

应力分布对单频光纤拉曼放大器中受激布里渊散射的影响

许将明 冷进勇 吴武明 周 朴 侯 静

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 高功率单频光纤拉曼放大器(SF-FRA)的输出功率往往会由于受激布里渊散射(SBS)的出现而受到限制。从 SF-FRA 中 SBS 因素限制下的强度耦合方程组出发,讨论了 SBS 因素对不同拉曼增益光纤长度的 SF-FRA 输出功率的限制作用,比较了不同的应力场施加方案对 SBS 抑制效果的影响,提出了优化后的应力分布施加方案。数值模拟结果表明,在拉曼增益光纤中引入应力梯度分布,可使得 SBS 的增益谱变宽,增益系数降低,进而实现对 SBS 的抑制;在光纤对应力的承受范围内,所施加的应力的位置、份数、每段光纤上的应力大小、应力施加均匀性等对放大器性能都有较大影响;采取优化后的应力施加方案,可将 SF-FRA 的输出功率提高近一倍。数值模拟结果为实验研究高功率 SF-FRA 中 SBS 的抑制提供了理论指导。

关键词 光纤光学;光纤拉曼放大器;单频;受激布里渊散射;抑制;应力分布

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100207

Influence of Strain Distribution on Stimulated Brillouin Scattering in Single-Frequency Fiber Raman Amplifiers

Xu Jiangming Leng Jinyong Wu Wuming Zhou Pu Hou Jing

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

Abstract High power operation of single-frequency Raman fiber amplifier (SF-FRA) is usually limited by the generating of stimulated Brillouin scattering (SBS). Based on the intensity equations combining SBS and stimulated Raman scattering (SRS), the limitation action to the output power of SF-FRAs for SBS is studied, the influence of different strain distributions to SBS inhibition is compared and an optimal solution of strain distribution is proposed. The simulation results indicate that strain gradients along Raman gain fibers can broaden the SBS gain profile and thereby suppress SBS. The location, stage number, value and length have the optima in the fibers' receivable range of strain. The threshold of output power of SF-FRA can be increased about 100% under the optimum condition.

Key words fiber optics; fiber Raman amplifier; single-frequency; stimulated Brillouin scattering; suppression; strain distribution

OCIS codes 060.2320; 140.4480; 190.5650

1 引 言

与传统放大器中通过掺杂粒子的受激辐射获得

增益不同,拉曼放大器的物理机制是利用受激拉曼散射(SRS)效应获得增益。而光纤具有模场面积小

收稿日期: 2010-12-28; **收到修改稿日期**: 2011-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(61077076, 61007037, 10904173, 11004247)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-142)资助课题。

作者简介: 许将明(1988—),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器与放大器等方面的研究。

E-mail: xu_jiang_ming@yahoo.com.cn

导师简介: 侯 静(1975—),女,博士,研究员,主要从事光纤激光器、光子晶体光纤和光纤激光相干合成等方面的研究。

E-mail: houjing25@sina.com(通信联系人)

和作用距离长等特点,特别适合于作为 SRS 的增益介质。因此在一些特殊波段,例如 1178 nm,光纤拉曼放大器(FRA)是很理想的光源^[1]。FRA 由于具有增益谱宽、增益谱区灵活、温度稳定性好、放大的自发辐射(ASE)低、与各类光纤系统兼容良好等优点^[2],得到了广泛应用,特别是通信^[3]和超连续谱产生^[4]等领域。而一些特殊领域,如引力波探测、非线性频率转换、激光雷达、谱合成及相干合成等,要求光源的线宽较窄,需要搭建单频光纤拉曼放大器(SF-FRA)系统。在 SF-FRA 中,由于传输功率高、纤芯截面小、同时相互作用距离长,导致各种非线性效应很容易产生,包括受激布里渊散射(SBS)、自相位调制(SPM)和交叉相位调制(XPM)等。一般情况下,SBS 的阈值要低很多,因此在高功率 SF-FRA 中首先要考虑 SBS 的抑制。

目前,对于 SF-FRA 中 SBS 抑制的研究主要集中在实验方面,如冯衍等^[1,5]通过不断改进 SBS 抑制措施,在单路 SF-FRA 中得到了 39 W 的 1178nm 激光输出,并通过 3 路相干合束的方法得到了 60 W 的 1178 nm 激光输出。理论方面,冷进勇等^[6]对 SF-FRA 中 SBS 抑制方法进行了一些数值模拟研究。单频光纤放大器中抑制 SBS 的方法有很多种^[7~9]:1)使用大模场(LMA)光纤;2)设计特殊光

