

文章编号:1004-4213(2011)08-1181-5

百皮秒脉冲放大中自相位调制效应实验研究

常丽萍¹, 范薇², 郭淑琴¹

(1 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800)

摘 要:利用掺镱双包层光纤放大器对百皮秒单脉冲(重复频率 1 Hz)进行了放大实验,分析了其放大过程中自相位调制对脉冲时域和频域特性的影响.采用小芯径(纤芯直径 6.5 μm)掺镱双包层光纤作为增益介质,研究了放大器中从小信号增益到增益深度饱和整个变化过程中自相位调制引起的频谱展宽效应,并分析了 SPM 引起的脉冲波形和频谱光强分布的变化.采用布喇格光纤光栅扫描方法观察了其光谱的变化,解决了单脉冲光谱不易测量的问题.结果表明:区别于无源光纤中的自相位调制效应,随着抽运功率的增加,百皮秒脉冲放大过程中增益饱和效应和自相位调制效应的共同作用,使脉冲频谱分裂成不对称双峰结构,且光强分布先向短波后逐渐向长波集中.

关键词:激光技术;双包层光纤放大器;自相位调制;增益饱和

中图分类号: TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114008.1181

0 引言

近几年来,作为当今光电信息领域较前沿的方向之一,脉冲双包层光纤放大器日益成为国际上研究的热点.光纤激光器和放大器具有结构紧凑、可靠性高、效率高和散热性好等优点,而掺镱光纤能级结构简单,具有很宽的抽运和发射光谱,镱(Yb^{3+})上能级寿命较长,特别适合于连续光和脉冲光高功率放大^[1-3].所以高功率光纤激光器和放大器大多选用掺镱双包层光纤作为增益介质,但双包层光纤由于纤芯尺寸较小,一般为几微米至几十微米,激光能量被限制在光纤有限的纤芯内,进一步增大单脉冲能量和提高峰值功率,容易激发强的非线性效应^[4-5],如受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)、受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)、自相位调制(Self Phase Modulation, SPM).为了提高脉冲峰值功率,需要采取一定的非线性管理技术^[6].皮秒脉冲激光放大过程中的非线性效应主要表现为自相位调制^[7],它是光束质量下降,制约峰值功率进一步提高的主要因素.目前,已有不少关于皮秒(ps)脉冲放大器中自相位调制效应的研究报告^[8-10],但国内研究主要仅限于无源光纤中的 SPM 效应分析或考虑到增益效应的 SPM 效应的理论分析^[11],在实验上研究 ps 脉

冲放大中 SPM 效应的报道较少.

在激光惯性约束核聚变高功率激光驱动装置的前端系统中,实现激光整形脉冲和激光探针精确时间同步都需要高能量脉冲信号^[12].本文从实验上研究了掺镱双包层光纤放大器中单脉冲百皮秒脉冲放大时自相位调制对脉冲时域和频域特性的影响,为了解决单脉冲光谱不易测量的问题,提出采用布喇格光纤光栅扫描方法测量光谱的方法,分析了放大器从小信号增益到增益深度饱和整个变化过程中自相位调制(SPM)效应引起的脉冲时域波形和频域光强分布的变化.

1 百皮秒脉冲放大实验装置

图 1 所示为百皮秒单脉冲光放大实验的总结构.皮秒锁模激光器输出平均功率 420 mW,重复频率 78 MHz,脉冲宽度 100 ps,通过电光开关选单系统,选出重复频率 1 Hz 的单个百皮秒脉冲,选单系统主要有薄膜偏振片 TFP_1 ,普克尔盒(Pockels cell),薄膜偏振片 TFP_2 组成,普克尔盒门打开时产生 $\lambda/2$ 相移, TFP_1 与 TFP_2 偏振方向正交;然后再经光纤耦合系统,不经电光开关选单时光纤耦合输出平均功率为 50 mW,脉冲能量 0.7 nJ,然后注入掺镱双包层光纤放大器(Yb-Doped Double-Clad Fiber Amplifier, YDDCFA)放大.

