

文章编号: 1001-3806(2009)05-0532-03

## 低重复频率脉冲掺镜光纤放大器

伍波<sup>1</sup>, 杨泽后<sup>1</sup>, 黄彪<sup>1</sup>, 赵晓军<sup>2</sup>, 樊冬<sup>1</sup>, 周鼎富<sup>1</sup>, 侯天晋<sup>1</sup>

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 四川大学 电子信息学院, 成都 610064)

**摘要:** 为了研究低重复频率两级脉冲掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器, 采用脉冲信号驱动的半导体激光器作为种子光源, 产生重复频率 100Hz、半峰全宽 100ns、能量 30nJ 的矩形光脉冲。第 1 级放大采用单模掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器, 双程放大方案有效地抑制了放大自发辐射, 放大后的脉冲能量达到了 8.2μJ。第 2 级放大采用纤芯直径 15μm 的双包层掺 Yb<sup>3+</sup> 光纤放大器, 大功率多模半导体激光器连续抽运。结果在抽运功率为 7.3W 时, 放大输出脉冲能量达到了 242μJ, 放大输出半峰全宽压缩为 29ns。输出的光束质量较好, 为准单模输出。结果表明, 该光纤放大器输出脉冲能量高, 具有全光纤化、结构简单的特点。

**关键词:** 激光技术; 光纤放大器; 主振功率放大; 掺镜光纤

**中图分类号:** TN722

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.05.025

## Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier for low repeat frequency pulse

WU bo<sup>1</sup>, YANG Ze-hou<sup>1</sup>, HUANG Biao<sup>1</sup>, ZHAO Xiao-jun<sup>2</sup>, FAN Dong<sup>1</sup>, ZHOU Ding-fu<sup>1</sup>, HOU Tian-jin<sup>1</sup>

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study a two-stage Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier for low repetition frequency pulses, a pulse driven laser diode was used as the seed source to obtain rectangle optical pulses with repetition rate of 100Hz, full width at half maximum (FWHM) of 100ns and energy of 30nJ. In the first stage, 8.2μJ pulse energy was obtained by a single mode Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier, in which amplified spontaneous emission was restrained efficiently by means of the method of round-trip amplification. Pumped by 980nm high power multimode laser diodes, the second stage was a double clad Yb<sup>3+</sup>-doped fiber amplifier with 15μm fiber core diameter. 242μJ output pulse energy was obtained at 7.3W pump power. The FWHM was compressed to 29ns. A near diffraction limited beam was produced from the amplifier with quasi-single mode output. The results shows that the high pulse energy fiber laser has advantage of simple all fiber structure.

**Key words:** laser technique; fiber amplifier; master oscillator power amplification; Yb<sup>3+</sup>-doped fiber

### 引言

随着双包层光纤和大功率半导体激光器的广泛应用, 大功率光纤激光器已进入了一个蓬勃发展的阶段, 也极大地推动了脉冲光纤激光器与放大器的发展。具有一定重复频率、高能量脉冲输出的脉冲光纤激光器与放大器已经成为当前人们的研究热点之一。主振功率放大 (master oscillator power amplifier, MOPA) 方式是获得窄脉宽、高峰值功率脉冲输出的有效方式<sup>[1,2]</sup>。脉冲光纤放大器以工作频率可以分为高重复频率与低重复频率脉冲光纤放大器两种。到目前为止, 高重复频率脉冲光纤放大器研究较多。2002 年, 德国 LIMPET 等人就采用 Nd:YAG 调 Q 激光器作为种子源, 以 MO-

PA 方式得到了重频为 50kHz、单脉冲能量 2.8mJ 的放大脉冲输出<sup>[3]</sup>。2007 年, 美国 Nufern 公司的 KHITROV 等人以调 Q 光纤激光器为种子源, 采用 3m 长纤芯直径为 30μm 的保偏大模场掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤放大器, 得到重复频率为 20kHz、半峰全宽 (full width at half maximum, FWHM) 45ns、能量 1mJ、平均功率 21W 的脉冲输出<sup>[4]</sup>。国内在 2006 年由中国科学院上海光学精密机械研究所 KONG 等人采用 4m 长、30μm 芯径国产双包层光纤, 在抽运功率为 250W 时, 实现半峰全宽 15ns、重频 20kHz、峰值功率 300kW 的脉冲输出<sup>[5]</sup>。清华大学的 YE 等人用保偏掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤放大器, 得到了半峰全宽 40ns、重频 40kHz、平均功率 53.1W、能量大于 1mJ 的脉冲输出<sup>[6]</sup>。对于低重频脉冲光纤放大器, 由于种子光源多采用半导体激光器, 种子脉冲能量低, 需多级光纤放大系统, 结构相对复杂, 国内外研究较少。2004 年, 美国密歇根大学在共 4 级的脉冲光纤放大器中, 采用调制的半导体

