

传输光纤对单频光纤放大器中受激布里渊散射的影响

杨春波, 冷进勇, 陆启生

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:在全光纤的单频光纤放大器系统中, 泵浦耦合器带有的传输光纤将会对放大器的性能产生影响, 为了研究其影响的规律, 本文从含有 SBS 的速率方程出发, 建立模型, 讨论在含有传输光纤的情况下的泵浦方式, 传输光纤长度, 光纤结构对 SBS 的影响, 所得结论为从实验上研究单频光纤放大器中 SBS 的变化规律提供理论依据。

关键词: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

Influence of transmitting fibers on the stimulated Brillouin scattering in single-frequency fiber amplifiers

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: For an all-fiber single-frequency amplifier, a passive transmitting fiber of the pump coupler may induce unwanted stimulated Brillouin scattering and affects the amplifier performance. To evaluate the impact, a rate-equation based model has been adopted to study SBS characteristics in the fiber amplifier with a transmitting fiber. The model allows independent inputs of many critical parameters, such as pump schemes, the fiber length and geometrical structures. The results of simulation provide a theoretical base for optimizing the design of high power single-frequency fiber amplifier.

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

1 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, 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、受激拉曼散射和自相位调制等。一般情况下, 受激布里渊散射(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]。本文从含有 SBS 的放大器速率方程出发, 建立模型, 讨论在含有传输光纤的情况下的泵浦方式, 传输光纤长度, 纤芯半径对 SBS 的影响。

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。E-mail: 68490388@163.com

收稿日期: 2010-07-10; **修订日期:** 2010-09-06

2 含SBS的速率方程

考虑信号光得到充分放大,即忽略 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]:

$$\frac{dP_s}{dz} = N_0 \Gamma_s P_s \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] - \alpha_s P_s - P_s \sum_i g_{sbsi} P_{sbsi} / A_{eff} \quad (1)$$

$$N_2 = N_0 \frac{\Gamma_s \sigma_s^a P_s \lambda_s + \Gamma_p \sigma_p^a P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i \sigma_s^a P_{sbsi} \lambda_{sbsi}}{\Gamma_s (\sigma_s^a + \sigma_s^e) P_s \lambda_s + \Gamma_p (\sigma_p^a + \sigma_p^e) P_p \lambda_p + \Gamma_s \sum_i (\sigma_s^a + \sigma_s^e) P_{sbsi} \lambda_{sbsi} + \frac{hcA_{eff}}{\tau}} \quad (5)$$

其中, P_s 为信号光功率; P_p^f, P_p^b 分别为前向和后向泵浦光功率; P_{sbsi} 和 g_{sbsi} 分别对应于布里渊散射频率 ν_{sbsi} 的功率和增益系数; z 为沿光纤的位置坐标; σ_x^a 为截面面积, 上标 a 代表吸收, e 代表发射, 下标 s 代表信号光, p 代表泵浦光; A_{eff} 为有效截面; Γ_s 和 Γ_p 分别为信号光和泵浦光场模与镱离子掺杂区域的重叠因子; α_s 和 α_p 分别为信号光和泵浦光的背景损耗; 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 0.1 nm, 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]:

$$g(\nu_{sbsi}) = g_0 \frac{(\Omega_{sbs}/2)^2}{(\nu_{sbsi} - (\nu_B + c_f \Delta T))^2 + (\Omega_{sbs}/2)^2} \quad (6)$$

式中, g_0 为峰值增益; Ω_{sbs} 为线宽; c_f 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, 被吸收的泵浦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]:

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

其中, α 为泵浦光吸收系数; $\eta = (\lambda_s - \lambda_p)/\lambda_s$ 为量子亏损, 代表了泵浦光转化为热的比例; a 和 b 分别为纤芯和内包层半径; H 为换热系数; k 为导热系

$$\frac{dP_p^f}{dz} = N_0 \Gamma_p P_p^f \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] - \alpha_p P_p^f \quad (2)$$

$$\frac{dP_p^b}{dz} = -N_0 \Gamma_p P_p^b \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_p^e + \sigma_p^a) - \sigma_p^a \right] + \alpha_p P_p^b \quad (3)$$

$$\frac{dP_{sbsi}}{dz} = -N_0 \Gamma_s P_{sbsi} \left[\frac{N_2}{N_0} (\sigma_s^e + \sigma_s^a) - \sigma_s^a \right] + \alpha_s P_{sbsi} - g_{sbsi} P_s P_{sbsi} / A_{eff} \quad (4)$$

数。方程(1)~(5)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_{s0} 和正向泵浦光功率 P_{p0}^f ; 在 $z=L$ 处, 反向泵浦光功率 P_{p0}^b 和散射光初始功率 $P_{sbsi0} = P_N$, $P_N = h\nu_B \Delta\nu_{sbsi}$ ^[5], 其中 $\Delta\nu_{sbsi}$ 为频率 ν_{sbsi} 附近的散射线宽。边界条件如图 1 所示。

