

文章编号: 1001-3806(2009)05-0482-04

Er/Yb 共掺光纤脉冲放大器中的受激布里渊散射

周雷, 宁继平*, 陈璋, 韩群, 张伟毅, 王俊涛

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 为了精确模拟脉冲放大器中的受激布里渊现象,修正了脉冲光纤放大器中受激布里渊散射瞬态演变模型,建立了基于 Er/Yb 共掺双包层光纤中动态速率方程的受激布里渊散射的瞬态模型,同时包括了受激布里渊散射的信号光能量转移和反转粒子数消耗两个增益获得过程,采用有限差分的方法,分析了受激布里渊散射在高功率、低重复频率、窄脉冲光纤放大器中对输出脉冲信号单脉冲能量、峰值功率、频谱和时域波形的影响。搭建了两级放大的主振功率放大实验平台,利用重复频率为 156kHz 的调 Q 脉冲信号进行了高功率脉冲放大实验,得到了 1.32W 的平均功率输出,以及受激布里渊级联频谱和时域波形情况。结果表明,实验与理论分析相吻合,同时也验证了这个修正模型的正确性和有效性。

关键词: 光纤放大器;受激布里渊散射;有限差分法;主振功率放大

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.010

Stimulated Brillouin scattering in Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers

ZHOU Lei, NING Ji-ping, CHEN Cheng, HAN Qun, ZHANG Wei-yi, WANG Jun-tao

(Key Laboratory of Opto-electronic Information Science & Technology of Ministry of Education, College of Precision Instrument & Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to simulate the stimulated Brillouin scattering (SBS) in a pulse amplifier, its transient model was modified based on the time dependent rate equation in an Er/Yb co-doped fiber, including both gain-increasing processes of signal light transfer and dissipation of inverse populations. The influence of SBS on the single pulse energy, peak power, spectrum and time domain waveform in a fiber laser with high power, low repetition rate, narrow pulse width was analyzed. A two-stage master oscillator power amplifier (MOPA) experimental setup was built based on a 156kHz, Q-switched pulse signal. In the experiment, average output power of 1.32W was obtained and the frequency spectra and time domain waveform of serial SBS was observed. The experimental results are conformal to the theoretical results, which proves the validity of the modified model.

Key words: fiber amplifier; stimulated Brillouin scattering; finite difference method; master oscillator power amplifier

引言

在基于双包层光纤的包层抽运技术日新月异的情况下,光纤激光器和光纤放大器的输出功率不断得到提高,脉冲激光的单脉冲能量和峰值功率也不断提高^[1-2],在医疗、太空通信、自由空间光通信和波分复用光纤通信^[3-4]等领域都具有重要应用。当前研究的增益介质主要为掺 Yb 和 Er/Yb 共掺两种双包层光纤,由于 Er/Yb 共掺双包层光纤的辐射波长在 1.5 μ m 波段,对人眼相对安全,更适合在实际中应用,近些年得到了较快的发展并已经有商用产品。Er/Yb 共掺窄脉宽高功率脉冲放大因其在激光雷达、加工、激光、非线性频率变换等方面的独特作用,最近也得到了快速发

展,单脉冲能量已经达到了 1.5mJ^[5]。在高功率窄脉冲(纳秒级)放大的过程中,光脉冲信号的峰值功率可以达到千瓦级甚至兆瓦级,如此高的峰值功率,会激发出光纤中各种非线性效应,如受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)、受激喇曼散射、自相位调制等,最终导致输出放大脉冲信号性能劣化。在这些非线性效应中,SBS 因为其较低的激发阈值,很高的增益系数和对信号光功率的较大影响而成为需要考虑的主要因素之一^[6]。SBS 一旦激发,就会将大部分的信号光功率转移到后向传输的斯托克斯波,使输出信号光单脉冲能量和峰值功率都将得到限制,如何抑制 SBS 成为设计高功率脉冲光纤放大器的关键。因此,正确地模拟在高功率光脉冲放大过程中,不同光纤参量对 SBS 的影响和抑制程度,以及 SBS 对某一特定光纤放大器的影响程度,对放大器设计和揭示脉冲放大器中的非线性效应的产生过程都有重要指导作用。已经有很多关于光纤放大器中分析 SBS 现象的理论模