基金项目:浙江省自然科学基金(No. Y1090338)资助

第一作者:常丽萍(1980-),女,副教授,博士,主要研究方向为光纤放大器和传感器、通信与信号处理. Email: clping@zjut.edu.cn

收稿日期:2011-02-15;修回日期:2011-05-05

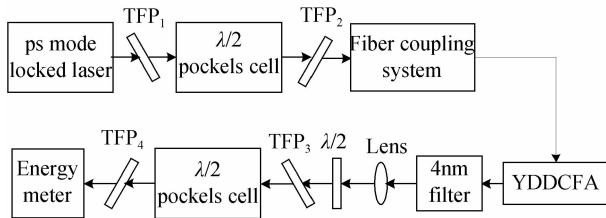


图1 百皮秒单脉冲放大总实验结构

Fig. 1 Experimental setup for the single hundred-picosecond pulse amplification

YDDCFA 实验结构如图 2. 其抽运源 LD 中心波长为 973.3 nm, 带宽 4.25 nm, 最大输出功率 6.5 W, 输入尾纤为 105/125, 数值孔径 0.22. 信号光经光纤分束器 85 : 15 分束, 前向 15% 端作为前向输入信号光监控, 后向 15% 端作为后向输出光监控端. 多模合束器信号输入光纤为普通单模光纤, 抽运光纤为 105/125 μm 多模光纤, 分别与合束器和 LD 尾纤参量匹配, 可直接熔接. 双包层光纤纤芯模场直径 6.5 μm , NA 为 0.12, 包层 130 μm , NA 为 0.46, 光纤长度 4 m. 输出采用光纤 PIN 光电探测器通过示波器观测脉冲波形.

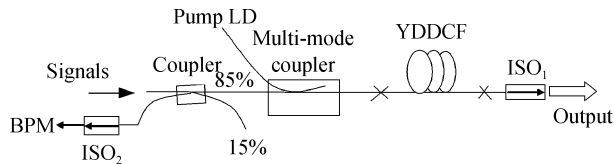


图2 YDDCFA 实验结构

Fig. 2 Experimental setup of YDDCFA (BPM: monitor of backward power)

2 实验结果和分析

2.1 脉冲波形的变化特性

图 3 为输入脉冲波形和放大后脉冲波形图. 考虑到光纤 PIN 光电探测器承受的最大峰值功率, 图中所示脉冲是输出放大脉冲先经过衰减器衰减后的相对值. 可以看出, 输入脉冲脉宽 100 ps, 抽运电流 4A 时, 输出能量 0.6 μJ , 脉宽 97 ps; 抽运电流 5.0 A

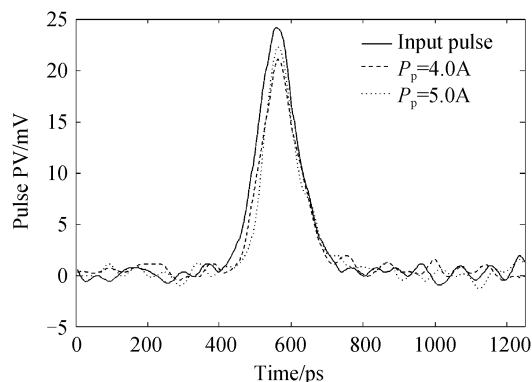


图3 输入脉冲波形与放大后脉冲波形图

Fig. 3 Input pulse waveform and the amplified pulse waveform

时, 输出能量 1.1 μJ , 脉宽 90 ps. 即随着脉冲输出能量的增加, 脉冲宽度逐渐被压缩, 脉冲前沿越来越陡, 脉冲波形不再对称.

由表 1 可看出, 随着抽运电流增大, 脉冲前沿和后沿同时逐渐变陡, 但前沿/后沿时间比呈递减趋势, 说明前沿增长速度要大于后沿. 脉冲前后沿表现出的这些特性主要是由放大器的增益引起的^[13]. 抽运功率小于 3.0 A 时, 放大器未进入饱和状态, 前沿和后沿增益差别不大, 前后沿时间与输入脉冲变化不大. 抽运电流 4.0 A、4.3 A 和 5.0 A 时, 由于放大器的增益饱和效应, 前沿比后沿获得更大的增益. 5.0 A 时放大器深度饱和, 脉冲后沿有拖长的趋势. 脉冲波形的变化特性也使放大器中 SPM 引起的光谱展宽表现出了不同的特性.

表 1 脉冲前后沿时间对比

Table 1 Comparison of the pulse rise time and fall time

Pump current/A	0	3.0	4.0	4.3	5.0
Rise time/ps	99.8	97.6	87.3	71.7	68.6
Fall time/ps	115.3	114.0	112.2	102.9	108.2
Rise/Fall	0.86	0.85	0.78	0.70	0.63

2.2 SPM 引起的光谱特性

SPM 是皮秒放大过程中的主要非线性效应之一. 它将产生频率啁啾, 在高功率光纤放大器中, SPM 使啁啾脉冲包络内不同时刻具有不同的瞬时频率, 脉冲各部位的增益不同, 脉冲放大不均匀, 频率啁啾和增益变化共同作用的结果使 SPM 所致信号光谱呈现不同的特性^[11].