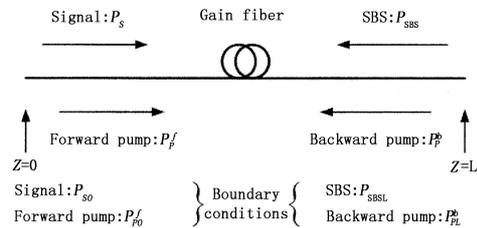


图1 边界条件

Fig.1 boundary conditions

3 模拟结果及讨论

3.1 泵浦方式的影响

如图 2 和图 3 所示, 在光纤放大器中, 无论是前向泵浦还是后向泵浦, 放大器中都会有一段非掺杂的光纤作为传输光纤, 此时的增益过程与没有传输光纤时的情况会有不同。由于传输光纤中没有粒子掺杂, 不会形成粒子数反转, 因此在计算时可将前向泵浦和后向泵浦的泵浦光的输入点放在 A 点和 B 点, 这样就可以把两段分开的传输光纤组成一段方便计算而对结果没有影响。

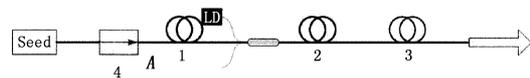


图2 前向泵浦时光路图

(1 和 2 为传输光纤, 3 为掺杂光纤, 4 为隔离器)

Fig.2 configuration of co-pumped amplifier with delivery fiber

(1, 2, delivery fiber, 3, gain fiber, 4, isolator)

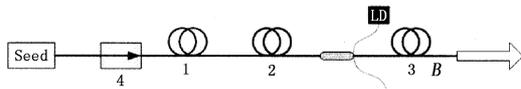


图3 后向泵浦时光路图

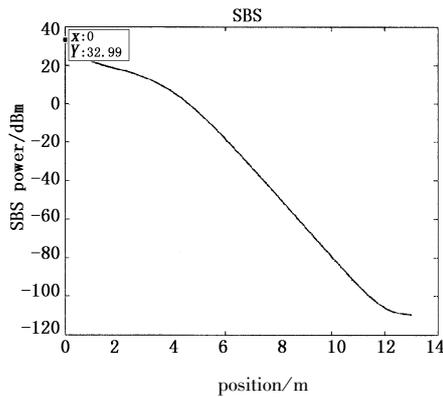
(1 为掺杂光纤,2 和3 为传输光纤,4 为隔离器)

Fig.3 configuration of counter-pumped amplifier with delivery fiber

(1. gain fiber,2,3. delivery fiber,4. isolator)

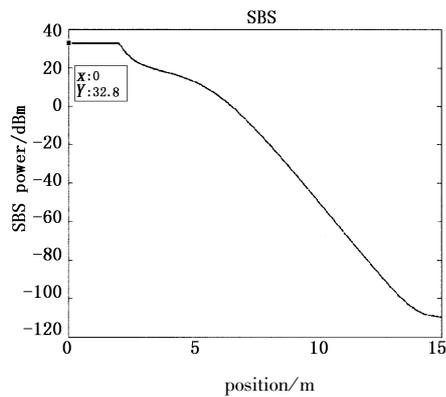
Anping Liu 在文章^[9]中只讨论了后向泵浦的

情况,而我们在实际工作和实验中,为了减轻泵浦耦合器的压力,常采用前向泵浦的方式,假设掺杂光纤的长度为 13 m,传输光纤的长度为 2 m,图 4 和图 5 分别给出了前向泵浦和后向泵浦条件下光纤内 SBS 光和信号光功率的变化规律,以及对对应情况下不含传输光纤时光纤内 SBS 光和信号光功率的变化规律。



