

文章编号: 0258-7025(2010)09-2334-06

单频拉曼光纤放大器中受激布里渊散射的抑制

冷进勇 吴武明 陈胜平* 许晓军 赵伊君

(国防科技大学光电科学与工程学院定向能技术研究所, 湖南 长沙 410073)

摘要 高功率单频拉曼光纤放大器(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。在综合考虑受激拉曼散射和 SBS 过程的基础上,提出了 SBS 限制下的 RFA 中的强度耦合方程组。通过在耦合方程中加入温度场和应力场,讨论温度场和应力场对 SBS 阈值的影响。分析表明,虽然单独依靠温度场或者应力场都能很好地抑制 SBS,提升放大器的性能,但要求都比较苛刻,很难真正实现。提出了一种综合使用温度和应力梯度的方案,在实际可操作的范围内,将 RFA 的输出功率提高了 3 倍。数值模拟的结果为实验研究高功率单频 RFA 中抑制 SBS 提供了一定的指导。

关键词 光纤光学;拉曼光纤放大器;单频;受激布里渊散射;抑制;温度;应力

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103709.2334

Suppression of Stimulated Brillouin Scattering in Single-Frequency Raman Fiber Amplifiers

Leng Jinyong Wu Wuming Chen Shengping Xu Xiaojun Zhao Yijun

(*Institute of Direct Energy, 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 (RFA) is usually limited by the onset of stimulated Brillouin scattering (SBS). We present our theoretical investigation on RFA limited by SBS, based on the intensity equations combining SBS and stimulated Raman scattering. The influence of temperature gradients and strain gradients, which can broaden the SBS gain profile and thereby increase the SBS threshold, on the performance of RFA is discussed. Although tensile strain and temperature gradients can suppress SBS in RFA separately, the conditions are too rigorous to realize. A feasible scheme for suppression of SBS in RFA is proposed using the temperature gradients together with tensile strain gradients along the fiber length, resulting in an increase of about 3 times of amplifier output power. The results of simulation provide a guide to suppress SBS in high power single-frequency RFA.

Key words fiber optics; Raman fiber amplifiers; single-frequency; stimulated Brillouin scattering; suppression; temperature; strain

1 引 言

对于钠导星激光光源,要求具有窄带(小于吉赫兹)、较大的平均功率、稳定性好等特性。采用窄带拉曼光纤放大器方式的光纤钠导星激光器能得到较高功率输出,它首先利用拉曼光纤放大器(RFA)输

出窄带 1178 nm,然后通过倍频输出窄带 589 nm。由于光纤激光器具有结构紧凑、光束质量好和能耗低等优点,所以光纤钠导星激光器是一种颇具前景且易实现的光源。

单频拉曼光纤放大器的物理机制是利用光纤中

收稿日期: 2010-03-30; 收到修改稿日期: 2010-05-11

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

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

导师简介: 赵伊君(1930—),男,教授,博士生导师,主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: zhaoyij70@sina.com

* 通信联系人。E-mail: chespn@163.com

的受激拉曼散射(SRS)效应,其中最大的问题是受激布里渊散射(SBS)限制了 1178 nm 单频激光输出功率的放大提升,一般情况下,SRS 增益系数比 SBS 增益系数小 2 个数量级,SBS 在一定程度上限制了 SRS 的发生,甚至使得拉曼光纤放大器没有放大光输出,因此对 SBS 限制下的单频 RFA 进行研究是非常必要的。

对于单频 RFA 中 SBS 抑制的研究主要集中在实验方面,如冯衍等^[1,2]通过有效的抑制手段,得到 39 W 的 1178 nm 输出光,为目前最高水平;目前国内这方面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^[3-5],对于单频拉曼放大器的研究还未见报道。虽然人们对于 RFA 的理论研究已经相当透彻,然而 SBS 限制下的 RFA 中的理论问题却较少有人涉足,特别是对 SBS 的抑制问题。本文在综合考虑 SRS 和 SBS 过程的基础上,提出单频 RFA 中的强度耦合方程组;在耦合方程组中加入温度场和应力场的影响,讨论不同的温度和应力分布对 SBS 阈值的影响。数值模拟所得到的结果与国外实验报道基本相符。

