

文章编号: 1001-3806(2012)02-0191-03

## 单频脉冲光纤放大器中的 SBS 效应实验研究

何幸锴 冯力天 沈琪皓 伍波兰 戈\* 周鼎富  
(西南技术物理研究所, 成都 610041)

**摘要:** 为了研究受激布里渊散射(SBS)效应对单频脉冲光纤激光放大器中脉冲波形的影响,搭建了单频脉冲光纤激光放大器系统。实验中观测到脉冲波形的畸变,继续提高功率,畸变处出现峰值功率极高的尖峰,分析认为,光纤中的二次受激布里渊散射导致了尖峰脉冲出现。为验证这一结论,构造包含二阶 Stokes 波的耦合方程组,进行了模拟仿真。结果表明,该峰值功率极高的尖峰正是 SBS 效应的二阶 Stokes 波。

**关键词:** 激光技术; 光纤激光放大器; 受激布里渊散射; 波形畸变; 二阶 Stokes 波

**中图分类号:** O437.2; TN722 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.011

### Experimental study about effect of stimulated Brillouin scattering in single frequency pulsed fiber amplifiers

HE Xing-kai, FENG Li-tian, SHENG Qi-hao, WU Bo, LAN Ge, ZHOU Ding-fu  
(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the stimulated Brillouin scattering (SBS) effect on the pulse form of pulsed fiber laser amplifiers, a single frequency fiber laser amplifier system was built and its pulse waveform distortion was observed in the experiment. If continuing to improve pump power, a high power spike appeared at the distorted location, which was induced by the second-order SBS effect in a fiber. To verify this conclusion, the coupled equations contains the second-order Stokes wave were built and simulated and the results showed that the high peak power spike was the second-order Stokes wave of SBS effect.

**Key words:** laser technique; fiber laser amplifier; stimulated Brillouin scattering; waveform distortion; second-order Stokes wave

### 引言

在激光雷达、激光传感、光谱学等领域,高功率单频激光有非常广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。由于在高功率、线宽特性和光束质量等方面的优势,单频光纤激光器成为了人们的研究热点。随着功率的不断提高,光纤中出现了非线性效应。对于单频激光,受激布里渊散射阈值极低,它将正向传输的信号光散射为反向传输的 Stokes 光,最终导致输出信号功率降低。因此,受激布里渊散射(stimulated Brillouin scattering, SBS)效应成为单频光纤激光放大器提高输出功率的主要障碍,如何抑制 SBS,提高输出功率成为人们研究的重点<sup>[3-4]</sup>。目前国际上纳秒级单频脉冲光纤放大器峰值功率已经达到千瓦级别<sup>[5-6]</sup>。

由于 SBS 具有极高的增益系数,所以对于数千米

长的单模传输光纤, SBS 阈值仅有几个毫瓦<sup>[7]</sup>, 光纤中传输的激光功率受到了限制。对于光纤长度仅有几米的脉冲光纤放大器,由于激光峰值功率较高,单模纤芯太小以至光功率密度极高,同样会激发 SBS 效应,从而导致脉冲波形畸变<sup>[8]</sup>,限制了放大器输出功率的提高。

作者建立了单频脉冲光纤激光放大器系统,实验观察了 SBS 效应对脉冲放大波形的影响。通过建立包含二阶 Stokes 波的耦合方程组模型,研究了光纤放大器中 SBS 的动态特性,模拟了瞬态 SBS 效应对脉冲的影响。

### 1 系统结构设计

实验装置如图 1 所示,由种子源、预放大级、调制系统和两级脉冲放大器组成。输出的激光脉冲由探测器接收,示波器显示其脉冲波形。

种子源是 RIO 公司生产的带尾纤输出的单频连续半导体激光器,其输出功率为 10mW,线宽为 2.9kHz。预放大级采用单模掺铒光纤放大器,目的是将连续的种子激光放大,以免调制后的脉冲信号功率

作者简介:何幸锴(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤激光放大器。

\* 通讯联系人。E-mail: lda\_209@hotmail.com

收稿日期:2011-05-11;收到修改稿日期:2011-05-17

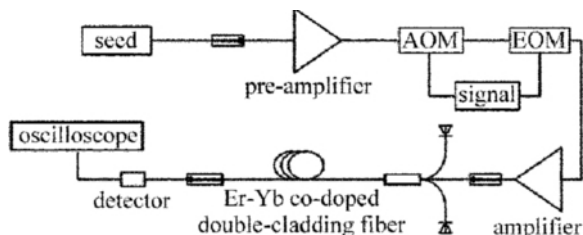


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

太小,导致放大后信噪比太低。放大器的抽运源采用单模尾纤输出,波长 980nm,功率 300mW 的半导体激光器,信号光和抽运光通过波分复用器耦合到放大光纤中,并在输出端加上一滤波器滤除自发辐射。

