

采用多级放大结构的单频拉曼光纤放大器的数值模拟

冷进勇 吴武明 陈胜平* 侯 静 许晓军

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南, 长沙 410073)

摘要 高功率单频拉曼光纤放大器(SF-RFA)的性能往往会由于受激布里渊散射(SBS)的出现而受到限制。数值模拟结果表明单级 SF-RFA 的输出功率较低,且所需的抽运功率远高于实际器件所能承受的水平。采用多级放大结构可使 SF-RFA 的输出功率和效率均有较大幅度的提升;各级放大器应选择适当类型的光纤,在波分复用器(WDM)所能提供的抽运功率范围内,可得到较高的放大光输出。以二级放大系统为例,第一级放大器使用 100 m、纤芯有效直径为 6 μm 的标准单模光纤,通过在光纤中施加应力梯度来抑制 SBS,在抽运功率为 32 W 时,得到约 3 W 的输出;以此为第二级放大器的种子信号光,使用 70 m、纤芯有效直径为 15 μm 的光纤,同样通过施加应力梯度抑制 SBS,在抽运功率为 105 W 和 130 W 时可分别得到 20 W 和 30 W 的放大光输出。

关键词 拉曼光纤放大器;受激拉曼散射;受激布里渊散射;单频;多级放大;抑制

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201131.0606007

Simulation on Single-Frequency Raman Fiber Amplifiers Utilizing Multi-Stage Amplification Scheme

Leng Jinyong Wu Wuming Chen Shengping Hou Jing Xu Xiaojun

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract High-power operation of single-frequency Raman fiber amplifiers (SF-RFA) is usually limited by the onset of stimulated Brillouin scattering (SBS). Simulation results indicate that the output power of a single-stage SF-RFA is always low and the needed pump power is too high to satisfy. The amplifiers with multiple stages have comparatively higher output power and efficiency. Different types of fiber should be provided in different stages so that the output power could be optimized according to the attainable pump power. Taking a two-stage amplifier as an example, 100 m fiber with the core diameter of 6 μm is used in the first stage. By utilizing strain gradients along the fiber to suppress the SBS, the output of the first stage is increased to 3 W under the pump power of 32 W. The output power of the first stage is seeded into the second stage with an isolator between them. The second stage is composed by 70 m fiber with the core diameter of 15 μm . By suppressing the SBS with strain gradients, 20 W and 30 W output powers are obtained with the pump powers of 105 W and 130 W, respectively.

Key words Raman fiber amplifier; stimulated Raman scattering (SRS); stimulated Brillouin scattering (SBS); single frequency; multi-stage amplification; suppression

OCIS codes 060.2320; 190.5650; 290.5910; 290.5900

1 引言

与传统激光器和放大器中通过掺杂粒子的受激辐射获得增益不同,拉曼激光器和放大器通过受激拉曼散射(SRS)效应获得增益。由于 SRS 的增益

谱较宽,使得拉曼光源的输出波长范围几乎可覆盖整个近红外区,因此被广泛应用于通信^[1]和超连续谱产生^[2]等领域。由于光纤具有模场面积小和作用距离长等特点,特别适合于作为 SRS 的增益介质,

收稿日期: 2010-06-25; 收到修改稿日期: 2010-10-22

基金项目: 国家自然科学基金(10904173)、中国博士后科学基金(20080430237)资助课题。

作者简介: 冷进勇(1982—),男,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: jinyongleng@gmail.com

* 通信联系人。E-mail: chensp@nudt.edu.cn

因此在一些特殊波段,例如 1120 nm 和 1178 nm,拉曼光纤激光器^[3]和放大器^[4]是很理想的光源。在一些特殊领域,例如频率转换和相干合成等,要求光源的线宽较窄,此时拉曼光纤激光器和放大器受到很大的限制,因为不管是激光器还是放大器往往需要几十、甚至数百米的光纤来提供足够高的增益。如果运行在单频状态下,信号光的受激布里渊散射(SBS)也很容易产生。SBS在一定程度上限制了单频拉曼光纤激光器和放大器的输出功率,甚至使得拉曼光纤激光器和放大器没有激光输出,因此对SBS限制下的单频拉曼光源的研究是非常必要的。