目前实验室由于不具备测量高峰值功率单脉冲光谱的条件: 1) 现有光栅光谱仪可承受最高峰值功率只有 200 mW, 且单脉冲测量很难捕抓到信号光谱; 2) 光纤光谱仪分辨比较低 (0.5 nm), 很难观察到光谱的细节结构. 为了解决上述问题, 本文提出利用布喇格光纤光栅测量单脉冲光谱的方法. 光纤光栅是一种反射滤波器, 对处于光栅布喇格波长的光具有最大反射率, 通过对光纤光栅拉伸可实现布喇格波长的调谐, 具有较高的频率分辨率. 实验结构如图 4.

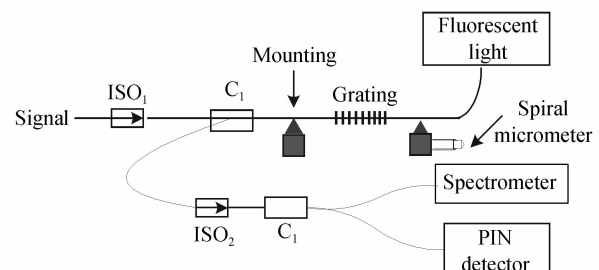


图4 光谱测量实验结构图

Fig. 4 Experimental configuration for the spectral measurement

实验中光纤光栅一端固定,另一端固定在千分尺上,通过千分尺拉伸光栅对其施加应力实现光栅中心波长的调谐,光纤光栅是利用准分子激光和相位板采用相位掩模技术进行刻写,其 3 dB 带宽为 0.19 nm. 在荧光源输入端输入荧光,通过隔离器 ISO₂,在光纤光栅的反射端利用日本安利公司 MS9710C 光谱仪观察光纤光栅中心波长,输入放大后的脉冲信号光,利用 PIN 光电管测量经光纤光栅反射后的脉冲峰值,边调谐边记录光栅中心波长和反射脉冲峰值,最后描出波长-脉冲峰值的曲线,得到信号光谱图. 图5为抽运电流 2.0 A、3.0 A、3.4 A

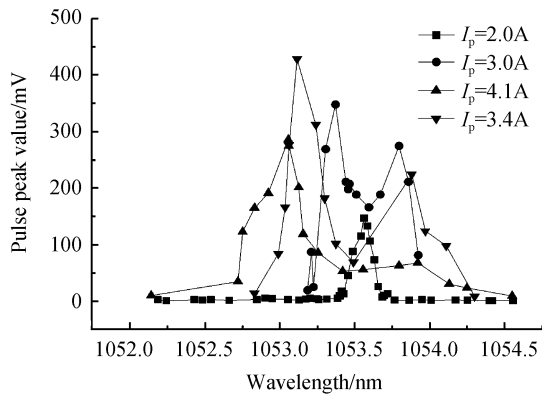


图5 不同抽运电流的输出信号光谱
Fig. 5 Output signal spectra under different the pump currents

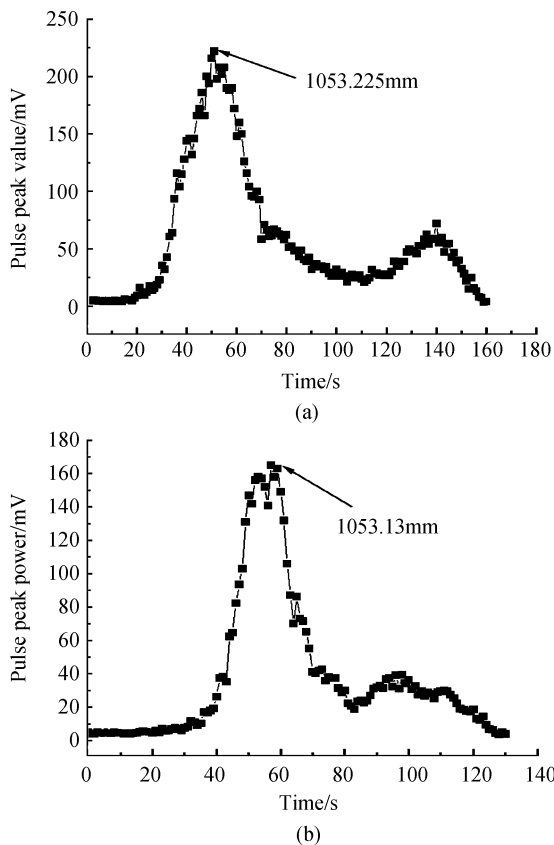


图6 抽运电流 3.5 A 和 3.8 A 时的输出信号光谱
Fig. 6 Output signal spectra at the pump current of 3.5 A and 3.8 A

和 4.1 A 时的测试光谱图,图 6 为抽运电流 3.5 A 和 3.8 A 光谱图.

