

光纤放大器中受激布里渊散射的抑制

韦佳天,吕宏伟,杨小亮

(中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:建立了一种考虑受激布里渊散射(SBS)效应和输出光纤影响的光纤放大器模型,该模型能有效描述低频脉冲的放大过程。数值仿真表明,通过优化设计掺杂光纤长度,缩短输出光纤长度,增大输入脉冲峰值功率等操作可以有效抑制光纤放大器中的受激布里渊散射。本文的结果可为单频放大系统的设计提供理论依据。

关键词:受激布里渊散射;光纤放大器;短脉冲

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2017.01.007

Suppression of stimulated Brillouin scattering in fiber amplifier

WEI Jia-tian, LÜ Hong-wei, YANG Xiao-liang

(China Electronics Technology Group Corporation No. 34 Research Institute, Guilin 541004, China)

Abstract: Considering the influence of stimulated Brillouin scattering (SBS) and the output fiber, a fiber amplifier model is established, and it can effectively describe the amplification of low-frequency pulse. The simulation results show that SBS in fiber amplifier can be effectively suppressed through optimizing length of the doped fiber, cutting down length of the output fiber and increasing peak power of input pulse. The research results can be applied to the design of the single-frequency amplification system.

Key words: stimulated Brillouin scattering; fiber amplifier; short pulse

1 引言

受激布里渊散射(SBS)是光纤单频激光系统中常见的非线性效应,一般出现在光纤放大器中,阻碍单频激光系统输出功率的提升。受激布里渊散射是入射的光场与介质声波场相互作用导致的非线性过程,其表现为:SBS激发的斯托克斯(Stokes)光后向传播,逐步放大;Stokes光相对于入射激光频移约10 GHz;布里渊增益频谱很窄,具有洛伦兹形状;SBS的阈值功率与入射光波的谱宽有关,谱宽越宽,阈值越高。针对SBS的特点,研究人员提出了几种抑制SBS的方法:优化设计具有高SBS阈值的光纤^[1];在掺杂光纤上施加应力分布或温度分布^[2-3];对单频激光进行相位调制,展宽光谱^[4]。以上几种方法均

能有效提高SBS阈值,但这些方法亦有其各自的缺点。SBS易发生于光纤放大器中,SBS的出现与光纤放大器相关,因此通过优化设计光纤放大器来提高SBS阈值是可能的。本文结合掺铒光纤放大器模型与受激布里渊散射的耦合振幅方程组,仿真研究低频短脉冲在光纤放大器中的SBS现象。

2 包含SBS以及输出光纤的光纤放大器模型

本文研究的激光脉冲为低频短脉冲,脉冲频率不大于1 kHz,脉冲宽度小于100 ns,因此SBS过程使用SBS耦合振幅方程组描述,放大过程使用瞬态功率传输方程描述,综合SBS耦合方程组^[5-7]与瞬态功率传输方程^[8],可以得到包含SBS过程的光纤放大器模型:

作者简介:韦佳天(1989-),男,学士,工程师,主要从事单频激光放大系统方面的研究。E-mail:hitwtj@126.com

收稿日期:2016-05-12;**修订日期:**2016-06-12

$$N = N_1(z, t) + N_2(z, t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_2(z, t)}{dt} = \frac{\Gamma_p \lambda_p}{hcA_{core}} [\sigma_{ap} N_1(z, t) - \sigma_{ep} N_2(z, t)] \cdot$$

$$P_p(z, t) - \frac{N_2(z, t)}{\tau} + \frac{\Gamma_s \lambda_s}{hcA_{core}} [\sigma_{as} N_1(z, t) -$$

$$\sigma_{es} N_2(z, t)] [P_s(z, t) + P_{st}(z, t)] \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_p} \frac{\partial P_p^\pm(z, t)}{\partial t} =$$

$$\Gamma_p [\sigma_{ep} N_2(z, t) - \sigma_{ap} N_1(z, t)] P_p^\pm(z, t) -$$

$$\alpha_p P_p^\pm(z, t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial A_s(z, t)}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_s(z, t)}{\partial t} =$$