作者简介:周雷(1982-),男,博士研究生,主要从事光纤通讯、高功率光纤放大器方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: jpnjing@tju.edu.cn

收稿日期:2008-11-08;收到修改稿日期:2008-12-11

型,但是这些模型都是假设光纤放大器的增益沿着光纤长度方向均衡分布,或者是建立在稳态的速率方程基础上^[6,9],而在高功率脉冲放大的过程中,沿光纤长度方向的增益和光功率都成为时间的函数而不是常数,在仿真计算时必须采用带时间项的速率方程和功率传输方程。作者提出了基于瞬态速率方程和瞬态SBS功率传输方程的理论模型,并实验进行了验证,理论分析与实验结果相吻合。

1 理论模型

为了具体考察高功率放大过程中SBS对放大器性能的影响,需要利用Er/Yb共掺双包层光纤中的动态速率方程,抽运光、信号光的瞬态功率传输方程,特别是这个模型还包含了通过反转粒子数消耗和信号光能量转移获得增益的两级斯托克斯光的瞬态功率传输方程。SBS引起的斯托克斯光会消耗一部分反转粒子数和转移一部分信号光能量,那么在进行数值建模的时候体现在功率传输方程中的情况,就是在信号光的方程中添加斯托克斯增益与损耗项,并在斯托克斯波功率方程中加入增益介质增益项和信号光功率转移项,本文中只考虑了两级斯托克斯波的功率传输方程,考虑多级斯托克斯光只需添加各个级次的斯托克斯波功率传输方程即可^[10]:

$$\frac{\partial N_1(z,t)}{\partial t} = \left[W_{21}(z,t) + \frac{1}{\tau_{21}} \right] N_2(z,t) - [W_{12}(z,t) + R_{13}(z,t)] N_1(z,t) - C_{cr} N_1(z,t) N_6(z,t) \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2(z,t)}{\partial t} = W_{12}(z,t) N_1(z,t) - \left[W_{21}(z,t) + \frac{1}{\tau_{21}} \right] N_2(z,t) + \frac{N_3(z,t)}{\tau_{32}} \quad (2)$$

$$N_1(z,t) + N_2(z,t) + N_3(z,t) = N_{Er} \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_6(z,t)}{\partial t} = R_{56}(z,t) N_5(z,t) - R_{65}(z,t) N_6(z,t) - \frac{N_6(z,t)}{\tau_{65}} - C_{cr} N_1(z,t) N_6(z,t) \quad (4)$$

$$N_5(z,t) + N_6(z,t) = N_{Yb} \quad (5)$$

$$\frac{dP_p^+(z,t)}{dz} = \Gamma_p [\sigma_{65}(\nu_p) N_6(z,t) - \sigma_{56}(\nu_p) N_5(z,t)] P_p \quad (6)$$

$$\frac{dP_s^+(z,t)}{dz} = \Gamma_s [\sigma_{21}(\nu_s) N_2(z,t) - \sigma_{12}(\nu_s) N_1(z,t)] \times P_s^+(z,t) - g_{SBS} \Gamma_{SBS} P_s^+(z,t) P_{SBS1}^-(z,t) - g_{s,SBS} P_s^+(z,t) \quad (7)$$

$$- \frac{dP_{SBS1}^-(z,t)}{dz} = \Gamma_{SBS1} [\sigma_{21}(\nu_{SBS1}) N_2(z,t) - \sigma_{12}(\nu_{SBS1}) \times$$

$$N_1(z,t)] P_{SBS1}^-(z,t) + g_{SBS} \Gamma_{SBS} P_{SBS1}^-(z,t) [P_s^+(z,t) - P_{SBS2}^+(z,t)] + g_{s,SBS} [P_s^+(z,t) - P_{SBS1}^-(z,t)] \quad (8)$$

$$\frac{dP_{SBS2}^+(z,t)}{dz} = \Gamma_{SBS2} [\sigma_{21}(\nu_{SBS2}) N_2(z,t) - \sigma_{12}(\nu_{SBS2}) N_1(z,t)] P_{SBS2}^+(z,t) + g_{SBS} \Gamma_{SBS} P_{SBS2}^+(z,t) \times P_{SBS1}^-(z,t) + g_{s,SBS} [P_{SBS1}^-(z,t) - P_{SBS2}^+(z,t)] \quad (9)$$