实验中输入信号中心波长为 1 053.54 nm. 可看出,抽运电流 2.0 A 时,SPM 产生的新频率成份沿中心波长向低频和高频对称展宽,此时放大器处于小信号增益状态.随着脉冲光强的增加,自相位调制现象增强,频谱逐渐展宽,当抽运电流为 3.0 A 时,中心波长处的功率已明显下降,光谱出现双峰结构;继续增加抽运功率,自相位调制引起的频率啁啾双峰结构不对称性越来越大,区别于无源光纤中的 SPM 效应^[7],其不对称程度随着抽运功率的增大先变大后变小,频谱光强由短波逐渐向长波集中,产生此种现象的原因是放大器存在着增益饱和和效应,增益饱和效应和 SPM 效应的共同作用引起频谱光强分布变化.

当抽运功率较低时,放大器处于小信号增益状态.尽管 SPM 已导致频谱展宽,脉冲包络内不同时刻有不同的瞬时频率,但各频率增益相同,脉冲仍保持对称结构.随着抽运功率升高,光强增强,脉冲光强接近于放大器介质饱和光强,放大器逐渐进入增益饱和状态,脉冲前沿变陡,较陡的脉冲前沿意味着有更宽的频谱展宽,所以脉冲前沿(红移)较脉冲后沿(蓝移)有更大的 SPM 致频谱展宽.抽运功率越大,脉冲前沿越陡,意味着向长波方向展宽的越宽,两峰不对称程度越大.但增益饱和造成的脉冲前沿和后沿增益差别并不大,此时放大器增益效应大于 SPM 引起的光谱展宽.

随着抽运功率进一步的增加,抽运电流 3.8 A 时,放大器进入深度饱和,增益增长速率变慢,SPM 引起的光谱展宽效应逐渐大于增益效应,能量分布到更宽的光谱范围内,光谱峰值开始下降,同时,脉冲内各部分增益不同,集中低频成分的脉冲前沿增益也逐渐大于集中高频成分的脉冲后沿,脉冲各部分的增益差异,导致频谱强度又反过来开始向低频长波方向移动,两峰幅度差又逐渐减小,如表 2 抽运功率 4.1 A、4.5 A 时,脉冲峰值减小,两峰值差也减小.可以预测,若抽运功率更高时,SPM 和增益的共同作用将使两峰幅度之差将越来越小,频谱光强向低频长波移动.

表 2 光谱峰值强度和两峰值比

Table 2 Spectral peak values and ratio of the two peak values					
Pump current/A	3.0	3.4	3.8	4.1	4.5
Peak value/mV	348	428	334	286	204
Peak ratio*	0.79	0.52	0.20	0.24	0.31

* Peak ratio is the ratio of the peak value at the long wavelength to the short wavelength

由本文实验现象分析可知,在百皮秒双包层脉冲从小信号增益到增益深度饱和的整个放大过程中,放大器增益饱和效应和光纤的自相位调制效应的共同作用,使其脉冲时域波形和光谱光强分布与无源光纤中 SPM 引起的光谱变化呈现不同的特性^[14-15]。

3 结论

针对激光惯性约束核聚变高功率激光驱动系统前端系统的应用,采用掺镱双包层光纤放大器对单脉冲(重复频率 1 Hz)百皮秒脉冲进行放大实验研究,分析了其放大过程中的自相位调制对脉冲时域和频域波形的影响。采用光纤长度 4 m,纤芯直径 6.5 μm 的小芯径双包层光纤,研究了放大器中从小信号增益到增益深度饱和整个变化过程中 SPM 引起的频谱展宽效应,分析了 SPM 引起的脉冲波形和频谱光强分布的变化,采用布喇格光纤光栅扫描方法观察了其光谱的变化,解决了单脉冲光谱不易测量的问题。实验结果表明,由于增益饱和效应和 SPM 的共同作用,频谱分裂成不对称双峰结构,其频谱光强也先向短波后逐渐向长波方向转移。该实验结果为今后研究高功率放大器中的非线性效应引起的光谱变化提供了一定的实验依据。

