

# 高 峰 值 功 率 亚 纳 秒 脉 冲 光 纤 放 大 器 特 性 研 究

杜松涛<sup>1,2</sup> 王子薇<sup>1,2</sup> 何 晶<sup>1,2</sup> 王兆坤<sup>1,2</sup> 孟俊清<sup>1</sup> 周 军<sup>1</sup> 楼祺洪<sup>1</sup>  
魏运荣<sup>1</sup> 王之江<sup>1</sup> 李骁军<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 上海飞博激光科技有限公司 上海 201800)

**摘要** 以被动调 Q 的固体薄片激光器作为种子光源, 以中心波长 976 nm 的半导体激光器为抽运源, 通过端面抽运耦合, 搭建了窄脉宽双包层掺镱光纤放大器。实验研究了前向、后向端面抽运方式对窄脉宽双包层掺镱光纤放大器的输出平均功率、激光光谱、脉冲宽度等特性的影响, 并进行分析讨论。结果表明, 采用后向抽运方式, 窄脉宽双包层掺镱光纤放大器, 获得了平均功率为 9.3 W 的放大激光输出, 重复频率为 10 kHz, 脉冲宽度为 450 ps, 峰值功率大于 2 MW。

**关键词** 光纤激光; 薄片激光器; 皮秒脉冲; 前向抽运; 后向抽运

**中图分类号** O436; TN248.1; TN253 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0602014

## Study on Characteristics of Picosecond Pulsed Fiber Amplifier with High Peak Power

Du Songtao<sup>1,2</sup> Wang Ziwei<sup>1,2</sup> He Jing<sup>1,2</sup> Wang Zhaokun<sup>1,2</sup> Meng Junqing<sup>1</sup>  
Zhou Jun<sup>1</sup> Lou Qihong<sup>1</sup> Wei Yunrong<sup>1</sup> Wang Zhijiang<sup>1</sup> Li Xiaojun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China  
<sup>3</sup> Shanghai Feibo Laser Technologies Co., Ltd, Shanghai 201800, China

**Abstract** A subnanosecond pulsed, one-stage Yb-doped fiber master oscillator power amplifier (MOPA) system for different pumping constructions is reported, which is seeded by a passively Q-switched Nd:YAG microchip laser. The comparison and discussions of average power, spectrum, together with pulse temporal profile of output laser under the forward pumping and backward pumping conditions are presented. Results show that the latter one provides the better performance, in which average output power as high as 9.3 W is achieved with pulse duration of 450 ps at 10 kHz repetition rate. The corresponding peak power is higher than 2 MW.

**Key words** fiber laser; thin disk laser; picosecond; forward pumping; backward pumping

**OCIS codes** 140.3510; 060.2310; 060.7140

## 1 引 言

可实现高功率输出的皮秒脉冲光纤激光器具有高光束质量、高电-光转化效率, 可同时实现冷、热加工等优势, 在工业领域、生物医疗领域以及谐波

变换等领域有着较大的应用前景<sup>[1~3]</sup>。随着大模场双包层光纤制作技术和包层抽运技术的发展, 国际上对采用基于主振荡-功率放大(MOPA)技术的光纤放大器获得高功率皮秒脉冲激光输出的研究逐步

收稿日期: 2012-11-04; 收到修改稿日期: 2012-12-25

基金项目: 上海市青年科技启明星计划(12QH1401100)资助课题。

作者简介: 杜松涛(1978—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事高功率脉冲光纤激光器方面的研究。

E-mail: songtaodu@mail.siom.ac.cn

导师简介: 楼祺洪(1942—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学、激光技术及其应用等方面的研究。

E-mail: qhlou@mail.shnc.ac.cn

升温<sup>[4~10]</sup>。2005年,英国南安普顿大学实现了平均功率321 W,脉宽20 ps,重复频率1 GHz的脉冲激光输出<sup>[7]</sup>。同年,美国华盛顿大学实现了平均功率近30 W,脉宽450 ps,重复频率13.4 kHz的脉冲激光输出<sup>[8]</sup>。2010年法国Pierrot等<sup>[9]</sup>实现了平均功率83 W,脉宽30 ps,重复频率5.9 MHz的脉冲激光输出,2009年,国内国防科学技术大学<sup>[10]</sup>也实现了平均功率96 W,脉宽13 ps,重复频率59.8 MHz的激光输出。

