

文章编号: 0253-2239(2010)05-1379-06

百皮秒脉冲在掺镱双包层光纤放大器中的放大

汪小超¹ 范 薇¹ 常丽萍² 张攀政¹ 林尊琪¹

(¹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)

²浙江工业大学信息工程学院, 浙江 杭州 310023

摘要 研究了百皮秒脉冲在掺镱双包层光纤放大器(YDDCFA)中的放大特性及非线性效应。在 1053 nm 波段, 分别对重复频率为 70 MHz 的准连续百皮秒信号和 1 Hz 的单脉冲百皮秒信号进行了放大。准连续脉冲输入信号平均功率为 55 mW, 谱宽为 0.016 nm, 饱和增益为 7.02 dB, 使用法布里-珀罗(F-P)干涉仪测量自相位调制(SPM)效应引起的信号光谱展宽为 0.01 nm。单脉冲输入信号峰值功率为 8.1 W, 在输出峰值功率为 6950 W、增益为 29.3 dB 时发生受激拉曼散射(SRS)效应, 利用光纤布拉格光栅拉伸扫描的方法, 观察到 SPM 和 SRS 效应引起的光谱变化, 利用单模光纤的色散作用分离信号脉冲和斯托克斯脉冲, 对 SRS 现象进行了判断, 解决了单脉冲光谱不易观察的问题。实验结果表明, SRS 效应是制约百皮秒脉冲放大的主要因素。

关键词 激光技术; 光纤放大器; 双包层光纤; 非线性效应

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103005.1379

100 ps Pulse Amplification in Ytterbium-Doped Double-Clad Fiber Amplifier

Wang Xiaochao¹ Fan Wei¹ Chang Liping² Zhang Panzheng¹ Lin Zunqi¹

¹ National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

² College of Information Engineering, Zhejiang University of technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

Abstract The amplification and nonlinear effects of 100 ps pulse in the diode-pumped Yb-doped double-clad fiber amplifier (YDDCFA) is investigated. The YDDCFA is seeded with 100 ps pulses with a spectrum centered at 1053 nm at repetition rate of 70 MHz and 1 Hz, respectively. The saturated gain of the quasi-continuous pulse input signal with average power of 55 mW, spectral width of 0.016 nm, is 7.02 dB. And the spectrum broadening caused by SPM is 0.01 nm, measured with F-P interferometer. The SRS is observed when the peak power of the single-shot pulse is amplified to 6950 W corresponding to a gain of 29.3 dB. Novel methods are devised to detect the spectrum of single shot. The change of spectrum caused by SPM and SRS is measured using a stretched fiber Bragg grating; and the Stocks pulse and signal pulse are separated using the dispersion of long sing mode fiber, revealing the SRS effect. Experimental results show that the SRS is the main limit of amplification of 100 ps pulse.

Key words laser technique; fiber amplifier; double-clad fiber; nonlinear effects

1 引 言

近年来,脉冲双包层光纤放大器日益成为国际上研究的热点,1 μm 波段的皮秒脉冲在微加工、激光工程和自由空间光通信等领域有着广泛的应用。国外

主要有英国的南安普顿大学光电研究中心、德国耶拿大学应用物理研究所^[1]、美国密歇根州大学^[2]和美国的 IPG 公司等对此进行了相关的研究。国内,主要有中国科学院上海光学精密机械研究所^[3]、清华大学和中国电子科技集团第十一研究所,对种子源主振荡

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-09-29

作者简介: 汪小超(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤激光器和放大器方面的研究。E-mail: smilexc@siom.ac.cn

导师简介: 林尊琪(1942—),男,中国科学院院士,博士生导师,主要从事激光惯性约束核聚变,高功率激光驱动器等方面的研究。E-mail: zqlin@mail.shcnc.ac.cn

放大技术(MOPA)方式的脉冲放大器进行了理论和实验研究,并取得了重要成果。对皮秒脉冲的双包层放大国内外研究机构也进行了深入的探索^[4]。2006年英国的南安普顿光电研究中心以增益可调的单纵模 LD 为种子源,采用四级光纤放大方式,在1064 nm 处获得了平均功率 300 W,脉宽 20 ps,重复频率 1 GHz,信号峰值比放大自发辐射背景(ASE)峰值大 20 dB 的信号输出,是目前为止国内外报道功率最高的皮秒级光纤放大器^[5]。

