

文章编号: 0258-7025(2008)06-0819-04

激光二极管抽运掺 Yb^{3+} 光纤放大器 获得 2.41 W 超短脉冲输出

刘庆文¹ 王清月¹ 薛迎红¹ 胡明列¹ 宋有健¹ 李进延² 陈伟² 柴路^{1*}

¹ 天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 天津大学光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

² 华中科技大学光电子科学与工程学院, 湖北 武汉 430073;

武汉烽火通信科技股份有限公司光纤研发部, 湖北 武汉 430074

摘要 对国产掺镱(Yb^{3+})双包层大模场面积光纤超短脉冲放大器进行了系统的实验研究。以自己搭建的脉冲宽度为 2.3 ps, 重复频率为 95 MHz 的全固态锁模激光器作为种子源, 以 976 nm 大功率光纤耦合激光二极管为抽运源, 以 1.6 m 国产掺 Yb^{3+} 双包层大模场面积光纤为增益介质, 在 11.2 W 的入纤抽运功率下, 将平均功率为 100 mW 的脉冲种子光放大到平均功率 2.41 W, 单脉冲能量达到了 25 nJ, 放大后脉冲的宽度(时域宽度)和光谱都有所展宽。

关键词 激光技术; 光纤放大器; 全固态激光器; 超短脉冲; 掺 Yb^{3+} 双包层光纤

中图分类号 TN 253 文献标识码 A

2.41 W Ultrashort Pulsed Laser Output from Laser Diode Pumped Yb^{3+} -Doped Fiber Amplifier

Liu Qingwen¹ Wang Qingyue¹ Xue Yinghong¹ Hu Minglie¹
Song Youjian¹ Li Jinyan² Chen Wei² Chai Lu¹

¹ Ultrafast Laser Laboratory, School of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering,

Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science,
Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China

² School of Optoelectronics Science and Engineering,

Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, Hubei 430073, China;
Fiber Home Telecommunication Technologies Co. LTD, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The experimental study on an ultrashort laser amplifier using a domestic Yb^{3+} -doped large-mode-area fiber as gain media was presented. The seed pulse has a width of 2.3 ps and repetition rate of 95 MHz, provided by an all-solid-state mode-locking laser designed by ourselves. The pump source is a 976 nm fiber-coupled laser diode (LD). The output pulse with the average power of 2.41 W from the 1.6 m gain fiber is achieved under the input pump power of 11.2 W, while the seed pulse average power is 100 mW. The amplified energy per pulse is up to 25 nJ. The width of the pulse is broadened from 2.3 ps to 3.0 ps, synchronously.

Key words laser technique; fiber amplifier; all-solid-state laser; ultrafast pulse; Yb^{3+} -doped double-clad fiber pulse

收稿日期: 2007-10-09; 收到修改稿日期: 2007-11-29

基金项目: 国家 973 计划(2006CB806002), 国家 863 计划(2007AA03Z447), 国家自然科学基金(60678012), 高等学校博士学科点专项科研基金(20070056083, 20070056073)和中国博士后科学基金(20070410194)资助项目。

作者简介: 刘庆文(1981—), 男, 山东人, 硕士研究生, 主要从事超快激光脉冲的产生和放大方面的研究。

E-mail: liuqingwen@gmail.com

导师简介: 王清月(1938—), 男, 河北人, 教授, 博士生导师, 主要从事超短脉冲激光技术在信息科学中的应用研究。

E-mail: Chywang@tju.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: lu_chai@tju.edu.cn

1 引 言

高功率的超短脉冲激光在测量、医疗、微纳加工、受控核聚变以及基础科学研究等方面具有很广阔的需求前景,是目前激光技术的一个重要研究方向。在高功率激光器的研究中,光纤作为增益介质在效率、散热以及光束质量方面有着明显的优势,已经引起人们的普遍重视。特别是掺镱(Yb^{3+})的双包层光纤,具有很宽的发射带宽,可以支持更短的飞秒脉冲;量子缺陷低,没有上转换和重吸收损耗;而双包层结构进一步提高了抽运光的耦合效率,成为目前国际上激光技术领域研究的热点之一^[1,2]。我国在掺 Yb^{3+} 光纤的研究方面紧跟世界前沿,对掺 Yb^{3+} 双包层光纤的连续光运转及脉冲运转进行了大量研究工作^[3~5],并已经取得了一定成就^[6,7]。同时,国内掺 Yb^{3+} 光纤的控制水平的进步,更是给这一领域的研究者以极大动力^[8]。本文以国产的掺 Yb^{3+} 大模场面积的双包层光纤作为增益介质,对激光二极管(LD)抽运的放大器进行了系统的实验研究,在入纤抽运功率为11.2 W的条件下,将功率100 mW,2.3 ps种子光放大得到了2.41 W,3.0 ps的超短脉冲输出,相应的单脉冲能量达25 nJ。