调制系统采用声光调制器(acoustic-optic modulator, AOM)和电光调制器(electric-optic modulator, EOM)同时进行调制。其中 AOM 的优点是拥有极高的消光比(调制器开与关时通过得光强之比),一般达到 60dB 以上,缺点是调制的脉冲波形上升沿和下降沿很大,达到 100ns; EOM 的优点是调制带宽高,调制出的脉冲波形上升沿和下降沿小于 1ns,缺点是消光比低,仅 20dB 左右,不满足脉冲放大的要求。之所以选用两种调制器同时进行调制,是为了利用两种调制器各自的优点,得到上升沿和下降沿极小、消光比高的方波脉冲,这种方波脉冲边沿清晰,便于观察实验现象。

## 2 实验现象分析

AOM 和 EOM 由同步的信号发生器提供调制信号,将连续的单频激光调制为脉冲宽度 400ns(重复频率 10kHz)的方波脉冲信号(见图 2),其平均功率仅 50 $\mu$ W。

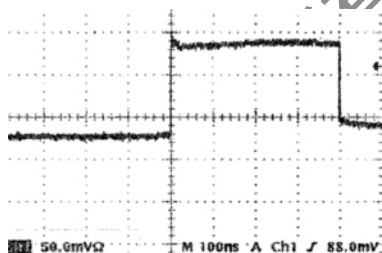


Fig. 2 Pulsed seed waveform

脉冲信号经过一级光纤放大器,实现了约 26dB 的信号增益,得到了平均功率 21mW 的脉冲输出。其波形如图 3 所示,脉冲的前沿高于后沿,这是由于脉冲前沿消耗了放大光纤中的上能级粒子数,导致后沿的增益小于前沿。

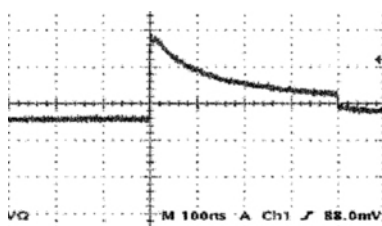


Fig. 3 Pulse waveform from the first order amplifier

将输出信号送入末级功率放大器,此级放大器采用辑镜共掺双包层光纤作为增益介质,两只多模尾纤输出的半导体激光器作为抽运源。随着抽运功率的增加,输出脉冲很快就出现了凹陷(见图 4),输出脉冲波形发生了畸变。

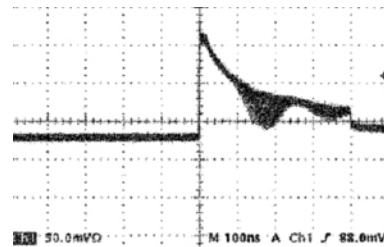


Fig. 4 Distorted waveform

抽运功率继续增大,输出脉冲出现了尖峰,如图 5 所示。尖峰出现在距信号脉冲前沿 110ns 处,宽度约 5ns。

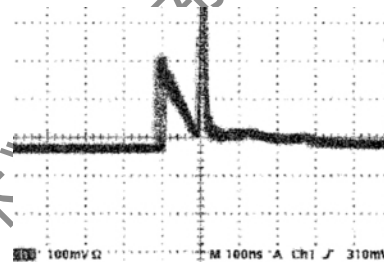


Fig. 5 A spike appeared in the pulse

使用示波器的单次扫描功能,观察到如下现象:

(1) 出现“尖峰”现象的脉冲只是所有脉冲中的小部分,其脉冲波形如图 6 所示;(2) “尖峰”出现的位置并不固定,相对于脉冲前沿在一个小范围内随机分布,由于示波器选择了脉冲中的“尖峰”作为触发电平,这导致图 5 中的波形前沿模糊;(3) 随着抽运功率的增加,脉冲出现“尖峰”的比例增大,“尖峰”的峰值功率也不断增加,直到所有脉冲都出现“尖峰”;(4) 在这个过程中,“尖峰”的峰值功率也不断升高,最终导致了烧断光纤的结果。