在激光惯性约束核聚变(ICF)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和提高百皮秒脉冲对比度都需要高能量脉冲信号^[6]。本文研制了双包层光纤放大器(YDDCFA),分别对重复频率为 70MHz 的准连续百皮秒信号和 1Hz 的单脉冲百皮秒信号进行了放大。针对 ICF 前端系统的应用,着重研究了 1Hz 重复频率的单脉冲放大特性。为解决附带本底噪声的高峰值功率、低重复频率的信号光谱不易测量的问题,使用光纤布拉格光栅(FBG)拉伸扫描的方法观察到自相位调制(SPM)和受激拉曼散射(SRS)效应引起的光谱变化,利用单模光纤的色散作用分离信号脉冲和斯托克斯脉冲,对 SRS 现象进行了判断。实验结果表明,SRS 效应是制约百皮秒脉冲放大的主要因素。

2 双包层光纤放大器中的主要非线性效应

随着大功率半导体激光器和包层抽运技术的出现,单根光纤输出功率已经达到千瓦水平。在较低功率激光输出时,光纤内的非线性效应对激光输出特性影响很小。但在高功率双包层光纤放大器中,非线性效应严重地影响了激光输出特性,成为限制能量和峰值功率提升的主要因素。高功率光纤放大器中主要的非线性效应有:受激拉曼散射、受激布里渊散射(SBS)^[7]和自相位调制等^[8]。

SPM 起源于光纤中的三阶电极化率 $\chi^{(3)}$,指的是光场在光纤内传输时光场本身会引起非线性相移 φ_{NL} 。因为非线性相移与功率即时间的相关性,脉冲各部分的相位是瞬时变化的,各处有不同的瞬时光频率。脉冲各处瞬时光频率与脉冲中心光频率的差值 $\delta\omega$ 为:
$$\delta\omega(T) = -\frac{\partial\varphi_{NL}}{\partial T}, \delta\omega$$
 的时间依赖性即频率啁啾。SPM 导致的频率啁啾在脉冲前沿附近是红

移的,而后沿附近是蓝移的。随着光束在光纤中的传输,光谱被逐渐展宽,并且呈现多峰结构^[9]。

SRS 和 SBS 属于二阶非线性效应,是光场将部分能量传递给介质的受激非弹性散射。它们都有明显的阈值性。两者的区别在于,拉曼频移量比布里渊频移量大得多;SRS 两个方向均能发生,主要是前向,而 SBS 只发生在后向。并且由于 SBS 阈值功率与信号光谱宽有关,对于脉宽小于 10 ns 的脉冲光,SBS 几乎不会发生。对于中心波长 1053 nm 的信号光,SRS 频移约为 13 THz,对应波长移动约 50 nm。在 SRS 和 SPM 共同作用时,由于 SRS 效应使得脉冲前沿发生耗尽,导致信号光谱低频成分耗尽,信号光谱会出现不对称的展宽^{[[10,11]]}。

3 百皮秒放大实验研究

3.1 百皮秒高重复频率脉冲放大实验研究

实验装置如图 1 所示,采用 YLF 锁模激光器(GE-100)输出的中心波长 1053 nm 作为输入信号光,平均功率为 420 mW,重复频率为 70 MHz,脉冲宽度为 100 ps 的锁模脉冲序列,经显微物镜耦合进入光纤,平均功率为 55 mW。

