A \Gamma_B}, \quad (2)$$

式中 $\Omega_B$ 为声波频率, $n_p$ 为入射波长 $\lambda_p$ 处的有效折射率, $\gamma_e \approx 0.902$ 是石英的电致伸缩常数, $\rho_0 \approx 2210 \text{ kg/m}^3$ 是石英的密度, $v_A$ 为光纤中的声速, $c$ 为光速。增益谱的半峰全宽(FWHM) $\Delta\nu_B$ 与 $\Gamma_B$ 的关系为 $\Delta\nu_B = \Gamma_B/(2\pi)$ ,声子寿命 $T_B = \Gamma_B^{-1}$ ,通常小于10 ns。

通过对SBS过程的耦合方程进行分析,可得传能光纤和增益光纤中的SBS阈值表达式分别为<sup>[13]</sup>

$$P_{th} \propto 21 \frac{A_{eff}}{g_B(\Omega_B) L_{eff}}, \quad (3)$$

$$P_{th} \propto 21 \frac{A_{eff}}{g_B(\Omega_B) L} \ln(G), \quad (4)$$

式中 $A_{eff}$ 为光纤有效模场面积, $L_{eff}$ 为有效光纤长度, $L$ 为光纤实际长度, $G$ 为光纤放大器的线性增益系数。

表示布里渊增益的(1)式是在稳态下得到的,因而对光谱宽度 $\Delta\nu_L$ 远小于布里渊增益带宽 $\Delta\nu_B$ 的连续或准连续波抽运( $T_0 \gg T_B$ )有效。对脉宽 $T_0 < T_B$ 的抽运脉冲,与由(2)式得到的结果相比,布里渊增益显著减小。即使是连续波抽运,若有 $\Delta\nu_L > \Delta\nu_B$ ,则相应的抽运相干长度小于SBS特征增益长度,此时抽运光线宽展宽的越多,对应的有效布里渊增益谱越宽,SBS增益越小<sup>[14]</sup>,此时若抽运波具有洛伦兹线型,其增益谱仍

可由(1)式给出,但布里渊增益的峰值降至原来的  $(1 + \Delta\nu_L/\Delta\nu_B)$  倍,即当  $\Delta\nu_L \gg \Delta\nu_B$  时,SBS 阈值增大很多。

## 2.2 SBS 影响因素分析

根据 2.1 节的分析,综合考虑 SBS 增益(1)式和 SBS 阈值方程(3)式和(4)式,可知 SBS 的阈值影响因素。从(3)式和(4)式可知,通过利用纤芯更粗因而有效模场面积  $A_{\text{eff}}$  更大的光纤可以增大 SBS 阈值,通过增大放大器的增益系数  $G$  可以提高 SBS 阈值,通过减小光纤有效长度  $L_{\text{eff}}$  或减小布里渊增益峰值  $g_B(\Omega_B)$  也可以提升 SBS 阈值。通过(1)式的推导条件知,减小  $g_B(\Omega_B)$  可以通过以下方法实现:增大抽运激光的线宽从而使得  $g_B(\Omega_B)$  降低至原来的  $1 + \Delta\nu_L/\Delta\nu_B$  倍;减小抽运激光的脉宽  $T_0$  使其小于声子寿命  $T_B$  进而减小了  $g_B(\Omega_B)$ 。根据峰值增益  $g_B(\Omega_B)$  的自身表达(2)式和关系式  $\Delta\nu_B = \Gamma_B/(2\pi)$  可知,通过增大布里渊增益带宽即可减小  $g_B(\Omega_B)$  从而实现对 SBS 的抑制。

## 3 窄线宽光纤放大器 SBS 抑制的研究进展

自 1964 年观察到 SBS 这种非线性效应以来<sup>[15]</sup>,人们已经对它进行了广泛的研究,对 SBS 的抑制方案也进行了广泛的探索。根据第 2 节的分析,本节将从不同 SBS 阈值影响因素的角度出发,对窄线宽光纤放大器中 SBS 抑制的研究进展进行介绍。

### 3.1 增大光纤有效模场面积抑制 SBS

2004 年, Alegria 等<sup>[16]</sup>利用 30/400  $\mu\text{m}$  大模场铷镜共掺光纤将 1552 nm 线宽为 13 kHz 的分布反馈式 (DFB) 激光种子源输出功率放大到了 83 W。放大后的激光线宽并未被展宽,由于大模场面积光纤的应用,也并未出现 SBS。

2007 年, Gray 等<sup>[17]</sup>将 8.5 m 长纤芯直径为 39  $\mu\text{m}$  的大模场 Al-Ge 梯度掺杂光纤作为主放大器的增益光纤,将 1064 nm 的单频种子激光功率提升到了 502 W,有效抑制了 SBS,其实验结构如图 2 所示。线宽为 3 kHz 的 100 mW 种子激光经由直径为 20  $\mu\text{m}$  的双包层掺铋保偏光纤组成的预放大器放大到 5 W 后送入主放,主放采用双端抽运,在 39  $\mu\text{m}$  的大模场高 SBS 阈值光纤的应用下实现了大于 500 W 的单频激光输出,其线宽为 3 kHz。

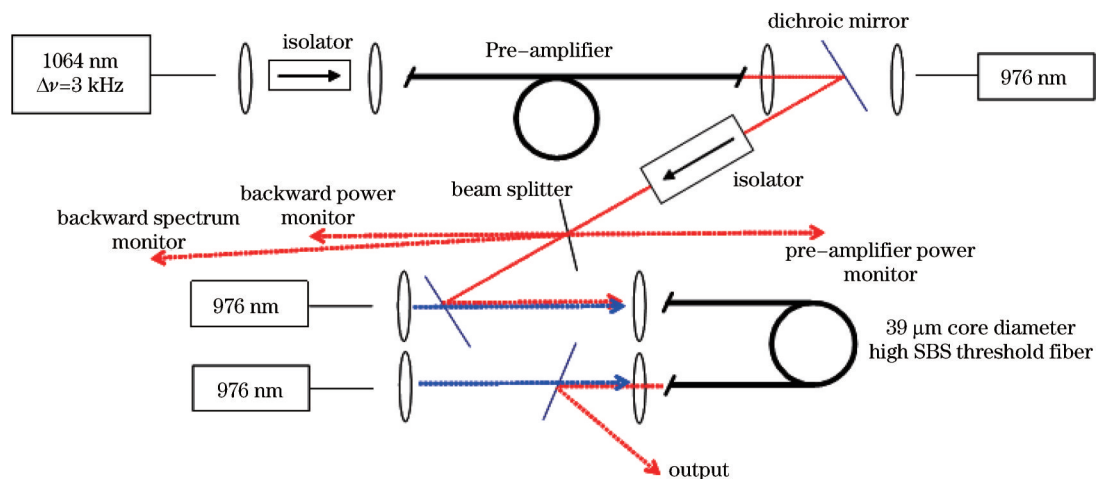


图 2 高 SBS 阈值光纤放大系统示意图

Fig.2 Schematic of amplifier system with high SBS threshold fiber

### 3.2 利用高掺杂或大模场光纤以减小光纤有效长度抑制 SBS

2008 年, Leigh 等<sup>[18]</sup>运用长 12 cm、纤芯直径为 15  $\mu\text{m}$  的保偏双包层大模场铷镜共掺磷酸盐玻璃光纤 (LC-EYPF) 实现了最高峰值功率为 51.5 kW、最高平均功率为 1.66 W 的单频 1.5  $\mu\text{m}$  脉冲激光输出,其实验结构如图 3 所示。线宽为 2 kHz 的连续波 (CW) 单频种子激光器经过一个由两个电光调制器 (EOM) 组成的脉冲发生系统后进入 3 级放大器 (A) 组成的主振荡功率放大 (MOPA) 系统。由于大模场面积光纤的运用和较短的光纤长度 (仅 12 cm), 该系统较好地抑制了 SBS, 最终实现了 51.5 kW 的单频峰值脉冲输出。图中 PA 为掺铷光纤 (EDF) 预放大器, BP filter 为带通滤波器, EYDF 为铷镜共掺光纤。