近年来,Feng Yan 等^[4]通过有效的SBS抑制手段,在单路单频拉曼光纤放大器(SF-RFA)中得到39 W的1178 nm输出光,为目前最高输出功率,然而他们的工作主要集中在实验方面,理论方面的工作较少。目前国内对拉曼光源的研究多集中在用于密集波分复用(DWDM)超长距离光传输的拉曼放大器^[5~7],对于单频拉曼放大器的研究还未见报道。

本文在综合考虑SRS和SBS过程的基础上,提出SF-RFA中的强度耦合方程组。模拟计算表明,通常情况下,SF-RFA的输出功率和效率均较低;多

级放大相对单级放大具有较高的效率。以两级放大系统为例,说明不同的放大级使用不同模场面积的光纤可降低对器件的要求,同时便于各种SBS抑制措施的实施。

2 SF-RFA 中含有 SBS 的强度耦合方程组

以图1为例说明SF-RFA中抽运光、信号光和SBS光的变化。从图中可以看出,前向传输的1178 nm信号光由于SRS会不断增大。通常情况下,为了提供足够高的增益,往往需要几十、甚至数百米的光纤,这样在放大单频种子光时就会带来另外一个问题——信号光的SBS。窄的信号光线宽和长的光纤,使得1178 nm信号光很容易发生SBS。后向传输的SBS光相对于1178 nm信号光的频移约为十几吉赫兹(小于0.1 nm),因此布里渊散射光仍处于1120 nm的拉曼增益线宽内,在后向传输的过程中会由于SRS和SBS的共同作用而得到放大。后向放大的SBS光会消耗信号光,形成信号光的SRS效应和SBS效应的竞争,使得放大器的性能受到限制。

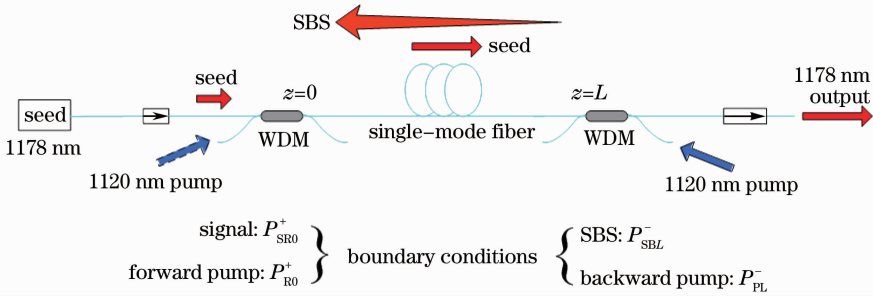


图1 SF-RFA 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a SF-RFA

SRS 和 SBS 过程可以用下面两个方程组描述^[8]:

$$\begin{cases} \frac{dI_{SR}}{dz} = g_R I_P I_{SR} - \alpha_{SR} I_{SR} \\ \frac{dI_P}{dz} = -\frac{\nu_P}{\nu_{SR}} g_R I_P I_{SR} - \alpha_P I_P \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_{SB}}{dz} = -g_B I_P I_{SB} + \alpha_{SB} I_{SB} \\ \frac{dI_P}{dz} = -g_B I_P I_{SB} - \alpha_P I_P \end{cases}, \quad (2)$$

式中 I_{SR} 和 I_{SB} 表示 SRS 光和 SBS 光的光强, I_P 为各自的抽运光强, g_R 和 g_B 分别为拉曼和布里渊增益系数, ν_P 和 ν_{SR} 分别为抽运光和拉曼散射光的频率, α_{SR} 、 α_{SB} 和 α_P 分别表示 SRS 光、SBS 光和抽运光的

