

## 180 W 单频全光纤激光器

张利明<sup>1</sup>, 鄢楚平<sup>2</sup>, 冯进军<sup>3</sup>, 张 昆<sup>1</sup>, 张浩彬<sup>1</sup>, 朱 辰<sup>1</sup>, 张大勇<sup>1</sup>, 赵 鸿<sup>1</sup>, 陈念江<sup>1</sup>,  
李 尧<sup>1</sup>, 郝金坪<sup>1</sup>, 王雄飞<sup>1</sup>, 何晓彤<sup>1</sup>, 周寿桓<sup>1</sup>

- (1. 中国电子科技集团公司第十一研究所 固体激光技术重点实验室, 北京 100015;
2. 中国电子科技集团公司第十五研究所, 北京 100083;
3. 中国电子科技集团公司第十二研究所, 北京 100016)

**摘 要:** 高功率单频光纤激光器在相干探测、功率光谱合成等方面具有广泛的应用前景。分析了高功率单频光纤激光器中受激布里渊散射效应的抑制方法, 研究了放大级特性对受激布里渊散射效应的影响。采用线宽为 70 kHz 的单频光纤激光器作为种子源, 经两级光纤放大, 实现了中心波长 1 064.1 nm、线宽 70 kHz、最高功率为 180 W 的单频全光纤激光输出, 光-光转换效率 71.1%, 光束质量  $M_x^2=1.2$ ,  $M_y^2=1.21$ 。分析了改变放大级特性前后输出功率提升的原因, 认为改变放大级的温度分布减小了受激布里渊散射效应的增益系数, 提高了输出激光的受激布里渊散射阈值, 促使改变放大级温度分布后的输出功率大幅提高。该激光器的输出功率仅受限于泵浦功率, 进一步提高泵浦功率, 有望实现更高功率的单频光纤激光输出。

**关键词:** 光纤激光器; 单频; 受激布里渊散射; 温度分布

**中图分类号:** TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1105001

## 180 W single frequency all fiber laser

Zhang Liming<sup>1</sup>, Yan Chuping<sup>2</sup>, Feng Jinjun<sup>3</sup>, Zhang Kun<sup>1</sup>, Zhang Haobin<sup>1</sup>, Zhu Chen<sup>1</sup>,  
Zhang Dayong<sup>1</sup>, Zhao Hong<sup>1</sup>, Chen Nianjiang<sup>1</sup>, Li Yao<sup>1</sup>, Hao Jinping<sup>1</sup>,  
Wang Xiongfei<sup>1</sup>, He Xiaotong<sup>1</sup>, Zhou Shouhuan<sup>1</sup>

- (1. Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, No.11th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China; 2. No.15th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100083, China;
3. No.12th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100016, China)

**Abstract:** High power single frequency fiber lasers are extensively applied in coherent detection and power spectrum beam combination etc. The suppressing method of stimulated Brillouin scattering was analyzed. The influences of amplification level on stimulated Brillouin scattering were studied. A single frequency fiber laser with linewidth of 70 kHz was used as seed source. And through two stage amplified, the central wavelength of 1 064.1 nm, linewidth of 70 kHz and power of 180 W were achieved respectively. The optical-optical efficiency is 71.1%. And the beam quality is  $M_x^2=1.2$  and  $M_y^2=1.21$ .

收稿日期: 2018-06-10; 修订日期: 2018-07-28

作者简介: 张利明(1981-), 男, 高级工程师, 博士后, 主要从事高功率光纤激光器方面的研究。Email: laser\_2014@163.com

1.21. The output power before and after changing amplifier characteristic was compared. And the reason that output power increased was analyzed. The stimulated Brillouin scattering gain coefficient was reduced by varying amplifier temperature distribution. Then stimulated Brillouin scattering threshold was promoted. Finally, this makes the output laser power increase greatly after varying amplifier temperature distribution. The output power of this laser is only limited by pump power. If the pump power is increased, the higher power of single frequency all fiber laser will be achieved.

**Key words:** fiber laser; single frequency; stimulated Brillouin scattering; temperature distribution

## 0 引言

光纤激光器具有转换效率高、光束质量好、结构紧凑等特点,在工业、医疗、科研和军事等领域得到了广泛应用。近几年,单频光纤激光器在相干探测、相干合成、功率光谱合成<sup>[1-3]</sup>等方面的应用日益广泛。