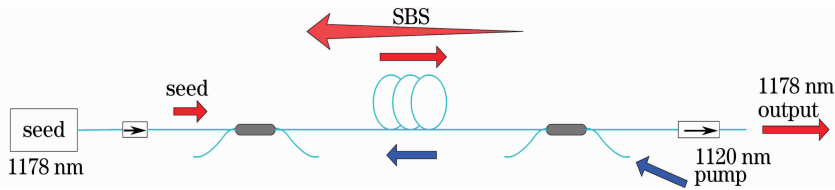


图 1 拉曼光纤放大器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a RFA

在 RFA 中,由于 SRS 过程,前向传输的 1178 nm 种子光会得到放大,当其功率超过 SBS 阈值时,会产生后向传输的布里渊散射光,也就是说整个过程可以分成两个部分:

1) SRS 过程: 1120 nm 抽运光向 1178 nm 耦合,种子光在传输过程中得到放大;

2) SBS 过程: 前向传输的拉曼放大光,由于其线宽较小(小于 10 MHz),且光纤长度较长,很容易达到 SBS 的阈值,产生后向传输的布里渊散射光。在这个过程中,由于 SBS 频移较小,产生的散射光仍处于拉曼放大的增益谱内,在传输过程中会同时由于 SBS 和 SRS 得到放大。

综合以上两个过程,得到耦合方程

$$\frac{dP_P}{dz} = \frac{\nu_p}{\nu_{SR}} g_R P_P P_{SR} / A_{eff} + \frac{\nu_p}{\nu_{SB}} g_R P_P \sum_i P_{SBSi} / A_{eff} + \alpha_P P_P, \quad (3a)$$

2 RFA 中含有 SBS 的强度耦合方程组

SRS 和 SBS 过程可以由方程组表示:

SRS 过程^[6]

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

SBS 过程^[6]

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

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, 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, g_R 和 g_B 分别为 SRS 光和 SBS 光的增益系数。

图 1 所示为主振荡功率放大器(MOPA)结构的拉曼光纤放大器示意图。

$$\frac{dP_{SR}}{dz} = g_R P_P P_{SR} / A_{eff} - P_{SR} \sum_i g_{Bi} P_{SBSi} / A_{eff} - \alpha_{SR} P_{SR}, \quad (3b)$$

$$\frac{dP_{SBSi}}{dz} = -g_R P_P P_{SBSi} / A_{eff} - g_{Bi} P_{SR} P_{SBSi} / A_{eff} + \alpha_{SB} P_{SBSi}, \quad (3c)$$

式中 P_P , P_{SR} 和 P_{SBSi} 分别为抽运光、拉曼散射光和布里渊散射光的功率, ν_{SB} 为布里渊散射光的频率, A_{eff} 为纤芯的有效截面。

自然状态下, SBS 的增益系数都可以用一个洛伦兹函数表示

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

式中 g_0 为峰值增益系数, Ω_{SBS} 为散射线宽。 $\nu_0 = 2n\nu_a / \lambda_{SR}$ 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。

已知的边界条件有:

左端:1178 nm 种子光功率 $P_{SR}(z=0)$;

右端:1120 nm 抽运光功率 $P_p(z=L)$ 和布里渊散射光初始功率 $P_{SBS_i}(z=L)$ ^[7]。

使用修正的弛豫法解方程组^[8],该方法不需要给出初始猜测值,且收敛速度较快,具体解法这里不做详细介绍。计算中使用到的参数常规值如表 1 所示。

表 1 计算中用到的参数

Table 1 Parameters used in the simulation

$\lambda_p = 1120 \text{ nm}$	$\lambda_{SR} = 1178 \text{ nm}$
$g_R = 7 \times 10^{-14} \text{ m/W}$	$g_0 = 2.4 \times 10^{-11} \text{ m/W}$
$\Omega_{SBS} = 58 \text{ MHz}$	$v_a = 5.96 \text{ km/s}$
$\alpha_p = 0.003 \text{ m}^{-1}$	$\alpha_{SR} = \alpha_{SB} = 0.005 \text{ m}^{-1}$
$n = 1.45$	$A_{\text{eff}} = 2.83 \times 10^{-11} \text{ m}^2$