散射损耗。

考虑图1中描述的过程,可以用下面的方程组来描述含有SBS的SF-RFA:

$$\frac{dI_P^+}{dz} = -\frac{\nu_P}{\nu_{SR}} g_R I_P^+ I_{SR}^+ - \frac{\nu_P}{\nu_{SB}} g_R I_P^+ I_{SB}^- - \alpha_P I_P^+, \quad (3)$$

$$\frac{dI_P^-}{dz} = \frac{\nu_P}{\nu_{SR}} g_R I_P^- I_{SR}^+ + \frac{\nu_P}{\nu_{SB}} g_R I_P^- I_{SB}^- + \alpha_P I_P^-, \quad (4)$$

$$\frac{dI_{SR}^+}{dz} = g_R I_P I_{SR}^+ - g_B I_{SR}^+ I_{SB}^- - \alpha_{SR} I_{SR}^+, \quad (5)$$

$$\frac{dI_{SB}^-}{dz} = -g_R I_P I_{SB}^- - g_B I_{SR}^+ I_{SB}^- + \alpha_{SB} I_{SB}^-, \quad (6)$$

式中上标“+”和“-”分别代表前向传播和后向传播,下标“P”、“SR”和“SB”分别代表1120 nm抽运光、1178 nm信号光和1178 nm的SBS光。 ν_{SB} 为

SBS 光的频率。(3)和(4)式分别描述了前向和后向抽运光的变化规律,(5)和(6)式分别描述了信号光和信号光的 SBS 光的变化规律。从(5)式可以看出,信号光由于 SRS 效应得到增益,由于 SBS 效应和散射损耗而衰减,如果后向的 SBS 功率足够强,将大量消耗种子信号光,影响信号光的放大;从(6)式可以看出,后向传输的 SBS 光同时通过 SRS 和 SBS 效应得到增益。

用功率代替光强,同时考虑到布里渊散射的增益谱,(3)~(6)式可改写为

$$\frac{dP_P^+}{dz} = -\frac{\nu_P}{\nu_{SR}} \frac{g_R P_P^+ P_{SR}^+}{A_{eff}} - \frac{\nu_P}{\nu_{SB}} \frac{g_R P_P^+ \sum_i P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_P P_P^+, \quad (7)$$

$$\frac{dP_P^-}{dz} = \frac{\nu_P}{\nu_{SR}} \frac{g_R P_P^- P_{SR}^+}{A_{eff}} + \frac{\nu_P}{\nu_{SB}} \frac{g_R P_P^- \sum_i P_{SBi}^-}{A_{eff}} + \alpha_P P_P^-, \quad (8)$$

$$\frac{dP_{SR}^+}{dz} = \frac{g_R P_P^- P_{SR}^+}{A_{eff}} - \frac{P_{SR}^+ \sum_i g_{Bi} P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_{SR} P_{SR}^+, \quad (9)$$

$$\frac{dP_{SBi}^-}{dz} = -\frac{g_R P_P^- P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \frac{g_{Bi} P_{SR}^+ P_{SBi}^-}{A_{eff}} + \alpha_{SB} P_{SBi}^-, \quad (10)$$

式中 A_{eff} 为纤芯的有效面积。在(7)~(10)式中,忽略了离散的布里渊散射光之间在频率、拉曼增益系数和散射损耗上的差别。

自然状态下,SBS 的增益谱都可以用洛伦兹函数表示^[8]:

$$g_B(\nu_i) = g_0 \frac{\Omega_{SBS}^2}{4(\nu_i - \nu_0)^2 + \Omega_{SBS}^2}, \quad (11)$$

式中 g_0 为峰值增益, Ω_{SBS} 为布里渊散射线宽, $\nu_0 = 2n\nu_a/\lambda_{SR}$ 为相对于信号光 λ_{SR} 的频移量,也是增益谱的中心频率,其中 n 为折射率, ν_a 为光纤中的声速。