$$\frac{\Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z, t) - \sigma_{as} N_1(z, t)] A_s(z, t)}{2} +$$

$$ig_1 A_a A_s - \frac{\alpha_s}{2} A_s(z, t) \quad (4)$$

$$- \frac{\partial A_{st}(z, t)}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial A_{st}}{\partial t} =$$

$$\frac{\Gamma_s [\sigma_{es} N_2(z, t) - \sigma_{as} N_1(z, t)] A_{st}(z, t)}{2} +$$

$$ig_1 A_a^* A_{st} - \frac{\alpha_s}{2} A_{st}(z, t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial A_a(z, t)}{\partial z} + \frac{1}{v_a} \frac{\partial A_a(z, t)}{\partial t} = ig_2 A_s(z, t) A_{st}^*(z, t) -$$

$$\frac{\alpha_a}{2} A_a(z, t) + \frac{1}{v_a} f(z, t) \quad (6)$$

$$P_s(z, t) = \frac{2nA_{core}}{Z_0} |A_s(z, t)|^2 \quad (7)$$

$$P_{st}(z, t) = \frac{2nA_{core}}{Z_0} |A_{st}(z, t)|^2 \quad (8)$$

其中, $g_1 = \pi n^3 p_{12} / (2\lambda_s \rho_0)$, $g_2 = \pi n^5 p_{12} \varepsilon_0 / (\lambda_s v_a^2)$, p_{12} 是光纤的光弹系数。

在上面各式中, z 为光纤轴向坐标; N 为光纤中掺杂浓度; $N_1(z, t)$ 和 $N_2(z, t)$ 分别为 z 坐标处 t 时刻下能级和上能级 Yb^{3+} 离子浓度; A_{core} 为纤芯面积; $P_p^\pm(z,$

$t)$ 、 $P_s(z, t)$ 、 $P_{st}(z, t)$ 分别为光纤 z 坐标处 t 时刻的正反向泵浦光、信号光以及 Stokes 光的功率; $A_s(z, t)$ 、 $A_{st}(z, t)$ 、 $A_a(z, t)$ 分别为光纤中 z 坐标处 t 时刻的信号光、Stokes 光以及声子场的振幅; Γ_p 和 Γ_s 分别为泵浦光、信号光(以及 Stokes 光)的功率填充因子; σ_{ap} 和 σ_{ep} 分别是泵浦光的吸收截面和发射截面, σ_{as} 和 σ_{es} 分别是信号光(以及 Stokes 光)的吸收截面和发射截面; n 是纤芯折射率; c 是光在真空中的速度; τ 是上能级寿命; Z_0 是光场在自由空间的阻抗; v_a 是声子的传播速度; α_p 、 α_s 、 α_a 分别是泵浦光、信号光(以及 Stokes 光)、声子在光纤中的衰减系数; $f(z, t)$ 是 Langevin 噪声源项, 表征介质密度的热起伏。 $f(z, t)$ 是时间和空间上的高斯随机变量, 满足相位平均随机分布、振幅高斯随机分布, 以及以下关系:

$$\langle f(z, t) \rangle = 0, \quad \langle f(z, t) f^*(z', t') \rangle = Q \delta(z - z') \delta(t - t')$$

其中, $Q = 2\rho_0 \Gamma \omega_a h (1 + \bar{n}) / (2\pi v_a^2 A_{eff})$; $\bar{n} = [\exp(h\omega_a/2\pi KT) - 1]^{-1}$; Q 为噪声强度参量; $\bar{n}$ 为声场中每一模式的平均声子数; ρ_0 是光纤平均密度; $\Gamma = \alpha_a v_a$; ω_a 是声波的圆频率; h 是普朗克常数; K 是玻尔兹曼常数; T 是介质温度; A_{eff} 是介质作用区的有效截面积。