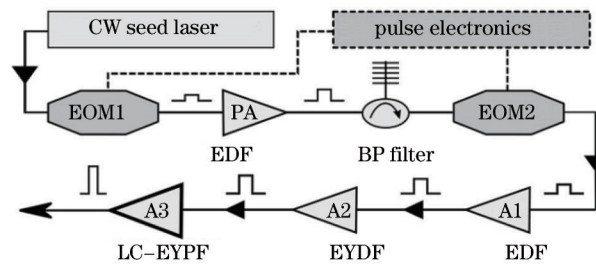


图3 脉冲主振荡功率放大器

Fig.3 Schematic of pulsed master oscillator-power amplifier

2010年,Shi等<sup>[19]</sup>设计并制造了一种新型的高掺杂LC-EYDF光纤,仅用15 cm长的该光纤作为MOPA结构中主放大器的增益光纤,就实现了峰值功率为1.2 kW的脉冲激光输出。该新型光纤的纤芯直径为25  $\mu\text{m}$ ,包层直径为400  $\mu\text{m}$ ,铟、镱掺杂质量分数分别为3%和15%,纤芯数值孔径NA约为0.0395。通过用单频主动调Q光纤激光器在1530 nm处产生数百纳秒的光纤激光作为种子光,并用15 cm长的该新型LC-EYDF光纤作为主放大器的增益光纤,最终得到了重复频率为8 kHz、脉宽为105 ns、峰值功率为1.2 kW的脉冲激光输出。其脉冲能量为0.126 mJ,对SBS实现了较好的抑制,实现了近衍射极限的激光输出。

2012年,Wang等<sup>[20]</sup>运用1.5 m长、975 nm处吸收系数为16 dB/m的30/125  $\mu\text{m}$ 高掺杂大模场光纤搭建了全光纤MOPA系统,最终实现了光束衍射倍率 $M^2$ 为1.3的310 W、1064 nm单频激光输出,其线宽小于20 kHz。由于主放光纤的高吸收系数,使得其需要的增益光纤长度很短,且在没有采取其他SBS抑制方法的情况下,实现了很好的SBS抑制效果。

### 3.3 相位调制展宽种子激光线宽抑制SBS

相位调制抑制SBS的方案主要有以下几种:通过信号发生器施加正弦相位调制、用射频(RF)白噪声源(WNS)和RF低通滤波器实现的白噪声相位调制、交叉相位调制、方波调制和伪随机码序(PRBS)相位调制等。该类方案是通过展宽种子激光线宽降低布里渊增益峰值实现SBS抑制的。

本文将主要从正弦相位调制、白噪声相位调制和伪随机码序相位调制等几种方案介绍相位调制展宽种子激光线宽抑制SBS的原理,再对各种方案的最新研究进展进行说明。

#### 3.3.1 正弦相位调制

早期的正弦相位调制主要是单级调制,其SBS阈值提升能力十分有限,只能将SBS阈值提高5 dB左右<sup>[21]</sup>。也有研究人员提出使用两个相位调制器(PM)进行级联调制,但高阶 $n$ 次谐波会和第一个调制器产生的光谱线相叠加,从而影响调制波形的等幅特性。

理论上EOM可以对激光加载各种形式的调制信号,分析起来比较复杂,但由傅里叶变换可知,任何调制信号都可以看成是无穷多个正弦信号的叠加,因此,对单频激光相位调制的研究最基本的就是对正弦信号相位调制研究。

假设在单级调制情况下,单频输入光的表达式为

$$E = E_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (5)$$

式中 $E_0$ 、 $\omega_0$ 、 $\varphi_0$ 分别表示输入光的光场幅度、角频率、初相位。

施加的正弦调制信号表达式为

$$E_M = E_{M0} \cos(\omega_1 t + \varphi_1), \quad (6)$$

式中 $E_{M0}$ 、 $\omega_1$ 、 $\varphi_1$ 分别为调制信号的振幅、角频率、初相位。

对输入光施加正弦调制信号进行相位调制,得到调制光波的表达式为

$$E_1 = E_{10} \cos[\delta_1 \cos(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_0 t + \varphi_0], \quad (7)$$

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

将输出光场按贝塞尔函数展开可得



$$E_1 = E_{10} \left\{ J_0(\delta_1) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + \sum_{k=1}^{+\infty} (-1)^k J_{2k}(\delta_1) \{ \cos[2k(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_0 t + \varphi_0] + \cos[\omega_0 t + \varphi_0 - 2k(\omega_1 t + \varphi_1)] \} - \sum_{k=0}^{+\infty} (-1)^k J_{2k+1}(\delta_1) \{ \sin[(2k+1)(\omega_1 t + \varphi_1) + \omega_0 t + \varphi_0] + \sin[\omega_0 t + \varphi_0 - (2k+1)(\omega_1 t + \varphi_1)] \} \right\}, \quad (8)$$

式中  $J_x$  为  $x$  阶贝塞尔函数。

由(8)式可知,单频激光经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  $\omega_1$ ,各波长成分的振幅由(8)式中对应项贝塞尔函数决定,与调制信号的调制幅度  $\delta_1$  有关;调制形成的多波长激光谱线特性由调制频率和调制幅度综合决定。由此,可以看出种子激光线宽明显展宽了,从而使得有效的布里渊增益谱展宽,SBS 阈值提高。

2009年,Liu等<sup>[22]</sup>研究了多频相位调制产生的种子激光等幅光梳及其在光纤中对SBS的抑制,理论上得出调制后的SBS阈值功率为  $P = P_0 / \max |A_i|^2$  ( $P_0$  为无调制情况下的SBS阈值功率),即SBS阈值同调制后的等幅光谱线基频及各次谐波最大模振幅  $A_i$  的平方成反比关系,说明了若要得到尽可能高的阈值功率,光谱线应尽量为等幅。实验上仅用一个相位调制器就将布里渊带宽为30 MHz的单模光纤(SMF)中SBS阈值提升了10.76 dB,其实验结构如图4所示,通过探测器D1、D2分别探测入纤功率和后向散射光功率。最终调制得到了3、5、7、11等幅光谱线,其SBS阈值功率分别提高了5.21 dB、8.36 dB、9.39 dB和10.76 dB。图中OI为光隔离器,F-P OSA为法布里珀罗光谱分析仪,OC为光环行器。

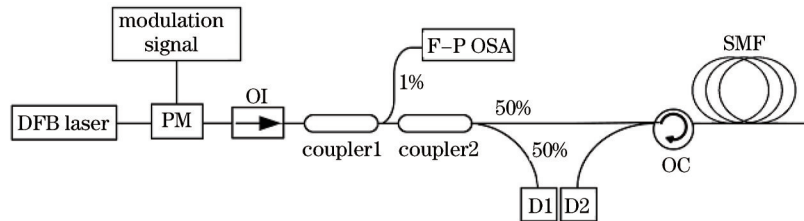


图4 多频相位调制抑制SBS实验结构

Fig.4 Experimental setup of SBS suppression based on multi-frequency phase modulation

2011年,Wang等<sup>[23]</sup>利用单个相位调制器对单频87 kHz种子激光源进行调制,再经全光纤MOPA结构放大后,输出功率提升到了未加调制时的2.2倍,实现了对SBS的抑制。在调制频率为100 MHz,调制幅度为  $\pi/2$  时,得到的种子光调制频率分布如图5所示,调制得到了5个边带成分,在只考虑中心3个明显边带的情况下,其线宽展宽到了200 MHz。在抽运功率为348.4 W时,实现了275 W的激光输出,输出功率受限于抽运功率。

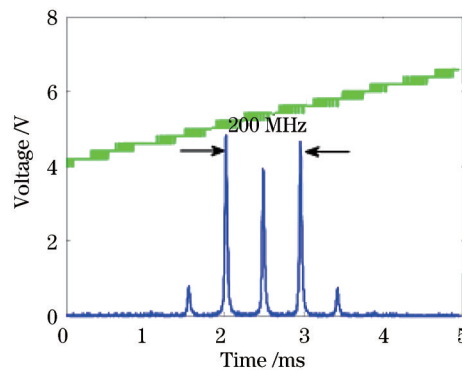


图5 相位调制单频种子频率分布图

Fig.5 Frequency distribution diagram of the phase-modulated SF laser

2011年,Engin等<sup>[24]</sup>搭建了一台MOPA结构的千瓦级掺镱光纤放大器,其实验结构如图6所示。为了产生更加均匀的调制后功率谱分布,实验中将两个正弦信号结合并施加于相位调制器,通过对种子激光的相位调制,最终在相位调制带宽为450 MHz的情况下,实现了1 kW连续波近衍射极限的激光输出。

2012年,王小林等<sup>[25]</sup>搭建了一台MOPA结构的窄线宽全光纤激光器,利用噪声相位调制技术将单频激光线宽展宽至0.3 GHz,通过四级放大器结构对10 mW的窄线宽种子激光进行放大,在主放大器抽运功率为