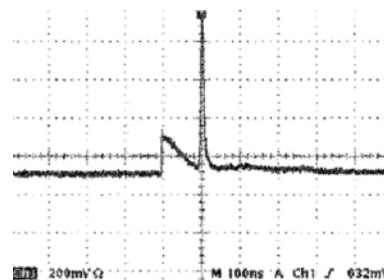


Fig. 6 Single scan pulse image from oscilloscope

分析认为是 SBS 效应造成这种现象。SBS 效应激发的反向 Stokes 波吸收信号光能量,导致输出脉冲波形发生畸变,出现如图 4 所示的输出波形。当反向 Stokes 波的功率足够高时,就会激发二次受激布里渊散射,产生与信号光传输方向相同的二阶 Stokes 波,二阶 Stokes 波与输出的信号脉冲叠加,产生了如图 5 的

输出脉冲波形<sup>[9]</sup>。

在 SBS 效应中,放大的 Stokes 波起源于自发的布里渊散射噪声,这导致 Stokes 波具有一定的随机性。另一方面,放大光纤中的脉冲信号本身存在一定的强度噪声,而反向 Stokes 波的增益系数与信号光强成正比,这导致信号光的强度噪声通过受激布里渊散射传递到 Stokes 波的过程中得到了指数级放大,使 Stokes 波表现出更大的随机性。正是这种随机性导致了每个输出脉冲波形略有不同,并且“尖峰”脉冲呈一定概率的随机出现。

为了验证脉冲放大过程中输出的“尖峰”现象来源于 SBS 效应的影响,下文对脉冲光纤放大器中的 SBS 效应进行了模拟仿真。

### 3 SBS 效应仿真验证

在放大光纤中,包含二阶 Stokes 波的耦合方程组如下:

$$\frac{\partial \Delta n(z,t)}{\partial t} = \frac{-2\sigma \cdot \Delta n(z,t) \cdot (I_p + I_{S1} + I_{S2})}{h\mu} \quad (1)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t}\right) I_p = -g_B I_p I_{S1} + \sigma \cdot \Delta n(z,t) \cdot I_p \quad (2)$$

$$\left(-\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t}\right) I_{S1} = g_B I_p (I_{S1} + I_n) + \sigma \cdot \Delta n(z,t) \cdot I_{S1} - g_B I_{S1} I_{S2} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t}\right) I_{S2} = g_B I_{S1} (I_{S2} + I_n) + \sigma \cdot \Delta n(z,t) \cdot I_{S2} \quad (4)$$

式中  $\Delta n(z,t)$  表示反转集居数密度,  $\sigma$  表示信号光的发射截面,  $I_p$  表示信号光强,  $I_{S1}$  和  $I_{S2}$  分别表示反向 Stokes 波光强和二阶 Stokes 波光强,由于 Stokes 波和信号光波长十分接近,因此,其发射截面与信号光相同,  $h$  代表普朗克常量,  $\mu$  代表信号光频率,  $v$  代表光纤中的光速,  $g_B$  表示布里渊增益系数,  $I_n$  表示自发的布里渊散射噪声<sup>[10]</sup>。

(1) 式表明了放大光纤中上能级粒子数的损耗,同时也说明了上能级粒子对光纤中传输的信号光和 Stokes 光的增益作用。(2) 式~(4) 式分别是信号光、反向 Stokes 光、二阶 Stokes 光在放大光纤中的传输方程。信号光在传输过程中激发 SBS 效应使能量转移到反向 Stokes 光;反向 Stokes 光在吸收信号光能量放大的情况下,再次激发 SBS 效应使能量转移到二阶 Stokes 光。

