

文章编号: 1001-3806(2011)01-0117-05

掺 Yb³⁺ 双包层单频光纤放大器中 SBS 的理论分析

杨春波, 冷进勇, 陆启生*

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

摘要: 为了研究掺 Yb³⁺ 双包层单频光纤放大器中受激布里渊散射产生的规律, 从含有受激布里渊散射的速率方程出发, 采用模拟计算的方法进行了理论分析。结果表明, 光纤长度、抽运方式、抽运功率和换热系数对受激布里渊散射有很大的影响, 信号功率的影响较小。所得结论为从实验上研究单频光纤放大器中受激布里渊散射的变化规律提供了理论依据。

关键词: 非线性光学; 光纤放大器; 单频; 受激布里渊散射; 换热系数

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2011.01.032

Stimulated Brillouin scattering in Yb³⁺-doped double clad single-frequency fiber amplifier

YANG Chun-bo, LENG Jin-yong, LU Qi-sheng

(College of Opto-Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to study stimulated Brillouin scattering (SBS) in Yb³⁺-doped double clad single-frequency fiber amplifiers, numerical simulation was carried out based on the rate equations. The results show that fiber length, pump schemes, pump power, heat transfer coefficient make great impact on SBS effect. On the other hand the impact of the signal power is small. The results of simulation provide a theoretical guide to optimum design of high power single-frequency fiber amplifiers.

Key words: nonlinear optics; fiber amplifier; single-frequency; stimulated Brillouin scattering; heat transfer coefficient

引言

虽然光纤激光器和光纤放大器的输出功率已经达到了很高的水平, 然而这些高功率输出光的线宽一般有几纳米, 甚至几十纳米, 这对于一些只考虑功率, 不关心线宽的领域不会造成影响, 例如切割、打标等等, 但是在一些需要窄的谱宽和高光束质量的领域, 比如相干合成、谱合成以及频率转换, 线宽就不能满足要求了, 因此, 必须考虑单频放大的问题。目前限制单频光纤放大器功率提升的主要原因是光纤中的各种非线性效应。

在光纤放大器中, 由于传输功率高, 纤芯的截面小, 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、受激喇曼散射和自相位调制等等。一般情况下, 受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 的阈值要低很多, 因此, 在单频放大中要首先考虑 SBS 的抑制问题^[1-4]。作者从含有 SBS 的放大器速率方程出发, 研究影响高功率单频

光纤放大器中 SBS 产生的因素。

1 含 SBS 的速率方程

考虑信号光得到充分放大, 即忽略放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 的影响情况, 掺镱 (Yb³⁺) 双包层光纤放大器中, 含有 SBS 的速率方程为^[5]:

$$\frac{dP_s}{dz} = N_0 \Gamma_s P_s \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{e,s} + \sigma_{a,s}) - \sigma_{a,s} \right] - \alpha_s P_s - P_s \sum_i g_{SBS,i} P_{SBS,i} / A_{eff} \quad (1)$$

$$\frac{dP_{f,p}}{dz} = N_0 \Gamma_p P_{f,p} \times \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{e,p} + \sigma_{a,p}) - \sigma_{a,p} \right] - \alpha_p P_{f,p} \quad (2)$$

$$\frac{dP_{b,p}}{dz} = -N_0 \Gamma_p P_{b,p} \times \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{e,p} + \sigma_{a,p}) - \sigma_{a,p} \right] + \alpha_p P_{b,p} \quad (3)$$

$$\frac{dP_{SBS,i}}{dz} = -N_0 \Gamma_s P_{SBS,i} \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_{e,s} + \sigma_{a,s}) - \sigma_{a,s} \right] + \alpha_s P_{SBS,i} - g_{SBS,i} P_s P_{SBS,i} / A_{eff} \quad (4)$$

作者简介: 杨春波 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: violet851736@163.com