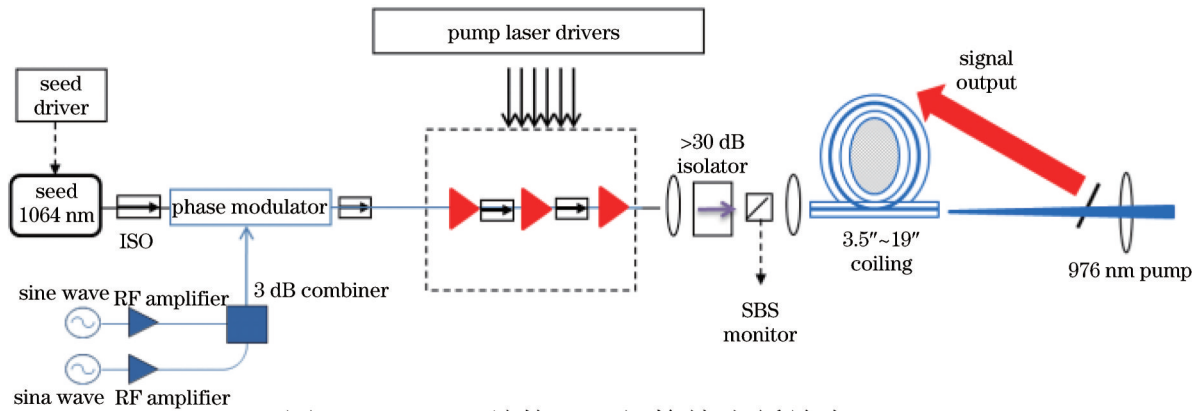


图6 MOPA结构千瓦级掺镱光纤放大器示意图

Fig.6 Schematic of kW Yb-doped fiber MOPA setup

765 W时,获得了功率为666 W的窄线宽激光输出。

2013年,该实验小组再次搭建了单频可恢复相位调制多波长光纤激光放大系统,实现了330W的激光输出<sup>[26]</sup>。其实验结构如图7所示,线宽为87 kHz的单频种子激光经信号发生器(FG)驱动的相位调制器PM1调制后产生多个边带,再经由三级放大器链路(AI、AII和AIII)放大后经高反(HR)镜输出,99%的输出光用功率计探测,1%的输出光被耦合进单模(SM)传能光纤后经相位调制器PM2解调输出。比较调制和不调制两种情况,输出功率提高了2.5倍,实现了330 W功率输出,此为目前报道的最高功率单频可恢复调制多波长放大器。其功率受限于抽运功率,可以预计,如果应用合适的高功率低损解调器,有望从多波长激光中恢复得到大于500 W的单频激光。图7中MO为主振荡器,CL1为耦合器,ISO为隔离器,LD为半导体激光器,WDM为波分复用器,BPF为带通滤波器;YDF为掺镱光纤,FPI为法布里珀罗干涉仪,PDI、PDII为光电探测器。

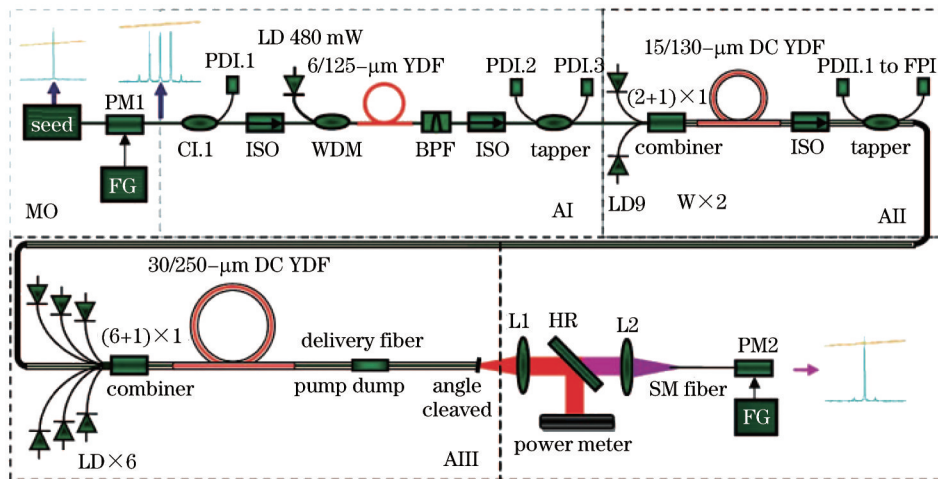


图7 单频可恢复多波长放大器实验结构

Fig.7 Experimental setup of the single-frequency retrievable multi-tone amplifier

### 3.3.2 白噪声源相位调制

2005年,Williamson等<sup>[27]</sup>提出了WNS相位调制法抑制SBS的方案,该技术的实现是让WNS通过一个带通滤波器,再通过一个RF放大器,放大后的RF信号用于驱动EOM,从而增加了种子激光的线宽。

2010年,Nuferm公司的Khitrov等<sup>[28]</sup>利用WNS对单频种子激光进行相位调制,利用低通滤波器选择白噪声带宽,通过3级MOPA结构实现了线宽为3 GHz的1 kW激光输出。

2012年,Zeringue等<sup>[29]</sup>详细分析了WNS相位调制对SBS过程的影响,并且给出了两种不同的调制后功率谱密度(PSD)分布。当WNS通过2 GHz的带通滤波器后会产生 $\text{sinc}^2$ 线型的PSD包络;而调整滤波响应和调制深度可以获得洛伦兹线型的PSD包络,通过将RF信号与 $\text{sinc}$ 函数卷积并且选择合适的RF增益来获得期望的FWHM。图8给出了两种情况下的PSD分布图。

该实验小组对两种PSD情况下的SBS阈值增强因子(即调制后SBS阈值与单频激光SBS阈值之比)进

行了数值模拟。图9给出了不同光纤长度下,SBS阈值增强因子随归一化种子激光 FWHM 的变化关系。

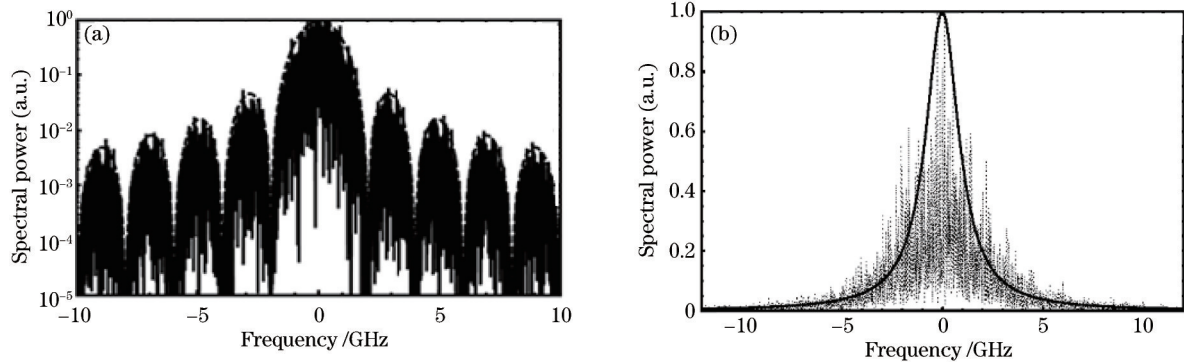


图8 WNS相位调制的光场PSD。(a)  $\text{sinc}^2$ 线型包络;(b)洛伦兹线型包络

Fig.8 PSD of optical field driven with WNS. (a)  $\text{sinc}^2$  lineshape envelope; (b) Lorentzian lineshape envelope

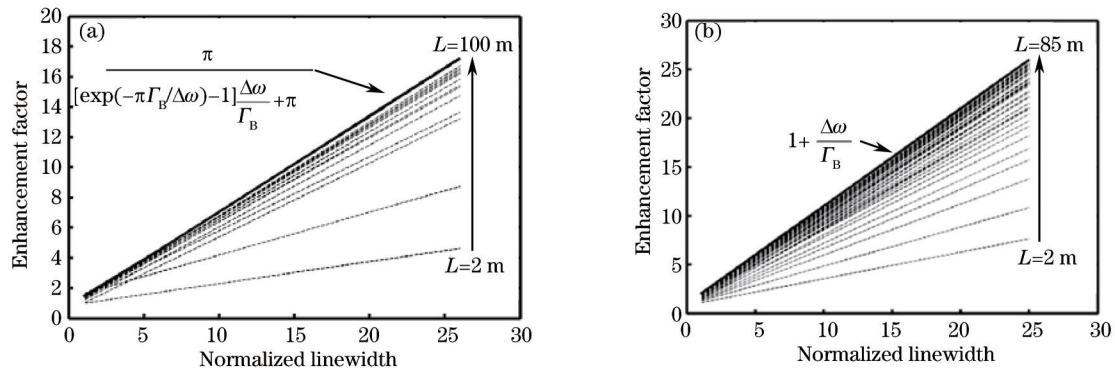


图9 不同光纤长度下增强因子随归一化FWHM的变化关系。(a)  $\text{sinc}^2$ 线型;(b)洛伦兹线型

Fig.9 Enhancement factor versus normalized FWHM at different lengths of fiber. (a) For the  $\text{sinc}^2$  lineshape; (b) for the Lorentzian lineshape