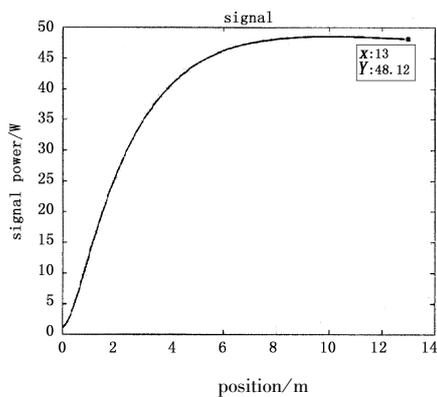
(a) 不含传输光纤时的 SBS 功率

(a) SBS power with no delivery fiber



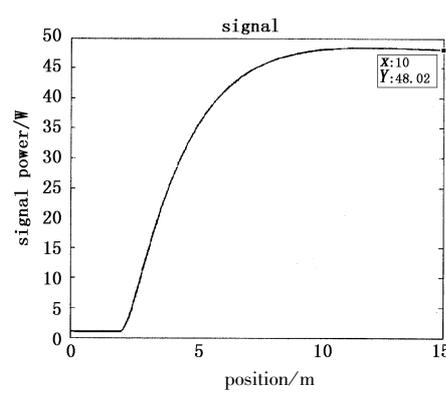
(b) 2 m 传输光纤时的 SBS 功率

(b) SBS power with 2 m delivery fiber



(c) 不含传输光纤时的信号功率变化

(c) signal power with no delivery fiber



(d) 2 m 传输光纤时的信号功率变化

(d) signal power with 2 m delivery fiber

图4 前向泵浦时功率分布

Fig.4 the power distribution at forward pump

从图 4 中我们可以发现:前向泵浦时,在含有传输光纤和不含传输光纤的条件下,SBS 光和信号光功率基本没有什么变化,也就是说前向泵浦条件下,传输光纤对光纤放大器的影响可以忽略,这是因为在泵浦输入端,传输光纤中的信号功率低且没有粒子数反转,因此对 SBS 的影响较小;后向泵浦时,在

不含传输光纤和含有传输光纤的条件下,SBS 光和信号光功率有了显著的变化,SBS 功率由 -65.4 dBm 增加到 39.36 dBm,而信号光功率由 211 W 下降到了 200.7 W,可见传输光纤对放大器的功率影响较大,这是因为此时的传输光纤中的信号功率较高,对 SBS 的作用明显。