(注:方程组经过了相应的坐标变换: $\pm \frac{dP_i^+}{dz} \equiv \pm \frac{dP_i^+}{dz} +$

$\frac{n_i}{c} \frac{dP_i^+}{dt}$)。式中, N_1, N_2, N_3 为Er离子各能级上的粒子

数, N_5, N_6 为Yb离子各能级上的粒子数, N_{Yb}, N_{Er} 分别为Yb离子和Er离子掺杂浓度; τ_{21}, τ_{32} 为Er离子激发态和亚稳态能级粒子寿命, τ_{65} 是Yb离子上能级粒子寿命; W_{21}, W_{12} 是Er离子在信号光作用下能级间的受激辐射和受激吸收几率; R_{56}, R_{65} 分别为Yb离子在抽运光作用下的受激吸收和受激辐射几率; $P_p, P_s, P_{SBS1}^-, P_{SBS2}^+$ 分别为抽运光功率、信号光功率、反向传输的第1级斯托克斯光功率和正向传输的第2级斯托克斯光功率, C_{cr} 为弛豫系数; $\Gamma_p, \Gamma_s, \Gamma_{SBS1}, \Gamma_{SBS2}$ 是抽运光、信号光、反方向传输的斯托克斯光的功率交叠因子; $\sigma_{12}(\nu_s), \sigma_{21}(\nu_s)$ 为Er离子能级对信号光的吸收截面和发射截面; $\sigma_{56}(\nu_p), \sigma_{65}(\nu_p)$ 为Yb离子能级对抽运光的吸收截面和发射截面; $\sigma_{12}(\nu_{SBS1}), \sigma_{21}(\nu_{SBS1}); \sigma_{12}(\nu_{SBS2}), \sigma_{21}(\nu_{SBS2})$ 分别为Er离子能级对第1级斯托克斯光和第2级斯托克斯光的吸收截面和发射截面; n 为折射率, c 是真空中光速。

(1)式~(5)式为Er/Yb共掺光纤中带时间项的速率方程, (6)式~(9)式分别为抽运光、信号光、反向传输的第1级和正向传输的第2级斯托克斯光的瞬态功率传输方程。从(8)式可以看出,第1级反向传输的斯托克斯光增益由动态粒子数消耗项 $\Gamma_{SBS1} [\sigma_{21}(\nu_{SBS1}) N_2(z,t) - \sigma_{12}(\nu_{SBS1}) N_1(z,t)] P_{SBS1}^-(z,t)$ 和动态信号光能量转移项 $g_{SBS} \Gamma_{SBS} P_{SBS1}^-(z,t) [P_s^+(z,t) - P_{SBS2}^+(z,t)] + g_{s,SBS} [P_s^+(z,t) - P_{SBS1}^-(z,t)]$ 两部分组成。由于SBS增益带宽非常窄,约50MHz,自发辐射对其影响可以在本模型中忽略。其中 $\Gamma_{SBS} = 1/A_{eff}, A_{eff}$ 为有效纤芯面积; g_{SBS} 为SBS增益系数,与信号光带宽有关; $g_{s,SBS} = g_{SBS} \Gamma_{SBS} h\nu \Delta\nu_{in}$, h 是普朗克常量, ν 为信号光频率, $\Delta\nu_{in}$ 为被散射的输入信号光带宽。

(1)式~(9)式是含有关于时间和空间的偏微分方程组,解决这样的问题,采用了常用的有限时域差分法进行数值求解。

选取信号光波长为1550nm、输入放大系统的峰值功率为5W的高斯型脉冲,脉冲宽度为100ns,脉冲重复频率为60kHz;抽运光波长为915nm,注入放大系统的平均抽运功率为10W。光纤长度选择3.5m,纤芯直