方程组(7)~(10)式的边界条件如图 1 中所示。使用修正的弛豫振动法求解此双边界条件的微分方程组。文献[9]中,模型的正确性已得到一定的阐述,在此直接使用数值模拟的结果进行讨论。计算中所使用到的参数如表 1 所示。

表 1 计算中用到的参数

Table 1 Parameters used in the model

Parameter	Value	Parameter	Value
λ_P/nm	1120	λ_{SR}/nm	1178
$g_R/(\text{m/W})$	7×10^{-14}	$g_0/(\text{m/W})$	2.4×10^{-11}
α_P/m^{-1}	0.003	$\alpha_{SR}, \alpha_{SB}/\text{m}^{-1}$	0.005
Ω_{SBS}/MHz	58	A_{eff}/m^2	2.83×10^{-11}
n	1.45	$\nu_a/(\text{km/s})$	5.96

3 数值模拟

3.1 采用单级放大结构的 SF-RFA 的功率限制

分布反馈式(DFB)激光二极管的输出功率一般在 10 mW 左右。图 2 所示为 1178 nm 信号光功率为 10 mW 时,使用不同长度光纤的 SF-RFA 的输出功率与抽运功率的关系。在 SF-RFA 中,抽运功率存在一个临界值,在临界值以下,放大器可得到放大光输出,抽运功率一旦超过该临界值,种子光在输入光纤不久就由于 SBS 效应而被后向传输的布里渊散射光消耗殆尽,最终使得放大器得不到放大光输出。图 2 中曲线的末端即对应其临界值。使用不同长度光纤的放大器,抽运功率取其临界值时,可得到在该长度下的最大输出功率。由于抽运功率一旦超过临界值,SBS 光功率急剧增长,因此在图 2 中体现不出信号光趋于饱和的过程^[9,10]。图 2 中的计算结果是在采用后向抽运方式的放大器中得到的;模拟结果表明,使用前向抽运方式可得到与图 2 类似的结果,只是所需的光纤长度和抽运功率稍有不同而已,因此在下面的计算中均采用后向抽运方式。

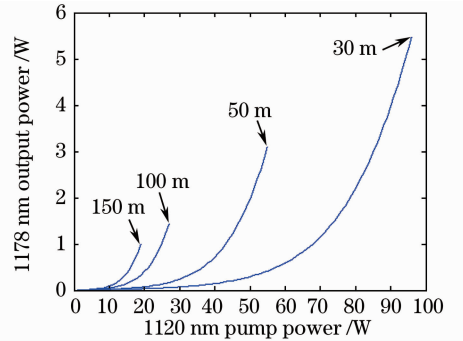


图 2 不同光纤长度下,输出功率与抽运功率的关系

Fig. 2 Output power as a function of pump power with different fiber lengths

图 3 所示为信号光种子功率为 10 mW,采用单级放大结构时,使用不同长度的光纤所能得到的最大输出功率及所需的抽运功率。从图中可以看出,使用单级放大结构所能得到的最大输出功率均较低,且所需要的抽运功率较高,已远远超出由普通单模光纤制成的波分复用器(WDM)的实际承受能力。

3.2 采用两级放大结构的 SF-RFA

在一级放大系统中,为了优化 SF-RFA 以提高其输出功率,可以选择合适的抽运方式、光纤长度以及施加 SBS 抑制措施。这样虽然能够使放大器的输出功率大幅提高,但离实际可使用的水平还有较大的差距。采用多级放大的方式也是提升放大器性