纤,对光纤中的声场进行有效管理;3)对种子源进行相位调制;4)采用多种子进行放大;5)使用温度场和应力场。其中方法 1)使得拉曼阈值大大提高,对抽运源功率的要求较高;方法 2)引入了掺杂粒子吸收损耗,产生噪声干扰,且掺杂粒子浓度分布不容易严格控制,技术要求较高;方法 3)输出光线宽较宽,同时对 SBS 阈值的提高效果有限;方法 4)会引入四波混频(FWM)效应;方法 5)中实施精细的温度控制较为困难。因此,通过施加应力场的方法来实现对 SF-FRA 中 SBS 的抑制是较理想的技术途径。在拉曼增益光纤上施加一定的应力梯度,可以展宽光纤内各部分的 SBS 增益谱,降低各频率散射光的增益系数,使 SBS 光得不到有效放大。本文从 SF-FRA 中考虑 SBS 因素的强度耦合方程组出发,讨论了 SBS 因素对 SF-FRA 输出功率的限制,研究了高功率 SF-FRA 中不同的应力分布对 SBS 抑制效果的影响。

2 理论模型

拉曼放大的数学模型早在 20 世纪 80 年代便已出现并在近年得到很大发展^[10,11]。图 1 所示为主振荡功率放大器(MOPA)结构的 SF-FRA 结构示意图。

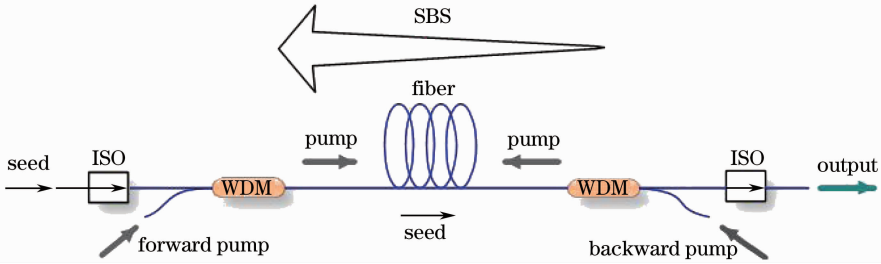


图 1 SF-FRA 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SF-FRA

文献[6]提出了 SF-FRA 中考虑 SBS 因素的强度耦合方程组,并对该模型的正确性进行了验证。文献[12]基于该理论模型对 SF-FRA 中抽运方式、光纤长度、放大器结构等因素对 SF-FRA 性能的影响进行了数值模拟。SF-FRA 中考虑 SBS 因素的强度耦合方程组为

$$\frac{dP_{SR}^+}{dz} = \frac{g_R P_P P_{SR}^+}{A_{eff}} - \frac{P_{SR}^+ \sum_i g_{Bi} P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_{SR} P_{SR}^+, \quad (1)$$

$$\frac{dP_{SBi}^-}{dz} = - \left(\frac{g_R P_P P_{SBi}^-}{A_{eff}} + \frac{g_{Bi} P_{SR}^+ P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_{SB} P_{SBi}^- \right), \quad (2)$$

$$\frac{dP_P^+}{dz} = - \frac{v_P}{v_{SR}} \frac{g_R P_P^+ P_{SR}^+}{A_{eff}} - \frac{v_P}{v_{SB}} \frac{g_R P_P^+ \sum_i P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_P P_P^+, \quad (3)$$

$$\frac{dP_P^-}{dz} = - \left[- \frac{v_P}{v_{SR}} \frac{g_R P_P^- P_{SR}^+}{A_{eff}} - \frac{v_P}{v_{SB}} \frac{g_R P_P^- \sum_i P_{SBi}^-}{A_{eff}} - \alpha_P P_P^- \right], \quad (4)$$

式中上标“+”和“-”分别表示前向传播和后向传播,下标“SR”、“SB”和“P”分别代表单频信号光、单频信号光产生的 SBS 光和抽运光。如 v_P 、 v_{SR} 和 v_{SB}

分别代表抽运光、单频信号光和单频信号光的 SBS 光的频率。 g 表示增益系数, P 表示功率, α 表示散射损耗。 A_{eff} 为纤芯的有效面积。 P_P 为 P_P^+ 与 P_P^- 之和。值得注意的是,在该方程组中,有 4 个假设: 1) 由于布里渊频移较小,波长变化小于 0.1 nm,故假设信号光与信号光的 SBS 光的拉曼增益系数相等; 2) 前、后向拉曼散射的增益系数相同; 3) 与输入的种子信号光功率相比,前、后向上的自发拉曼散射均可以忽略; 4) 离散的布里渊散射光之间在频率、拉曼增益系数和后向瑞利散射损耗上的差别可以忽略。

自然状态下,SBS 的增益系数可以用一个洛伦兹函数表示^[13]为

$$g_B(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B)^2}{4(\nu - \nu_0)^2 + (\Delta\nu_B)^2}, \quad (5)$$

式中 g_0 为峰值增益, $\Delta\nu_B$ 为布里渊散射增益线宽。 $\nu_0 = 2n\nu_a/\lambda_{\text{SR}}$ 为相对于信号光 ν_{SR} 的布里渊频移量,即布里渊增益谱中心频率。 n 为纤芯折射率, ν_a 为声速。