目前,国外在单频光纤激光器方面做出贡献的主要有英国南安普敦大学和美国空军实验室。2007年,英国南安普敦大学的 Y. Jeong 等人采用中心波长为 1 060 nm 的掺 Yb<sup>3+</sup> 分布反馈(DFB)单频光纤激光器作为种子源,主放大级采用纤芯直径为 43 μm、长 9 m 的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤,经四级放大,透镜耦合的方式,实现了功率为 500 W 的单频激光输出,斜效率为 80%<sup>[4]</sup>。2011年,美国空军实验室的 Craig Robin 等人采用中心波长为 1 064 nm 的单块非平面环形腔(NPRO)单频激光器作为种子源,主放大级采用“声学剪裁光子晶体光纤(Acoustically Tailored PCF)”,经四级放大、透镜耦合的方式,实现了功率 494 W 的单频激光输出,斜效率 78%,光束质量  $M^2 < 1.3$ <sup>[5]</sup>。同年,美国空军实验室的 Clint Zeringue 等人又采用两个输出波长分别为 1 035 nm(线宽 0.1 nm)和 1 065 nm(线宽 < 100 kHz)的激光器经合束后作为种子光,经两级光纤放大、透镜耦合的方式,实现了功率为 203 W 的单频激光输出,斜效率 82%,光束质量未见报道<sup>[6]</sup>。国内,2009年,中国科学院上海光学精密机械研究所的漆云凤等人采用 DFB 单频光纤激光器作为种子源,经两级光纤放大,实现了功率 128 W 的单频激光输出,光光效率 83%<sup>[7]</sup>。2011年,国防科学技术大学的董小林等人采用线宽小于 20 kHz、中心波长 1 063.8 nm 的单频光纤激光器作为种子源,主放大级采用纤芯/包层直径 30/400 μm、长 5 m 的掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤,经两级放大,获得了功率 122 W

的单频全光纤激光输出,光光转换效率 78%,光束质量未见报道<sup>[8]</sup>。2012年,国防科学技术大学的肖虎等人采用相同的种子源,主放大级采用长 4 m 的 30/250 μm 掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤,经三级放大,实现了功率 168 W 的单频激光输出,光光转换效率 82.9%,光束质量未见报道<sup>[9]</sup>。这是目前国内全光纤单频激光器输出功率的最高记录。

在单频光纤激光器中,受激布里渊散射(SBS)效应是限制其功率提升的主要因素。为了提高 SBS 的阈值,多篇文献已对光纤激光器中的 SBS 效应及其抑制方法进行了研究,提出了诸如改变光纤的温度分布、增大光纤的芯径、缩短光纤长度、改变光纤的应力分布<sup>[10]</sup>、采用声光分离光纤<sup>[11]</sup>、声学剪裁光子晶体光纤等特殊设计的光纤,采用双波长增益竞争等方法都在一定程度上提高了单频光纤激光器的输出功率,但这些方法大多是通过非全光纤化方式实现的。且当光纤芯径大于 25 μm 时,过多的高阶模式将会使窄线宽光纤激光器的光束质量下降,缩短长度、改变光纤的应力分布只能局部提高 SBS 的阈值功率,声光分离光纤和声学剪裁光子晶体光纤能够提高 SBS 效应的阈值,但光纤的制备和掺杂工艺较复杂,双波长增益竞争经过一级放大能够提高 SBS 的阈值功率,可是不能实现多级级联放大,因此难于实现输出功率的大幅提升。而采用缩短光纤长度和改变光纤的温度分布相结合的技术,可以有效抑制 SBS,大幅提高单频光纤激光器的输出功率。

文中讨论了主振荡功率放大结构光纤激光器中放大级特性对 SBS 的影响。采用单频光纤激光器作为种子源,经两级放大的主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构,实现了工作波长 1 064.1 nm、线宽 70 kHz、最大功率 180 W 的单频激光输出,光-光转换效率 71.1%,光束质量

$$M_x^2=1.2, M_y^2=1.21。$$

### 1 放大级特性对 SBS 的影响

高功率单频光纤激光器通常采用 MOPA 结构, 即前级采用单频激光作为种子, 通过一级或多级光纤放大, 获得高功率单频激光输出。在功率放大过程中, 如果激光功率谱密度过高, 将产生后向传输的 SBS Stokes 光。种子光 (信号光)、泵浦光和 SBS Stokes 光之间的关系可用速率方程表示为<sup>[12-13]</sup>:

$$N_2 = \frac{N_0 \left( \Gamma_s \sigma_s^a \sum_n P_{sn} \frac{c}{v_{sn}} + \Gamma_p \sigma_p^a P_p \frac{c}{v_p} + \Gamma_s \sigma_s^a \sum_i P_{sbsi} \frac{c}{v_{sbsi}} \right)}{\Gamma_s (\sigma_s^a + \sigma_s^e) \sum_n P_{sn} \frac{c}{v_{sn}} + \Gamma_p (\sigma_p^a + \sigma_p^e) P_p \frac{c}{v_p} + \Gamma_s (\sigma_s^a + \sigma_s^e) \sum_i P_{sbsi} \frac{c}{v_{sbsi}} + \frac{hcA_{eff}}{\tau}} \quad (4)$$