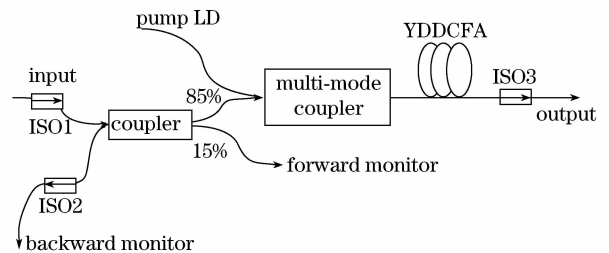


图 1 双包层光纤放大器结构示意图

Fig. 1 Experimental setup of YDDCFA

YDDCFA 的抽运 LD 中心波长为 973.7 nm,带宽为 4.25 nm,最大输出功率 6.5 W,输出尾纤为 105/125,数值孔径 0.22。输入信号光经 2×2 光纤耦合器 85:15 分束,前向 15% 端口作为前向输入信号的监控,后向 15% 端口作为后向输出光监控。抽运光和信号光通过多模合束器合束。实验采用双包层掺镱光纤(SM-YDF-5/130),纤芯模场直径为 $6.5 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.13,包层直径为 $130 \mu\text{m}$,数值孔径为 0.46,光纤长度为 4 m。放大器输出、输入及反向监控端口均采用光纤型隔离器防止光纤端面反射引起自激振荡。

图 2 为重复频率 70 MHz,100 ps 脉冲放大时输出功率与放大增益随抽运电流的变化曲线。在抽运电流 5.1 A(对应抽运功率 4.3 W)时有最大饱和

输出功率 277 mW,增益 7.02 dB。可以看出,放大器达到饱和状态时,其放大倍数并不高,若想进一步提高放大增益,可适当增长光纤长度,以提高放大器存储能量。

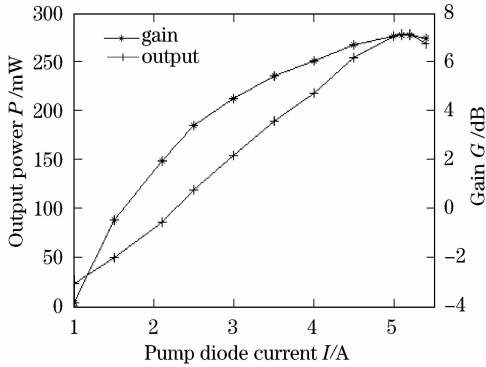


图 2 连续百皮秒输入信号的放大

Fig. 2 Amplification of 70 MHz 100 ps input signal

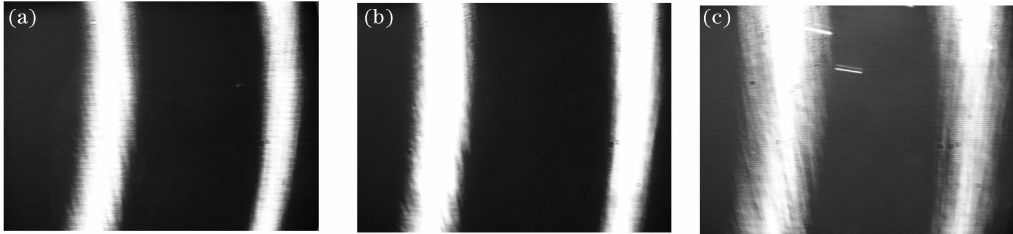


图 3 准连续百皮秒放大的光谱变化。(a) 输入信号;(b)抽运电流 1.9 A 时的输出;(c)抽运电流 5.1 A 时的输出

Fig. 3 Spectra of 70 MHz amplification. (a) Input; (b) output of 1.9 A pump; (c) output of 5.1 A pump

模序列经过电光开关选单,得到重复频率 1 Hz,脉冲宽度 100 ps,峰值功率 8 W 的脉冲。图 4 为电光开关选单系统示意图,选单系统主要有薄膜偏振片 TFP1、普克尔盒(Pockels cell)和薄膜偏振片 TFP2 组成,普克尔盒门打开时产生 $\lambda/2$ 相移,TFP1 与 TFP2 偏振方向正交。

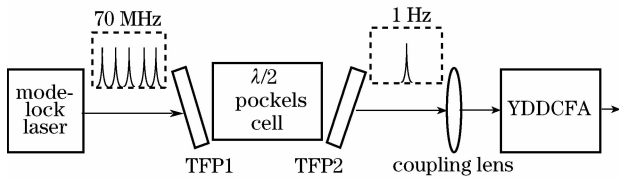


图 4 电光开关选单示意图

Fig. 4 Schematic diagram of electric-optics switch singling

在低重复频率的输入信号情况下,因为信号脉冲的时间间隔很大,连续抽运会引入很高的 ASE^[12,13]。图 5 为放大器输出端加 1 nm 滤波器和不加滤波器时的 ASE 输出功率。可以看出,没有 1 nm 滤波器时 ASE 功率随抽运增加迅速增加,抽运电流 5.1 A 时,ASE 功率已达 80 mW。如此高的 ASE 功率大大降低了输出脉冲的信噪比,所以在 1 Hz 信号的放大实验中,在图 1 所示放大器结构的