径 $8\mu\text{m}$, 信号源的带宽为 50MHz 。其中输入信号的波形如图 1 所示。

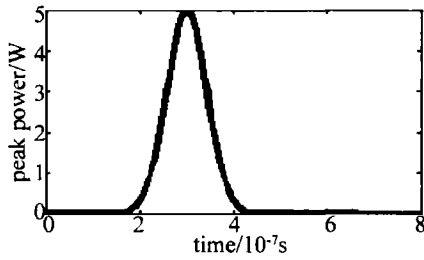


Fig. 1 Initial input pulse

首先将脉冲信号输入忽略 SBS 非线性效应影响的模型中进行计算, 最后输出信号的峰值功率约为 242W , 输出的平均功率约为 1.5W 脉冲能量约为 $24\mu\text{J}$, 脉冲波形如图 2a 所示。

接下来将信号光输入到带有 SBS 效应的模型中进行计算, 得到输出信号的峰值功率由于 SBS 的影响仅为 50W , 峰值功率降低了很多, 如图 2b 所示。这时通过计算可知 SBS 的平均功率为 $1.68 \times 10^{-4}\text{W}$, 而信号光的平均输出功率约为 0.3W , 脉冲能量约为 $5\mu\text{J}$ 。但由于 SBS 功率仍较低, 所以没有影响到放大后脉冲的时域波形。

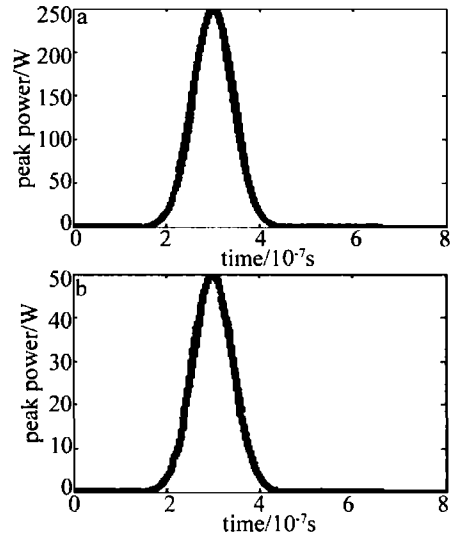


Fig. 2 a—amplified pulse without SBS b—amplified pulse including SBS

下面分析在不同重复频率情形下, 受激布里渊散射对脉冲信号输出的影响。在其余参量不变的情况下, 分别选择重复频率为 60kHz , 100kHz , 500kHz , 计算结果如图 3 所示。

可以看出, 随着重复频率的增加, 输出信号的平均功率不断上升, 这一方面是由于每秒钟输出的具有相

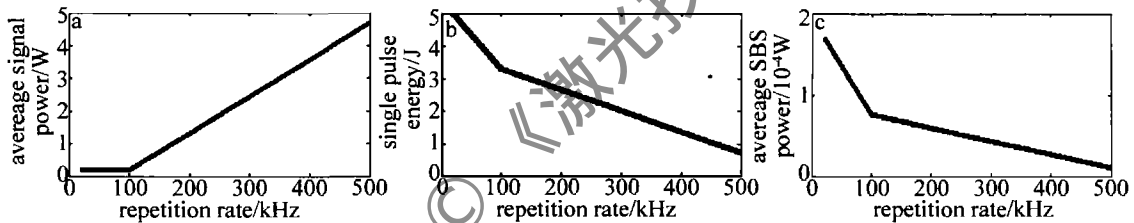


Fig. 3 Influence of different repetition rate on the signal and SBS

同峰值的脉冲数目增多, 另一方面从图 3b 图中可以看出, 此时随着重复频率的增加单脉冲能量不断下降, 即其峰值功率不断降低, 所以使 SBS 的产生受到了抑制, 这也造成了随着重复频率的增加输出信号的平均功率得到了提高。但是由于脉冲重复频率增高时, 上能级粒子数的反转跟不上单位时间内单脉冲数量的增长, 从而造成重复频率越高时, 后面的单脉冲放大后输出的能量就越小。