收稿日期: 2010-05-20; 收到修改稿日期: 2010-07-17

$$N_2 = N_0 \frac{\Gamma_s \sigma_{a,s} P_s \lambda_s + \Gamma_p \sigma_{a,p} P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i \sigma_{a,s} P_{SBS,i} \lambda_{SBS,i}}{\Gamma_s (\sigma_{a,s} + \sigma_{e,s}) P_s \lambda_s + \Gamma_p (\sigma_{a,p} + \sigma_{e,p}) P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i (\sigma_{a,s} + \sigma_{e,s}) P_{SBS,i} \lambda_{SBS,i} + \frac{hcA_{eff}}{\tau}} \quad (5)$$

式中, P_s 为信号光功率, $P_{f,p}$, $P_{b,p}$ 分别为前向和后向抽运光功率, $P_{SBS,i}$ 和 $g_{SBS,i}$ 分别对应于受激布里渊散射频率 $\nu_{SBS,i}$ 的功率和增益系数, z 为沿光纤的位置坐标, $\sigma_{e,s}$ 为信号光发射截面面积, $\sigma_{a,s}$ 为信号光吸收截面面积, $\sigma_{e,p}$ 为抽运光发射截面面积, $\sigma_{a,p}$ 为抽运光吸收截面面积, A_{eff} 为有效截面, Γ_s 和 Γ_p 分别为信号光和抽运光场模与镱离子掺杂区域的重叠因子, α 和 α_p 分别为信号光和抽运光的背景损耗, N_0 为镱离子的掺杂浓度, N_1, N_2 为下能级和上能级离子浓度, 且 $N_0 = N_1 + N_2$, τ 为上能级寿命。值得注意的是, 布里渊散射光波长相对于信号光的偏移量小于 0.1nm, 因此, 对于散射光来说, 上述的吸收和发射截面、重叠因子和损耗均可使用信号光的各参量代替。

在常用的双包层光纤中, 纤芯的数值孔径远小于 1, 因此, 包含有温度梯度的 SBS 增益谱的表达式为^[5-6]:

$$g(\nu_{SBS,i}) = g_0 \frac{(\Omega_{SBS}/2)^2}{[\nu_{SBS,i} - (\nu_B + c_T \Delta T)]^2 + (\Omega_{SBS}/2)^2} \quad (6)$$

式中, g_0 为峰值增益, Ω_{SBS} 为线宽, c_T 为温度系数, $\nu_B = 2n\nu_a/\lambda_s$ 为相对于信号光 λ_s 的布里渊频移, n 为折射率, ν_a 为声速。

在增益光纤中, 被吸收的抽运光有相当部分转化为热, 使得光纤的温度上升。纤芯区域的温度升高量可以由下式计算^[7-8]:

$$\Delta T(z) = \frac{\alpha \eta P_p(z)}{4\kappa\pi} \left(1 + 2\ln \frac{b}{a} + \frac{2\kappa}{kb} \right) \quad (7)$$

式中, α 为抽运光吸收系数, $\eta = (\lambda_s - \lambda_p)/\lambda_s$ 为量子亏损, 代表了抽运光转化为热的比例, a 和 b 分别为纤芯和内包层半径, k 为传热系数, κ 为导热系数。(1)式~(5)式是含边界条件的微分方程组, 已知的边界条件有: 在 $z=0$ 处, 输入信号光功率 $P_{s,0}$ 和正向抽运光功率 $P_{f,p,0}$; 在 $z=L$ 处, 反向抽运光功率 $P_{b,p,0}$ 和散射光初始功率 $P_{SBS,i,0} = P_N$, $P_N = h\nu_B \Delta\nu_{SBS,i}$ ^[5], 其中 $\Delta\nu_{SBS,i}$ 为频率 $\nu_{SBS,i}$ 附近的散射线宽。边界条件如图 1 所示。