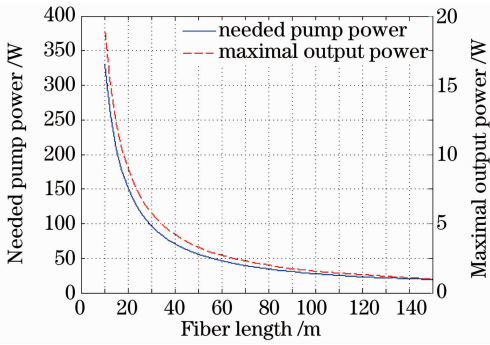


图 3 最大输出功率和所需的抽运功率与光纤长度的关系

Fig. 3 Maximal output power and needed pump power as functions of fiber length

能的重要措施。下面以二级放大系统为例,说明多级放大对 SF-RFA 性能的影响。

3.2.1 二级放大系统中的第一级放大

图 4 给出了与图 2 所对应的不同光纤长度下,放大器的效率与输出功率的关系。从图中可以看出,使用较短的光纤虽然可得到的最大输出功率较高,但效率相对较低;较长的光纤可得到的最大输出功率较低,但效率相对较高。因此在输出功率满足需求的前提下,应尽量选用较长的光纤。

以上模拟计算是在使用标准的单模光纤(纤芯有效直径为 $6 \mu\text{m}$)作为增益介质的情况下得到的,此时的 WDM 可承受的功率较低(国产器件最高可承受功率为 30 W)。结合图 2 和图 4 中的结果可以

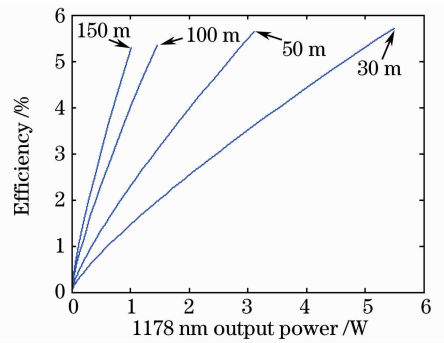


图 4 不同光纤长度下,效率与输出功率的关系
Fig. 4 Efficiency as a function of output power with different fiber lengths

看出,在种子信号光功率为 10 mW 时,在光纤长度为 100 m 的放大器中,25 W 的抽运功率可得到 1 W 的放大光输出,通过采取一定的 SBS 抑制措施^[9,11],可将输出功率提升至 3 W 左右。

在光纤中施加如图 5(a)所示的应力梯度,使后向放大的 SBS 光分散到离散的频移范围内,如图 5(b)所示,放大器的性能可得到大幅提升,如图 5(c)所示。从图 5 中可以看出,通过施加 SBS 抑制措施,使用纤芯较细的光纤,在抽运功率为 32 W 时,可得到 3 W 的放大光输出。计算中,SBS 频移的应力系数取为 $c_\epsilon = 0.7 \text{ GHz}/\%$ ($\epsilon = \Delta L/L$),因此,在图 5(a)所示的阶梯式应力分布中,相邻的两个应力只要其差值大于 $\Omega_{\text{SBS}}/c_\epsilon = 0.0829$,就可以使得 SBS 增益谱完全分开,即可得到理想的抑制效果。