放大器输入信号的谱宽为 0.016 nm(半高全宽)。实验中采用法布里-珀罗(F-P)标准具照相法来观测脉冲激光光谱,采用的 F-P 标准具厚度为 0.3 cm,自由光谱宽度为 30 G。图 3(a)为输入信号光谱,干涉条纹宽度为 4 cm,其半高全宽谱宽为 $[4/(2 \times 12.5)] \times 0.1 = 0.016$ nm,与实际值相符。图 3(b)和图 3(c)分别为抽运电流 1.9 A (1.5 W)和 5.1 A(4.3 W)时放大器的输出信号光谱,对应的干涉条纹宽度为 4.5 cm 和 6.5 cm。可以得到在 1.9 A 时谱宽展宽至 0.018 nm,5.1 A 时展宽至 0.026 nm。随着抽运电流的升高,信号光谱宽度逐渐展宽,这是由光纤放大器中 SPM 引起的。

3.2 1 Hz 重复频率的单脉冲放大实验研究

3.2.1 单脉冲放大结构及增益特性

皮秒锁模激光器输出的 70 MHz 重复频率的锁

输出端加 1 nm 光纤滤波器,能有效抑制 ASE 噪声,提高输出信噪比。

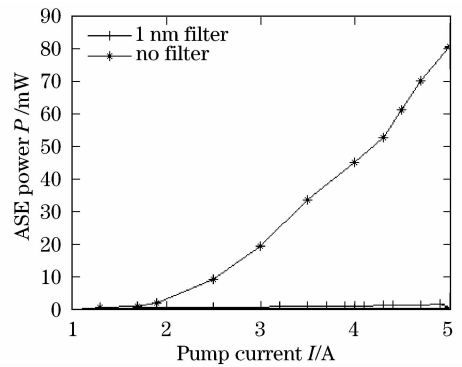


图 5 放大器输出端的 ASE 噪声

Fig. 5 Amplifier output noise of ASE

图 6 所示为放大后脉冲峰值和放大增益随抽运电流的变化。可以看出,当抽运电流 3.8 A(对应抽运功率 3.1 W)时,放大器单脉冲放大增益 29.3 dB。进一步增大抽运功率,输出信号开始下降。信号下降的原因推断是由于信号光强超过了 SRS 阈值,信号光的能量转移到斯托克斯光,而斯托克斯光在滤波器的透过带宽之外,被滤波器滤掉。