3 利用温度场和应力场抑制 RFA 中的 SBS

图 2 所示为种子信号光功率为 10 mW,光纤长

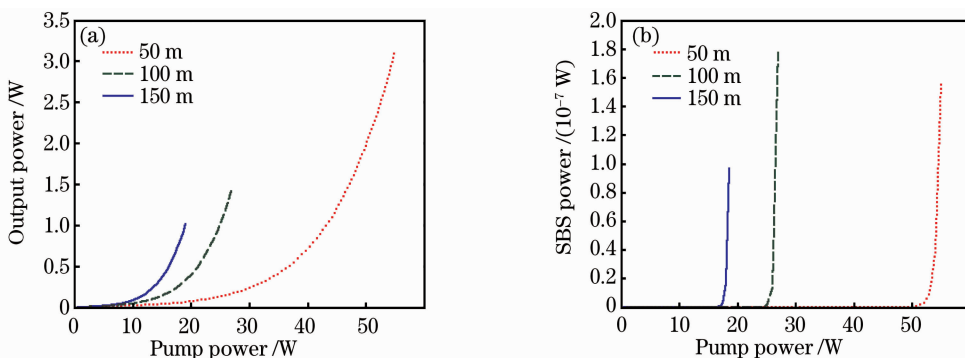


图 2 不同长度下,输出功率(a)和 SBS 功率(b)与抽运功率的关系

Fig. 2 Output power (a) and SBS power (b) as a function of pump power with different fiber lengths

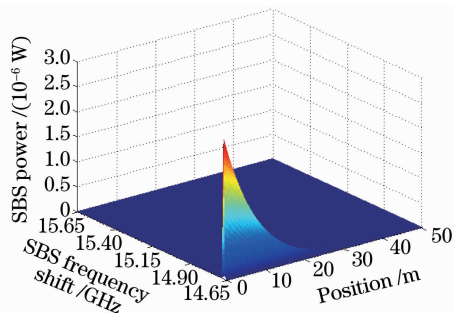


图 3 光纤内 SBS 的频谱分布

Fig. 3 SBS frequency distribution inside the fiber

若能采取一定的措施,使得光纤不同位置处的增益谱中心位置不同,则在 SBS 频谱范围内,对于不同的频率,只能有一部分光纤对其增益有贡献,进而实质上减小了光纤的有效长度,达到抑制 SBS 的目的。SBS 过程是入射光波、散射光波和布里渊声

度取不同值时得到的输出信号光功率以及 SBS 功率与抽运光功率的关系。

从图 2 中可以看出,对于每种光纤长度来说,由于 SBS 的限制,抽运功率都存在一个阈值,在阈值之前,输出光功率随着抽运功率的增加而增加;当超过阈值后,SBS 光会急剧增大,高的 SBS 功率使得输入的 1178 nm 种子信号光向 SBS 光耦合而趋于消失,最终得不到 1178 nm 的放大光;抽运功率的阈值随着光纤长度的增加而降低。

在拉曼光纤放大器中,SBS 的阈值通常会很低,这是因为在光纤的不同位置,SBS 的增益谱相同,使得后向传输的布里渊散射光总能得到高效的放大。图 3 所示即为光纤长度为 50 m,种子信号功率为 10 mW,抽运功率为 55 W 时,光纤内的频谱分布。可以看出,在光纤的不同位置处,SBS 只对同一频移处的散射光有贡献,导致散射光功率急剧增大,很容易达到其阈值。

场相互作用的过程,若能改变声场的频率,就能破坏三者之间的共振关系,从而达到抑制 SBS 的目的。通过施加温度场或者应力场能够改变光纤不同位置处的声速,进而改变(4)式中的中心频率 ν_0 ^[9-12]。

3.1 温度场的影响

在光纤内存在温度梯度时,增益谱的中心频率变为 $\nu'_0 = \nu_0 + c_T \Delta T(z)$,式中 c_T 为温度系数,对于硅光纤来说, $c_T = 2.25 \text{ MHz/}^\circ\text{C}$ 。