式中:  $P_p$  为泵浦光功率;  $P_{sn}$  为信号光中第  $n$  个频率成分的功率;  $N_0$  为光纤单位体积中  $\text{Yb}^{3+}$  离子的掺杂浓度;  $\tau$  为上能级粒子自发辐射寿命;  $N_2$  为上能级粒子数密度分布函数;  $\Gamma_p$  为泵浦功率填充因子;  $\Gamma_s$  为信号功率填充因子;  $A_{eff}$  为双包层光纤纤芯有效面积;  $\sigma_p^a$  和  $\sigma_p^e$  分别为泵浦光的吸收和发射截面;  $\sigma_s^a$  和  $\sigma_s^e$  分别为信号光的吸收和发射截面;  $\alpha_p$  和  $\alpha_s$  分别为泵

$$\frac{dP_p}{dz} = N_0 \Gamma_p P_p \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] - \alpha_p P_p \quad (1)$$

$$\frac{dP_{sn}}{dz} = N_0 \Gamma_p P_{sn} \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] - P_{sn} \sum_i g_{sbsi} P_{sbsi} / A_{eff} - \alpha_s P_{sn} \quad (2)$$

$$\frac{dP_{sbsi}}{dz} = -N_0 \Gamma_s P_{sbsi} \left[ \frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] - P_{sbsi} \sum_i g_{sbsn} P_{sn} / A_{eff} + \alpha_s P_{sbsi} \quad (3)$$

浦光和信号光的传输损耗系数;  $v_{sbsi}$  为布里渊散射频率;  $P_{sbsi}$  为对应于布里渊散射频率  $v_{sbsi}$  的功率;  $v_{sn}$  为信号光中第  $n$  个频率;  $v_p$  为泵浦光频率;  $g_{sbsi}$  和  $g_{sbsn}$  分别对应于第  $i$  和第  $n$  个布里渊散射频率的增益系数;  $c$  为光速;  $h$  为普朗克常量。

后续的理论计算中, 各参量的取值如表 1 所示。在 MOPA 结构的单频光纤激光器中, 放大级增益光

表 1 理论计算中各参量的取值

Tab.1 Value of each parameter in theoretical calculation

Parameter	Value	Parameter	Value
$\lambda_p/\text{nm}$	975	$N_0/\text{m}^{-3}$	$6.7 \times 10^{25}$
$\lambda_s/\text{nm}$	1 064.4	$A_{eff}/\text{m}^2$	$4.906\ 25 \times 10^{-10}$
$\sigma_p^a/\text{m}^2$	$2.269\ 67 \times 10^{-24}$	$\Delta\nu_B/\text{MHz}$	58
$\sigma_p^e/\text{m}^2$	$2.179\ 6 \times 10^{-24}$	$c_l/\text{MHz} \cdot \text{K}^{-1}$	2.25
$\sigma_s^a/\text{m}^2$	$5.52 \times 10^{-27}$	$c_s/\text{GHz}$	0.7%
$\sigma_s^e/\text{m}^2$	$3.27 \times 10^{-25}$	$k_1/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.38
$\alpha_p/\text{m}^{-1}$	$3 \times 10^{-3}$	$k_2/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	1.38
$\alpha_s/\text{m}^{-1}$	$5 \times 10^{-3}$	$k_3/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.2
$\Gamma_p$	0.002 5	$h_3/\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	1 000
$\Gamma_s$	0.88	$\alpha/\text{m}^{-1}$	0.58
$h/\text{J} \cdot \text{s}$	$6.63 \times 10^{-34}$	$\eta_{abs}$	1
$c/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$3 \times 10^8$	$\eta_q$	0.9
$\tau/\text{ms}$	0.8	$\nu_A/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	5.96
$n_p$	1.45	$g_0/\text{m} \cdot \text{W}^{-1}$	$2 \times 10^{-11} - 5 \times 10^{-11}$

纤的长度和温度分布均能影响 SBS 的阈值功率,文中分析了以上参数对 SBS 的影响,并对其进行了优化。

### 1.1 光纤长度对 SBS 的影响

该节主要研究增益光纤长度对输出功率及 SBS 阈值功率的影响。同时考虑到光纤激光器通常需要以无源光纤作为输出端,后续的计算中均以长度为 0.5 m 的无源光纤作为输出光纤。为了保证较好的光束质量,论文主要以纤芯/包层直径为 25/250  $\mu\text{m}$ ,对 975 nm 泵浦光吸收系数为 4.8 dB/m 的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤作为放大级增益光纤为例进行研究。

放大级增益光纤长度的确定主要考虑两个方面的因素:

一是对最大输出功率和光光转换效率的影响。图 1 为当注入放大级的种子光功率 1.5 W、泵浦光功率 242 W 时,泵浦光功率和激光功率随增益光纤长度的变化。随着增益光纤长度(Fiber length)的增大,激光功率(Laser power)逐渐增大,其中,当增益光纤长度为 2.5 m 时,输出激光功率相对较小;增益光纤长度为 4 m 时,激光功率达到最大值,此时,进一步增加增益光纤的长度,激光功率开始减小。而泵浦光功率随着增益光纤长度的增大逐渐减小,其中,当增益光纤长度为 2.5 m 时,剩余泵浦光功率相对较小;增益光纤长度为 4 m 时,泵浦光功率已减小到瓦级,对于高功率光纤激光器可认为此时泵浦光已基本被吸收。因此,可实现最高效激光功率输出的增益光纤最佳长度为 4 m。

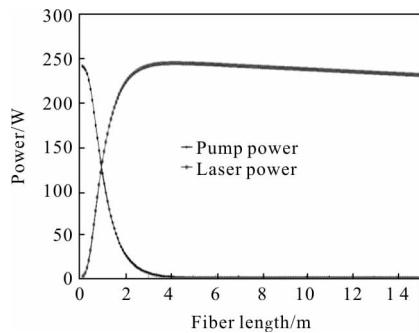


图 1 泵浦光功率和激光功率随增益光纤长度的变化  
Fig.1 Pump power and laser power vary with the length of gain fiber

二是对 SBS 阈值功率的影响。图 2 是以长度分别为 2.5、3、3.5、4 m 的掺  $\text{Yb}^{3+}$  双包层光纤作为放大

级增益光纤时,SBS 的功率随输出激光功率的变化。当增益光纤的长度为 2.5 m 时(2.5 m YDF),SBS 的阈值功率最高,为 127 W;增益光纤的长度为 3 m 时(3 m YDF),SBS 的阈值功率减小为 95.1 W;增益光纤的长度为 3.5 m 时(3.5 m YDF),SBS 的阈值功率减小为 79.54 W;增益光纤的长度为 4 m 时(4 m YDF),SBS 的阈值功率最小,其值为 72.4 W。

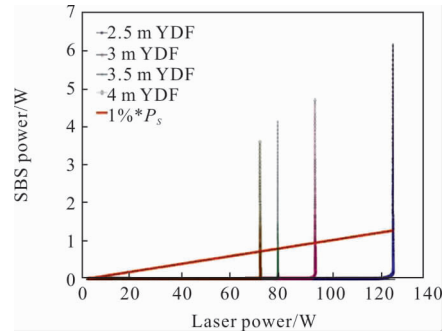


图 2 增益光纤不同长度下 SBS 功率随输出激光功率的变化  
Fig.2 SBS power varies with output laser power with different gain fiber length

综上,YDF 光纤的长度由 4 m 缩短至 3.5 m,长度变化 0.5 m,SBS 阈值功率由 72.4 W 提高到 79.54 W,提高了 7.14 W;由 3.5 m 缩短至 3 m,SBS 阈值功率由 79.54 W 提高到 95.1 W,提高了 15.56 W;由 3m 缩短至 2.5 m,SBS 阈值功率由 95.1 W 提高到 127 W,提高了 31.9 W,SBS 的阈值功率大幅提高;进一步表明缩短增益光纤的长度可明显提高 SBS 的阈值功率,并且增益光纤长度越短,SBS 阈值功率的涨幅就越大。

综合考虑增益光纤长度对输出激光功率和 SBS 阈值功率的影响:虽然从提高输出激光功率的角度考虑,增益光纤的理想长度为 4 m,但从提高 SBS 阈值功率角度考虑,当增益光纤长度为 4 m 时,SBS 的阈值功率仅为 72.4 W,而当增益光纤长度减小到 2.5 m 时,SBS 的阈值功率已高达 127 W,尽管此时激光器的输出功率有所下降,但仍能保证高功率激光输出,进一步减小增益光纤长度,将会导致光光转换效率过低,不能实现高功率激光输出。因此,增益光纤的最佳长度为 2.5 m。

### 1.2 增益光纤温度分布对 SBS 的影响

在确定了放大级增益光纤长度的基础上,合理改变增益光纤的温度分布能够进一步提高 SBS 的阈

值功率。而增益光纤的温度分布通常包括增益光纤吸收泵浦光导致自身温度升高形成的温度分布(自身温度梯度),以及通过升高增益光纤的某一部分温度形成的温度分布(温度梯度),其中,增益光纤吸收泵浦光导致自身温度升高形成的温度分布(自身温度梯度)对 SBS 的影响较复杂,这里不在分析。下面只针对通过升高增益光纤的某一部分温度形成的温度分布(温度梯度)对 SBS 的影响进行了计算。