2014年,Anderson等<sup>[30]</sup>实验验证了WNS相位调制的SBS抑制效果。通过RF WNS产生频率范围100~1.5 GHz的平整度为2 dB的随机电压浮动,将该RF信号放大并通过低通滤波器滤波,施加于相位调制器,最终在光调制带宽为1470 MHz、光纤长度为70 m的10/125  $\mu\text{m}$  掺镱光纤放大器中使得SBS阈值增强因子到达了18。

### 3.3.3 伪随机码序相位调制

PRBS作为相位调制器的一种控制信号,与WNS存在较大的不同。经PRBS相位调制后产生的PSD存在分离的周期性特性,该周期性特性由调制频率和PRBS模式数决定。PRBS模式数的典型值为 $2^n-1$ ,其中 $n$ 表示用于产生模式数的移位寄存器长度, $2^n-1$ 包含了除全0外的 $n$ 个比特数值只能是0或1的所有可能组合,如 $2^3-1$ 个模式数包含7比特的周期性结构。研究中,将0和1视为分别代表调制深度0和 $\pi$ ;每比特之间的频率间隔则是由PRBS发生器的调制频率决定的,即 $\Delta\nu = \nu_{\text{pm}}/(2^n-1)$ ,其中 $\nu_{\text{pm}}$ 为PRBS调制频率。

2012年,Zeringue等<sup>[29]</sup>详细研究了PRBS相位调制抑制SBS的方法。通过PRBS驱动相位调制器,使得产

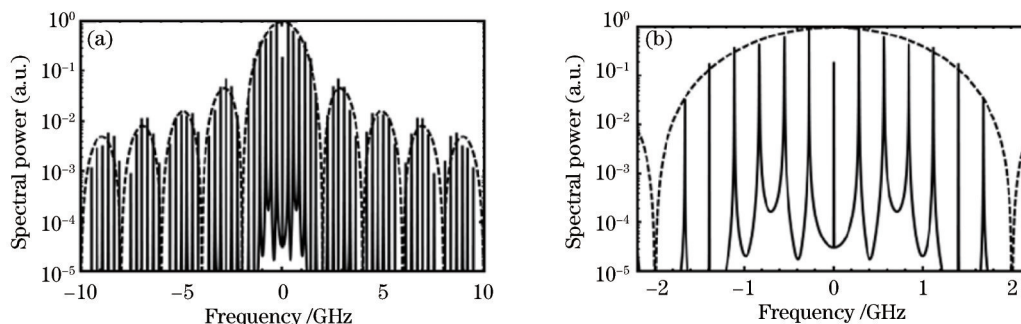


图10 PRBS相位调制的光场PSD。(a)总览图;(b)局域放大图

Fig.10 PSD of optical field driven with a PRBS. (a) Overview map; (b) zoomed-in region



生的 PSD 呈现依赖于调制频率和 PRBS 模式数的分离的周期性结构,当 PRBS 模式数为  $2^3-1$ , 调制频率 2 GHz 时,  $\Delta\nu = 2/(2^3 - 1)$  GHz = 0.29 GHz, 其 PSD 如图 10 所示。

Zeringue 等<sup>[29]</sup>数值模拟了当  $n=5, 7, 9, 17, 31$  时, 不同调制频率下该方案对纤芯直径为  $10\ \mu\text{m}$ 、长度为 9 m 的光纤中 SBS 阈值增强因子的提升情况, 其实验结果如图 11 所示。当  $n=7$ , 调制频率为 5 GHz 时, 得到了最优的调制结果, 其 SBS 阈值提升了 40 倍以上。图 12 给出调制频率为 2 GHz 时,  $n=7, 17, 31$  时的相位随时间变化情况。

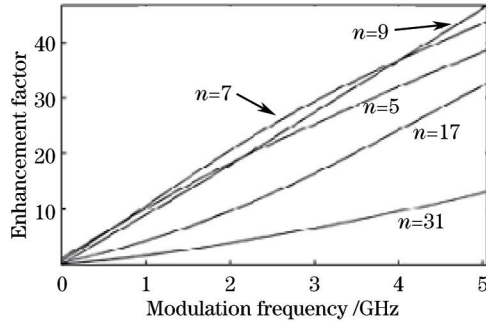


图 11 不同 PRBS 下 SBS 阈值增强因子随调制频率的变化关系图

Fig.11 SBS threshold enhancement factor versus modulation frequency for different PRBS patterns

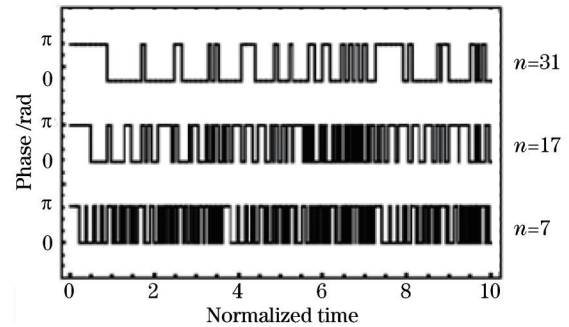


图 12 光子寿命时间尺度内的相位-时间图

Fig.12 Phase as a function of time over several phonon lifetimes

2013 年, Robin 等<sup>[31]</sup>进一步给出了该方案的实验验证结果, 搭建了 MOPA 结构的全光纤放大器, 如图 13 所示。非平面环形腔振荡器 (NPRO) 种子激光经 PRBS 相位调制后经 3 级放大器放大后送入主放, 主放部分由 6 个 300 W 多模 200/220  $\mu\text{m}$  的 LD 抽运 20/400  $\mu\text{m}$  的非保偏掺镱光纤, 最后通过外差法对 Stokes 波的频率特性进行探测。图 13 中 ESA 为电光谱分析仪。

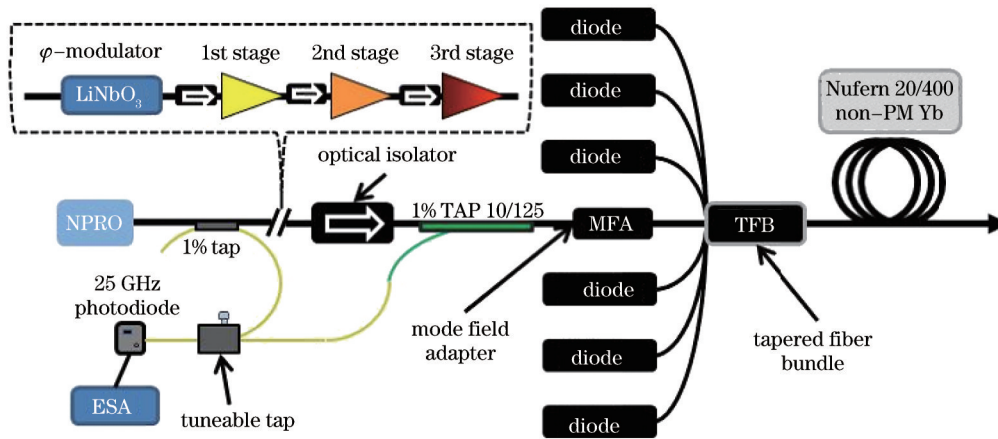


图 13 树枝状结构光纤放大器结构

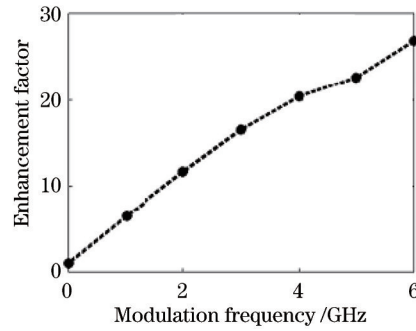
Fig.13 Experimental setup of tapered fiber bundle monolithic fiber amplifier

实验测得 PRBS 为  $2^6-1$  时, SBS 阈值增强因子随调制频率的变化关系如图 14。最终在调制频率为 6 GHz, PRBS 为  $2^6-1$  时, 实现了 1 kW 的激光输出, 其与理论预计较好地吻合了, 但仍没有达到 2012 年 Zeringue 等<sup>[29]</sup>数值模拟得到的理想数值。该研究小组认为, 这可能是由于 PRBS 系统的响应时间不够快或者该系统还存在其他的 SBS 激发源所致, 进一步的研究分析还在进行中。