2 实验研究

实验结构如图 4 所示, 采用两个输出功率为 5W 的 915nm 多模抽运源, 通过 $(2+1) \times 1$ 耦合器与信号

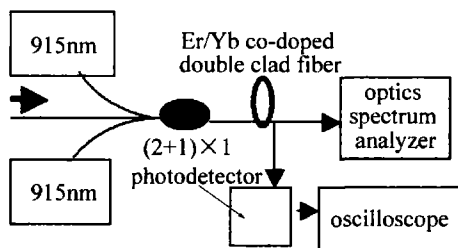


Fig. 4 Experiment configuration

光一起耦合入 8m Er/Yb 共掺双包层光纤中, 纤芯直径为 $10\mu\text{m}$, 数值孔径 0.19 。纤芯镱离子掺杂浓度 $2.685 \times 10^{26}/\text{m}^3$, 铒离子掺杂浓度 $3.08 \times 10^{25}/\text{m}^3$ 。经过放大后的信号通过光谱仪观测其光谱, 又经过光电转换后在示波器上观察其时域波形。信号光采用了重复频率为 156kHz , 脉冲宽度约 $3\mu\text{s}$, 中心波长为 1555nm 的调 Q 脉冲序列。

图 5 为不同抽运功率时输出功率相对于输入调 Q 脉冲平均功率的变化, 可见放大系统的输出功率随着

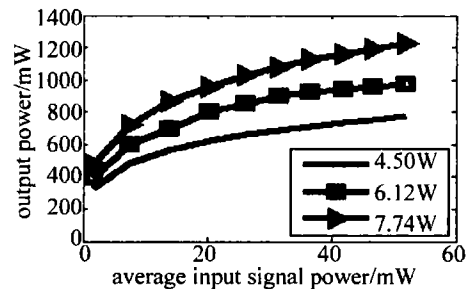


Fig. 5 Output signal power under different pump power

抽运功率的提高而不断提高, 且在最大抽运功率为 7.74W 的情况下并未出现饱和, 加大抽运功率, 仍会提

高输出功率。

图6a为放大前的脉冲波形,图6b为最大抽运时的放大脉冲波形,可见放大前后,脉冲波形没有明显变化,脉宽仍维持在 $3\mu\text{s}$ 。

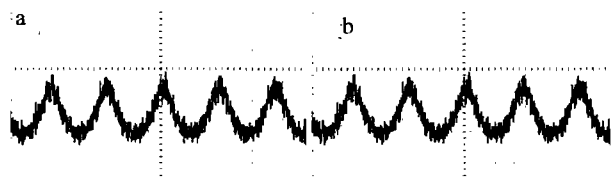


Fig. 6 a—input signal b—amplified signal

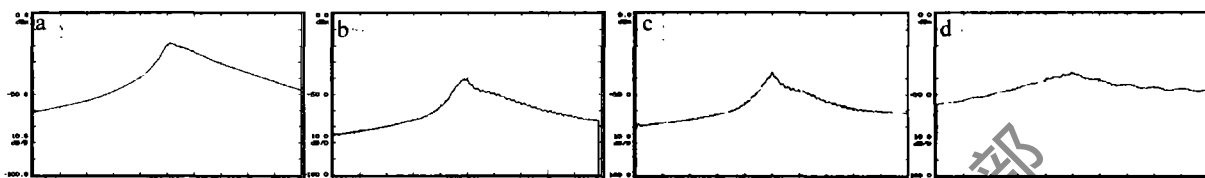


Fig. 7 Input signal spectrum

a—978mW output power spectrum b—1.32W output power spectrum c—1.32W output power detail spectrum d—the exact spectral at 1.32W output power