(1)~(4)式是含边界条件的微分方程组,边界条件可以表示为

$$P_{\text{SR}}^+(z=0) = P_{\text{S}_0}; P_{\text{P}}^+(z=0) = P_{\text{P}_0}^+;$$

$$P_{\text{P}}^-(z=L) = P_{\text{P}_0}^-; P_{\text{SBr}}^-(z=L) = P_{\text{N}}, \quad (6)$$

式中 $P_{\text{N}} = h\nu_0\Delta\nu_B$ ^[14], 对应于一个布里渊光子的能量。可以使用修正的弛豫振荡法求解带边值条件的微分方程组^[15]。

3 数值计算与分析

由(1)式可以看出,如果后向的 SBS 光功率足够强,将大量消耗信号光功率,影响信号光的放大效果,甚至使得放大器无激光输出。图 2 所示为拉曼增益光纤长度取不同值时 SF-FRA 输出的信号光功率及 SBS 光功率与抽运功率的关系。由于一般商业途径可得到的分布反馈(DFB)式 1178 nm 激光二极管的输出功率在 10 mW 左右,所以计算中种子信号光功率取 10 mW,线宽为 4 MHz^[16]。抽运光波长为 1120 nm,目前报道的最高功率水平为 150 W^[17]。为了获得更高的抽运功率上限,同时减少抽运光噪声对信号光的影响,一般采用反向抽运的方式^[12]。计算中用到的参数值如表 1 所示。

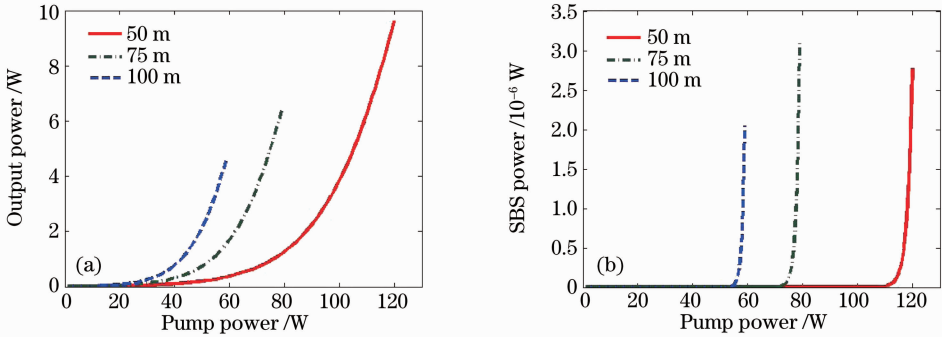


图 2 不同光纤长度对 SF-FRA 性能的影响。(a)输出信号光功率,(b)SBS 光功率

Fig. 2 Influence of different lengths on the performance of SF-FRA. (a) output power of signal light, (b)SBS power

表 1 SF-FRA 计算参数值

Table 1 Parameters of SF-FRA used in the simulation

Parameters	Numerical value
λ_s/nm	1178
α_s/m^{-1}	0.0026
P_s/mW	10
$\Delta\nu_s/\text{MHz}$	4
λ_p/nm	1120
α_p/m^{-1}	0.003
$g_R/(\text{m/W})$	5×10^{-14}
$g_B/(\text{m/W})$	1×10^{-11}
$\Delta\nu_B/\text{MHz}$	58
$A_{\text{eff}}/\text{m}^2$	3.63×10^{-11}
$\nu_a/(\text{m/s})$	5960
n	1.45

从图 2 可以看出,由于 SBS 因素的限制,每种长度的拉曼增益光纤都对应着一个抽运功率上限,即 SF-FRA 中受 SBS 因素限制的抽运功率阈值。在阈值之前,输出光功率随抽运功率的增加而增加。当超过抽运功率阈值后,SBS 光功率会急剧增长,同时 SBS 光的布里渊增益过程会消耗 1178 nm 种子信号光,随着抽运功率的增加,甚至使 SF-FRA 无 1178 nm 信号光输出。拉曼增益光纤长度越长,抽运功率阈值越低,所能得到的最大输出信号光功率也越低。

在 SF-FRA 中,由于在整个拉曼增益光纤内 SBS 增益谱相同,后向传输的 SBS 光总能得到高效的放大,因此 SBS 的阈值通常较低。当光纤内存在

应力分布时,介质密度将发生变化,进而影响声速,使得光纤不同位置处的增益谱中心频率不同。对于不同频率的SBS光,只能有一部分光纤对其产生增益,即光纤的有效长度得到了减小。SBS增益谱中心频率与光纤内分布的应力大小有如下关系: $\nu_0' = \nu_0 + C_s \epsilon(z)$,其中 C_s 为应力系数。对于硅光纤来说, $C_s = 0.7 \text{ GHz}/\%$ ($\epsilon = \Delta L/L$)。要特别注意的是,对于张力, C_s 为正;对于压力, C_s 为负^[18]。