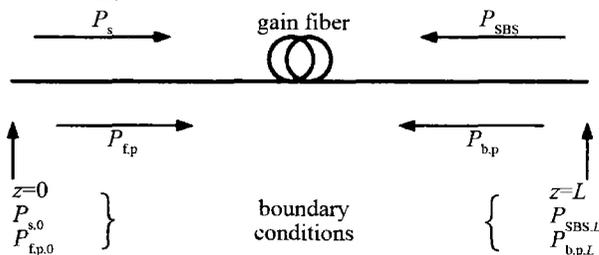


Fig. 1 Boundary conditions

使用修正的弛豫法解方程组^[1], 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的介绍。计算中使用到的参量见表 1。

Table 1 Simulation parameters for rate-equation model

pump wavelength	$\lambda_p = 976\text{nm}$	signal wavelength	$\lambda_s = 1064\text{nm}$
radius of core	$a = 2.5\mu\text{m}$	radius of cladding	$b = 65\mu\text{m}$
absorption cross sections of pump light	$\sigma_{a,p} = 2.35 \times 10^{-24}\text{m}^2$	absorption cross sections of signal light	$\sigma_{a,s} = 2.95 \times 10^{-27}\text{m}^2$
emission cross sections of pump light	$\sigma_{e,p} = 2.17 \times 10^{-24}\text{m}^2$	emission cross sections of signal light	$\sigma_{e,s} = 2.5 \times 10^{-25}\text{m}^2$
pump background loss	$\alpha_p = 0.003\text{m}^{-1}$	signal background loss	$\alpha_s = 0.005\text{m}^{-1}$
pump overlap factor	$\Gamma_p = 0.0025$	signal overlap factor	$\Gamma_s = 0.88$
pump absorption coefficient	$\alpha = 1.7\text{dB/m}$	doping concentration	$N_0 = 1.13 \times 10^{26}\text{m}^{-3}$
upper level lifetime	$\tau = 0.8\text{ms}$	effect section	$A_{eff} = 3.14 \times 10^{-10}\text{m}^2$
SBS gain bandwidth	$\Omega_{SBS} = 58\text{MHz}$	SBS gain coefficient	$g_0 = 2.4 \times 10^{-11}\text{m/W}$
temperature slope coefficient	$c_T = 2.25\text{MHz/K}$	index of core	$n = 1.45$
velocity of sound	$\nu_a = 5.96\text{km/s}$	coefficient of heat transfer	$k = 3 \times 10^{-3}\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$

2 影响 SBS 产生的因素

计算中, 假设信号光的线宽在千赫兹量级, 即 $\Delta\nu_s \ll \Omega_{SBS}$, 峰值增益是一个与信号光线宽无关的常数^[9]。在实际情况下, 增益光纤缠绕在光纤盘上, 传热系数要稍大于自然换热条件下的值, 因此取 $k = 3 \times 10^{-3}\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ 。

2.1 抽运方式的影响

假设输入信号光功率为 0.1W, 抽运光功率为 3.2W, 光纤长度为 12m。图 2 中分别列出了前向、双向和后向抽运条件下, 光纤内信号光、抽运光和 SBS 光功率的变化规律, 以及光纤上的升温分布。

从图中可以看出, 后向抽运时, 放大器的输出功率要稍高于其它两种抽运方式; 前向和后向抽运时, 光纤内的温度分布趋势大致相同, 只不过方向相反, 而双向抽运时, 光纤内的温度要明显偏低, 且梯度较小; 前向抽运时, SBS 光功率要明显高于其它两种抽运方式; 光纤内温度的变化规律与抽运功率沿轴向的分布规律一致, 这就使得在高功率单频放大实验中必须注意对抽运端的保护, 防止高温引起光纤损伤。