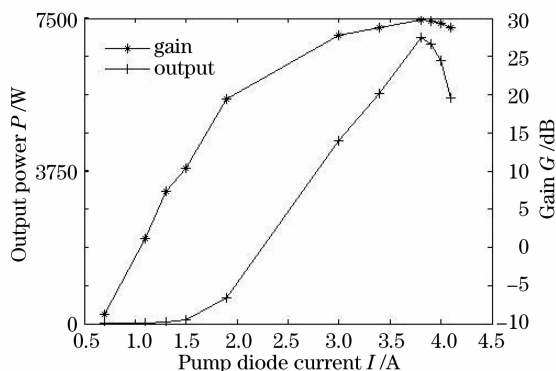


图 6 1 Hz 百皮秒脉冲的放大

Fig. 6 Amplification of 1 Hz 100 ps input signal

3.2.2 单脉冲放大过程中的 SRS 效应

因为 1 Hz 信号放大的 YDDCFA 输出信号峰值功率强、脉宽窄、重复频率低和附带连续本底光,

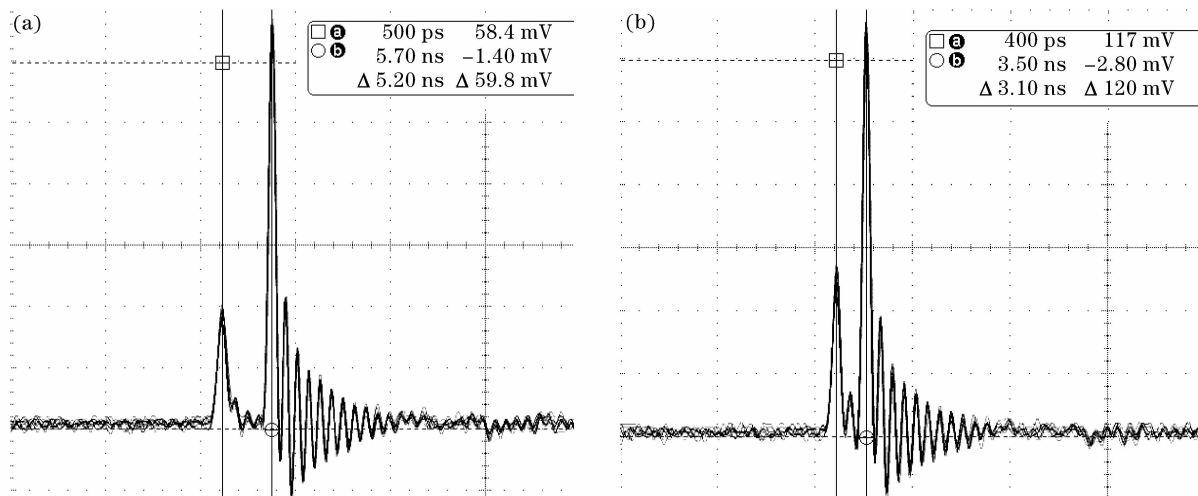


图 7 斯托克斯光和信号光的分离。(a) 光纤长度 4 km; (b) 光纤长度 2.5 km

Fig. 7 Separation of Stokes and signal. (a) Fiber length of 4 km; (b) fiber length of 2.5 km

此时在 YDDCFA 输出端加 1 nm 滤波器, 输出脉冲由两个变为一个, 时间上处于前方的脉冲被滤掉。在 1053 nm 波段正色散的光纤中, 这说明被滤掉的脉冲波长大于另一脉冲。利用单模光纤的色散参数计算, 可得 2.5 km 光纤传输后相距 3.1 ns 的两个脉冲波长差为 49 nm, 4 km 光纤传输后相距 5.2 ns 的两个脉冲波长差为 52 nm。被滤掉的脉冲相对另一脉冲波长为 50 nm 左右, 对应频率下移 13 THz, 可以判断 SRS 的产生, 所得两个波长差的偏差是由于光纤长度不精确引起。由此判断结果可知 SRS 效应是制约百皮秒单脉冲放大的主要因素。

3.2.3 SPM 和 SRS 引起的信号光的光谱特性变化

同样由于 3.2.2 中所述百皮秒单脉冲放大输出信号光谱难以测量的特性。实验中利用 FBG 拉伸

以对输出信号光谱的测量比较困难, 无法使用现有光谱仪 (MS9710C) 直接观测 SRS 的产生。本文利用单模光纤的色散作用在时域上分离信号脉冲和斯托克斯脉冲判断是否发生 SRS。首先将 YDDCFA 输出端的 1 nm 滤波器去掉, 接光纤衰减器和一段单模光纤 (1060-XP), 使用光电 PIN 管和示波器观察。衰减器的作用是降低 YDDCFA 输出脉冲峰值功率, 避免在单模光纤中发生其它非线性效应。抽运电流 3.8 A 时, 输出脉冲由一个变为两个, 随着抽运电流的增大, 处于前方的脉冲强度增大, 后方的减小。抽运电流 4.0 A 时, 单模光纤长度约为 4 km, PIN 管测量得到两个脉冲间隔为 5.2 ns [图 7(a)], 在光纤长度约为 2.5 km 时, 两个脉冲间隔变为 3.1 ns [图 7(b)]。

扫描的方法来观察信号的光谱展宽效应。FBG 是一种反射滤波器, 对处于光栅布拉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拉格波长的调谐。图 8 是实验中 FBG 拉伸扫描光谱测量的实验结构图。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可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, 光谱仪 (MS9710C) 测得其 3 dB 带宽为 0.19 nm。首先在荧光源输入 (Fluorescence input) 端通入荧光, 用光谱仪 (Spectrometer) 在隔离器 2 (ISO2) 输出端测量光纤光栅的透射谱以确定其中心波长; 然后在信号输入 (Signal input) 端通入放大器的输出信号, 在 ISO2 输出端使用光电 PIN 管和示波器观察脉冲峰值。不断改变光纤光栅的拉伸程度, 可得到波长与