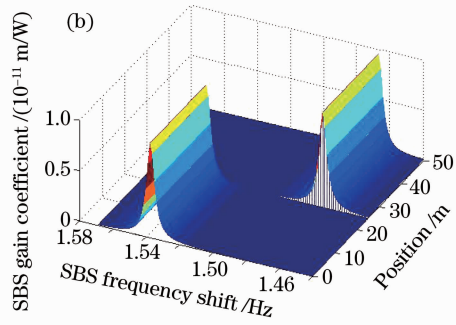
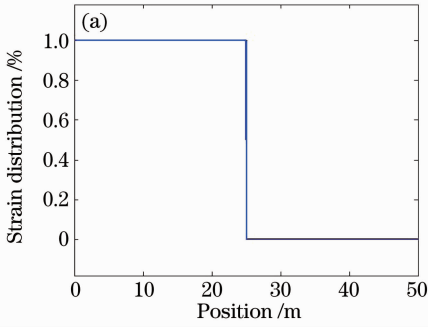


图 3 (a) 光纤内的应力分布, (b) 光纤内的 SBS 增益谱

Fig. 3 (a) Strain distribution inside the fiber, (b) SBS gain profile inside the fiber

3.1 应力施加位置对 SBS 的影响

由(2)式可以看出, SF-FRA 中 SBS 光的生长主要是单频 1178 nm 信号光的布里渊放大效应和 1120 nm 抽运光的拉曼放大效应提供增益。由于不同位置处的 1178 nm 信号光功率与 1120 nm 抽运

以光纤长度 50 m 为例来说明应力分布对 SF-FRA 中 SBS 的影响。假设光纤对应变的最大承受能力为 1%。当不施加应力时, 50 m 拉曼增益光纤所对应的抽运功率阈值为 120 W, 输出 1178 nm 信号光功率为 9.6 W。如在光纤的始端至 25 m 处施加图 3(a)所示的应力分布, 则光纤内的 SBS 增益谱被分为不同的两段, 如图 3(b)所示。施加应力后, 抽运功率阈值提高到 122 W, 输出信号光功率为 10.4 W。

光功率不同, 对 SBS 光的放大效果也不相同。因此, 应力分布对 SBS 的抑制效果与施加位置有关。图 4(a)是不同位置处施加应力时, SF-FRA 所能输出的最大信号光功率。由图 4(b)可知, 应力施加位置越靠近光纤信号光输出端, 1178 nm 信号光功率

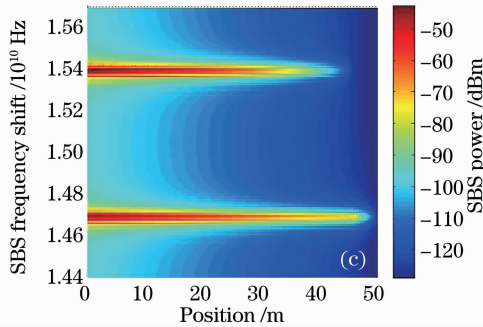
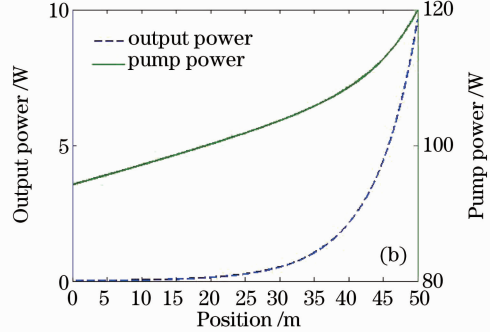
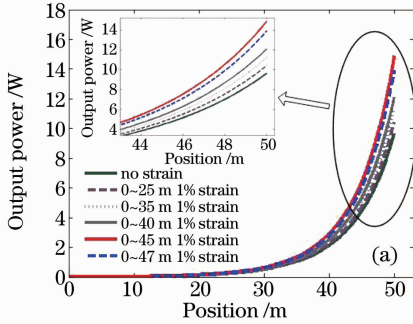


图 4 (a) 应力施加位置对 SF-FRA 性能的影响, (b) 光纤中 1178 nm 信号光及 1120 nm 抽运光的功率分布, (c) SBS 光功率的频谱分布

Fig. 4 (a) Influence of the location of 1% strain on the performance of SF-FRA, (b) power distributions of 1178 nm signal light and 1120 nm pump light, (c) frequency distribution of SBS power

与 1120 nm 抽运光功率越大,对 SBS 光的布里渊放大与拉曼放大效果越明显。因此,一定范围内,应力施加位置越靠近光纤信号光输出端,所能得到的 1178 nm 信号光功率越大,即对 SBS 的抑制效果越好。由图 4(a)可知,应力施加位置存在最优值,当超过或短于此位置,抑制效果都会变差。图 4(c)显示的是在光纤上从 1178 nm 信号光输入端至 46 m 处施加 1% 的应变时,光纤内 SBS 光功率的频谱分布。此时抽运功率阈值达到最大,为 133 W,对应的 1178 nm 信号光输出功率为 15.38 W。