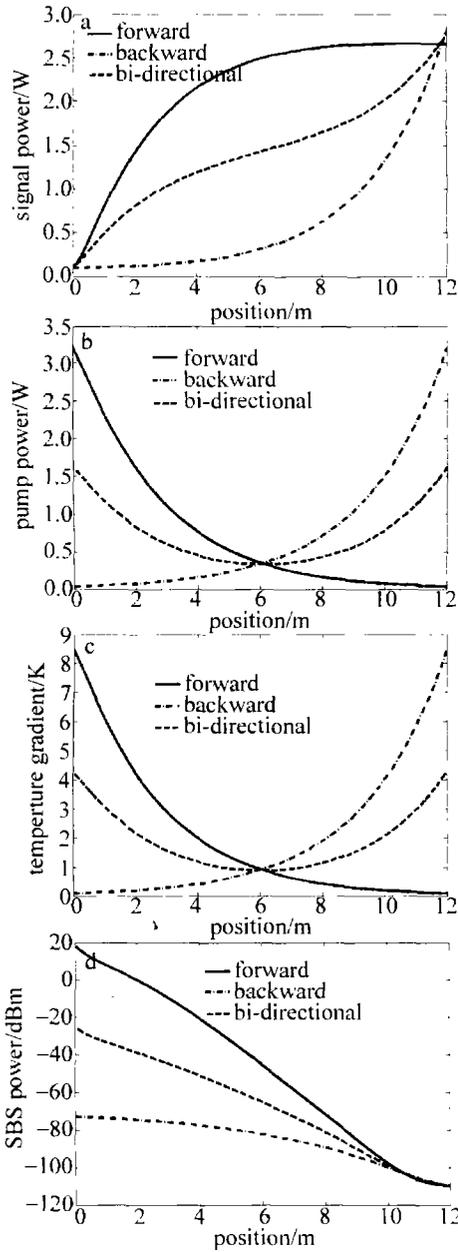


Fig. 2 a—signal power distribution b—pump power distribution c—temperature distribution d—SBS power distribution

在前向抽运情况下, SBS 之所以会明显偏高, 主要有如下两个方面的原因: (1) 从图 2a 中可以看出, 前向抽运时增益光纤内的信号光在较大范围内保持较高的功率水平, 也就是说, 此时 SBS 的有效增益长度要远大于其它两种情况; (2) SBS 过程所产生的 Stokes 散射光相对于信号光来说只有约 0.06nm 的频移, 而镱离子的增益带宽远大于这个数值, 即散射光仍处于增益带宽内, 在后向传输过程中, 仍会得到放大。这一点可以从增益光纤内的粒子数反转的情况得到说明。图 3 是 3 种抽运方式下, 增益光纤内的粒子数反转的分布图。从中可以看出, 在光纤 0m ~ 2m 区域内, 对于前向抽运来说, 后向传输的 Stokes 散射光会得到最大的增益, 这一点也可以从图 2d 中得到验证。可以将前

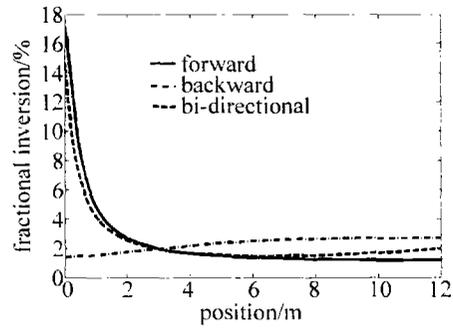


Fig. 3 Fractional inversion in fiber

向抽运时, 后向传输散射光的增益过程分解成两部分来考虑: 6m ~ 12m 区域, 较高的信号光发生 SBS 效应, 能量向散射光转移, 此区域反转粒子数较少, 光放大作用较小; 0m ~ 2m 区域, 粒子数反转较高, 光放大起主要作用, 而此区域内的信号光功率较低, SBS 效应带来的能量转移可以忽略。这种解释, 对于其它两种抽运方式同样适用, 只不过前向抽运时的过程最明显。