### 3.4 展宽布里渊增益谱抑制 SBS

由  $\Delta\nu_B = \Gamma_B / (2\pi)$  可知, 增大布里渊增益带宽即增大了  $\Gamma_B$ , 根据(2)式可知  $g_B(\Omega_B)$  便减小了, 进一步根据(3)、(4)式可知 SBS 阈值提高, 实现了对 SBS 的抑制。由此可知, 展宽布里渊增益谱可以有效地降低布里渊增益峰值, 从而从根本上提高 SBS 阈值。本小节主要介绍施加温度、应力抑制 SBS, 并对近年来引起广泛关注的声场裁剪抑制 SBS 的方法进行介绍。



图14 PRBS为 $2^6-1$ 时SBS阈值增强因子随调制频率的变化关系Fig.14 Enhancement factor versus modulation frequency for a PRBS bit pattern of  $2^6-1$ 

### 3.4.1 温度控制抑制SBS

通过控制温度分布的方法抑制SBS,其本质是展宽了布里渊增益谱,相比于改变光纤尺寸和掺杂浓度展宽布里渊增益谱的方法来说,其在短光纤中较容易实现。

通过对稳态近似下的速率方程进行分析,得到布里渊增益与温度梯度以及布里渊频移关系的表达式为<sup>[32]</sup>

$$g_B(\nu) = g_{B_0} \frac{(\Omega_{BS}/2)^2}{[\nu - (\nu_B + c_f \Delta T)]^2 + (\Omega_{BS}/2)^2} \quad (9)$$

式中  $g_{B_0}$  为布里渊峰值增益系数,  $\Omega_{BS}$  为布里渊增益带宽,  $\nu_B$  为布里渊频移,  $\Delta T$  是由抽运吸收以及外加温度引起的温度梯度,  $c_f$  为温度梯度引起的布里渊增益谱的中心频移<sup>[33]</sup>。可以明显看出,通过对温度的合理控制,可以改变布里渊增益系数,进而实现对SBS的抑制。

2001年,Hansryd等<sup>[34]</sup>理论上证明了短光纤中的SBS阈值增加仅仅依赖于布里渊频移的分布,并且通过对光纤施加不同的温度分布,实现了不同布里渊增益谱的分布。通过将100 m的高非线性光纤绕在8个直径为4 cm、高度为5 cm铝制短管上,用30 W的珀尔帖元件在每个短管的上端施加控制,最终成功在该光纤上施加了140 °C的温度梯度(其布里渊频移的温度系数为1.2 MHz/°C),将SBS阈值提升了4.8 dB,达到该阈值时测得的布里渊增益谱如图15所示,其线宽约为170 MHz。

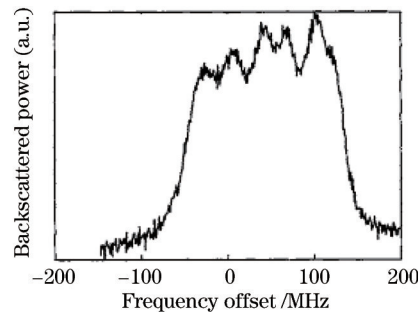


图15 SBS阈值提升4.8 dB时的布里渊增益谱

Fig.15 SBS gain spectrum for a 4.8-dB threshold increase

2009年,Liu<sup>[35]</sup>分析了包含增益光纤和传能光纤情况下温度梯度对SBS阈值的影响。其实验结构如图16所示(其中1为种子源,2为预放大器,3为隔离器,4为抽运源,5为抽运耦合器,6为增益光纤,7为传能光纤),种子激光经预放系统放大后与隔离器相连,而后进入后向抽运的主放系统进行放大,最后接一段传能光纤将激光输出。实验中,将传能光纤的温度分别控制在0 °C和100 °C,最终发现0 °C时SBS阈值更高,其光纤温度分布和实验结果示于图17。该研究小组认为,该结果的出现取决于整个光纤上的相对布里渊频移。当传能光纤温度控制在100 °C时,增益光纤尾端的温度与传能光纤温度相同,因而两者的布里渊增益谱存在较大的重叠,从而增强了抽运耦合器输出端的SBS增益。反之,当传能光纤温度为0 °C,SBS增益较低。

### 3.4.2 应力控制抑制SBS

在对光纤施加应力的情况下,其布里渊频移具有如下的对应关系<sup>[36]</sup>:

$$\nu_B(\varepsilon) = \nu_B(0)(1 + C_s \varepsilon), \quad (10)$$

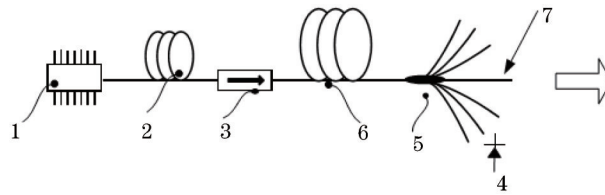


图 16 后向抽运光纤放大器结构图

Fig.16 Configuration of counter-pumped amplifier with delivery fiber

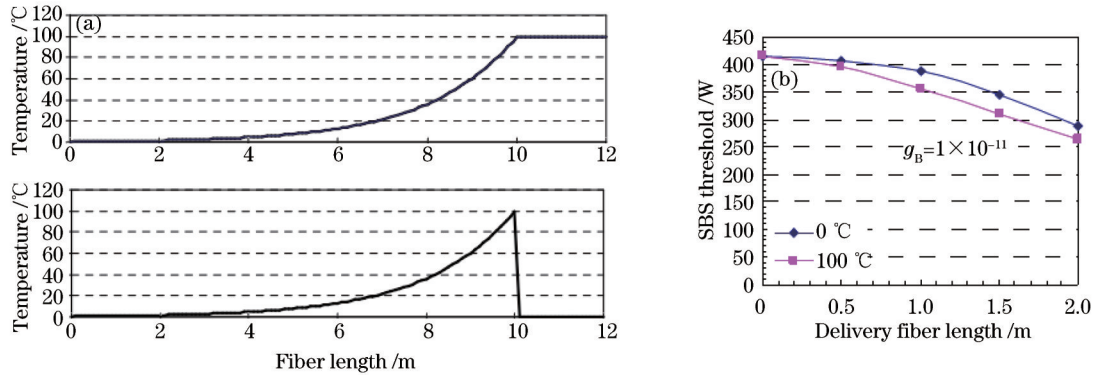


图 17 传能光纤温度对SBS阈值的影响。(a)光纤温度分布情况:前10 m为增益光纤,后2 m为传能光纤;(b)不同温度下SBS阈值

Fig.17 Effect of delivery fiber temperature on SBS threshold. (a) Fiber temperature distribution with 10 m gain fiber and 2 m delivery fiber; (b) SBS threshold for various temperatures

式中  $\varepsilon$  为施加的应力,  $\nu_B(0)$  为未施加应力时的布里渊频移(约为 16 GHz),  $\nu_B(\varepsilon)$  为施加应力  $\varepsilon$  以后的布里渊频移,  $C_s$  为一系数,其值约为  $4.6\%^{-1}$ 。根据(9)式中布里渊增益系数和布里渊频移的关系可知:通过施加合适的应力分布,可以实现对布里渊频移的控制,进而降低布里渊增益峰值,抑制SBS。

2013年,中国科学院上海光学与精密机械研究所的Zhang等<sup>[36]</sup>理论分析并实验验证了对光纤施加应力的SBS抑制效果,通过对增益光纤施加20个应力梯度,辅以相应的温度分布,最终实现了171 W的输出功率,光效率达81%,相对于没有施加应力梯度时24.5 W的最大输出功率,将SBS阈值提升了7倍。图18给出了施加应力、温度后的理论计算布里渊增益谱。

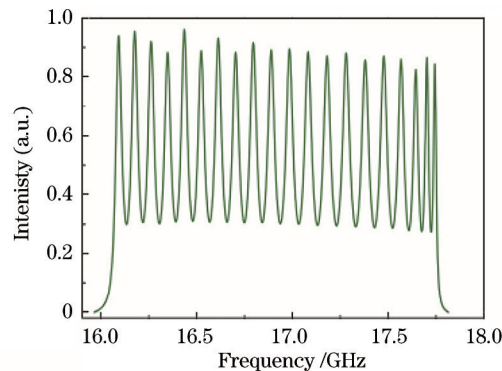


图 18 理论计算的布里渊增益谱

Fig.18 Theroretically calculated SBS gain spectrum

### 3.4.3 声场裁剪抑制SBS

1988年,Jen等<sup>[37]</sup>研究了几种不同掺杂对二氧化硅中光速和声速的影响。结果表明,要实现较高的SBS阈值,必须同时考虑声波和光波的波导特性。表1给出了掺杂后的二氧化硅光纤中声光折射率的对应关系。

2005年,Kobyakov等<sup>[38]</sup>通过控制纤芯的锗掺杂从而在保持通讯光纤的光学特性的同时极大地减小了声光重叠,将SBS阈值提升了3 dB以上。