3.2 应力施加份数对 SBS 的影响

图 5(a)比较了不施加应力,将拉曼增益光纤均匀地分为 2 段、4 段、10 段施加应力及在光纤上施加

线性应力对 SBS 抑制效果的影响。不施加应力及将光纤均匀划分为 2 段、4 段、10 段时抽运功率阈值分别为 120,122,125 和 131 W;如果在光纤上施加线性应力,抽运功率阈值可以提高到 135 W。计算结果表明,对拉曼增益光纤的划分段数越多,抽运功率阈值越高,所能得到的 1178 nm 信号光功率越高,即对 SBS 的抑制效果越好,且当在光纤上施加线性应力时,对 SBS 的抑制效果最好。从实际操作出发,线性应力较难施加,因此可以考虑将光纤分为 10 段施加应力。将光纤均匀分为 10 段施加应力时,可以将 SF-FRA 的信号光最大输出功率提高 50%,图 5(b)显示的是此时光纤内的应力分布。

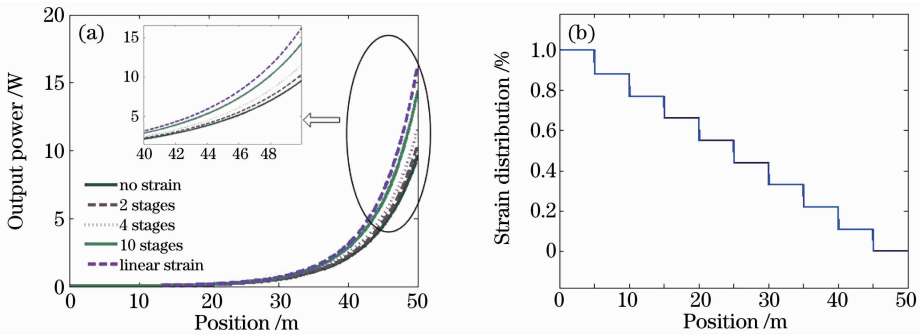


图 5 (a)应力施加份数对 SF-FRA 性能的影响,(b)光纤内的应力分布

Fig. 5 (a) Influence of the number of strain on the performance of SF-FRA, (b) strain distribution inside the fiber

3.3 各段应力大小不同对 SBS 的影响

由于拉曼增益光纤内不同位置处的 1178 nm 信号光功率与 1120 nm 抽运光功率不同,对 SBS 光的放大效果不同,因此各段光纤所施加的应力大小会影响 SF-FRA 中 SBS 增益。图 6(a1)、(a2)和 (a3)分别对应应力施加方案 A,B,C,比较了将光纤均匀划分为 10 段施加应力时各段应力大小不同对 SBS 的影响,图 6(b1)、(b2)、(b3)比较了 3 种应力施加方案所对应的光纤内不同位置处 SBS 增益谱。方案 A 的抽运功率阈值为 131 W,方案 B 和 C 的抽运功率阈值为 132 W,方案 A 的抽运功率阈值低于方案 B 和 C,1178 nm 信号光的最大输出功率也低于方案 B 和 C。由图 6(c)可知,抽运功率相同时,方案 C 对应的 SBS 光功率低于方案 A 和 B。综合比较可以发现,应力施加方案 C 对 SF-FRA 的性能改善最佳。这是由于在光纤信号光输入端 1120 nm 抽运光功率和 1178 nm 信号光功率较高,对 SBS 的增益作用更明显。而施加方案 C 所示的应力分布时,靠近信号光输出端的相邻光纤段 SBS 增益谱中心频率被分离到较远处。这使得在 SBS 光增益较

为明显的光纤尾端,各段光纤的 SBS 增益谱重叠较小,对于某一频率的 SBS 光,对其产生增益作用的光纤长度较短,即该频率 SBS 光所对应的光纤有效长度减小。所以应力施加方案 C 对 SBS 的抑制效果较好。

3.4 非均匀施加应力对 SBS 的影响

图 7(a)显示的是均匀施加应力与非均匀施加应力的两种方案的比较。其中方案 D 将光纤均匀划分为 10 段,方案 E 将光纤非均匀地划分为 10 段,且在越靠近 1178 nm 信号光输出端的位置每段光纤的长度越短,即应力施加越精细。两种方案所对应的光纤内 SBS 光功率的频谱分布分别如图 7(b)和(c)所示,对比可以发现,施加方案 D 所示应力时,在信号光输入端的 SBS 光功率的频谱分布较为集中。施加方案 D 和 E 所示应力分布时 SF-FRA 的抽运功率阈值分别为 132 W 和 139 W,对应的 1178 nm 信号光输出功率分别为 14.9 W 和 18.5 W。由此可见在光纤尾端施加较精细的应力分布,可以更好地实现对 SBS 的抑制。这是由于光纤的不同位置处 SBS 光的增益不同,其中 1178 nm 信号光输