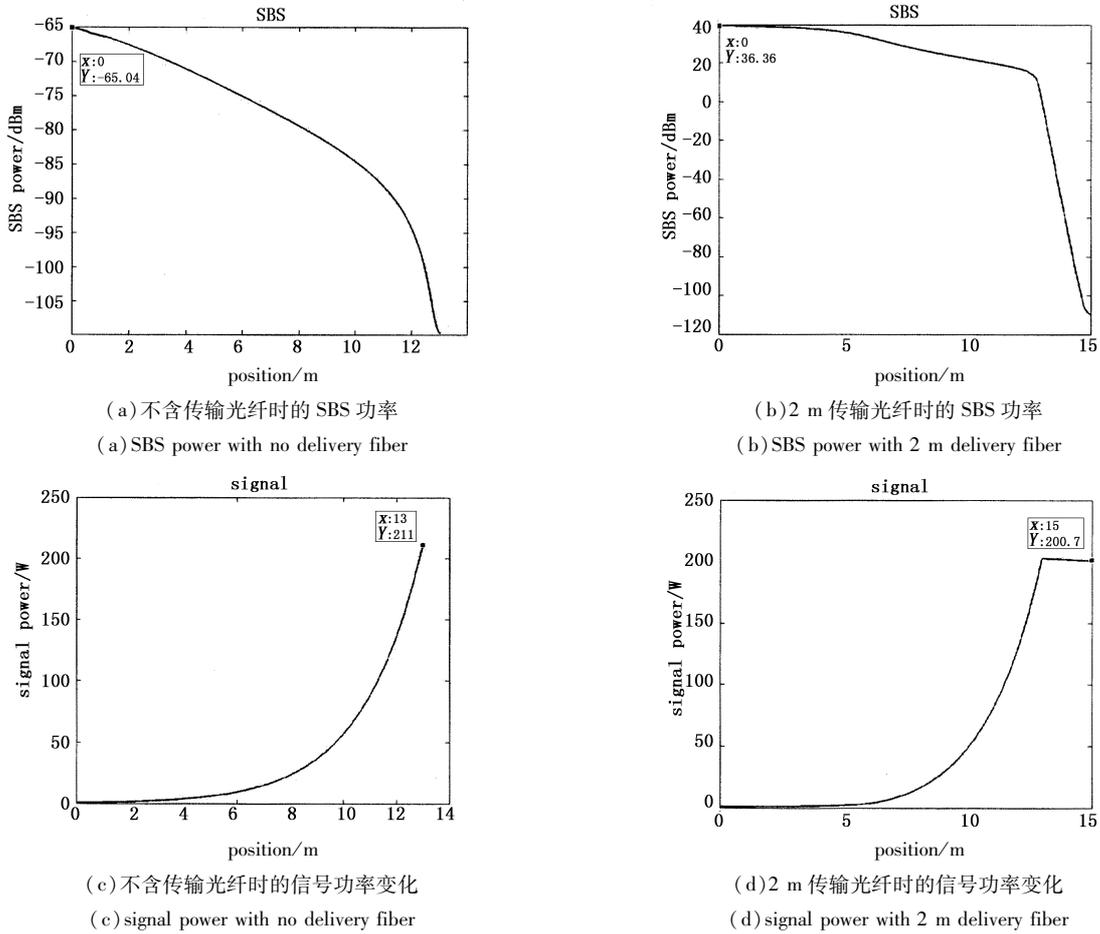


图5 后向泵浦时功率变化

Fig. 5 the power distribution at backward pump

3.2 传输光纤长度对 SBS 的影响

假设掺杂光纤的长度为 13 m,图 6 所示为取不同的传输光纤长度时,SBS 的阈值功率。可见在后向泵浦时,传输光纤对 SBS 的阈值影响较大,传输光纤的长度越长 SBS 的阈值越低,传输光纤的长度越短 SBS 的阈值越高,为了提高放大器的输出功率,抑制 SBS,我们在实际工作中必须有目的地减短输出光纤的长度;在前向泵浦时阈值功率基本没有

什么变化,SBS 对传输光纤的长度不敏感,这和前面的讨论结果一样,但是前向泵浦的阈值功率较低,也就是说前向泵浦不利于抑制 SBS 的产生,这种泵浦方式将限制放大器输出功率的提高。

3.2 传输光纤结构对 SBS 的影响

在高功率放大器中,增加纤芯直径是一种比较普遍的抑制 SBS 的方法,那么增加传输光纤的纤芯直径会对 SBS 产生什么样的影响,如图 7 所示,可见随着纤芯直径的增加,SBS 的阈值功率也随着增大,

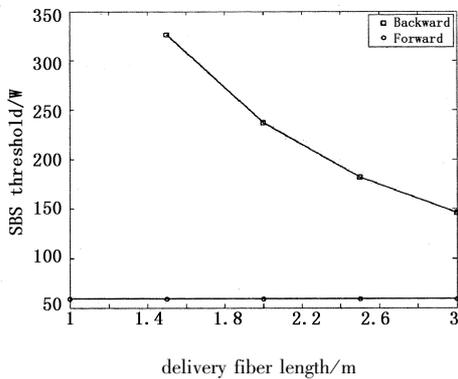


图6 SBS 阈值功率随传输光纤长度的变化

Fig. 6 SBS threshold as a function of delivery fiber length

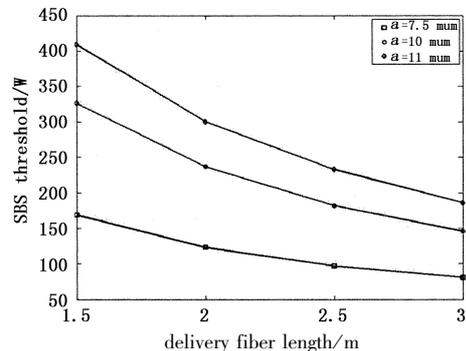


图7 SBS 阈值功率随传输光纤长度的变化

Fig. 7 SBS threshold as a function of delivery fiber length

这是由方程(4)中的 $g_{\text{sbsi}} P_s P_{\text{sbsi}} / A_{\text{eff}}$ 项影响的,也就是说为了提高放大器的输出功率和抑制 SBS,我们可以增加传输光纤的纤芯直径。

4 结 论

本文从含有 SBS 的速率方程出发,建立模型,数值模拟研究了光纤放大器中传输光纤对光纤放大器性能影响的规律,在前向泵浦的条件下,传输光纤对放大器性能的影响较小,而在后向泵浦条件下,传输光纤对 SBS 的影响较大,传输光纤的长度越长, SBS 的阈值功率越低;传输光纤的芯径越大, SBS 的阈值功率越高。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] Anping Liu. Novel SBS suppression scheme for high power fiber amplifier [C]. Proc. of SPIE., 2006, 6102, 61021R.
- [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 J. Lasers, 2000, A27(9): 790 - 794.
- [3] Ge C W, Zhang W J, Gao X M. Illustrated description of narrow 2 b and broad 2b and stimulated Brillouin scattering process [J]. Chinese J. Lasers, 2003, 30(8): 701 - 704.
- [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 J. Lasers, 2006, 33(12): 1630 - 1635.
- [5] M Hildebrant, et al. Brillouin scattering spectra in high-power single-frequency ytterbium doped fiber amplifiers [J]. Opt Express, 2008, 16: 15970.
- [6] Anping Liu. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient [J]. Opt Express, 2007, 15: 977.
- [7] Chen J X, et al. Thermal effect of Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 268 - 270.
- [8] Wang Y, Xu C, Po H. Thermal effects in kilowatt fiber lasers [J]. IEEE Photon. Tech. Lett., 2004, 16: 63.
- [9] Anping Liu. Stimulated Brillouin scattering in single frequency fiber amplifiers with delivery fibers [J]. Opt Express, 2009, 17: 977.