表 1 二氧化硅光纤的掺杂特性

Table 1 Properties of dopants in silica fibers

	GeO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Optical refractive index	↑	↑	↑	↓	↓	↑
Acoustic refractive index	↑	↑	↑	↑	↑	↓

2007年,美国康宁公司的Li等<sup>[39]</sup>对单模光纤纤芯中的掺杂进行特殊设计,在保证光场阶跃折射率分布不变的情况下,改变声场折射率分布,降低了两者的重叠度,提高了SBS阈值。其代表性的掺杂方式如图19所示,以图19(a)为例,即是在纤芯靠内区域掺入Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,在纤芯靠外区域掺入GeO<sub>2</sub>。数值分析后得到,图19(a)~(c)分别对应实现了7.15 dB,6.1 dB和6.5 dB的SBS阈值提升(相对于仅纤芯锗掺杂情况)。然而这种光纤在制造上存在较大的难度,一方面,纤芯中不同部分的折射率匹配很难实现;另一方面,不同掺杂层之间形成的分界面会激发较强的光散射并导致4 dB/km~5 dB/km的背景损耗。

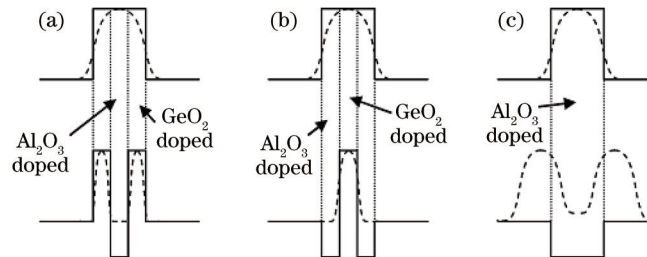


图 19 光纤中代表性掺杂方式

Fig.19 Typical dopant designs in fibers

同年,为了克服光纤设计制造上的困难,康宁公司的Li等<sup>[39]</sup>提出了在纤芯内铝锗共掺的方法,通过外气相沉积技术(OVD),使铝浓度从纤芯中心到边缘递减,锗浓度从纤芯中心到边缘递增,避免了不同掺杂间分界面的形成,也保证了阶跃折射率廓线的形成,从而在纤芯直径为30 μm、数值孔径为0.06的掺铋双包层大模场面积光纤中将SBS阈值提升了6 dB。

2011年,Robin等<sup>[40]</sup>将声场裁剪技术应用于掺铋保偏光子晶体光纤,通过对纤芯中两个区域氟、铝、锗浓度的选择,使得相应的布里渊频移足够分离,进而允许在光纤上引进温度分布以进一步抑制SBS。其光纤结构如图20所示,将纤芯分为了两个区域 $\nu_1$ 和 $\nu_2$ ,通过氟、铝、锗掺杂浓度的选择实现两个区域间70 m/s的声速差,从而使得形成的两个布里渊峰间隔大于200 MHz,利于SBS的进一步抑制。通过剪断法测得布里渊增益系数为 $1.2 \times 10^{-11}$  m/W,相对于石英光纤的典型参数,即布里渊增益系数在 $3 \times 10^{-11} \sim 5 \times 10^{-11}$  m/W范围<sup>[12]</sup>,该光纤的布里渊增益系数减小了至少2.5倍,可实现SBS有效抑制。最后在光学分界面未产生且后向抽运的情况下,实现了500W近衍射极限的单频激光输出。

2014年,Robin等<sup>[10]</sup>发现,利用图20所示光纤结构在功率水平高于500 W时出现了模式不稳定性(MI)。他们进一步改进了光纤结构,如图21所示,其与图20的区别在于纤芯中六边形区域 $\nu_1$ 外有三个区域 $\nu_3$ 没有掺铋。通过对纤芯氟、铝、锗浓度的掺杂实现了3个分离的声场区域,最终在抑制SBS和MI的同时实现了811 W的保偏光子晶体光纤放大器单频输出。

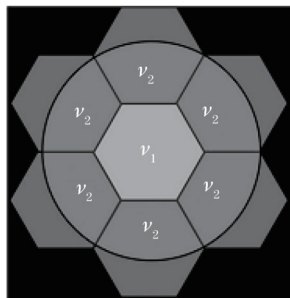


图 20 声场裁剪光纤核心设计图

Fig.20 Core design of the segmented acoustic fiber

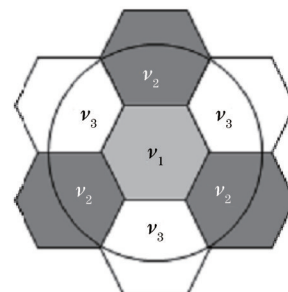


图 21 改进后的声场裁剪光纤核心设计图

Fig.21 Modified core design of the segmented acoustic fiber

### 3.5 其他抑制方法

#### 3.5.1 啁啾种子抑制SBS

2012年, White等<sup>[41]</sup>提出了用线性啁啾半导体激光器(ChDL)作种子源抑制SBS的思想, 并对其进行了理论分析和实验验证。实验通过光电(EO)锁相环对1.5 μm的垂直腔面发射半导体激光器(VCSEL)的电流进行控制, 使其啁啾范围可以在 $10^{14}$ ~ $5 \times 10^{15}$  Hz/s连续变化。该啁啾种子的PSD如图22所示, 最终种子源的功率在500 GHz的范围内保持在2 mW左右。当啁啾为 $5 \times 10^{14}$  Hz/s时, 在6 km处的传能光纤中SBS阈值达到2 W, 是啁啾为 $10^{14}$  Hz/s时SBS阈值的5倍。其实验结构如图23所示, 一个啁啾半导体激光种子源通过掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大后, 通过环形器将其引导到待测光纤(FUT)中。该研究小组预计在啁啾为 $5 \times 10^{15}$  Hz/s时, SBS阈值相对于啁啾为 $10^{14}$  Hz/s时可以实现近20倍的提升。

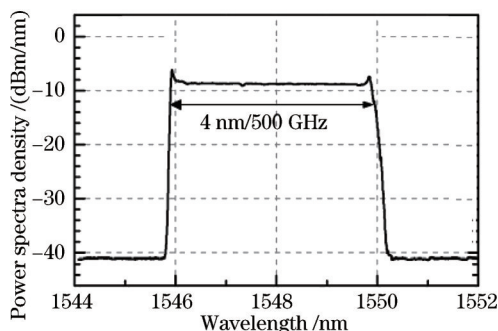


图22 啁啾半导体种子源的功率谱密度

Fig.22 PSD of the chirped diode seed laser

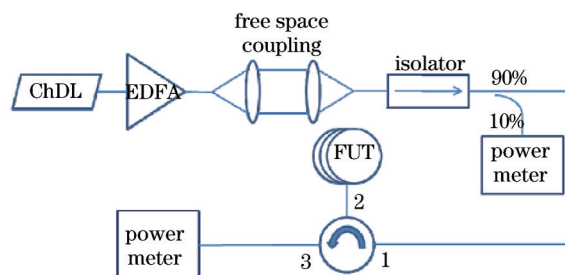


图23 SBS抑制测试结构图

Fig.23 Experimental layout for observing SBS suppression

2014年, White等<sup>[11]</sup>再一次将一个频率啁啾种子作为高功率光纤放大器的种子源, 在啁啾为 $10^{16}$  Hz/s时, 后向布里渊散射被控制在了自发水平, 实现了600 W的功率输出。

由于单个啁啾半导体激光器的啁啾波形存在频率值为0的拐点, 这使得SBS阈值会出现突然的降低, 限制了该系统SBS的抑制效果。为了解决该问题, 实验用了两个啁啾半导体种子源, 如图24所示, 通过控制器对两个种子源进行同步并且为电光开关提供触发。由图24(b)可知, 负啁啾情况下一个种子的啁啾频率由500 GHz降到50 GHz时迅速通过控制器触发到了另一个种子源, 从而通过在两个三角啁啾波之间循环触发实现了啁啾锯齿波的调制输出, 解决了拐点SBS阈值突然下降的问题。其实验结构如图25所示, 啁啾半导体种子源经预放后进入掺铒光纤主放大器, 通过一段传能光纤输出, 由光电探测器(PD)进行探测, 实验结果显示, SBS阈值线性正比于啁啾率。该实验小组预计下一代的啁啾半导体激光器的啁啾率有望再增大一个量级, 产生约6 kW的功率输出。