在实际工程应用中, 光纤放大器一般包含输入光纤和输出光纤。由于输入光纤处信号光的功率仍很小, 可以不用考虑, 因此主要关注输出光纤的影响。

3 仿真研究

考虑同向泵浦的光纤放大器模型, 对于无源光纤中的 SBS 过程的耦合振幅方程组, 可以直接使用有限差分法进行求解。而对于光纤放大器的耦合波方程组, 首先使用松弛法求解稳态功率传输方程, 获得泵浦光、反转粒子数分布, 然后再将此分布作为初始条件, 结合边界条件, 使用有限差分法求解。主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 主要仿真参数

Tab. 1 Main simulation parameters

λ_s / nm	λ_p / nm	Γ_p	Γ_s	A_{eff} / m^2	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
1064	975	0.0033	0.85	4.32×10^{-10}	2210
σ_{ap} / m^2	σ_{ep} / m^2	σ_{as} / m^2	σ_{es} / m^2	τ / s	n
2.5×10^{-24}	2.5×10^{-24}	9.24×10^{-27}	3.59×10^{-25}	0.84×10^{-3}	1.454
p_{12}	$v_a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	τ_a / s	$Z_0 (\Omega)$		
0.286	5920	10×10^{-9}	376.7		

注: 部分仿真参数参照相关参考文献。

3.1 掺杂光纤长度的影响

掺杂光纤的相关参数选自 Nufern PLMA - YDF - 10/125 - M 双包层掺镱光纤, 掺杂光纤长度为 4 m, 输出无源光纤长 0.5 m, 其中无源光纤尺寸和掺杂光纤尺寸一致。输入脉冲为矩形脉冲, 脉冲宽度 3 ns, 峰值功率 2 W, 泵浦功率 0.5 W, 可以得到信号光以及 Stokes 光在光纤中的演变过程, 如图 1 所示。低频脉冲光在光纤放大器中传输, 相比连续光放大, 由于单个脉冲能量小, 放大阶段增长迅速, 而衰减阶段在掺杂粒子的作用下衰减严重。从脉冲放大过程来看, 存在最佳光纤长度匹配输入脉冲与泵浦功率。对于 SBS 效应产生的 Stokes 光, 在泵浦输入端获得明显的增长, 放大器提供的增益对 Stokes 光的放大起到十分重要的作用。针对使用 3 m 和 4 m 掺杂光纤的情形进行仿真研究, 可以得到在不同泵浦功率下, 输出信号光大小和 Stokes 光大小, 如图 2 所示。从图中可见, 在同等的泵浦功率下, 削减导致衰减的掺杂光纤可以得到更大的输出功率, 同时有效抑制 SBS 效应。