上述报道中多采用锁模激光器作为种子源,因此重复频率较高,虽然通过放大器获得了高功率的输出,但单脉冲能量较低。另外,已报道的研究工作主要集中在放大器输出功率和效率等方面,而抽运方式对输出激光特性的影响未见报道。为了获得高脉冲能量,本文采用重复频率较低的调Q激光器作为种子光,构建了一级双包层光纤放大器,对前向、后向不同抽运方式的掺镱双包层光纤亚纳秒脉冲放大器的输出平均功率,输出激光光谱、脉冲宽度等特性进行了研究。

## 2 实验装置

实验分别采用如图1(a)和(b)所示的实验装置。种子源采用一台激光二极管(LD)抽运Nd:YAG,Cr<sup>4+</sup>:YAG复合晶体被动调Q的激光器,该技术具有结构紧凑,输出功率高等特点,可以

大大减少光纤放大级数,从而降低系统的复杂性。放大光纤采用一段2.5 m长的八边形双包层高掺杂掺镱光纤(YDF)作为增益介质,纤芯直径/内包层直径为50/400 μm,纤芯/包层有效数值孔径为0.13/0.45,包层在976 nm处的吸收系数为6 dB/m。采用尾纤输出的中心波长为976 nm的LD作为抽运源,输出光纤芯径为200 μm,数值孔径为0.22,最大输出功率为60 W。采用前向端面抽运的方式如图1(a)所示,种子光通过隔离器后经过双色镜与准直的抽运光被透镜同时耦合到放大光纤的一端,双色镜为对976 nm高反(92%)、1064 nm高透(97%),抽运耦合效率约为85%。放大输出的信号光经过一个同样的双色镜后滤除残余的抽运光。图1(b)采用了后向抽运的方式,种子光通过隔离器后经过上述相同的双色镜后耦合到放大光纤,准直的抽运光经过一个双色片后被耦合到放大光纤的输出端。为保护抽运源不被激光损伤,抽运源前增加一个1064 nm带阻滤波片。为了保证两种不同抽运方式下输出激光脉冲的可比性,实验采用了同一根放大光纤,两种结构中所使用的光学元件完全相同。为了避免高功率下的光纤端面损伤以及抑制放大过程中端面菲涅耳反射引起的放大自发辐射(ASE),将光纤输出端熔接上带斜角(8°)的端帽,如图1(a)中插入的图片所示。

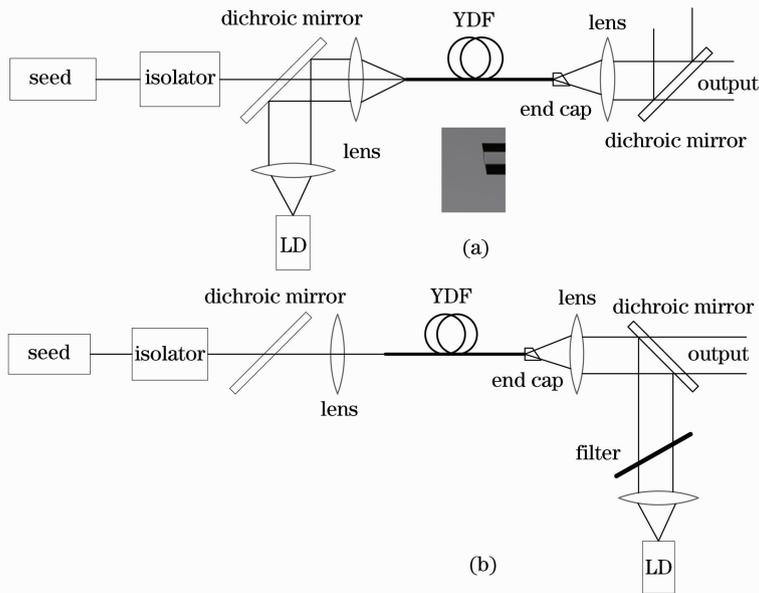
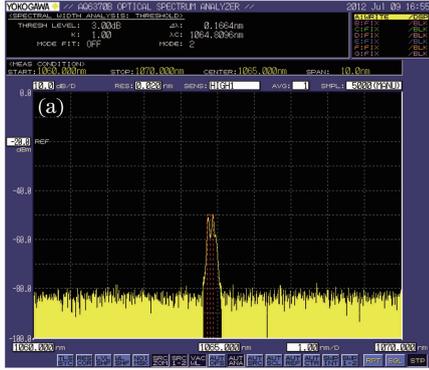