后向抽运方式更加有利于抑制 SBS 的产生, 但在没有高功率的隔离器的情况下, 容易对整个系统造成破坏, 因此实际实验中, 前向抽运要比后向抽运更容易实现和安全, 特别是全光纤的情况。因此, 下面将讨论前向抽运的情况, 研究影响 SBS 的一些因素, 包括光纤长度、抽运光功率、信号光功率和传热系数等等。

2.2 光纤长度对 SBS 的影响

在信号光功率 0.1W, 抽运光功率 3.2W 情况下, 光纤长度对 SBS 的影响如图 4 所示。从图中可以看

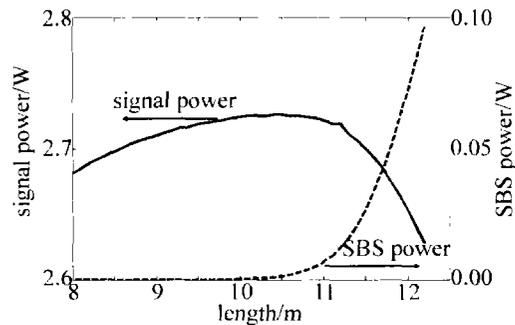


Fig. 4 Output power and SBS power as a function of fiber length

出, 光纤的长度存在一个最佳值, 在该值以前, 输出的信号光功率随光纤长度的增加而增加, SBS 功率基本上没有什么变化; 长度超过最佳值后, 信号光功率突然下降, SBS 功率开始急剧增加。不难理解, 随着抽运功率的增加, 光纤的最佳长度逐渐减小。这是由于抽运功率的增加, 无疑会使增益光纤内的信号光功率增加, 导致 SBS 更容易发生, 因此必须减小光纤长度来抑制 SBS。根据本实验室条件, 采取 11m 长度的光纤进行实验研究。

2.3 抽运功率对 SBS 的影响

从上面的计算中可以看出, 抽运功率对光纤内信

号光的功率分布有很大的影响,进而影响到SBS的产生。图5中计算的是输入信号光功率为0.1W、光纤长

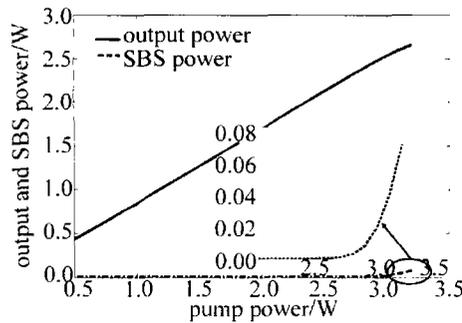


Fig. 5 Output power and SBS power as a function of pump power

度为12m时,放大器的输出功率以及SBS功率与抽运功率的关系。

从图5可以看出,抽运功率存在一个阈值,当功率低于该阈值时,输出光功率随抽运功率线性增加,而SBS功率基本可以忽略;高于阈值时,输出功率的增长幅度逐渐降低,而SBS开始迅速增大。抽运功率的阈值与增益光纤的长度有关,随着增益光纤的加长,将使SBS的阈值降低,因此抽运阈值也将降低。

2.4 输入信号光功率对SBS的影响

图6中计算的是抽运功率为3.2W、光纤长度为

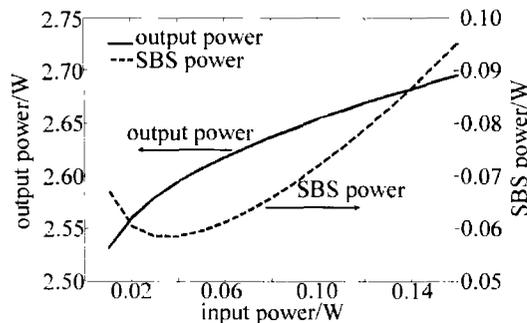


Fig. 6 Output signal power and SBS power as a function of input signal power

12m时,输入信号功率对输出功率以及SBS功率的影响。从图中可以看出,输入信号的大小对输出功率和SBS的影响较小,这类似于普通放大器中,信号光被充分放大时的情况。信号光在传输过程中,被很快放大到一定水平,这一点基本不受输入信号大小的影响。