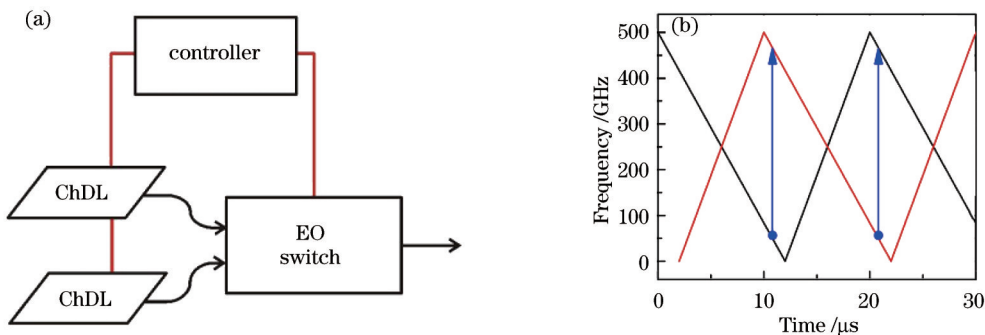


图24 啁啾种子源。(a)双啁啾半导体种子源结构图;(b)负啁啾频率-时间图

Fig.24 Chirped seed laser. (a) Dual source consisting of two synchronized, out of phase chirped diode lasers; (b) frequency versus time waveform in the case of a negative sawtooth

由于线性频率啁啾种子的频率随时间恒定地变化, 保证了时间相干性, 使得长度不匹配的多个放大器可以进行相干合成。路径长度差为39 cm的两个20 W掺铒光纤放大器也可通过声光移频器和反馈电路实现相干合成, 合成效率达91.2%。



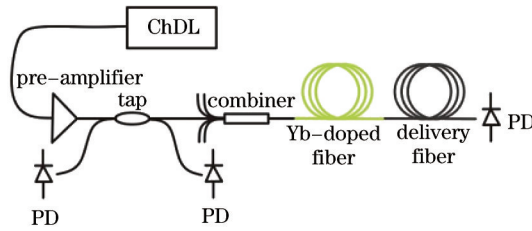


图25 600 W输出啁啾种子放大器实验结构图

Fig.25 Experimental apparatus for chirped amplifiers, taken at an output power of 600 W

### 3.5.2 双波长抑制SBS

2004年,Webels等<sup>[42]</sup>提出了一种新颖的SBS抑制方案。用两个波长间隔为两倍布里渊频移,初始功率比为0.5的单频种子源对增益光纤为72 m的掺钕单频光纤放大器进行SBS抑制,最终SBS阈值提升了3倍。其布里渊散射机制如图26所示,当第一个种子源laser 1刚刚达到SBS阈值而产生布里渊散射光Brillouin 1时,由于其与第二个种子源laser 2满足布里渊频移的关系,laser 2相当于Brillouin 1的Stokes光,于是Brillouin 1迅速将能量转移给laser 2,由于两个种子源的初始功率比为 $P_2/P_1=0.5$ ,从Brillouin 1转移给laser 2的能量还并未使其达到SBS阈值,从而实现了SBS的抑制。

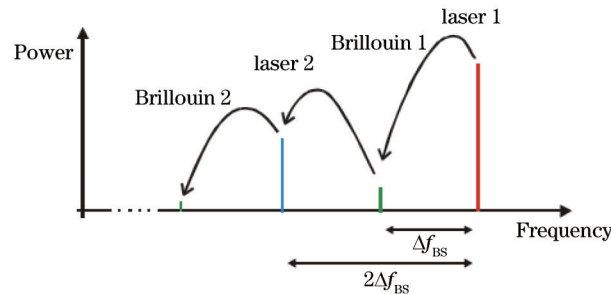


图26 两个频率间隔为两倍布里渊频移单频种子源的布里渊散射机制

Fig.26 Brillouin-scattering scheme with two single-frequency lasers separated by twice the Brillouin frequency shift

### 3.5.3 窄脉宽种子抑制SBS

由2.2节的分析可知,通过减小抽运激光的脉宽 $T_0$ ,使其小于声子寿命 $T_B$ ,进而减小布里渊峰值增益系数可以提升SBS阈值。利用该原理,2014年,栗荣涛等<sup>[43]</sup>实现了一台913 W的窄线宽纳秒脉冲光纤放大器,其实验结构如图27(a)所示。单频连续光纤激光经光强度调制器(EOIM)和声光调制器(AOM)后产生脉冲激光,再经由3级放大进入主放大器,最终在激光脉冲重频为10 MHz,半宽时间约为3 ns时,得到了913 W的高平均功率输出,脉冲激光峰值功率为28.6 kW。通过对主放大器输出激光的光谱特性进行分析,发现实验中未出现SBS,此时限制脉冲激光输出功率的因素是受激拉曼散射。图中AFG为任意函数发生器,MFA为模式匹配器。图27(b)为此时输出激光的光谱特性图。

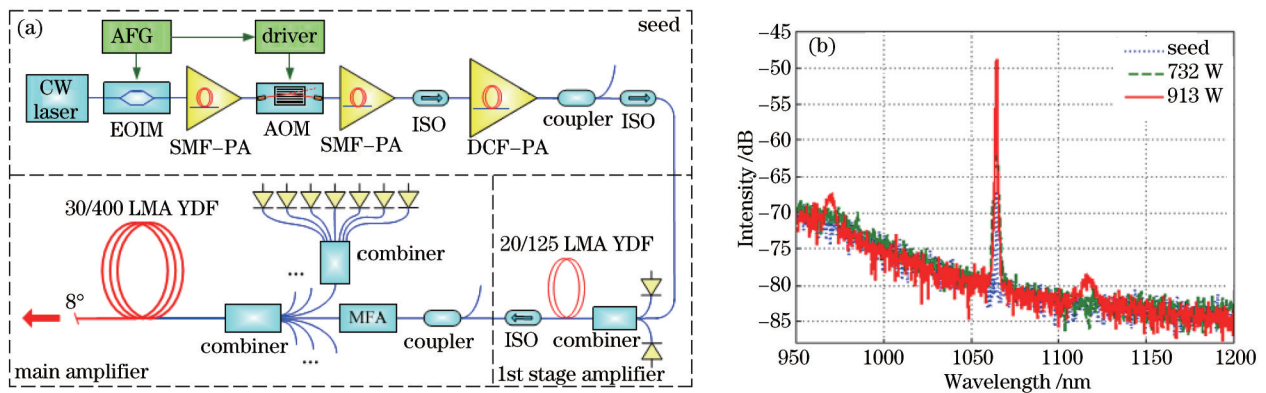


图27 913 W窄线宽纳秒脉冲光纤激光的系统结构。(a)整体结构;(b)输出光谱

Fig.27 913 W narrow linewidth nanosecond pulse fiber laser system. (a) Overall structure; (b) output spectrum

### 3.5.4 提高放大器增益系数

由2.2节中的分析可知,可以通过增加放大器的增益系数 $G$ 来提高SBS阈值,而增大放大器增益系数的根本方法即是在输出激光功率相同的情况下尽量减小种子激光功率。在高功率放大器中,为了抑制ASE并获得稳定的功率输出,一般增益系数都较低。但是,在窄线宽光纤放大器中,为了提高SBS的阈值,人们希望在提高激光器增益系数的同时实现ASE的抑制。这就要求适当降低增益光纤的长度,并采用稳波长的抽运源进行抽运。

2007年,英国南安普顿大学Yoonchan等<sup>[44]</sup>就将3 W的单频种子激光放大到511 W,增益系数为170。2010年,Nufern公司Khitrov等<sup>[28]</sup>将5 W左右的窄线宽种子功率放大到1000 W,增益系数为200。通过减小种子激光功率以增加放大器的增益系数的方法能够一定程度提高SBS阈值,但是需要优化光纤放大器的参数设计,在实现SBS阈值提高的同时抑制ASE。

### 3.6 窄线宽光纤激光放大器SBS抑制方案比较

在介绍了上述SBS抑制方案后,对各种SBS抑制方案的特点有了较为清晰的理解。在SBS阈值提升能力方面,相位调制抑制SBS的阈值提升能力较显著,近年来,高功率窄线宽光纤激光的相关报道不少是通过相位调制实现的,然而其调制后输出激光线宽取决于调制信号,非严格单频。从系统复杂程度方面考虑,通过温度、应力等方式实现SBS抑制需要考虑光纤不同部分的温度、应力施加情况,系统结构较复杂,不易控制。从工程实现难易角度考虑,声场裁剪光纤抑制SBS方案需要进行特殊光纤设计,实现难度较大;相比之下的大模场短光纤以及各种通过电学信号控制相位调制器的外加调制方法实现起来则较容易,且在工程上实现的周期较短。表2给出了几种主要SBS抑制方案的对比分析。