作者简介: 伍波 (1979-), 男, 博士后, 主要从事光纤激光器与光纤放大器的研究。

E-mail: w\_bo@sohu.com

收稿日期: 2008-11-08; 收到修改稿日期: 2008-12-22

激光器作为脉冲种子光源,实现了1064nm波长的低重频82mJ脉冲能量输出<sup>[7]</sup>。2007年,美国密歇根大学再次采用多级放大方案,最后得到了FWHM为3ns、重频50Hz、峰值功率大于5MW、能量大于3mJ的放大脉冲<sup>[8]</sup>。2005年,清华大学YE等人采用被动调Q薄片激光器为种子光,使用双包层增益光纤得到低重频、FWHM为0.8ns、能量138μJ的放大脉冲<sup>[9]</sup>。在低重频光纤放大器中,放大自发辐射、光纤损伤以及非线性效应等都是限制得到更高放大脉冲能量的重要因素。

作者研究了以半导体脉冲激光器为种子光的2级脉冲掺Yb<sup>3+</sup>光纤放大系统。该光纤放大器采用双程光纤放大方案抑制前级放大自发辐射,输出脉冲能量高,具有全光纤化、结构简单等特点。

## 1 2级脉冲光纤放大器

实验结构如图1所示,脉冲光纤放大器由半导体

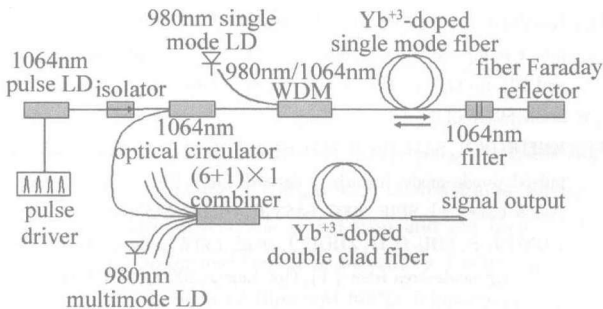


Fig. 1 Experimental setup of a two-stage pulse fiber amplifier

脉冲种子光源、1级掺Yb<sup>3+</sup>单模光纤放大器以及1级掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤放大器构成。半导体脉冲种子光源由1台脉冲信号发生器提供驱动信号,激光器3dB光谱宽度约为0.2nm。

脉冲种子激光通过隔离器后,进入1级掺Yb<sup>3+</sup>单模光纤放大器进行预放大。在这级光纤放大器中,采用的增益介质是4m长掺Yb<sup>3+</sup>单模光纤,该光纤在1030nm波长处的峰值吸收系数为250dB/m。抽运源波长980nm的单模半导体激光器,最大输出抽运光功率为300mW。种子光脉冲信号从光纤环形器的一端注入,980nm/1064nm波分复用器将抽运光与信号光合束,一起送入增益光纤。经过一次放大的脉冲信号中的放大自发辐射被增益光纤后的窄带滤波器滤除,然后光纤法拉第旋转器将经过一次放大的光脉冲信号反射回到增益光纤中,进行第2次放大,最后经过两次放大的脉冲信号从光纤环形器的3端口输出。在弱脉冲信号光放大的情况下,采用双程放大方案可以有效地抑制放大自发辐射,提高放大增益<sup>[10]</sup>。

经过1级放大的光脉冲进入到掺Yb<sup>3+</sup>双包层光纤放大器进行功率放大。信号与抽运光输入采用(6+1)×1光纤合束器,合束器信号输入端光纤纤芯

直径为6μm,6路抽运输入光纤纤芯直径100μm,合束端光纤纤芯直径为15μm。抽运源为980nm波长的大功率半导体多模激光器,最大连续输出功率为6.5W,实验中共使用了3只。采用的增益介质为15μm纤芯直径的双包层掺Yb<sup>3+</sup>光纤。为了提高光纤的端面损伤阈值,将双包层光纤放大器输出端熔接了一段1m长的多模光纤,纤芯直径为50μm。并将光纤输出端面研磨为8°角,可以减小反射光脉冲功率,防止双包层光纤内部出现自振荡以及对抽运源可能的损伤。