2 实验设计

2.1 光纤的加工和处理

实验所采用的掺 Yb^{3+} 增益光纤是由武汉烽火通信科技股份有限公司控制的大模场面积双包层光纤,高倍光学显微镜下的截面图如图1所示。光纤的纤芯直径约为35 μm ,数值孔径约为0.1,掺杂质量分数为 4×10^{-3} 。光纤的内包层直径为315 μm ,由一层致密的气孔形成,光纤直径520 μm 。测得空气孔形成光纤内包层的数值孔径大于0.2,这种结构有利于将高功率的抽运光限制在包层中,提高抽运光的耦合效率。

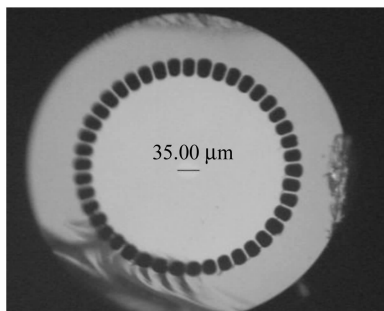


图1 掺 Yb^{3+} 大模场面积增益光纤

Fig.1 Section of the large-mode-area fiber

在初步实验中,所用的光纤长度为1.6 m,两个端面都是用宝石刀直接切割出来的光滑端面。当吸收抽运功率达到1.3 W时,在没有信号光注入的情况下,由于光纤端面的菲涅耳反射,光纤中出现了激光振荡。为了避免这一现象,进一步的实验中对光纤信号注入端的端面进行了特殊处理。即首先用光纤熔接机对光纤的端面进行火花放电,将空气孔熔融塌陷后,再用专用的光纤打磨机进行研磨,研磨出具有 13° 倾角的光滑端面,如图2所示。

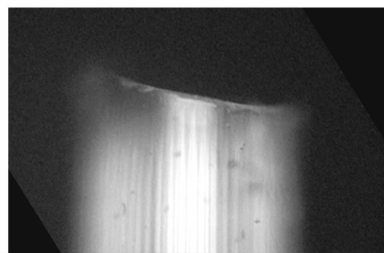


图2 光纤端面熔融后打磨出 13° 倾角

Fig.2 Polished end with obliquity of 13°

由于倾斜的端面对抽运光的耦合效率有一定的影响,光纤的抽运光注入端的端面仍然采用宝石刀直接切割出的解理面。实验中发现,在端面经上述处理后,在实验中没有再出现激光自激振荡的现象。

2.2 放大器的实验装置

实验所搭建的光纤放大器采用抽运光与信号光相对传输的反向抽运方式,实验装置如图3所示。

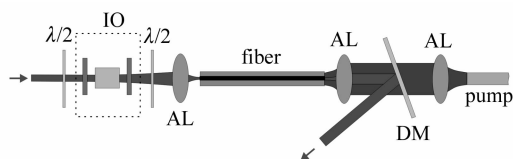


图3 光纤放大器装置图

Fig.3 Setup of the fiber amplifier

图中 $\lambda/2$ 为半波片,用于调整种子光的偏振方向;IO为光学隔离器,由两个格兰棱镜和一个法拉第旋光器组成,防止反射光影响振荡器工作;AL为镀有增透膜的非球面透镜,Fiber为双包层大模场面积掺 Yb^{3+} 增益光纤,DM为双色镜,用于分离抽运光和放大后的信号光,镀膜在入射角 15° 时为 $T > 90\%$ (980 nm), $R > 99\%$ (1025~1075 nm)。入射的种子脉冲光首先经过一个光学隔离器,然后经过一个焦距为18.4 mm的非球面镜会聚后进入增益光纤的纤芯得到放大,最后从双色镜反射输出。抽运光源是光纤耦合输出的InGaAs激光二极管(JOLD-30-FC-12, German),中心波长为976 nm,谱线宽度小于4 nm。从耦合光纤输出的抽运光经过焦距为