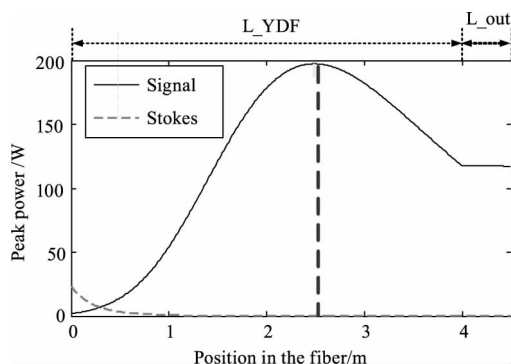


图 1 信号光与 Stokes 光在光纤中的演变

Fig. 1 The evolution of signal wave and Stokes wave in the fiber

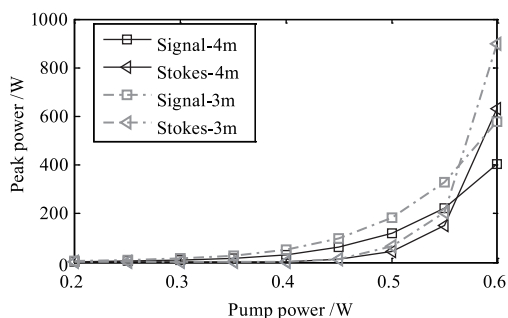


图 2 不同的掺杂光纤长度

Fig. 2 Different length of doped fiber

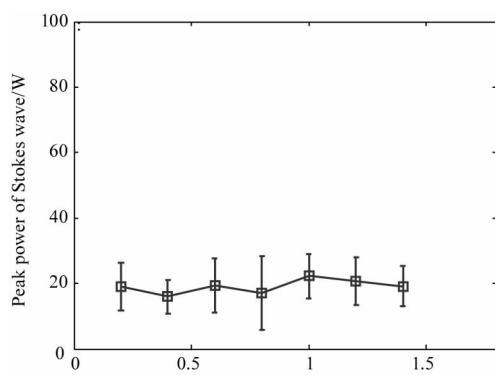
3.2 输出光纤长度的影响

仿真研究了掺杂光纤 3 m 模型与掺杂光纤 4 m 模型在同等输出 (峰值功率 118 W) 和同等泵浦功率 (0.5 W) 下, Stokes 光峰值功率随输出光纤长度

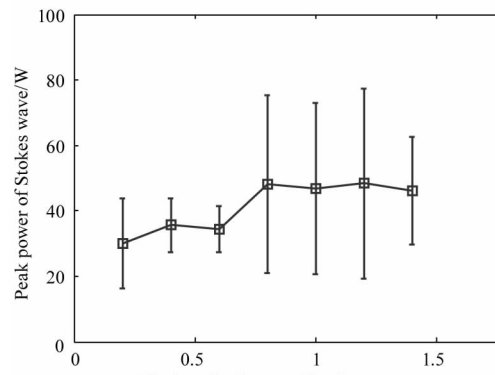
变化的情况, 仿真结果如图 3 所示。无论掺杂光纤长短, 缩短输出光纤都能起到一定的抑制 SBS 效应的作用。输出光纤的长度应当小于或等于 SBS 效应有效作用长度。对于单个短脉冲注入无源光纤的情况, SBS 效应有效作用长度表述为^[9]:

$$RGL = \min(2cT_0/n, L) \quad (9)$$

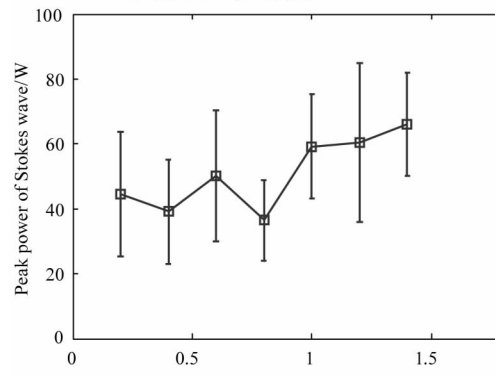
其中, c 为光在真空中的传播速度; T_0 为脉冲宽度; n 为纤芯群折射率; L 为无源光纤的长度。对于 3 ns 脉冲, 其有效作用长度不超过 1.2 m。由于掺杂光纤的存在, 输出光纤的长度要比 SBS 效应有效作用长度更短才表现出对 SBS 的抑制效应。



(a) 光纤长 3 m, 峰值功率 118 W



(b) 光纤长 4 m, 峰值功率 118 W



(c) 光纤长 3 m, 峰值功率 183 W

图 3 Stokes 光与输出光纤

Fig. 3 Stokes wave versus different length of output fiber

4.3 输入脉冲峰值功率的影响

保证输出功率一样(输出光峰值功率 183 W),研究放大器不同增益对 SBS 效应的影响。仿真模型选取掺杂光纤长度 3 m,输出光纤 0.5 m。如图 4 所示,在同等输出的情况下,随着输入脉冲峰值功率增大,放大倍数变小,同时激发的 Stokes 光也大幅减少。光纤放大器中的 Stokes 光大小与增益表现出正相关性,光纤放大器增益越大,后向 Stokes 光越强,适当增大输入脉冲峰值功率,减小放大器增益,有助于抑制光纤放大器中的 SBS 效应。在多级放大系统中,合理设计增益分配,适当提高前级放大倍数,减小后级放大倍数,或者将高增益的末级拆分为两级,能够提高系统的 SBS 阈值。