## 2 实验结果

半导体种子激光器输出矩形脉冲波形如图2所

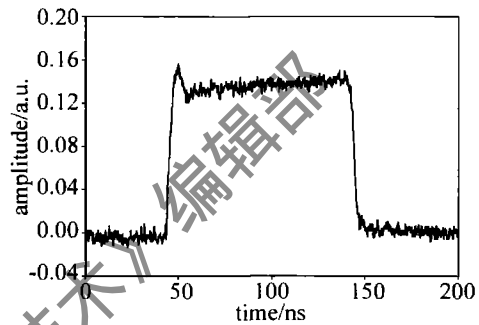


Fig. 2 Pulse shape of seed laser

示,FWHM为100ns,单脉冲能量约30nJ。将种子光脉冲频率设置为100Hz,注入单模掺Yb<sup>3+</sup>单模光纤放大器,采用Geotec-XLE4探头测量脉冲能量。当抽运功率为251mW时,放大后的脉冲能量达到了8.2μJ,此时放大增益约24dB。输出脉冲能量随抽运的变化情况如图3所示。

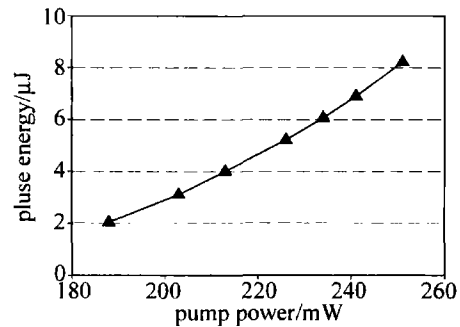


Fig. 3 Output energy of single mode fiber amplifier

将经过1级放大后,能量约2μJ的光脉冲注入到双包层光纤放大器中进行放大,抽运方式采用连续抽运。在抽运功率为7.3W时,放大输出脉冲能量达到了242μJ。输出脉冲能量随抽运功率的变化情况如图4所示。由图可知,放大脉冲能量随抽运功率的增加基本上呈线性变化,没有饱和趋势,还有进一步放大的潜力。在双包层光纤放大器中,可以观察到随着输出脉冲能量的增加,FWHM逐渐压缩。这是由于光脉冲在增益光纤中传输和放大过程中,基态上粒子数逐渐减少,而激发态粒子数逐渐增加,从而使粒子数反转增

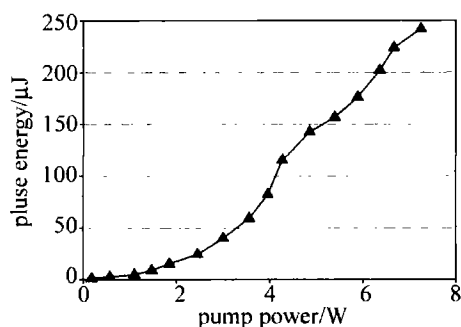


Fig. 4 Output energy of double clad fiber amplifier

加,使脉冲前沿和后沿的增益都增加,但由于脉冲前沿放大对后沿放大的抑制,导致脉冲种子信号的前沿增益大于后沿的增益,脉冲峰值将向前沿方向移动,产生波形的畸变。尤其是如果脉冲信号光很强,或FWHM较宽时,脉冲后沿根本就得不到放大,因此出现脉宽压缩现象。当双包层光纤放大器输出脉冲能量为242 $\mu$ J时,放大FWHM为29ns,对应的峰值功率达到了8.3kW。单模光纤放大器与多模光纤放大器输出脉冲波形如图5所示。