表2 几种主要SBS抑制方案对比

Table 2 Comparison of several main SBS suppression schemes

SBS suppression scheme	Characteristic	Advantages	Disadvantages	Can be recovered or not
Phase modulation	Broaden the linewidth of laser	SBS threshold improved relatively high; easy to control	Output linewidth depends on the modulation signal; not strictly single-frequency laser	Sinusoidal phase modulation can be recovered; WNS and PRBS are not recoverable
Temperature and stress gradient	Broaden Brillouin gain spectrum	Does not affect the linewidth of laser	System structure is more complex; difficult to control	Output laser is single-frequency; need not to recover
Acoustically tailored	Broaden Brillouin gain spectrum	Solve the intrinsic problem inside fiber involving SBS	Requires special fiber design; difficult to achieve	Output laser is single-frequency; need not to recover
Large mode area and short fiber	Enhance the SBS threshold directly	Easy design of engineering	High temperature of doped fiber; limited improvement of SBS threshold	Output laser is single-frequency; need not to recover

## 4 结 论

介绍了窄线宽光纤放大器中SBS抑制方案的研究进展。各种SBS抑制方案看似繁杂,通过分析其SBS阈值表达式,不难发现其本质上可归为三种方式:1)增大光纤有效模场面积;2)减小光纤有效长度;3)减小布里渊峰值增益系数。通过相位调制展宽激光器线宽本质上是使得有效布里渊增益谱展宽,布里渊增益的峰值降至原来的 $1 + \Delta\nu_L/\Delta\nu_B$ 倍,施加温度、应力,声场裁剪等方案则是改变了光纤的内部特性,使得其布里渊增益谱展宽,布里渊增益峰值降低。

纵观SBS的各种抑制方案,研究者往往同时采用多种SBS抑制方案从而实现高功率窄线宽激光输出。如运用高吸收系数大模场面积光纤作为主放大器的增益光纤,同时可以减小其光纤长度,并施加相位调制,温度梯度等。通过综合多方面因素考量,加之各种新的抑制方案不断出现,有望实现窄线宽光纤激光高功

率输出的较大突破。近年来, SBS抑制方案研究在逐步向光纤中 Stokes光的本质研究靠拢, 考虑到高功率窄线宽激光的各种应用领域, 新的SBS抑制方案层出不穷, 有望实现千瓦级的单纤单频激光输出。

#### 参考文献

- 1 Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- 2 Andrés M V, Cruz J L, Díez A. Actively Q-switched all-fiber lasers [J]. Laser Physics Letters, 2008, 5(2): 93-99.
- 3 Bufetov I A, Dianov E M. Bi-doped fiber lasers [J]. Laser Physics Letters, 2009, 6(7): 487-504.
- 4 Kobayakov A, Sauer M, Chowdhury D. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. Advances in Optics and Photonics, 2010, 2(1): 1-59.
- 5 Xie Shuping, Xu Guoliang. Suppression on fiber stimulated Brillouin scattering based on phase modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206003.  
谢淑平, 许国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制[J]. 光学学报, 2013, 33(2): 0206003.
- 6 Liu Jiang, Wang Pu. High-power narrow-bandwidth continuous wave thulium-doped all-fiber laser [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0102001.  
刘江, 王璞. 高功率窄线宽全光纤结构掺铥连续光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0102001.
- 7 Wu Weijun, Wang Xiong, Xiao Hu, *et al.*. Experimental study on suppression of stimulated Brillouin scattering in 2  $\mu\text{m}$  - band fiber laser based on phase modulation [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1005001.  
伍惟骏, 王雄, 肖虎, 等. 相位调制法抑制 2  $\mu\text{m}$  光纤激光受激布里渊散射效应的实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1005001.
- 8 Huang Weifa, Wang Xiaochao, Wang Jiangfeng, *et al.*. Temperature characteristic of stimulated Brillouin scattering in single-mode optical fiber [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0405001.  
黄文发, 汪小超, 王江峰, 等. 单模光纤中受激布里渊散射的温度特性[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0405001.
- 9 Hao LiYun, Qi Yunfeng, Su Cen, *et al.*. Influence of transmitting fiber length on SBS threshold of continuous-wave single-frequency all fiber amplifier [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0814001.  
郝丽云, 漆云凤, 苏岑, 等. 传输光纤长度对连续波单频光纤放大器 SBS 阈值特性的影响[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0814001.
- 10 Robin C, Dajani I, Pulford B, *et al.*. Single-frequency Yb-doped photonic crystal fiber amplifier with 800 W output power [C]. Proceedings SPIE, 2014, 8961: 896103.
- 11 White J O, Petersen E, Edgecumbe J, *et al.*. A linearly chirped seed suppresses SBS in high-power fiber amplifiers, allows coherent combination, and enables long delivery fibers [C]. SPIE, 2014, 8961: 896102.
- 12 Ma Pengfei, Zhou Pu, Ma Yanxing, *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.
- 13 Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2005: 245-249.
- 14 Lichtman E, Friesem A A, Waarts R G, *et al.*. Stimulated Brillouin scattering excited by two pump waves in single-mode fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1987, 4(9): 1397-1403.
- 15 Chiao R Y, Townes C H, Stoicheff B P. Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves [J]. Physical Review Letters, 1964, 12(21): 592-595.
- 16 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.
- 17 Gray S, Liu A, Walton D T, *et al.*. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. Opt Express, 2007, 15(25): 17044-17050.
- 18 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.
- 19 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.
- 20 Wang X L, Zhou P, Xiao H, *et al.*. 310 W single-frequency all-fiber laser in master oscillator power amplification configuration [J]. Laser Physics Letters, 2012, 9(8): 591-595.

- 21 Yang Jianliang, Guo Zhaonan, Cha Kaide, *et al.*. Experimental study of SBS suppression using phase modulation in fiber CATV [J]. Chinese J 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.
- 22 Liu Yingfan, Lü Zhiwei, Dong Yongkang, *et al.*. Research on stimulated Brillouin scattering suppression based on multi-frequency phase modulation [J]. Chinese Optics Letter, 2009, 7(1): 29-31.
- 23 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.
- 24 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 [C]. SPIE, 2011, 7914: 791407.
- 25 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Xiao Hu, *et al.*. Narrow linewidth all-fiber laser with 666 W power output [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(6): 1261-1262.  
王小林, 周朴, 肖虎, 等. 窄线宽全光纤激光器实现 666 W 高功率输出[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(6): 1261-1262.
- 26 Wang Xiaolin, Zhou Pu, Leng Jinyong, *et al.*. A 330-W single-frequency retrievable multi-tone monolithic fiber amplifier [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(4): 044205.
- 27 Williamson R S. Laser coherence control using homogeneous linewidth broadening: US, 20050047454 A1 [P]. 2005-03-03.
- 28 Khitrov V, Farley K, Leveille R, *et al.*. kW level narrow linewidth Yb fiber amplifiers for beam combining [C]. SPIE, 2010, 7686: 76860A.
- 29 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]. Opt Express, 2012, 20(19): 21196-21213.
- 30 Anderson B, Robin C, Flores A, *et al.*. Experimental study of SBS suppression via white noise phase modulation [C]. SPIE, 2014, 8961: 89611W.
- 31 Robin C, Dajani I, Zernig C, *et al.*. Pseudo-random binary sequency phase modulation in high power Yb-doped fiber amplifiers [C]. SPIE, 2013, 8601: 86010Z.
- 32 Hildebrandt M, Busche S, Wessels P, *et al.*. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2008, 16(20): 15970-15979.
- 33 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.
- 34 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.
- 35 Liu A. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers [J]. Opt Express, 2009, 17(17): 15201-15209.
- 36 Zhang L, Cui S, Liu C, *et al.*. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier[J]. Opt Express, 2013, 21(5): 5456-5462.
- 37 Jen C K, Oliveira J E B, Goto N, *et al.*. Role of guided acoustic wave properties in single-mode optical fibre design [J]. Electronics Letters, 1988, 24(23): 1419-1420.
- 38 Kobayakov A, Kumar S, Chowdhury D, *et al.*. Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold [J]. Opt Express, 2005, 13(14): 5338-5346.
- 39 Li M J, Chen X, Wang J, *et al.*. Al/Ge co-doped large mode area fiber with high SBS threshold [J]. Opt Express, 2007, 15(13): 8290-8299.
- 40 Robin C, Iyad D. Acoustically segmented photonic crystal fiber for single-frequency high-power laser applications [J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2641-2643.
- 41 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]. Opt Express, 2012, 20(14): 15872-15881.
- 42 Webels P, Adel P, Auerbach M, *et al.*. Novel suppression scheme for Brillouin scattering [J]. Opt Express, 2004, 12(19): 4443-4448.
- 43 Su Rongtao. Coherent Amplified Array of Narrow-Linewidth Nanosecond Fiber Lasers [D]. Hunan: National University of Defense Technology, 2014: 46-48.  
粟荣涛. 窄线宽纳秒脉冲光纤激光相干放大阵列[D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2014: 46-48.
- 44 Yoonchan J, 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.