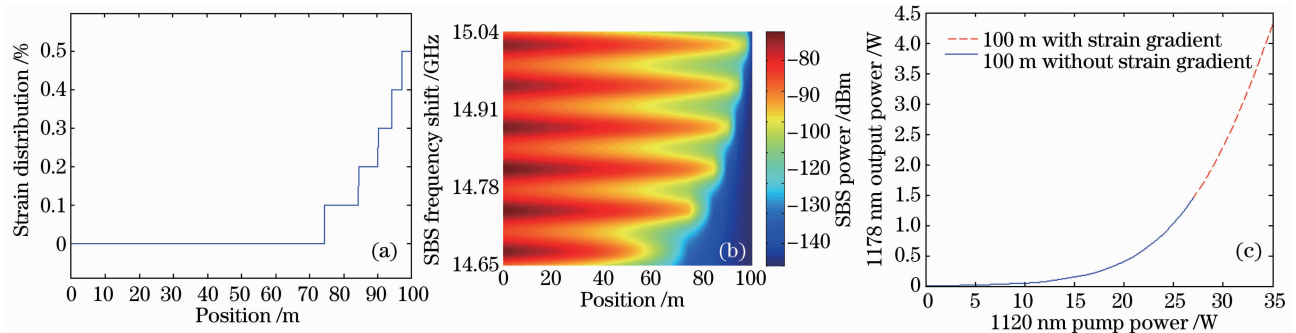


图 5 (a) 光纤内的应力分布, (b) 光纤内 SBS 的频移分布, (c) SBS 抑制对 SF-FRA 性能的提升
Fig. 5 (a) Strain distribution inside the fiber, (b) SBS frequency-shift distribution inside the fiber, (c) improvement of the performance of SF-FRA with SBS suppression

3.2.2 二级放大系统中的第二级放大

图 6 所示为以 3 W 信号光为种子的第二级放大器内抽运光与信号光功率的关系,所使用的光纤依然是上述的纤芯较细的光纤。与图 2 和图 3 中的结果相比,虽然采用二级放大系统,可以在使用较短的光纤时,在相对较低的抽运功率下得到较高的输

输出功率,例如图 6 中使用 5 m 光纤在抽运功率为 150 W 时得到 16 W 的输出,但所需的抽运功率已远远超出了 WDM 所能承受的范围。即便使用较长的光纤,例如图 6 中的 10 m 光纤,通过施加 SBS 抑制措施可以得到超过 10 W 的放大光输出,但所需的抽运功率还是超出了 WDM 所能承受的范围。

另外,要在较短的光纤上施加精确的 SBS 抑制措施,本身就难于实现。

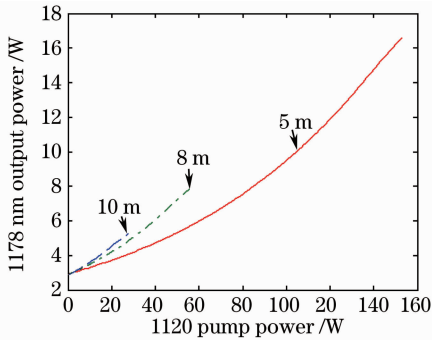


图6 种子功率为 3 W 时,输出功率与抽运功率的关系
Fig. 6 1178 nm output power as a function of 1120 nm pump power with the seed power of 3 W

从上面的模拟计算中可以看出,使用二级放大系统能大幅度地提高 SF-RFA 的输出功率。二级放大中所使用的是模场面积较小的光纤,为了得到高功率的输出,必须使用较短的光纤,使得 SBS 抑

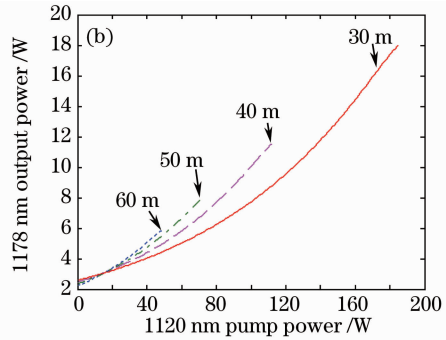
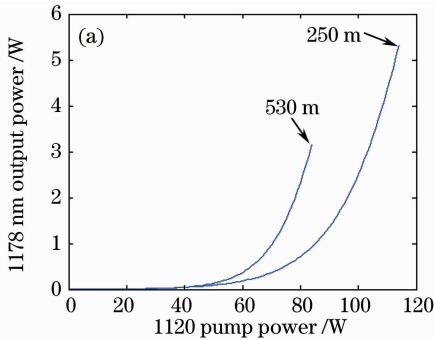


图7 使用大模场光纤时,在不同光纤长度下,输出功率与抽运功率的关系。(a)种子信号功率为 10 mW,
(b)种子信号功率为 3 W

Fig. 7 Output power as a function of pump power with large-mode-area fibers. (a) seed-signal power is 10 mW,
(b) seed-signal power is 3 W