图1 皮秒脉冲光纤放大器实验装置。(a)前向抽运;(b)后向抽运

Fig. 1 Experimental setup of picosecond fiber amplifier. (a) Forward pump; (b) backward pump

### 3 实验结果及分析

调节实验装置,首先测量了种子源输出的脉冲激光特性。采用 OPHIR 3A 功率计测得种子源输出激光平均功率为 300 mW;激光波长采用 YOKOGAWA AQ6370 光谱分析仪测量,测得激光



中心波长为 1064.3 nm,光谱带宽为 0.16 nm,存在两个振荡模,如图 2(a)所示;采用高速示波器 (Tektronix TDS 6124C)和高速光电探测器 (EOT ET-3500)测得激光脉冲的重复频率为 10 kHz,脉冲宽度为 420 ps,如图 2(b)所示。

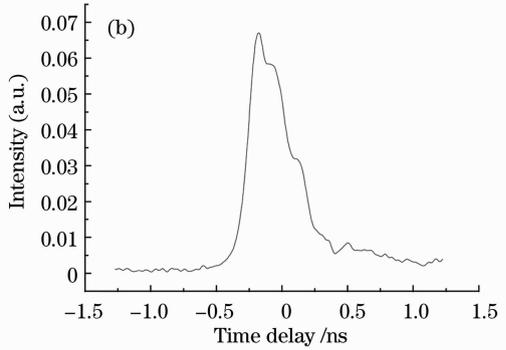


图 2 (a)种子源光谱;(b)种子源脉冲波形

Fig. 2 (a) Spectrum of seed pulse; (b) temporal profile of seed pulse

放大器输出的激光功率采用 ThorLab S370C 功率计测量,为了保证测到的功率为真实的信号光功率,功率计前放置了一个  $1064 \pm 5$  nm 的窄带滤波片,1064 nm 波长的透射率为 98%。图 3 给出了在不同抽运方式下得到的放大输出平均功率(单脉冲能量)与抽运功率的对比。可以看出,在两种抽运方式下的输出脉冲激光平均功率(单脉冲能量)均随抽运功率的增大而增大,都存在约 10 W 的抽运阈值。后向抽运方式输出的激光功率明显优于前向抽运方式。在抽运功率为 35 W 时,前向抽运方式获得了平均功率为 4.7 W 的输出,单脉冲能量为  $470 \mu\text{J}$ 。后向抽运方式下获得了最大平均功率为 9.3 W 的输出,单脉冲能量达到  $930 \mu\text{J}$ ,对应的峰值功率大于 2 MW。光纤端面熔接了长度为 2 mm 的端帽,使得最大输出时光纤端面的能量密度降为  $1.4 \text{ J}/\text{cm}^2$ ,远小于文献[11]报道的损伤阈值,避免了光纤端面在高功率下的损伤。前向抽运方式下,激光的斜率效率为 20%,考虑到耦合效率和反射镜的损耗,实际效率高于该值;后向抽运方式下,激光的斜率效率为 38.5%。后向抽运输出激光的斜率效率高于前向抽运方式,由文献[12]报道提到采用前向和后向抽运在连续输出功率下物理分析类似,本文中的结果主要是因为不同的抽运方式下,产生的反转粒子数沿光纤分布不均,从而导致增益不同,后向抽运方式更有利于输出较高的功率。另外,前向抽运时,增益饱和和带来的合作荧光效应和非线性效应也是制约其信号放大输出功率的因素,后面会

做进一步讨论。

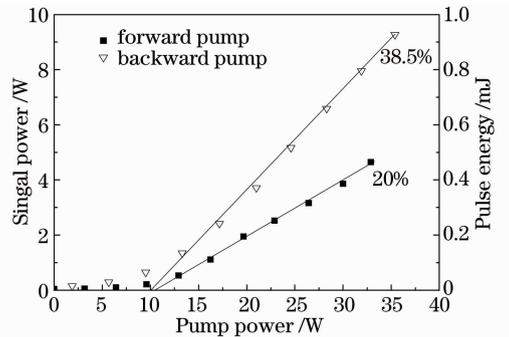


图 3 两种抽运方式下输出激光功率(脉冲能量)随抽运光功率变化的关系

Fig. 3 Pulse average power and corresponding pulse energy as a function of pump power under different pump conditions