11 mm的非球面镜准直后从双色镜中透过,再经另一个焦距11 mm的非球面镜会聚后耦合进入增益光纤。在整个放大器装置中,除了放大器的抽运源外,均已实现了国产化。

放大器所用的超短脉冲信号源是自己搭建的Yb:YAB激光器,锁模脉冲的重复频率为95 MHz,时域宽度为2.32 ps,中心波长在1041 nm,其自相关曲线与光谱如图4所示。

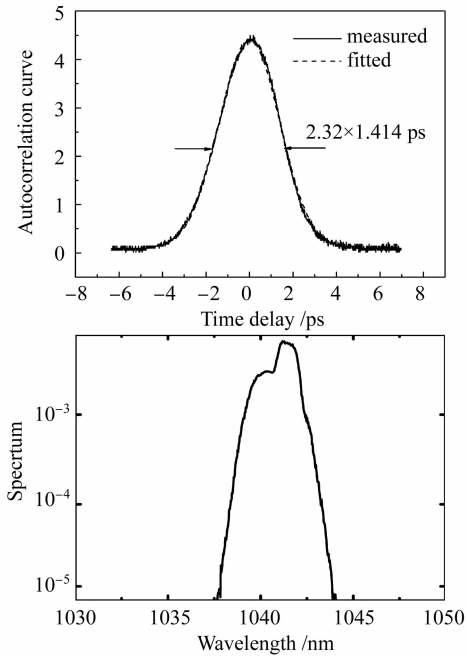


图4 信号光的自相关曲线和光谱

Fig. 4 Autocorrelation curve and the spectrum of the seed pulse

3 结果及分析

首先测量了没有种子信号时从光纤中透射出的抽运光功率,如图5所示。从图中可以看出,在没有信号光时,实验所用光纤对抽运光的吸收效率较低,

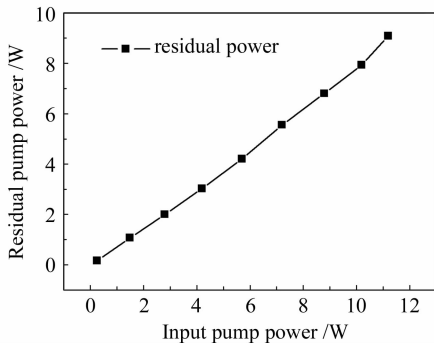


图5 光纤透射抽运功率随入纤抽运功率的变化曲线

Fig. 5 Residual pump power versus the input pump power

大部分功率都从光纤的另一端透射出去。这一结果表明光纤的掺杂浓度偏低,在有限的光纤长度内光纤对抽运光的吸收效率比较低。

将100 mW的种子光引入到放大器中,显然,由于信号光的引入,光纤对抽运光的吸收也有所增加。图6给出了放大后脉冲输出功率的变化曲线。图中显示放大后脉冲的输出功率随抽运功率的增加而线性增加,在最高入纤抽运功率为11.2 W时,获得了放大后脉冲功率最大为2.41 W。

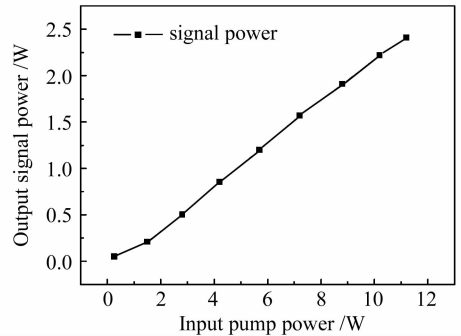


图6 信号放大后功率随入纤抽运功率的变化曲线

Fig. 6 Amplified signal power versus input pump power

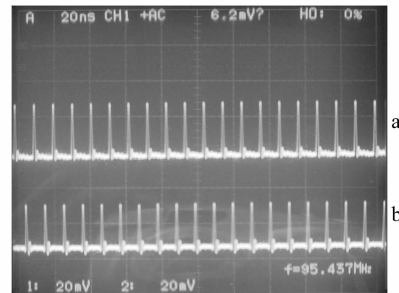


图7 示波器监测的脉冲序列(a:放大后信号光; b:放大前信号光)

Fig. 7 Trains of pulses on an oscilloscope (a: the amplified signal; b: the seed signal)