脉冲峰值的一系列对应关系,即信号光谱图。

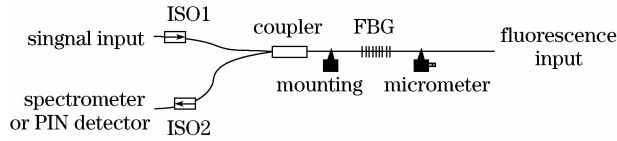


图 8 光纤布拉格光栅拉伸测量光谱原理图

Fig. 8 Schematic diagram of spectrum measurement using FBG

图 9 为抽运电流 2.0,3.4,3.8 和 4.1 A 时的测试光谱图。可以看出,抽运电流 2.0 A 和 3.4 A 时,SPM 引起的新的频率成份沿中心波长 1053 nm

向低频和高频方向展宽,随着脉冲光强的增加,SPM 现象增强,频谱逐渐展宽,是典型的 SPM 引起的光谱变化特征,光谱的不对称性是由信号的不对称性引起^[10,11]。当抽运电流升至 3.8 A 时,开始出现 SRS 效应,光谱呈现严重的不对称性,低频成分出现明显的耗尽现象,这是由于发生 SRS 效应时,信号脉冲前沿的耗尽引起的,这些现象与利用光谱仪精细测量高重复频率的信号发生 SRS 效应的结果完全一致^[11]。说明了利用 FBG 拉伸扫描测量光谱方法的可靠性。抽运电流 4.1 A 时,信号光的光谱强度开始下降,这是由于信号脉冲能量开始向斯托克斯光转移,信号光强度下降。