首先对温控位置进行了优化。图 3 为以长度 2.5 m 的掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤作为放大级增益光纤,输出端连接 0.5 m GDF 光纤时,温控长度为 1 m,温度为 60 °C 为例,控制增益光纤不同位置(Fiber position)的温度时,SBS 阈值功率(SBS threshold power)的变化,当温控区域在 0.5~1.5 m 的范围时,SBS 的阈值功率最小,仅为 151 W,温控区域在 1~2 m 的范围时,SBS 的阈值功率增大到 168.2 W,温控区域在 1.5~2.5 m 的范围时,SBS 的阈值功率增大到 178.2 W。与未对增益光纤温控相比(SBS 的阈值功率 145 W),对增益光纤进行温控后,SBS 的阈值功率明显提高。表明对增益光纤进行温控条件下,SBS 的阈值功率大幅提高,且温控的最佳起始位置为增益光纤的输出端。

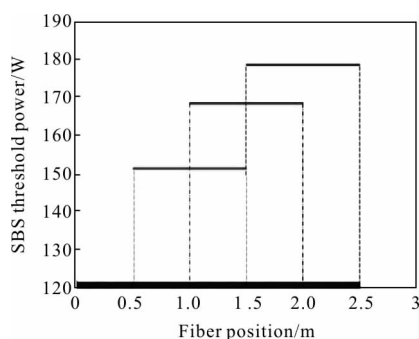


图 3 SBS 阈值功率随温控位置的变化

Fig.3 SBS threshold power varies with the position of temperature control

这里对温控长度也作了优化。图 4 为与图 3 同样的增益光纤和输出光纤条件下,温控温度为 60 °C 时,SBS 的阈值功率随增益光纤温控长度的变化,温控起始位置在增益光纤的输出端,当温控区域在 0.5~2.5 m 的范围、长度为 2 m 时,SBS 的阈值功率为 164.3 W,温控区域在 1~2.5 m 的范围、长度为 1.5 m 时,SBS 的阈值功率为 183.1 W,温控区域在 1.5~2.5 m 的范围、长度为 1 m 时,SBS 的阈值功率为

178.2 W,温控区域在 2~2.5 m 的范围长度为 0.5 m 时,SBS 的阈值功率为 144.3 W。当温控长度为 1.5 m 时,SBS 的阈值功率最高,表明此时以增益光纤的输出端作为温控的起始端,最佳温控长度为 1.5 m。

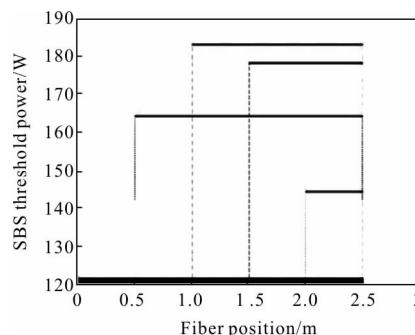


图 4 SBS 阈值功率随温控长度的变化

Fig.4 SBS threshold power varies with the length of temperature control

通过以上理论计算,具体分析了增益光纤的温度梯度对 SBS 阈值功率的影响。在不考虑增益光纤由于吸收泵浦光形成的温度梯度,通过外部温控使增益光纤中形成温度梯度时,对于最佳温控位置,在泵浦光注入端附近,由输出端激发的后向 Stokes 光已在增益光纤中经过相当长度的放大,此时注入放大级的种子光功率较小,后向 Stokes 光将会与种子光形成竞争并获得增益;而在增益光纤的输出端附近激光功率达到最大,此时后向 Stokes 光刚刚被激发,功率很小,后向 Stokes 光不能与正向激光形成竞争并被放大,因此,在增益光纤的输出端附近控制增益光纤的温度梯度抑制 SBS 效果最佳。同时考虑增益光纤由于吸收泵浦光形成的温度梯度和通过外部温控使增益光纤中形成的温度梯度对 SBS 的影响时情况比较复杂,这里不再作进一步分析。另外,改变增益光纤的应力易对光纤造成损伤,且与改变增益光纤的温度来提高 SBS 的阈值具有相同的特性,同样不再作进一步的分析。

## 2 实验方案

高功率单频光纤激光器采用单频种子源加两级放大的 MOPA 结构,实验原理如图 5 所示。其中,种子源的中心波长为 1 064.4 nm,线宽 70 kHz,最大输出功率 100 mW,输出尾纤的纤芯/包层直径为 6/125 μm。