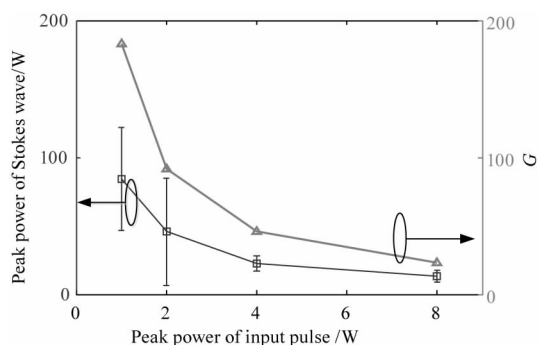


图4 放大器增益与 Stokes 光

Fig. 4 Amplifier gain versus Stokes wave

5 结 语

本文建立了包含 SBS 效应的低频脉冲光纤放大器模型,仿真研究了掺杂光纤长度、输出光纤长度以及增益对光纤放大器中的 SBS 效应的影响,得到以下结论:(1)优化选择合适长度的掺杂光纤,可以获得更大输出的同时减少 SBS 的激发;(2)无论掺杂光纤长短,缩短输出光纤的长度均有利于抑制 SBS 效应;(3)增大输入脉冲峰值功率,有利于抑制 SBS 效应;(4)采用多级放大比单级放大,能提高系统的 SBS 阈值。SBS 效应易于出现在光纤放大器中的一大因素是放大器对 Stokes 光的增益作用,因此可以通过采用逆向泵浦或者脉冲泵浦的方式减少放大器对 Stokes 光的增益,从而起到抑制 SBS 效应的效果。

参考文献:

- [1] Alan H McCurdy. Modeling of stimulated brillouin scattering in optical fibers with arbitrary radial index profile[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23 (11): 3509 - 3516.
- [2] Lei Zhang, Shuzhen Cui, Chi Liu, et al. 170 W, single-frequency, single-mode, linearly-polarized, Yb-doped all-fiber amplifier [J]. Optic Express, 2013, 21 (5): 5456 - 5462.
- [3] Anping Liu. Suppressing stimulated Brillouin scattering in fiber amplifiers using nonuniform fiber and temperature gradient [J]. Optic Express, 2007, 15 (3): 977 - 984.
- [4] XIE Shuping, XU Guoliang. Suppression on fiber stimulated brillouin scattering based on phase modulation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33 (2): 0206003. (in Chinese)
谢淑平, 许国良. 基于相位调制法的光纤受激布里渊散射抑制 [J]. 光学学报, 2013, 33 (2): 0206003.
- [5] Hongpu Li, Kazuhiko Ogusu. Dynamic behavior of stimulated brillouin scattering in a single-mode optical fiber [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1999, 38 (11): 6309 - 6315.
- [6] GUO Shaofeng, LU Qisheng, CHENG Xiangai, et al. Numerical study for transient SBS process in transparent optical materials [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53 (1): 99 - 104. (in Chinese)
郭少锋, 陆启生, 程湘爱, 等. 光学透明材料中瞬态 SBS 过程的数值研究 [J]. 物理学报, 2004, 53 (1): 99 - 104.
- [7] HUANG Xiaodong, ZHANG Xiaomin, WANG Jianjun, et al. Stimulated brillouin scattering in high-power fiber amplifier [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40 (11): 2124 - 2128. (in Chinese)
黄小东, 张小民, 王建军, 等. 高功率光纤放大器中的受激布里渊散射 [J]. 红外和激光工程, 2011, 40 (11): 2124 - 2128.
- [8] LIU Qing. Study of pulse-pumped high power LMA Yb-doped fiber amplifier [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011. (in Chinese)
刘庆. 高功率大模场掺镱光纤放大器脉冲泵浦的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [9] LIU Jing. Theoretical analysis of high power pulse propagation and amplification in optical fibers [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
刘静. 高功率脉冲在光纤中的传输与放大研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.