对比图 7(b)和图 6 中的结构,除了光纤长度和所需的抽运功率不同外,变化趋势和所能得到的输出功率也基本一致,然而此时大模场面积的 WDM 能够满足所需的抽运功率,而且较长的光纤更适合各种精细的 SBS 抑制措施的实施。从图 7(b)中可以看出,如果 WDM 能承受所需的抽运功率,使用较短的光纤(如图中的 30 m)在没有 SBS 抑制的情况下即可得到接近 20 W 的输出。从前文的计算结果可知,使用较长的光纤可以得到较高的效率,在输出功率满足要求的前提下,应尽量使用较长的光纤,因此如果能够在第二级放大中按照类似于第一级放大时所使用的 SBS 抑制方法,则可以在使用较长光

制措施难以施加,且所需的抽运功率相对较高,对小模场面积的 WDM 提出很高的要求。因此在下面的计算中,放大器中所使用的是纤芯较大的光纤,由此种光纤组成的 WDM 所能承受的功率能大幅提高。

图 7 所示为使用纤芯有效直径为 $15 \mu\text{m}$ 的光纤时,放大器的输出功率与抽运功率的关系,种子信号功率分别为 10 mW 和 3 W。对于较低的信号光功率,对比图 7(a)和图 2 中的结果,可以看出除了光纤长度和所需的抽运功率不同外,变化趋势和所能得到的输出功率基本一致。需要强调的是,图 7(a)没有计算更长光纤时的结果,因为相比而言如此长的光纤没有实际意义。对于第一级放大来说,所要求的输出功率约为数瓦,对比图 5(c)和 7(a)可知,虽然使用较细和较粗的光纤均能满足要求,但如果使用较粗的光纤,整体成本将较高,因此第一级放大使用较细的光纤即可满足要求。

纤时,在较低的抽运功率下得到高的放大光输出。下面以光纤长度为 50、60 和 70 m 为例,说明二级放大中 SBS 抑制对放大器性能的影响。

当种子信号功率为 3 W 时,在光纤上施加图 8(a)所示的应力梯度,使得三种情况下第二级放大的性能均大幅提升,如图 8(b)所示。从图中可以看出,光纤长度为 70 m 时,105 W 和 130 W 的抽运功率分别可以得到 20 W 和 30 W 的放大光,而此时所需的抽运功率在大模场面积的 WDM 所能承受的范围之内。如果 WDM 可承受的功率可以继续增大,那么在使用 50 m 光纤的情况下,最大可得到近 50 W 的输出。

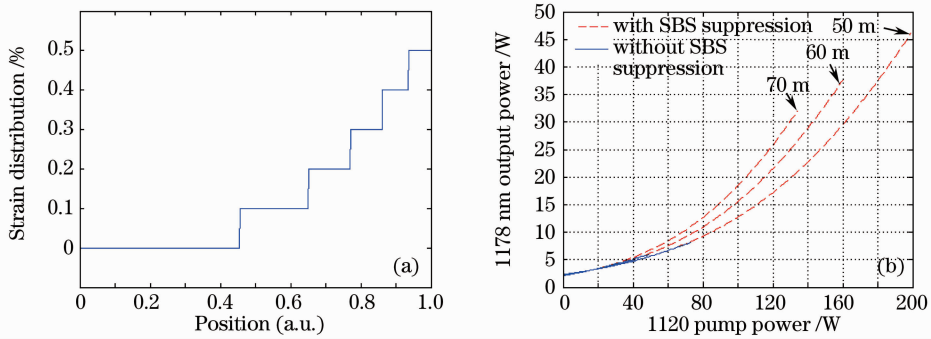


图 8 (a) 光纤内的应力分布, (b) SBS 抑制对 SF-FRA 性能的提升

Fig. 8 (a) Strain distribution inside the fiber, (b) improvement of the performance of SF-FRA with SBS suppression