2.5 传热系数对SBS的影响

SBS的增益谱受温度的影响很大,也正因为此,增益光纤由于吸收而产生的温升,使得放大器中SBS的阈值远高于非增益光纤。图7中给出了传热系数分别取 $k=1 \times 10^{-3} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ (虚线)和 $k=3 \times 10^{-3} \text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ (实线)时的情况。从中可以看出,不同的传热系数,导致光纤内存在不同的温度梯度,进而影响SBS产生的过程。

图8是不同传热系数下,SBS增益带宽内各频率的变化规律,更形象地解释传热系数对SBS的影响

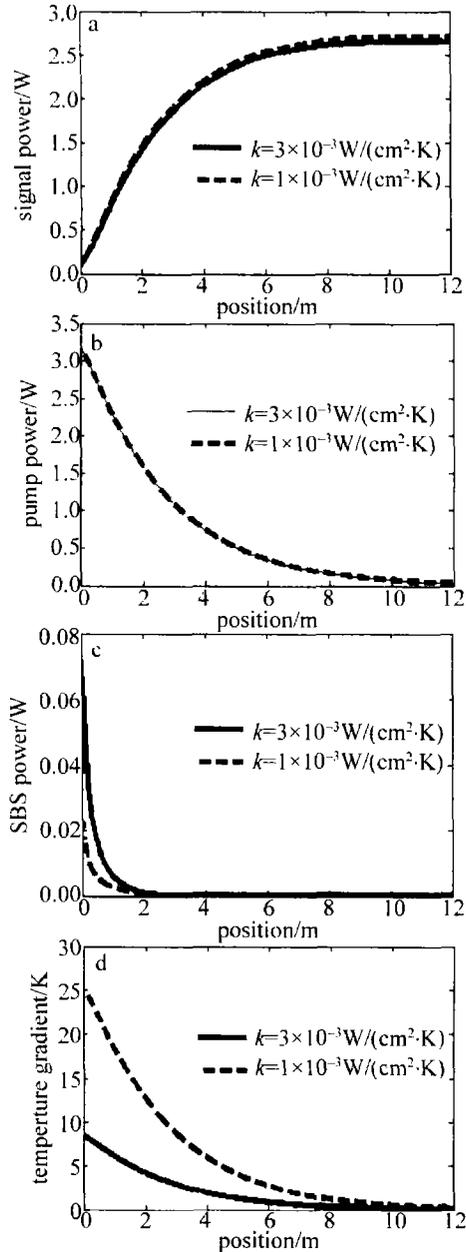


Fig. 7 Signal, pump, SBS and temperature distribution as a function of coefficient of heat transfer

(横坐标用0~100表示,是把SBS的线宽分成了100份)。当传热系数较小时,增益光纤内存在较大的温度梯度,SBS增益谱的中心频率在光纤内发生连续变化,导致总的增益谱加宽,进而使得增益系数降低,散射光得不到有效的放大;而当传热系数较大时的情况正好相反,较小的温度梯度使得SBS增益谱的中心频率频移范围很小,也就是说,总的增益谱较窄,进而使得增益系数较高,散射光能够得到有效的放大。

实际情况下,为了保护增益光纤,都会使用光纤盘来缠绕光纤,使得传热系数大于自然冷却时的情况,这将明显降低光纤温度,减小增益带宽,增大散射光的增益系数,就需要采取别的措施^[4],在保证光纤安全的前提下抑制SBS。