这里以光纤长度为 50 m,抽运功率为 55 W 为例,说明温度场的抑制作用。在光纤上施加如图 4(a)所示的温度分布,光纤内 SBS 功率的频谱分布如图 4(b)所示。可以看出,与没有温度控制时的图 3 相比,SBS 被分散到两个频率范围。采取温度控制后,抽运功率的阈值由 55 W 提高到 62 W,而输出功率由 3.1 W 提高到 5.4 W,RFA 的性能将显

著提高,如图 4(c)所示。

要进一步提高抽运功率的阈值,就必须采取更细致的温度控制方式,如图 5(a)所示的光纤内温度分布,将使抽运功率阈值提高到 72 W,而输出功率

超过 10 W,如图 5(c)所示。而此时的频谱分布如图 5(b)所示,可以看出,SBS 功率较为均匀地分布在 10 个频率范围,从而有效地抑制了 SBS。

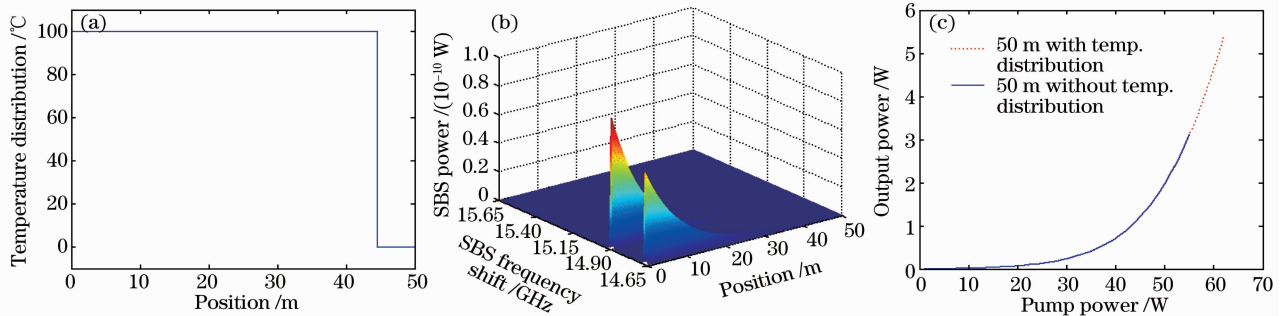


图 4 (a) 光纤内的温度分布,(b) 光纤内的 SBS 频谱分布和(c) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 4 (a) Temperature distribution inside the fiber, (b) SBS frequency distribution inside the fiber and (c) improvement of the performance of RFA

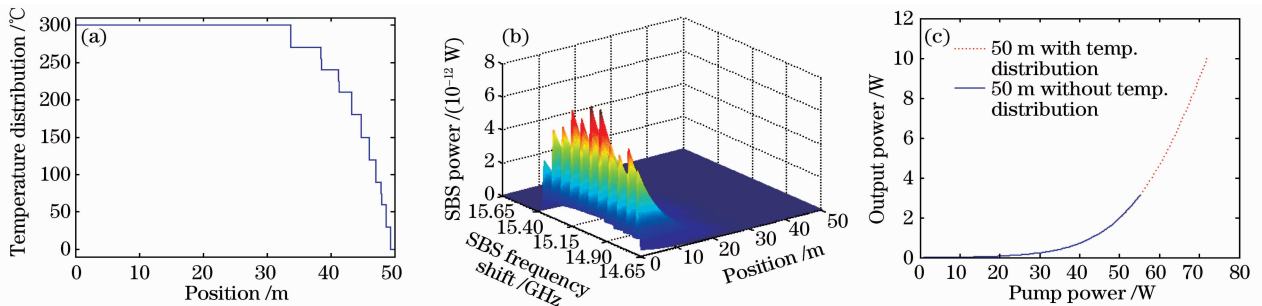


图 5 (a) 光纤内的更精细温度分布,(b) 光纤内的 SBS 频谱分布和(c) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 5 (a) More elaborate temperature distribution inside the fiber, (b) SBS frequency distribution inside the fiber and (c) improvement of the performance of RFA