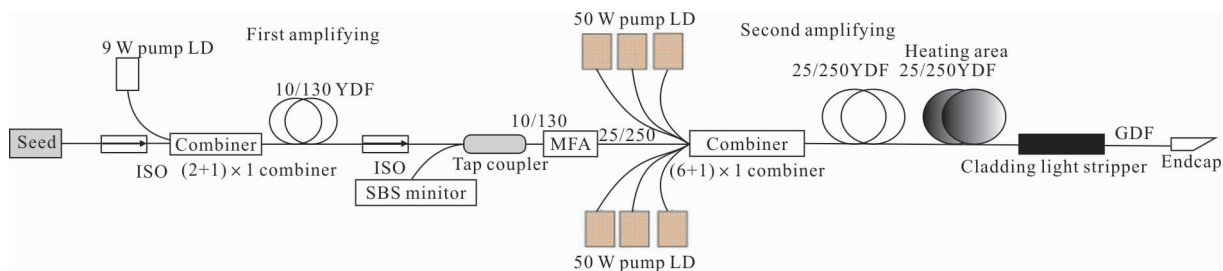


图 5 单频光纤激光器实验原理图

Fig.5 Experimental schematic diagram of single frequency fiber laser

一级放大的增益光纤采用长 4 m 的 10/130 掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤,其对 975 nm 泵浦光的吸收系数为 3.9 dB/m。泵浦源采用 1 支最大输出功率为 9 W、中心波长 975 nm 的激光二极管,输出尾纤直径为 105/125 μm。泵浦耦合采用(2+1)×1 合束器,泵浦臂直径为 105/125 μm,主纤直径为 10/125 μm。

二级放大的增益光纤采用长 2.5 m 的 25/250 掺 Yb<sup>3+</sup>双包层光纤,其对 975 nm 泵浦光的吸收系数为 4.8 dB/m。泵浦源采用 6 支最大输出功率为 50 W、中心波长 975 nm 的激光二极管,输出尾纤直径为 105/125 μm。泵浦耦合采用(6+1)×1 合束器,泵浦臂直径为 105/125 μm,主纤直径为 25/250 μm。为了抑制高阶模,采用弯曲缠绕的方式将增益光纤以 20 cm 的半径缠绕在柱状圆筒上,圆筒底部紧贴水冷板。

为了防止反馈,各级之间均接入了光隔离器(ISO);采用模场适配器(MFA)连接第一和第二放大级;为了防止受激布里渊散射效应引起的后向散射光打坏前级器件,在第一与第二放大级之间连接抽头耦合器(Tap coupler),分光比为 1/99,其功能为监测反向 SBS 功率(SBS Monitor),当反向功率出现非线性增长时说明已达到了 SBS 效应的阈值,应迅速关掉放大级电源,以防止前级器件被反向光打坏;为了消除包层光,在第二放大级和输出端之间连接包层光泄漏器(Cladding light stripper);第二放大级增益光纤输出端之后连接长 0.5 m 的无源光纤(GDF),为防止反馈,采用切有斜 8°角的端帽(Endcap)作为输出端。整个系统采用水冷方式进行散热。

另外,文中设计了通过对第二放大级的增益光纤进行部分升温的方式来改变增益光纤的温度分布的实验,其中加热区域为以增益光纤输出端为起点、增益光纤上长度为 1 m 的区域。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 输出功率

前面的理论计算结果已表明,缩短光纤的长度及改变增益光纤的温度分布均能提高 SBS 的阈值功率。该节通过实验进一步验证了以上理论分析的正确性。

对通过控制增益光纤某一区域的温度梯度改变增益光纤的温度分布、SBS 的阈值功率变化情况进行了实验研究。但考虑到高功率下增益光纤的表面温度较高,涂覆层可承受的温度有限,需对增益光纤的高温区进行散热。图 6 为当第二放大级增益光纤长度为 2.5 m,注入增益光纤的泵浦光功率为 251 W 时,在近常温条件下增益光纤涂覆层表面的温度分布,沿着增益光纤的纵向从 0~2.5 m,增益光纤涂覆层的表面温度从 0 m 的 125.9 °C 逐渐减小到 2.5 m 的 48.7 °C,其中 1.5 m 处的温度为 67.4 °C,0~1.5 m 的区域增益光纤涂覆层的表面温度均大于 67.4 °C,为了保证系统的稳定工作,对 0~1.5 m 区域的增益光纤进行了散热处理。综合以上分析,增益光纤的温

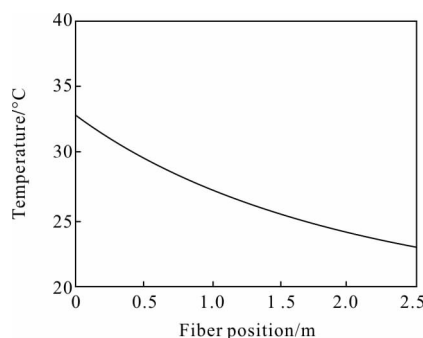


图 6 近常温条件下增益光纤涂覆层表面的温度

Fig.6 Gain fiber coating temperature near normal temperature

控区域选为增益光纤上以输出端为起始端长 1 m 的区域。

在增益光纤长度缩短的条件下,控制增益光纤某一部分的温度梯度,同样存在最佳温控位置和长度。结合图 3,温控的最佳起始位置在增益光纤的输出端。虽然 1.2 节的理论计算结果表明,当增益光纤的长度为 2.5 m 时,其最佳温控长度为 1.5 m。但为了确保系统的稳定工作,实验中增益光纤的温控长度选为 1 m。图 7 为输出端无源光纤的长度为 0.5 m,增益光纤完全处于水冷散热下(温度为 20 ℃)(图 7(1)),和以增益光纤的输出端为起始位置、增益光纤上控制温度为 60 ℃(图 7(2))时,后向散射光功率(Backscattered power)随激光功率的变化,当只对光纤进行散热的条件下(图 7(1)),SBS 的阈值功率为 148 W,当增益光纤升温至 60 ℃(图 7(2))、输出激光功率为 180 W 时并未达到 SBS 的阈值,进一步增大激光功率受到泵浦功率的限制。以上结果与 1.2 节的理论计算结果基本吻合。