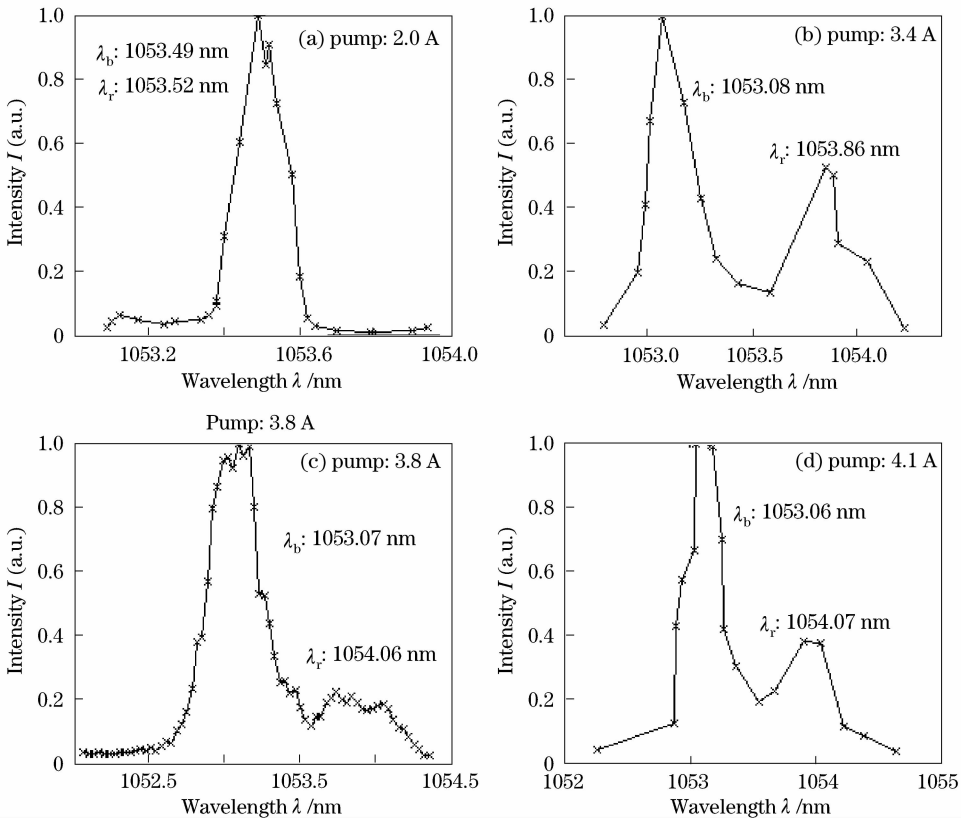


图 9 输出信号光谱图

Fig. 9 Spectrum of output signal

4 结 论

针对 ICF 高功率激光装置前端系统应用,研究了 1053 nm 波段百皮秒脉冲的放大特性。包括高重复频率百皮秒准连续和单脉冲放大,对单脉冲实现峰值功率 6950 W 的输出。实验研究了百皮秒单脉冲放大过程中的 SRS 效应,利用单模光纤的色散作用分离了信号脉冲和 SRS 脉冲,判断了 SRS 现象的发生。实验中分别采用 F-P 干涉仪和 FBG 拉

伸扫描方法,观察连续和单脉冲放大时信号光谱的变化,并验证了两种测量方法的可靠性,解决了单脉冲光谱不易被观察的问题。实验结果表明,SRS 效应是制约百皮秒脉冲放大的主要因素,要进一步提高单脉冲的输出功率需采用更大模场面积的光纤^[14]或者采用更高掺杂浓度的掺杂光纤^[15]以缩短光纤长度。

参 考 文 献

- 1 J. Limpert, S. Höfer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4-5): 477-479
- 2 Mingyuan Cheng, Yuchung Chang, A. Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200-mm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 358~360
- 3 Lingfeng Kong, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. 133-W pulsed fiber amplifier with large mode area [J]. *Opt. Eng. Lett.*, 2006, **45**(1): 010502-1~2
- 4 Liu Qingwen, Wang Qingyue, Xue Yinghong *et al.*. 2. 41 W ultrashort pulsed laser output from laser diode pumped Yb³⁺-doped fiber amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 819~822
刘庆文,王清月,薛迎红等. 激光二极管抽运掺 Yb³⁺ 光纤放大器获得 2. 41 W 超短脉冲输出 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 819~822
- 5 P. Dupriez, A. Piper, A. Malinowski *et al.*. High average power, high repetition rate, picosecond pulsed fiber master oscillator power amplifier source seeded by a gain-switched laser diode at 1060 nm [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(9): 1013~1015
- 6 Wang Jiangfeng, Zhu Haidong, Li Xuechun *et al.*. Time-synchronization technique between shaped optical pulse and probe optical pulse [J]. *Chinese J. Lasers*, 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
- 7 Wang Chuncan, Zhang Fan, Lu Yuchun *et al.*. Study of stimulated Brillouin scattering effect in high-power single-frequency fiber amplifiers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1630~1635
王春灿,张帆,陆玉春等. 单频大功率光纤放大器中抑制受激布里渊散射的理论分析 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1630~1635
- 8 Liao Suying, Gong Mali. New development of nonlinearity management in high power fiber lasers and amplifiers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 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
- 9 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. San Diego: Academic Press, 2001. 101~103
- 10 A. S. L. Gomes, W. Sibbett, J. R. Taylor *et al.*. Spectral and temporal study of picosecond pulse propagation in a single-mode optical fibre [J]. *Appl. Phys. B*, 1986, **39**(1): 43~46
- 11 P. N. Kean, K. Smith, W. Sibbett. Spectral and temporal investigation of self-phase modulation and stimulated Raman scattering in a single-mode optical fibre [C]. *IEE Proceedings*, 1987, **134**(3): 163~170
- 12 Changgeng Ye, Ping Yan, Mali Gong *et al.*. Pulsed pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 249~250
- 13 Yong Kong, Qi Zhong Liu, Chen Deng *et al.*. Pulsed pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber amplifier [J]. *J. Mod. Opt.*, 2009, **56**(5): 597~600
- 14 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jianqiang *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 714 W 连续光纤激光器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 15 M. Y. Cheng, K. C. Hou, A. Galvanauskas *et al.*. High average power generation of single-transverse mode MW-peak power pulses using 80- μ m core Yb-doped LMA fibers [C]. *Proc. CLEO*, 2006; CThAA3