3.2 应力场的影响

当光纤内存在应力时,介质密度将发生改变,进而影响声速,使得 SBS 增益谱的中心频率变为: $\nu'_0 = \nu_0 + c_e \Delta \epsilon(z)$ 。式中 c_e 为应力系数,对于硅光纤来说, $c_e = 0.7 \text{ GHz}/\%$ ($\epsilon = \Delta L/L$)。要特别注意的是,对于张力, c_e 为正;对于压力, c_e 为负^[9]。同样以光纤长度为 50 m,抽运功率为 55 W 为例,在光纤上

施加如图 6(a)所示的应力分布,得到光纤内 SBS 功率的频谱分布,如图 6(b)所示。可以看出,与温度控制时的情况一样,SBS 也被分散到两个频率范围,RFA 的性能提高幅度如图 6(c)所示,也与采用温度控制所得到的结果基本相同。不管是采用温度场还是应力场,最终目的都是将原本在同一位置的中心频率分开,在这一点上温度和应力的作用是一样的。

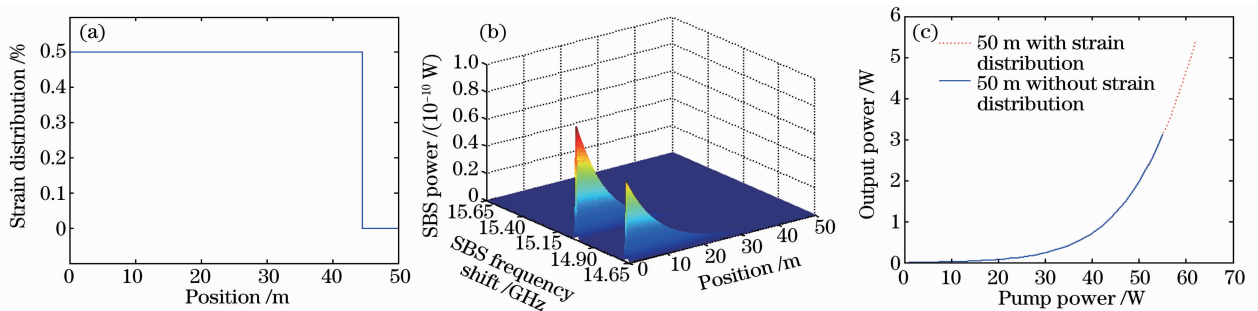


图 6 (a) 光纤内的应力分布,(b) 光纤内的 SBS 频谱分布和(c) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 6 (a) Strain distribution inside the fiber, (b) SBS frequency distribution inside the fiber and (c) improvement of the performance of RFA

与使用温度场相同,在光纤内施加如图 7(a)所示的应力分布,同样将抽运功率阈值提高到 72 W,

则输出功率也超过了 10 W,如图 7(b)所示,此时的频谱分布也与图 5(b)类似。

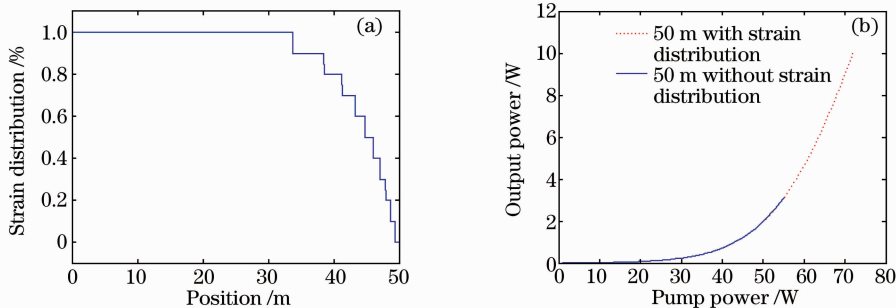


图 7 (a) 光纤内的更精细应力分布, (b) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 7 (a) More elaborate strain distribution inside the fiber, (b) improvement of the performance of RFA