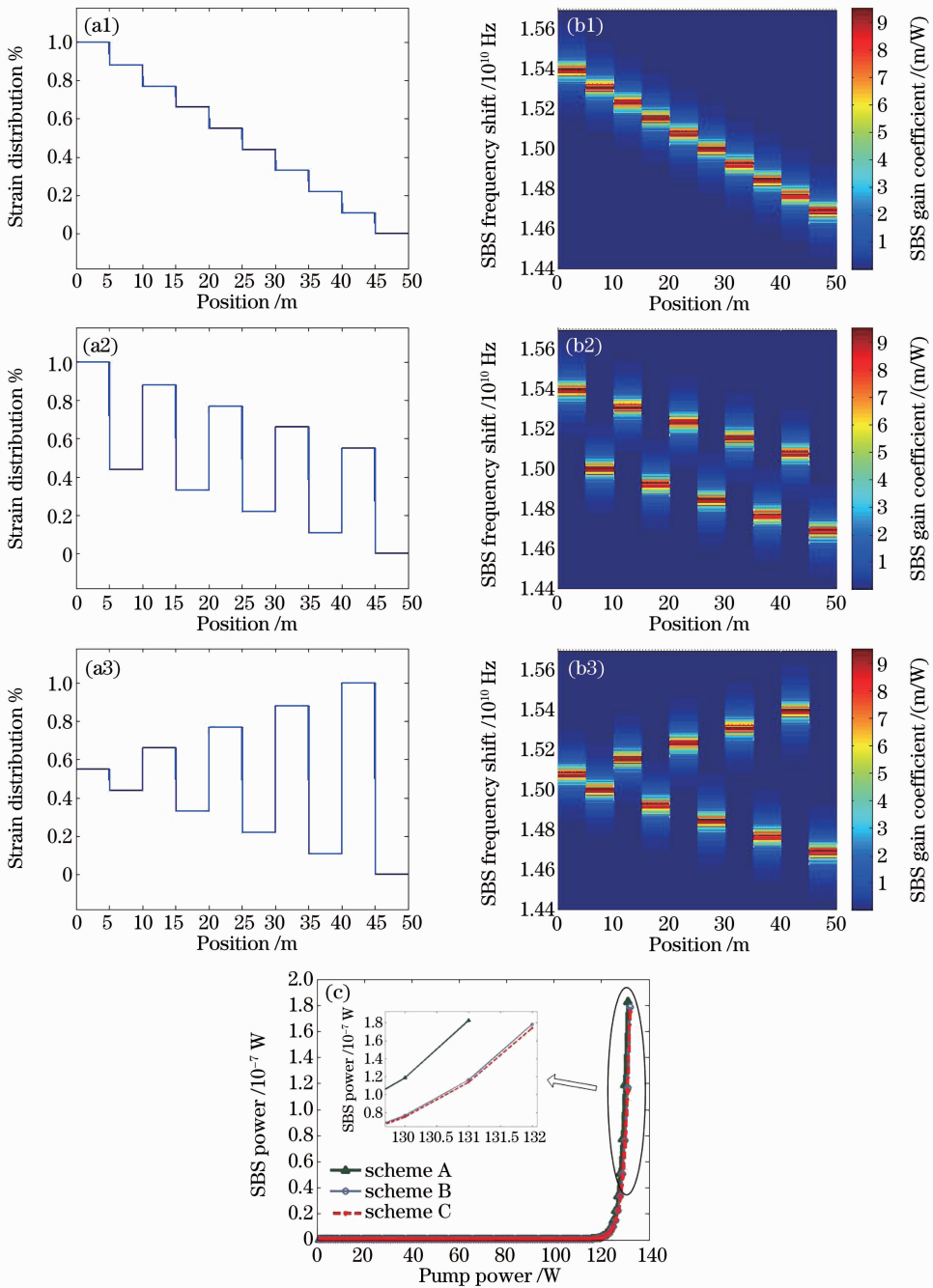


图 6 各段应力大小不同对 SBS 的影响。(a1) (a2) (a3) 对应 A, B, C 3 种应力分布方案;(b1) (b2) (b3) 分别为 3 种方案下光纤内 SBS 增益谱,(c) 为 3 种应力施加方案的 SBS 功率比较

Fig. 6 Influence of the strain magnitude of every stage on the SBS power. (a1) (a2) (a3) Strain distributions; (b1) (b2) (b3) SBS gain profiles inside the fiber, (c) confrontation of SBS power of three schemes

出端附近光纤上 SBS 光增益较强,如在该区域上施加较为精细的应力,可以使得各应力对应频率的 SBS 光只在较短的光纤上获得增益,有利于将 SBS 光的功率分离到更宽的频谱上,使得每个频率上 SBS 光的功率都较小,从而实现对 SBS 的抑制。