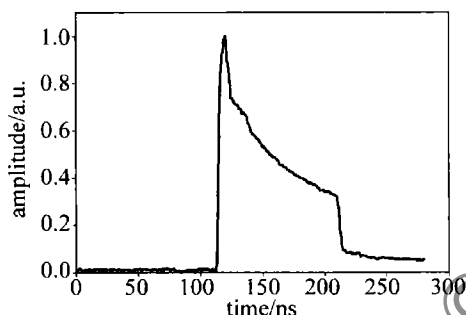


Fig. 5 Amplifying pulse shape

采用光束质量分析仪检测了从双包层光纤放大器输出的近场光束能量分布,如图6所示。由图可知,从

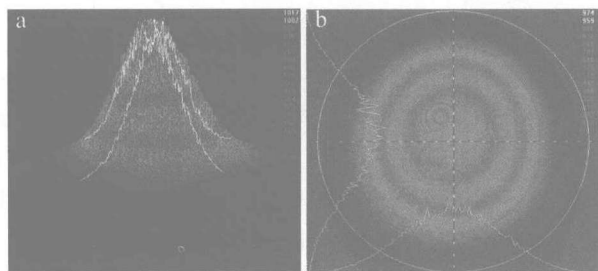


Fig. 6 3-D and 2-D energy distribution of amplifying pulse

中放1级输出的光束质量较好,为准单模输出。同时说明了双包层光纤放大器输出端的多模光纤并未对放大器光束质量造成影响。

### 3 结论

研制了低重频脉冲掺Yb<sup>3+</sup>光纤放大器。光纤放大器采用2级放大结构,得到频率100Hz、半峰全宽为29ns、脉冲能量242 $\mu$ J的放大脉冲输出。实验中观察到了脉冲压缩现象,输出的光束质量较好,为准单模输出。

### 参考文献

- [1] MADASAMY P, KIMPEL F, TORRUELLAS W. High peak power ytterbium doped diode pumped fiber amplifier system [J]. Proc SPIE, 2007, 6552: 65520Q/1-65520Q/10.
- [2] FEUCHTER T, LUMHOLT O. mJ pulse energy fiber lasers based on Yb-doped photonics crystal fibers [J]. Proc SPIE, 2007, 6453: 64531X/1-64531X/10.
- [3] LIMPET J, ZELLAME H, TUNNERMANN A, et al. High-average-power millijoule fiber amplifier system [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, Lasers and Electro-Optics. Long Beach; CLEO, 2002: 591-592.
- [4] KHITROV V, SAMSON B, MACHEWIRTH D, et al. High peak power pulsed single-mode linearly polarized LMA fiber amplifier and Q-switch laser [J]. SPIE, 2007, 6453: 645305/1-645305/6.
- [5] KONG L F, LOU Q H, ZHOU J, et al. 133W pulsed fiber amplifier with large-mode-area fiber [J]. Opt Engng, 2006, 45(1): 010502/1-010502/2.
- [6] YE Ch G, GONG M L, YAN P, et al. Linearly-polarized single-transverse-mode high-energy multi-ten nanosecond fiber amplifier with 50W average power [J]. Optics Express, 2006, 14(17): 7604-7609.
- [7] CHEN M Y, CHANG Y C, GALVANAUSKAS A, et al. 27mJ nanosecond pulse in M<sup>2</sup> = 6.5 beam from a coiled highly multimode Yb-doped fiber amplifier [C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. San Francisco; CLEO, 2004: 1-2.
- [8] GALVANAUSKAS A, CHENG M Y, HOU K Ch, et al. High peak power pulse amplification in large-core Yb-doped fiber amplifier [J]. Selected Topics in IEEE J Q E, 2007, 13(3): 559-566.
- [9] YE Ch G, YAN P, GONG M L, et al. Pulse pumped Yb-doped fiber amplifier at low repetition rate [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(5): 249-250.
- [10] MARCIANTE J R, ZUEGAL J D. High-gain, polarization-preserving, Yb-doped fiber amplifier for low-duty-cycle pulse amplification [J]. Appl Opt, 2006, 45(26): 6798-6804.

(上接第531页)

- [8] LI Y Zh, QIAN L J, LU D Q, et al. Coherent and incoherent combining of fiber array with hexagonal ring distribution [J]. Optics & Laser Technology, 2007, 39(1): 957-963.
- [9] KURKOV A S, BABIN S A, LOBACH I A, et al. Mechanism of mode coupling in multicore fiber lasers [J]. Opt Lett, 2008, 33(1): 61-63.
- [10] LI Y Q, CUI M. Optical waveguide theory and technology [M]. Bei-

jing: Posts and Telecom Press, 2002: 93-100 (in Chinese).

- [11] TONG L M, LOU J Y, MAZUR E. Single-mode guiding properties of subwavelength-diameter silica and silicon wire waveguides [J]. Optics Express, 2004, 12(6): 1025-1035.
- [12] TAFLOVE A, HAGNESS S C. Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method [M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2000: 91-99.