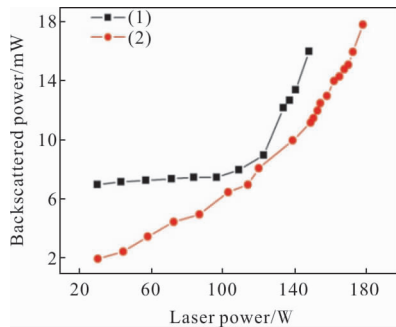


图 7 增益光纤不同的控制温度后向散射光功率随激光功率的变化

Fig.7 Backscattered power varies with laser power in different gain fiber temperature control

当主放大级增益光纤温控区的温度为 60 ℃时,第二放大级激光功率随泵浦功率的变化如图 8 所示。种子源输出功率为 100 mW,第一放大级输出功率为 1.52 W,第二放大级注入泵浦功率 251 W 时,第二放大级最大输出激光功率 180 W,光光效率 71.1%,斜效率 72%。激光功率与泵浦光功率具有较好的线性关系,说明进一步增大泵浦功率能够实现更高功率的单频激光输出。

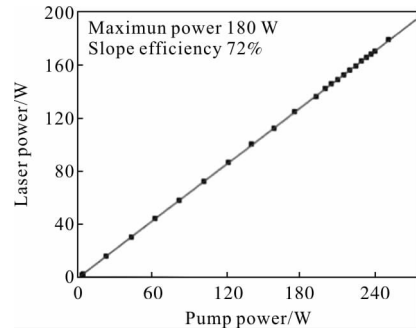
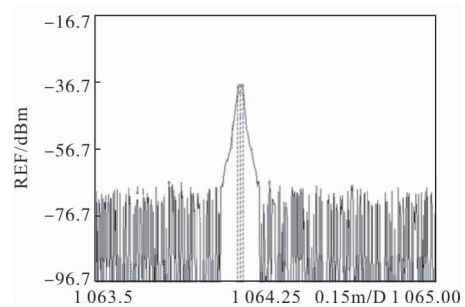


图 8 激光功率随泵浦功率的变化

Fig.8 Laser power varies with pump power

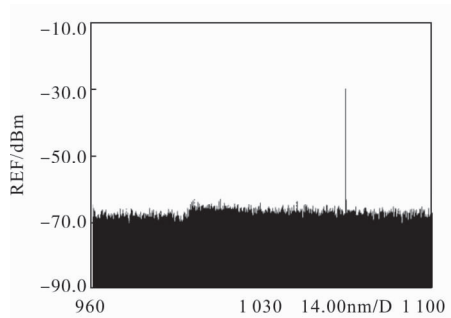
### 3.2 输出光谱

采用测量光谱范围为 400~1 700 nm、分辨率为 0.02 nm 的光谱分析仪对输出激光的光谱进行了测量,测量结果如图 9(a)、(b)所示。其中,种子源的中心波长为 1 064.136 nm(图 9(a)),放大级输出功率为 180 W 时(图 9(b)),输出激光的中心波长为 1 064.133 nm,未观察到 975 nm 附近的剩余泵浦光,表明包层光泄漏器已将剩余泵浦光完全泄漏掉。



(a) 种子源光谱

(a) Seed source spectrum



(b) 放大功率为 180 W 时的光谱图

(b) Spectrum with amplified power of 180 W

图 9 输出激光光谱

Fig.9 Output laser spectrum

### 3.3 输出光束质量

采用光束质量分析仪对输出激光的光束质量进行了测量,当输出功率为 180 W 时,输出激光的光束质量测量结果如图 10 所示,测得光束质量  $M_x^2=1.2, M_y^2=1.21$ 。