通过模拟运算,二阶 Stokes 波的脉冲波形如图 7

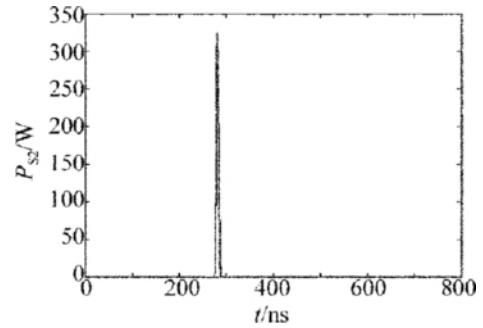


Fig. 7 Second-order Stokes wave

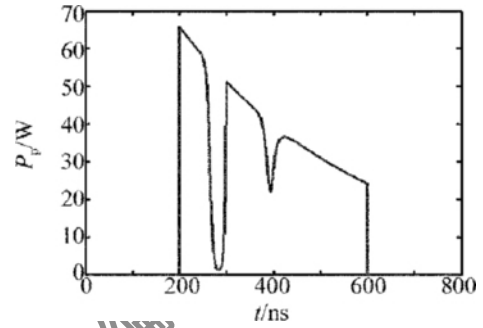


Fig. 8 Pulse sharp of output signal

所示,同时输出畸变的信号脉冲波形,见图 8。从图中可以发现,二阶 Stokes 波出现在信号脉冲产生第 1 个凹陷的位置。

图 7 中的尖峰拥有极高的峰值功率,脉宽约 3ns。模拟运算的结果证明了实验中脉冲波形的畸变是由于 SBS 效应造成的,示波器显示的尖峰脉冲波形(见图 6)是由于 SBS 效应激发的二阶 Stokes 波与信号脉冲叠加在一起产生的结果。

### 4 结论

实验搭建了脉冲光纤激光放大器,并且同时采用 AOM 和 EOM 作为调制系统,得到方波脉冲,研究了 SBS 效应对单频激光脉冲波形的影响。实验中观测到了 SBS 效应导致脉冲波形畸变,并出现尖峰的现象。通过研究包含二阶 Stokes 波的 SBS 效应耦合方程组并进行模拟运算,证明了激光脉冲上出现尖峰是 SBS 效应激发的二阶 Stokes 波与信号脉冲叠加在一起产生的结果。

#### 参 考 文 献

- [1] CANAT G, LOMBARD L, DOLFI A, et al. High brightness 1.5 μm pulsed fiber laser for lidar: from fibers to systems [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2008, 27(5): 422-439.
- [2] LI Zh, RAO J H, LI H F. Suppression of SBS in fiber hydrophone by optical isolators based on Michelson fiber interferometer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(2): 178-182 (in Chinese).
- [3] KOVALEY V I, HARRISON R G. Suppression of stimulated Brillouin scattering in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(2): 161-163.
- [4] ZHOU L, NING J P, CHEN Zh, et al. Stimulated Brillouin scattering in Er/Yb co-doped fiber pulse amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(5): 482-485 (in Chinese).

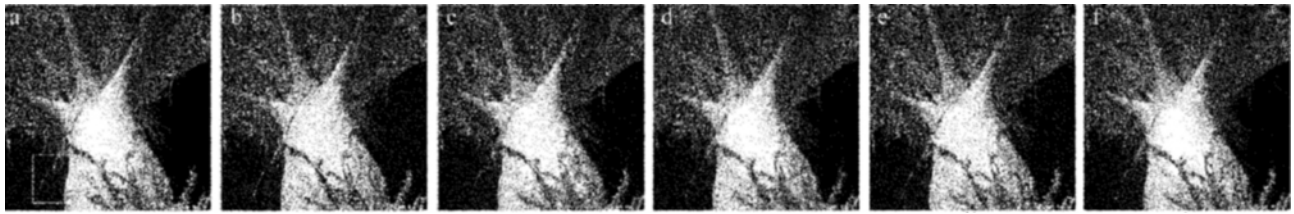


Fig. 2 Comparison of denoised result

a—original image b—noisy image c—result of TV model d—result of P-harmonic model e—result of Corina model f—the result of our model

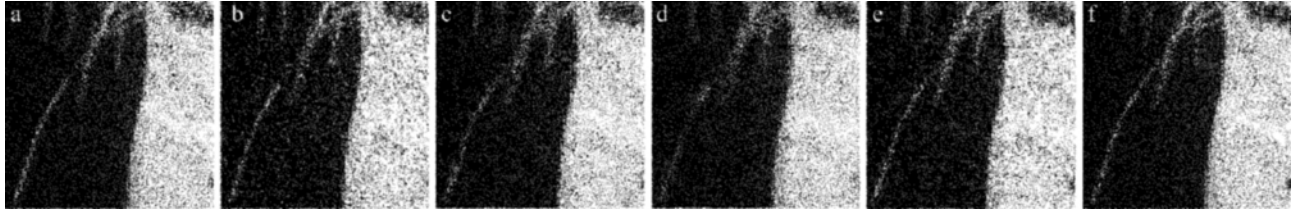


Fig. 3 Comparison of fine structure of the denoised result

a—original image b—noisy image c—result of TV model d—result of P-harmonic model e—result of Corina model f—the result of our model