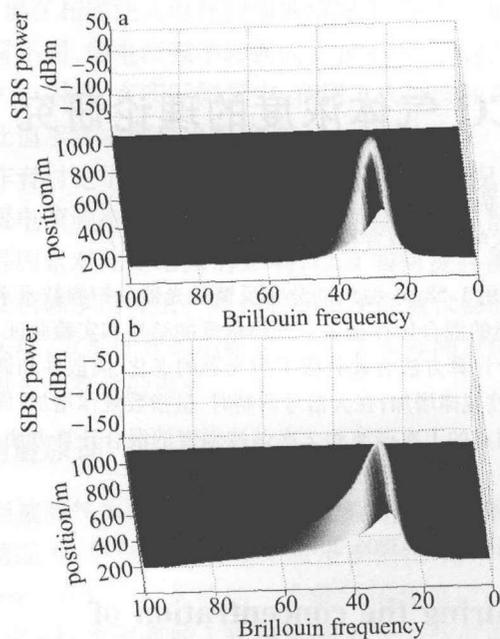


Fig. 8 a—the gain spectrum of SBS at $k = 3 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$ b—the gain spectrum of SBS at $k = 1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})$

3 结论

从含有 SBS 的速率方程出发,研究单频光纤放大器中 SBS 产生的规律,得到如下结论:在抽运功率一定的情况下,光纤长度存在一个最佳值,当光纤长度小于这个值时,SBS 处于很低的水平,当光纤长度大于最佳值后,SBS 急剧增加,在制作光纤放大器时应尽量使光纤长度在这个最佳值附近;相比较于后向抽运和双向抽运方式,前向抽运更容易产生 SBS;当光纤长度和输入的信号光功率确定时,抽运功率存在一个阈值,抽运功率超过阈值,SBS 将显著增加;当传热系数较小

时,SBS 增益谱加宽,增益系数降低,有利于抑制 SBS,传热系数较大时,情况相反,但有利于保护光纤,确保放大器安全运作,如何在有效保护光纤的情况下,更好地抑制 SBS 将是下一步工作的研究重点。以上结论为从实验上研究单频光纤放大器中 SBS 的变化规律提供了理论依据。

参考文献

- [1] LIU A P. Novel SBS suppression scheme for high power fiber amplifier[J]. Proceedings of SPIE,2006,6102:61021R/1-61021R/9.
- [2] YAN F P, SHAN Y, JIAN S S. Study on threshold power of the fiber source for the stimulated Brillouin scattering fiber optic gyros[J]. Chinese Journal of Lasers,2000,A27(9):790-794(in Chinese).
- [3] GE C W, ZHANG W J, GAO X M. Illustrated description of narrow-band and broad-band stimulated Brillouin scattering process[J]. Chinese Journal of Lasers,2003,30(8):701-704(in Chinese).
- [4] WANG C C, ZHANG F, LU Y C, *et al.* Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers[J]. Chinese Journal of Lasers,2006,33(12):1630-1635(in Chinese).
- [5] HILDEBRANT M, BÜSCHE S, WEBELS P, *et al.* Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers[J]. Optics Express,2008,16(20):15970-15979.
- [6] LIU A P. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient[J]. Optics Express,2007,15(3):977-984.
- [7] CHEN J X, SUI Zh, CHEN F Sh, *et al.* Thermal effect of Yb^{3+} -doped double clad fiber laser[J]. Laser Technology,2006,30(3):268-270(in Chinese).
- [8] WANG Y, XU C, PO H. Thermal effects in kilowatt fiber lasers[J]. IEEE Photonics Technology Letters,2004,16(1):63-65.
- [9] NATHAN A. Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier[J]. Journal of the Optical Society of America,2002,B19(11):2551-2557.

(上接第 116 页)

- [9] CHEN L, WEN Sh Ch, LI W Y, *et al.* Optical front-ends to generate optical millimeter-wave signal in radio-over-fiber system with different architectures[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007,25(11):3381-3387.
- [10] QI G H, YAO J P, SEREGELYI J, *et al.* Optical generation and dis-

tribution of continuously tunable millimeter-wave signals using an optical phase modulator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005,23(9):2687-2695.

- [11] MA L L, LI G H. Polarized light expressed by poincare sphere[J]. Laser Technology,2003,27(4):302-303(in Chinese).