3.3 综合使用温度和应力

虽然使用温度场和应力场均能很好地抑制 SBS,提升 RFA 的性能,但从图 5(a)和图 7(a)可以看出,条件要求非常苛刻。不管是 300 °C 的温度还是 1% 的拉力,都是比较难实现的,再加上在同一光纤上进行分段温控或施加应力,就更加难以实施,使得这种方法在实际操作中失去意义。可以看出,温度和应力对 SBS 增益谱的影响,其机理大致相同,如果能够将两者结合起来,就能减轻单方面的压力,使得对 SBS 的抑制真正可行。

而此时不管是 150 °C 的温度,还是 0.5% 的张力,实现起来都相对比较容易。此时的频谱分布如图 8(c)所示。

需要说明的是,上面介绍的抑制措施均是在光纤上进行分段操作,使得 SBS 的中心频率分别转移到一些相互分离的频率处。如果施加线性温度和应力控制,使得 SBS 功率在一定频率范围内均匀分布,如图 9(a)所示,此时的抑制效果基本上达到最佳。然而对比图 9(b)和图 8(d),阈值抽运功率只是由 72 W 提升至 72.5 W,而输出功率也只是提高了 0.3 W 左右,提升的幅度并不大。若从实际操作考虑,线性的温度和应力很难施加,因此,图 8 所示的结果已经是实际可得到的最佳抑制效果。

在光纤上分别按照图 8(a)和(b)所示施加温度和应力控制,同样可以使得 RFA 的抽运阈值功率提高到 72 W,输出功率超过 10 W,如图 8(d)所示,

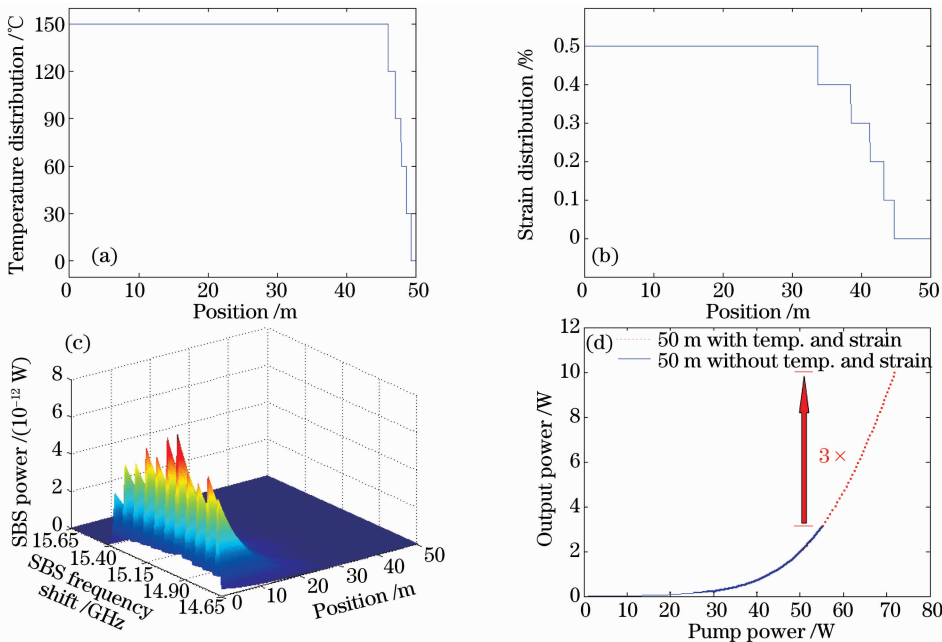


图 8 (a) 光纤内的温度分布, (b) 光纤内的应力分布, (c) 光纤内的 SBS 频谱分布和 (d) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 8 (a) Temperature distribution inside the fiber, (b) strain distribution inside the fiber, (c) SBS frequency distribution inside the fiber and (d) improvement of the performance of RFA