4 结 论

在综合 SF-RFA 中 SRS 和 SBS 过程的基础上, 提出 SBS 限制下的 SF-RFA 中的强度耦合方程。数值模拟结果表明, 单级 SF-RFA 所能得到的输出功率较低, 且所需的抽运功率远高于实际器件所能承受的水平。采用二级放大的 SF-RFA 的输出功率有较大提升; 在两级放大系统中应根据所要求的输出功率和所需要的抽运功率合理选择光纤的类型, 以使得 WDM 能够满足所需的抽运功率, 同时所需的光纤较长, 适合各种精细的 SBS 抑制措施的实施。通过在两级放大器中分别施加简单的 SBS 抑制措施, 能够使得放大器的性能得到显著提高。计算表明, 第一级放大器使用 100 m, 纤芯有效直径为 $6 \mu\text{m}$ 的光纤, 在种子信号光为 10 mW 时, 通过在光纤中施加应力梯度, 抽运功率为 32 W 时可以得到 3 W 的放大光输出; 第二级放大器使用 70 m, 纤芯有效直径为 $15 \mu\text{m}$ 的光纤, 以第一级的输出光为种子光, 同样通过在光纤中施加应力梯度, 在抽运功率为 105 W 和 130 W 时分别可以得到 20 W 和 30 W 的放大光输出。如果将多路上述放大系统的输出光进行相干合成, 则可得到更高功率的输出。

参 考 文 献

- 1 N. S. Kim, M. Prabhu, C. Li *et al.*. 1239/1484 nm cascaded phosphosilicate Raman fiber laser with CW output power of 1.36 W at 1484 nm pumped by CW Yb-doped double-clad fiber laser at 1064 nm and spectral continuum generation[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**(1-3): 219~222
- 2 H. Masuda, K. -I. Suzuki, S. Kawai *et al.*. Ultra-wideband optical amplification with 3 dB bandwidth of 65 nm using a gain-equalised two-stage erbium-doped fiber amplifier and Raman

- amplification[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(9): 753~754
- 3 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 4 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia *et al.*. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm[C]. in *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD)* (Optical Society of America, 2009), paper PDPA4
- 5 Zhang Mingming, Liu Deming, Wang Ying *et al.*. Single-stage fiber Raman lasers for pumping fiber Raman amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(12): 1634~1638
- 张敏明, 刘德明, 王 英 等. 用于光纤拉曼放大器抽运源的单级光纤拉曼激光器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(12): 1634~1638
- 6 Qin Zujun, Zhou Xiaojun, Wu Haocheng *et al.*. Design of multi-wavelength cascaded Raman fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 244~248
- 秦祖军, 周晓军, 伍浩成 等. 多波长级联拉曼光纤激光器的设计[J]. *光学学报*, 2008, **29**(1): 244~248
- 7 Chi Ronghua, Lü Kecheng, Yun Peng *et al.*. Experimental study of fiber distributed Raman amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(7): 833~837
- 迟荣华, 吕可诚, 运 鹏 等. 分布拉曼光纤放大器的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(7): 833~837
- 8 Govind P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *et al.* Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002
- 阿戈沃. *非线性光纤光学原理及应用*[M]. 贾东方, 余震虹, 谈 斌 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002
- 9 Leng Jinyong, Wu Wuming, Chen Shengping *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency Raman fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 冷进勇, 吴武明, 陈胜平等. 单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2334~2339
- 10 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia. 25 W Raman-fiber-amplifier-based 589 nm laser for laser guide star[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(21): 19021~19026
- 11 J. E. Rothenberg, P. A. Thielen, M. Wickham *et al.*. Suppression of stimulated Brillouin scattering in single-frequency multi-kilowatt fiber amplifiers[C]. *SPIE*, 2008, 6873:687300