图7是模拟示波器(Iwatsu-SS-7840, Japan)监测的从振荡器输出的信号光与从放大器输出的信号光锁模脉冲序列。测量放大后脉冲的自相关曲线如图8所示。可见,相对于入射脉冲,出射脉冲的宽度有所增加,从2.32 ps增加到3.0 ps,这可能是由于入射脉冲本身即带有一定的正啁啾,在隔离器及光纤的正色散作用下被展宽。

在所用最大入纤抽运功率11.2 W时,用扫描光谱仪(AQ-6315A, ANDO, Japan)测得无种子信号时光纤的自发辐射光谱与有种子信号时的放大脉冲光谱,如图9所示。

从图9可以看出,由于脉冲信号的注入,自发辐射光谱强度降低了5~10 dB,这是因为注入的信号

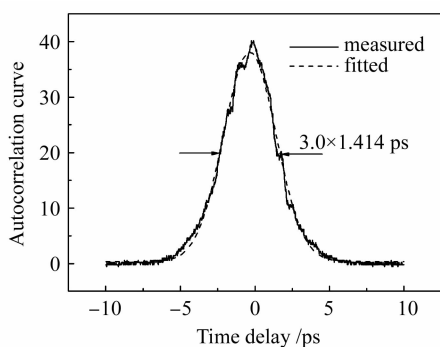


图 8 放大后脉冲的相关曲线

Fig. 8 Autocorrelation of amplified signal

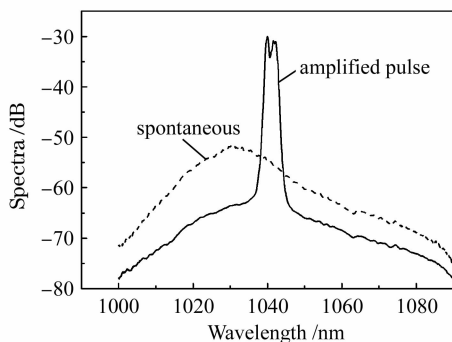


图 9 光纤的自发辐射光谱与放大脉冲信号光谱

Fig. 9 Spectra of the spontaneous radiation and amplified signal

光消耗了激光上能级的粒子数。信号频谱的强度要比自发辐射基底大30 dB左右,这表明输出脉冲具有比较好的信噪比。与入射种子信号的光谱相比较,放大后脉冲的光谱被展宽到3.2 nm以上,并出现了轻微的振荡结构,这是光纤的色散与非线性对脉冲作用的结果,数值模拟计算也验证了这一现象。

4 结 论

介绍了利用国产双包层大模场掺 Yb³⁺ 光纤作为放大器的增益介质进行脉冲信号放大的实验研究。将宽度为2.32 ps,功率为100 mW的锁模脉冲

信号输入光纤中,在11.2 W抽运光的作用下,获得了最高2.41 W,脉宽为3.0 ps的超短脉冲信号。这一功率的皮秒脉冲可以用于大功率超连续谱的产生等应用;这一工作的展开为国产化大模场掺 Yb³⁺ 光纤的开发提供了经验,对国产化光纤放大器的发展有着借鉴意义。相信通过采用性能更好的光纤,以及增加抽运功率,可以获得更高功率的超短脉冲输出。

参 考 文 献

- 1 J. Limpert, F. Röser, T. Schreiber *et al.*. High-power ultrafast fiber laser systems [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(2):233~244
- 2 F. Röser, J. Rothhard, B. Ortac *et al.*. 131 W 220 fs fiber laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(20):2754~2756
- 3 Shang Liang, Song Zhiqiang, Mao Qinghe. Experimental-research on output characteristics of high power Yb³⁺-doped double clad fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):755~758
尚亮,宋志强,毛庆和. 高功率掺镱光纤激光器输出特性的实验研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):755~758
- 4 Wang Chuncan, Zhang Fan, Geng Rui *et al.*. Study on the improved high-power femtosecond pulse generation system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):655~660
王春灿,张帆,耿蕊等. 改进的高功率飞秒脉冲系统理论研究[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):655~660
- 5 Ding Guanglei, Shen Hua, Yang Lingzhen *et al.*. High repetition rate femtosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(6):886~890
丁广雷,沈华,杨玲珍等. 高重复频率飞秒掺镱光纤放大器[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(6):886~890
- 6 Bo Peng, Qiang Liu, Mali Gong *et al.*. Acousto-optic Q-switched cladding-pumped ytterbium-doped fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7):415~417
- 7 Libo Li, Qihong Lou, Jun Zhou *et al.*. High power low-order modes operation of a multimode fiber laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(4):221~222
- 8 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