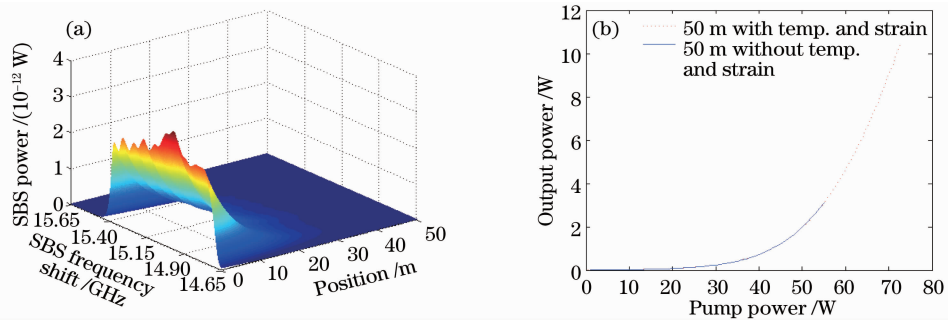


图 9 (a) 光纤内的 SBS 频谱分布和(b) 拉曼光纤放大器性能的改善

Fig. 9 (a) SBS frequency distribution inside the fiber and (b) improvement of the performance of RFA

4 与实验报道相对比

2009 年冯衍等^[2]报道了他们的最新实验结果, 在 1120 nm 抽运光约 140 W 时, 得到 39 W 的 1178 nm 输出光, 由于并没有说明实验中的几个关键数据, 按照文献^[13]所说的优化 RFA 的方法, 并假设拉曼增益系数 $g_R = 1.36 \times 10^{-13}$ m/W, 输入的 1178 nm 信号光功率为 1 W, 光纤长度为 7.5 m, 按比例施加图 8 中所示的温度和应力分布, 就可以得到如图 10 所示结果, 可以看出, 利用假设的参数得到的模拟计算可以和实验报道符合得很好, 这间接说明了本文理论分析方法及模拟过程的正确可信。

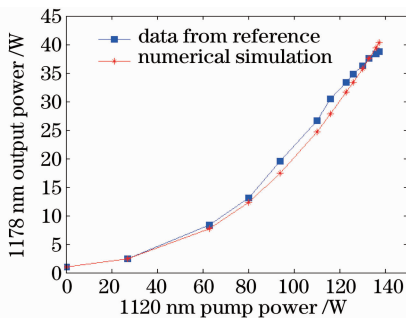


图 10 对实验报道的数值模拟

Fig. 10 Comparison with experimental datas

5 结 论

综合 SRS 和 SBS 过程, 提出 SBS 限制下的 RFA 中的强度耦合方程, 通过数值模拟分析 SBS 阈值较低的原因; 通过在耦合方程中加入温度场和应力场的影响, 讨论温度场和应力场对 SBS 阈值的影响。分析表明, 虽然单独依靠温度场或者应力场都能很好地抑制 SBS, 提升放大器的性能, 但要求都比较苛刻, 很难真正实现。综合分段施加 150 °C 的温度梯度和 0.5% 的张力, 将抽运功率的阈值从 55 W 提高到 72 W, RFA 的输出功率提高了 3 倍。数值模拟结果为从实验上抑制高功率单频拉曼光纤放大器中的 SBS 提供了一定的指导。

参 考 文 献

- 1 Yan Feng, L. R. Taylor, D. B. Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (26): 23678~23683
- 2 Yan Feng, L. R. Taylor, D. B. Calia *et al.*. 39 W narrow linewidth Raman fiber amplifier with frequency doubling to 26.5 W at 589 nm [C]. *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest*, 2009, PDPA4
- 3 Zhang Minming, 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
- 4 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*, 2009, **29**(1): 244~248
- 5 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
- 6 G. 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. 12
G. P. 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. 12
- 7 N. A. Brillouin. Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier [J]. *J. Opt. Soc. Am. B.*, 2002, **19** (11): 2551~2557
- 8 A. Liu. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15201~15209
- 9 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**:68730O
- 10 Y. Jeong, J. Nilsson, J. K. Sahu *et al.*. Power scaling of single-frequency ytterbium-doped fiber master-oscillator power-amplifier sources up to 500 W [J]. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 11 M. Hildebrandt, S. Büsche, P. Weßels *et al.*. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(20): 15970~15979
- 12 Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun *et al.*. Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1630~1635
王春灿, 张帆, 陆玉春等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1630~1635
- 13 L. R. Taylor, Yan Feng. Narrow band fiber Raman optical amplifier; European, EP2081264A1[P]. 2009-07-22