实验中,在最高输出平均功率时,测量了两种抽运方式下的输出激光脉冲波形,如图 4 所示。从图中可以看出,两种抽运方式下输出的激光脉冲没有观测到明显区别,脉冲宽度均为 450 ps。与种子源激光脉冲相比,放大输出的激光脉冲均存在一定的畸变,这主要是因为脉冲放大过程中瞬态增益(激光脉冲的前沿有更高的增益)和高峰值功率下自相位调制(SPM)效应的影响所产生的<sup>[13]</sup>。这些效应最终也会影响信号放大输出的功率。

图 5 为最高输出功率时两种抽运方式下输出激光的光谱。从图 5(a)中可以看出,在前向抽运方式下,放大器输出激光光谱包括四个部分,第一为残余的抽运光,中心波长在 976nm 处;第二部分来自于

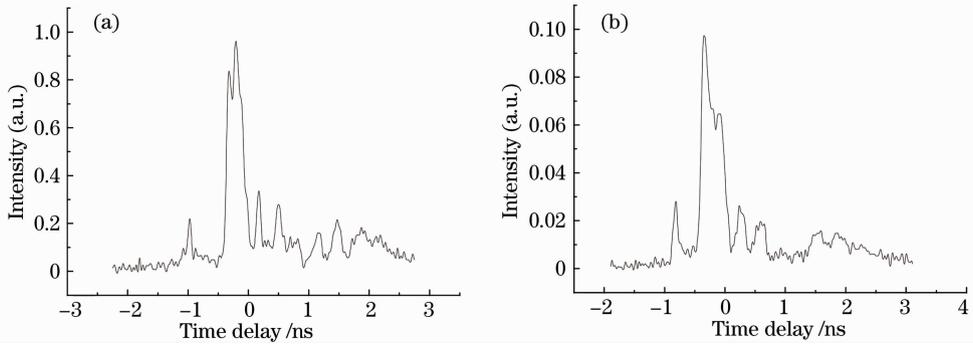


图 4 放大输出激光脉冲波形。(a)前向抽运方式;(b)后向抽运方式

Fig. 4 Temporal profile of amplified pulses. (a) Forward pump; (b) backward pump

光纤放大过程中产生的放大自发辐射(ASE),其中心波长位于1030 nm附近,其强度比信号光小很多,大于35 dB;第三部分为信号光,其中心波长为1064.3 nm,光谱半峰全宽为0.2 nm;第四部分中心波长为1116 nm,强度比信号光低约30 dB,这主要来自于光纤中的一级受激拉曼散射(SRS)。从图5(b)中可以看出,在后向抽运方式下,由于抽运光与信号光的传输方向相反,所以在输出光中不存在残余抽运光,且光谱与前向抽运方式下输出的激光光谱相比,除信号

光外只观测到1030 nm附近的ASE,其强度比信号光低45 dB。又对两种抽运方式下输出激光光谱的精细结构进行了测量,两种抽运方式输出的激光光谱精细结构相同,如图6所示。与种子源输出激光光谱相比,随着放大输出激光功率的增加,放大输出光谱发生展宽,在最高功率时光谱上可以观测到分裂出新的峰,这主要是由于在高峰值功率下SPM效应引起的<sup>[13]</sup>,这与前面讨论的脉冲畸变相对应。