参考文献

- [1] LIMPET J, HÖFER S, LIEM A, *et al.* 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier[J]. *Applied Physics B*, 2002, **75**(4-5): 77-79.
- [2] DUPRIEZ P, PIPER A, MALINOWSKI A, *et al.* High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1 060 nm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(9): 1013-1015.
- [3] ZHOU Jun, LOU Qi-hong, ZHU Jiang-qiang, *et al.* A continuous-wave 714 W fiber laser with china-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119-1120.
周军,楼祺洪,朱健强,等.采用国产大模场面积双包层光纤的 714W 连续激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119-1120.
- [4] YE Chang-geng, YAN Ping, GONG Ma-li, *et al.* Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, **3**(5): 249-250.
- [5] WANG Yong. Optimization of pulse amplification in Ytterbium-doped double-clad fiber amplifiers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(6): 2139-2147.
- [6] LIAO Su-ying, GONG Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics*, 2007, **44**(6): 27-33.
廖素英,巩马理.高功率光纤激光器和放大器的非线性效应管理新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(6): 27-33.
- [7] AGRAWAL G P. *Nonlinear fiber optics* [M]. San Diego: Academic Press, 1995.
- [8] JAOUËN Y, CANAT G, GROU S, *et al.* Power limitation induced by nonlinear effects in pulsed high-power fiber amplifiers[J]. *Physique*, 2006, **7**: 163-169.
- [9] LIMPET J, DEGUILL-ROBIN N, MANEK-HÖNNINGER I, *et al.* High-power picosecond fiber amplifier based on nonlinear spectral compression[J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(7): 714-716.
- [10] TEODORO F D, KOPLOW J P, MOORE S W, *et al.* Diffraction-limited, 300 kW peak-power pulses from a coiled multimode fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(7): 518-520.
- [11] LI Shu-xian, XU Wen-cheng, FENG Jie, *et al.* Propagation properties of self-similar pulses in Yb³⁺-doped fiber amplifier [J]. *Acta Photonics Sinica*, 2008, **37**(10): 1937-1941.
李书贤,徐文成,冯杰,等.掺镱光纤放大器中自相似脉冲传输特性研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1937-1941.
- [12] WANG Jiang-feng, ZHU Hai-dong, LI Xue-chun, *et al.* Time-synchronization technique between shaped optical pulse and probe optical pulse[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2008, **35**(1): 31-34.
王江峰,朱海东,李学春,等.整形激光脉冲与激光探针同步技术[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 31-34.
- [13] KONG Ling-feng, LOU Qi-hong, ZHOU Jun, *et al.* Frequency response and transient gain of Yb-doped double clad fiber amplifier[J]. *Acta Photonics Sinica*, 2004, **33**(11): 1286-1289.
孔令峰,楼祺洪,周军,等.掺 Yb 双包层光纤放大器的瞬时增益和频率响应[J]. *光子学报*, 2004, **33**(11): 1286-1289.
- [14] SCHREIBER T, SCHIMPF D, MÜLLER D, *et al.* Influence of pulse shape in self-phase-modulation-limited chirped pulse fiber amplifier systems[J]. *JOSA B*, 2007, **24**(8): 1809-1814.
- [15] van HOWE J, ZHU Guang-hao, XU C. Compensation of self-phase modulation in fiber-based chirped-pulse amplification systems[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(11): 1756-1758.

Experimental Study on Self-phase Modulation in Hundred-picosecond Pulse Amplification

CHANG Li-ping¹, FAN Wei², GUO Shu-qin¹

(1 *College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China*)

(2 *Joint Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

Abstract: The single hundred-picosecond pulse amplification (the repetition rate is 1 Hz) was studied experimentally in the Ytterbium-doped double clad fiber amplifier. The characteristic of time-domain and frequency-domain pulse waveform influenced by the self phase modulation (SPM) effect was presented. In the experiment, the small mode area double clad fiber was adopted with core diameter $6.5 \mu\text{m}$ as the gain media. As the gain of the amplifier from the small-signal gain to the deeply saturated gain, the evolution of the spectrum broadening, the pulse waveform and intensity distribution because of the SPM effect were observed. Then to overcome the difficulty for measuring the single pulse spectrum, the Bragg fiber grating scanning was introduced to investigate the changing of spectrum broadening. The results indicate that different from the SPM effect in the passive fibers, as the increase of the pump power, due to the competition mechanism of the gain saturation and SPM in the hundred-picosecond pulse amplification, the spectrum exhibits asymmetric double-peak and the pulse intensity is shifting to short wavelength firstly and then to the long wavelength.

Key words: Laser technology; Double-clad fiber amplifier; Self-Phase Modulation (SPM); Gain saturation