## 4 结 论

在经典的全变分去噪模型基础上,针对图像特征对扩散函数以及正则项和忠诚项的相关参量进行了改进,得到了一个全新的去噪模型。由去噪效果的对比实验可以看出,本文中的算法无论在画质还是信噪比以及收敛时间上都较其它对比的算法有了一定提高。

但是从本文中算法的修复结果也可以看出,该算法对图像的纹理部分去噪效果不是太理想,下一步的工作是在算法中引入一个鲁棒的纹理检测算子,使本算法对纹理图像去噪也有更好的效果。

### 参 考 文 献

- [1] RUDIN L I, OSHER S, FATEMI E. Nonlinear total variation based noise removal algorithms[J]. *Physica* 1992, D60(1/4): 259-268.
- [2] OSHER S, BURGER M, GOLDFARB D, *et al.* An iterative regularization method for total variation based on image restoration[J]. *Multi-scale Modeling and Simulation* 2005, 4(2): 460-489.
- [3] NIKOLOVA M. Minimizers of cost-functions involving nonsmooth data-fidelity terms[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Numerical Analysis* 2002, 40(3): 965-994.
- [4] CHAN T, ESEDOGLU S, PARK F, *et al.* Recent developments in total variation image restoration [C]//*Handbook of Mathematical Models in Computer Vision*. New York: Springer, 2004: 1-10.
- [5] CHAN T, ESEDOGLU S. Aspects of total variation regularized  $L^1$  function approximation[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal of Applied Mathematics* 2005, 65(5): 1817-1837.
- [6] GILBOA G, SOCHEN N, ZEEVI Y Y. Variational denoising of partly textured images by spatially varying constraints[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, 15(8): 2281-2289.
- [7] LI F, SHEN C M, FAN J S, *et al.* Image restoration combining a total variational filter and a fourth-order filter[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 2007, 18(4): 322-330.
- [8] LYSAKER M, TAI X C. Iterative image restoration combining total variation minimization and a second-order functional[J]. *International Journal of Computer Vision* 2006, 66(1): 5-18.
- [9] ZHANG H Y, WU B, PENG Q C, *et al.* Digital image inpainting based on p-harmonic energy minimization[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2007, 3(4): 525-530.
- [10] DRAPARA C S. A nonlinear total variation-based denoising method with to regularization parameters[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(3): 582-286.
- [11] CHEN Q, MONTESINOS P, SUN Q S, *et al.* Ramp preserving perona-malik model[J]. *Signal Processing*, 2010, 90(6): 1963-1975.
- [12] BARBU T, BARBU V, BIGA V, *et al.* A PDE variational approach to image denoising and restoration[J]. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2009, 10(3): 1351-1361.
- [13] WAN J, ZHANG X H, RAO J H. Application of wavelet threshold denoising in the scattering optical wake flow signal processing[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(4): 468-471 (in Chinese).
- [14] LU Zh L, QIAN J Sh, LI L D. Image inpainting based on adaptive total variation model[J]. *The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2011, E94-A(7): 1608-1612.
- [5] CANAT G, JETSCHKE S, UNGER S, *et al.* Multifilament-core fibers for high energy pulse amplification at 1.5  $\mu\text{m}$  with excellent beam quality[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(22): 2701-2703.
- [6] PAYNE D N, JEONG Y, NILSSON J, *et al.* Kilowatt-class single-frequency fiber sources[J]. *Proceedings of SPIE*, 2005, 5709: 133-141.
- [7] SMITH R G. Optical power handling capacity of low loss optical fibres as determined by stimulated Raman and Brillouin scattering[J]. *Applied Optics*, 1972, 11(11): 2489-2494.
- [8] HE X K, HOU H, FENG L T, *et al.* Experimental study of 1550nm single frequency pulsed fiber laser amplifiers[J]. *Laser Technology*, 2011, 35(2): 145-147 (in Chinese).
- [9] KULCSAR G, JAOUËN Y, CANAT G, *et al.* Multiple-Stokes stimulated Brillouin scattering generation in pulsed high-power double-cladding  $\text{Er}^{3+}$ - $\text{Yb}^{3+}$  codoped fiber amplifier[J]. *Photonics Technology Letters*, 2003, 15(6): 801-803.
- [10] PANNELL C N, RUSSELL P St J, NEWSON T P. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers: the effects of optical amplification[J]. *Journal of the Optical Society of America* 1993, 10(4): 684-690.

(上接第 193 页)