但由于随着级次的增加,布里渊散射功率急剧下降,且本实验中所用双包层光纤长度较短,削弱了布里渊散射的增长,还不至于影响信号光的放大,从而导致了前面提到的在时域上调Q脉冲波形没有发生变化,因为前面的理论分析采用的是脉宽为100ns的高斯脉冲,而本实验中采用的是脉宽为 $3\mu\text{s}$ 的调Q脉冲,脉宽较宽,同时调Q脉冲的带宽也比理论分析时的带宽要宽,导致SBS阈值上升,产生的SBS信号微弱,没有影响到信号光脉冲的输出功率。根据理论模型和实验结果可以预见:如果继续加大抽运功率,或者减小信号源带宽,各级布里渊散射功率会逐渐加大,进而影响到放大脉冲信号的时域波形和平均输出功率。也就是说,在高功率脉冲放大器的设计中,光纤长度、信号光带宽、脉冲宽度都会影响到SBS的大小,从而影响放大器的输出性能。

3 结论

建立了基于Er/Yb共掺双包层光纤中动态速率方程的SBS瞬态模型,同时包括了SBS的信号光能量转移和反转粒子数消耗两个增益获得过程,并采用有限差分法在理论上分析了SBS在高功率、低重复频率、窄脉冲光纤放大器中对输出脉冲信号单脉冲能量、峰值功率、时域波形的影响。搭建主振荡功率放大实验平台,采用重复频率为156kHz的调Q脉冲信号进行了高功率脉冲放大实验,得到了1.32W的平均功率输出,观察到产生的SBS级联频谱和时域波形情况,实验结果与理论模型相吻合。并且指出了信号光带宽、脉冲宽度、光纤长度对SBS的影响程度,进而对放大器性能的影响程度,建立的模型对高功率脉冲光纤

图7为初始调Q脉冲光谱和不同输出功率时的放大脉冲光谱。比较图7a、图7b、图7c可以看出,放大后的调Q脉冲光谱产生了变化,在长波部分产生了很多有规律的波动,并且产生的这些功率起伏随着抽运功率的增加和脉冲输出功率的增加而加剧。图7d为输出最大平均功率1.32W时的脉冲光谱细节展开图,可以发现,相邻光谱尖峰之间的频率均相差约为11.2GHz(约为0.1nm),与布里渊散射各级次之间的频移相符。即在此时,由于信号峰值功率很高,已经激发了多级的布里渊散射,这与前面的理论分析符合。

放大器的设计具有重要意义。

参考文献

- [1] CHEN M Y, CHANG Y Ch, ALMANTAS G. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200 μm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2005, 30(4): 358-360.
- [2] YE Ch G, YAN P, GONG M L, et al. Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(5): 249-250.
- [3] PARK N, WYSOCKI P, PEDRAZZANI R. High-power Er/Yb-doped fiber amplifier with multichannel gain flatness within 0.2dB over 14nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1996, 8(9): 1148-1150.
- [4] PASQUALE F D, GRASSO G, MELI F, et al. 23dBm output power Er/Yb co-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1575nm ~ 1605nm wavelength region [R]. New York: Optical Fiber Communication Conference and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, 1999: 4-6.
- [5] PHILIPPOV V, SAHU J K, CODEMARD Ch, et al. All-fiber 1.15mJ pulsed eye-safe optical source [J]. *Proc SPIE*, 2004, 5335: 1-7.
- [6] FISHMAN D A, NAGEL J A. Degradations due to stimulated Brillouin scattering in multigigabit internal-modulated fiber-optic systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(11): 1721-1728.
- [7] KULCSAR G, JAOUEN Y, CANAT G. Multiple-stokes stimulated Brillouin scattering generation in pulsed high-power double-cladding Er³⁺-Yb³⁺ co-doped fiber amplifier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2003, 15(6): 801-803.
- [8] KOVALEY V I, HARRISON R C. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(2): 161-163.
- [9] PANNELL C N, TUSSELL P St J, NEWSON T P. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers: the effects of optical amplification [J]. *J O S A*, 1993, B10(4): 684-690.
- [10] BRILLIANT N A. Stimulated Brillouin scattering in a dual-clad fiber amplifier [J]. *J O S A*, 2002, B19(11): 2551-2554.