3.5 优化应力施加方案

根据模拟结论,将 50 m 长的拉曼增益光纤划

分为 10 段,进一步优化每段光纤长度的非均匀性,模拟应力分布对 SF-FRA 性能的改善。图 8(a) 显示的是优化后的应力分布。从图 8(b) 可以看出,施加优化应力方案后,SBS 增益谱各中心频率处的 SBS 光功率在信号光输入端的分布较为一致,这说明所施加的应力分布较好地实现了对 SF-FRA 施加中 SBS 的抑制。计算结果表明,优化应力施加方

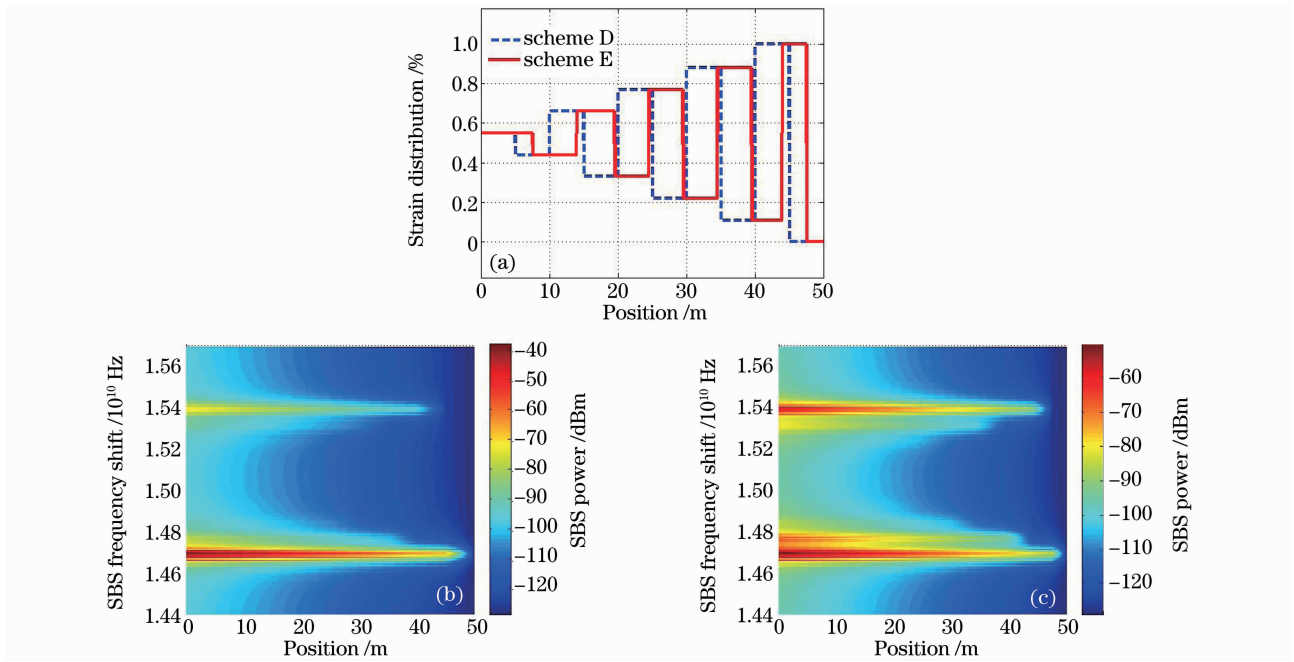


图 7 (a) D, E 两方案应力分布比较; (b), (c) 光纤内 SBS 光功率的频谱分布

Fig. 7 (a) Confrontation of two strain distributions schemes; (b), (c) frequency distribution of SBS power inside the fiber

案可将 SF-FRA 的抽运阈值功率由 120 W 提高到 140 W, 对应的 1178 nm 信号光输出功率可由 9.6 W 提高到 19.1 W, 1178 nm 信号光输出功率提