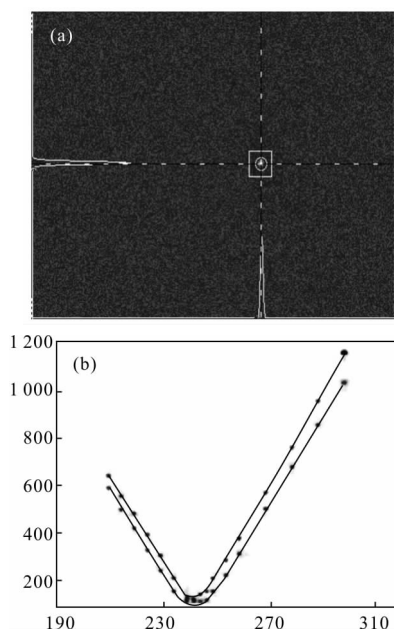


图 10 输出功率为 180 W 时的光束质量测量图

Fig.10 Beam quality at power of 180 W

## 4 结 论

文中研究了 MOPA 结构高功率单频光纤激光器技术。重点研究了单频光纤激光器放大技术,最终,采用输出激光功率为 100 mW、线宽为 70 kHz 的单频光纤激光器作为种子源,经两级放大,实现了最大功率为 180 W 的单频全光纤激光输出,中心波长 1 064.134 nm,光光效率 71.1%,斜效率 72%,光束质量为  $M_x^2=1.2, M_y^2=1.21$ 。

通过理论计算对单频光纤激光器放大级的特性——光纤的长度及增益光纤的温度分布对 SBS 的阈值功率的影响进行了预判,并进行了相应的单频激光放大实验。验证了通过改变放大级增益光纤的温度分布能够提高 SBS 的阈值功率,实验结果与理论计算结果基本吻合。初步分析了改变光纤的温度分布提高 SBS 的原因,改变光纤的温度分布,实质上是改变了光纤的折射率,导致后向 Stokes 光发生

频移,引起 SBS 增益谱展宽,使 SBS 的有效增益系数减小,从而提高了 SBS 阈值功率;最终促使单频光纤激光器的输出功率得到大幅提升。

### 参考文献:

- [1] Hu Xudong, Ning Tigang, Pei Li, et al. Progress of high power single frequency master oscillator fiber power amplifier[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(8): 081401. (in Chinese)  
胡旭东, 宁提纲, 裴丽, 等. 高功率单频主振荡光纤功率放大器研究进展[J]. *激光与光电子学研究进展*, 2010, 47(8): 081401.
- [2] Ji Wen, Chen Shufen, Fu Lei, et al. Experimental study of an ultra narrow linewidth fiber laser by injection locking[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(8): 080601.
- [3] Song Zhaoyuan, Yao Guibin, Zhang Leilei, et al. Influence factors of phase noise of single frequency fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (3): 0305005. (in Chinese)  
宋昭远, 姚桂彬, 张磊磊, 等. 单频光纤激光器相位噪声的影响因素[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 0305005.
- [4] Yoonchan Jeong, Johan Nilsson, Jayanta K Sahu, et al. Power scaling of single frequency ytterbium doped fiber master oscillator power amplifier sources up to 500 W [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2007, 13(3): 546–551.
- [5] Craig Robin, Iyad Dajani, Furqan Chiragh. Experimental studies of segmented acoustically tailored photonic crystal fiber amplifier with 494 W single-frequency output [C]// SPIE, 2011, 7914: 79140B.
- [6] Clint Zeringue, Christopher Vergien, Iyad Dajani. Pump-limited, 203 W, single-frequency monolithic fiber amplifier based on laser gain competition [J]. *Optics Letters*, 2011, 36 (5): 618–620.
- [7] Qi Yunfeng, Liu Chi, Zhou Jun, et al. High power narrow linewidth single frequency line-polarized fiber amplifier based on master-oscillator power amplifier technology [J]. *Acta Phys Sin*, 2010, 59(6): 3942–3947. (in Chinese)  
漆云凤, 刘驰, 周军, 等. 128 W 单频线偏振光纤放大器特性研究[J]. *物理学报*, 2010, 59(6): 3942–3947.
- [8] Dong Xiaolin, Xiao Hu, Xu Shanhu, et al. 122-W high-power single-frequency MOPA fiber laser in all-fiber format [J]. *Chinese Optics Letters*, 2011, 9(11): 111404.



- [9] Xiao Hu, Dong Xiaolin, Zhou Pu, et al. A 168-W high-power single-frequency amplifier in an all-fiber configuration [J]. *Chin Phys B*, 2012, 21(3): 034207.
- [10] Joshua E Rothenberg, Peter A Thielen, Michael Wickham, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers [C]// SPIE, 2008, 6873: 68730O.
- [11] Stuart Gray, Liu Anping, Donnell T Walton, et al. 502 Watt, single transverse mode, narrow linewidth, bidirectionally pumped Yb-doped fiber amplifier [J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17044-17050.
- [12] Liu Anping, Chen Xin, Li Mingjun, et al. Comprehensive modeling of single frequency fiber amplifiers for mitigating stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(13): 2189-2197.
- [13] Liu Anping. Stimulated Brillouin scattering in single frequency fiber amplifiers with delivery fibers [J]. *Optics Express*, 2009, 17(17): 15201-15209.