高了 99%。因此, 采取合理的应力分布施加方案, 可以明显提升 SF-FRA 的性能。

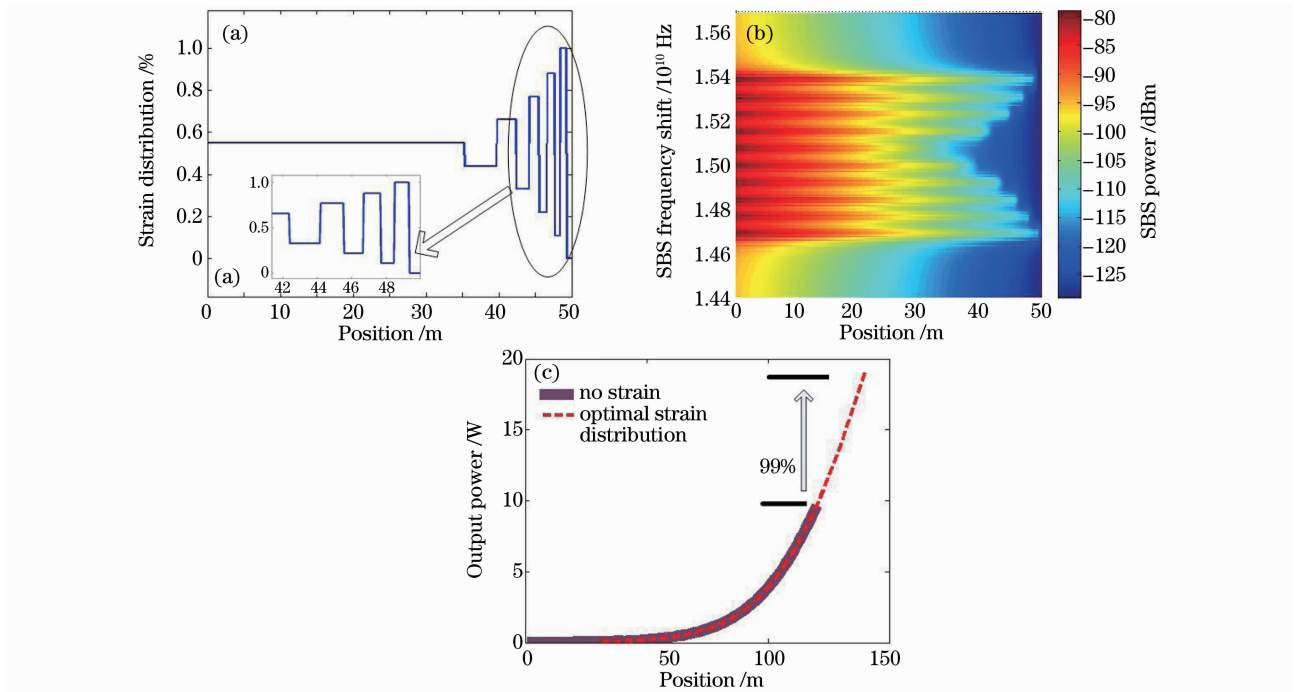


图 8 (a) 优化后的应力分布; (b) 光纤内 SBS 光功率频谱分布; (c) SF-FRA 性能的提升

Fig. 8 (a) Strain distribution of optimal scheme; (b) frequency distribution of SBS power inside the fiber; (c) improvement of the performance of SF-FRA

4 结 论

从 SF-FRA 中 SBS 因素限制下的强度耦合方程组出发,研究了光纤内应力分布对 SBS 的影响。由于光纤内不同位置处信号光功率和抽运光功率不同,对 SBS 光的布里渊增益和拉曼增益效果不同,因此应力的施加位置、份数、各段光纤上的应力大小及光纤不同位置处应力施加的精细程度都存在最佳值。采取优化后的应力施加方案,抽运功率阈值大幅提高,且 SF-FRA 的信号光输出功率可提高近一倍。由于利用温度分布抑制 SBS 与利用应力分布抑制 SBS 的实质都是展宽光纤中的 SBS 增益谱,因此以上结论也适用于研究温度分布对 SBS 的影响。本文的数值模拟结果为实验中采取合理的应力施加方案来抑制 SBS、提升 SF-FRA 性能提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domencio Bonaccini 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 (CD) (Optical Society of America, 2009), paper PDPA4
- 2 Hiroji Masuda. Recent progress on optical fiber amplifiers and their applications[C]. *SPIE*, 2006, **6389**: 638902
- 3 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
- 4 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
- 5 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domencio Bonaccini Calia. 50 W CW visible laser source at 589 nm obtained via frequency doubling of three coherently combined narrow-band Raman fibre amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(8): 8540~8555
- 6 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
- 7 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]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, 2007, **13**(3): 546~551
- 8 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
- 9 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
- 10 M. L. Dakss, P. Melman. Amplified spontaneous Raman scattering and gain in fiber Raman amplifiers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**(4): 806~813
- 11 S. R. Chinn. Analysis of counter-pumped small-signal fibre Raman amplifiers[J]. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7): 607~608
- 12 Jinyong Leng, Shengping Chen, Wuming Wu *et al.*. Analysis and simulation of single-frequency Raman fiber amplifiers[J]. *Opt. Commun.*, 2011, **284**(12): 2997~3003
- 13 R. W. Boyd. *Nonlinear Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1992, chap. 8
- 14 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. 12
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
- 15 A. Liu. Stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers with delivery fibers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(17): 15201~15209
- 16 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domencio Bonaccini Calia. Multiwatts narrow linewidth fiber Raman amplifiers [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(15): 10927~10932
- 17 Yan Feng, Luke R. Taylor, Domenico Bonaccini Calia. 150 W highly-efficient Raman fiber laser [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 23678~23683
- 18 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