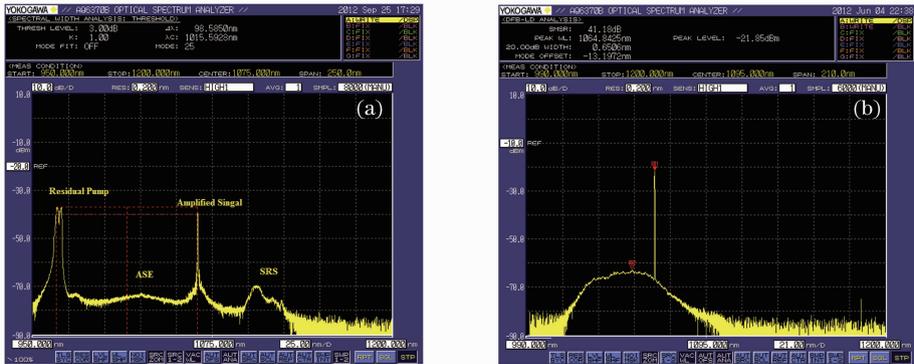


图 5 放大输出激光光谱。(a)前向抽运;(b)后向抽运

Fig. 5 Spectra of amplified pulses. (a) Forward pump; (b) backward pump

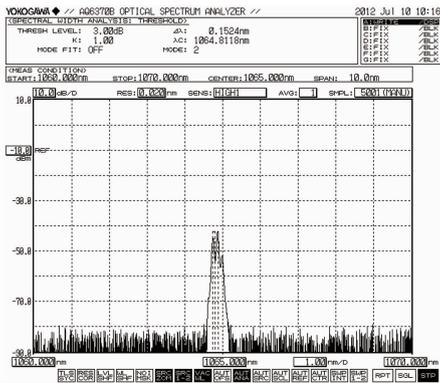


图 6 放大输出激光精细光谱

Fig. 6 High-resolution scan of amplified pulse spectrum  
在前向抽运方式下,最大输出功率时,观测到光

纤输出肉眼可见的红光。采用 Ocean HR4000 光谱仪对输出激光的可见光区光谱进行了测量,光谱仪前放置一个1064 nm的高反片(1064 nm反射率99.9%,带宽 $1064 \pm 5$  nm),以避免放大信号光对探测的影响。测得光谱如图7所示,在600~850 nm区域观测到多个峰值。这主要是因为前向抽运时,抽运光和信号光从光纤的同一端注入,在注入端抽运光强度最大,信号光强度最小,光纤中存储的能量无法有效地转换为信号光,处于上能级的Yb离子以能量传递的方式将能量转移给光纤中的其他离子(如Pr)<sup>[14]</sup>或者非桥氧空穴中心(NBOHC)<sup>[15]</sup>,从而产生合作荧光效应。这也是影响前向抽运输出功率的因素之一。

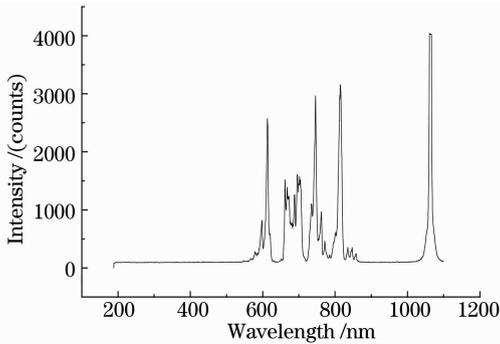


图7 前向抽运方式下输出激光可见光区光谱

Fig. 7 Visible spectrum of amplified pulse under forward pumping

采用 PRIMES LQM-HP 光束质量分析仪对后向抽运方式下放大器输出时的激光光束质量进行了测量。在最高功率输出时,输出激光的光束质量因子  $M^2$  为 4.5。

## 4 结 论

以重复频率较低的调 Q 激光器作为种子源,采用前向和后向两种不同的抽运方式构建了单级双包层光纤放大器,对这两种不同抽运方式的掺镱双包层光纤亚纳秒脉冲放大器的输出平均功率,输出激光光谱、脉冲宽度等特性进行了比较分析。实验研究证明后向抽运方式由于抽运光与信号光传输方向相反,可以使得信号光强度沿光纤呈指数增长趋势,有效减小各类非线性效应,更有利于输出高功率脉冲。这对短脉冲光纤放大的研究具有一定的指导意义。实验中采用后向抽运方式,在重复频率 10 kHz 下,获得了最大平均功率为 9.3 W 的输出,单脉冲能量达到 930  $\mu\text{J}$ ,脉冲宽度 450 ps,对应的峰值功率大于 2 MW。

## 参 考 文 献

1 Lin Li. The advances and characteristics of high-power diode laser materials processing[J]. *Laser Material Processing*, 2000, **34**(4-6): 231~253

2 Y. Hori, I. Kuromatsu, Y. Sugimura. Photosensitive vaporization of the prostate using high power (80 W) KTP laser: one year follow up of the first 101 patients in Japan[J]. *Int J Urol.*, 2008, **15**(12): 1067~1071

3 W. E. Glenn. Solid-state light sources for color projection[J]. *Advanced Solid State Lasers*, 1997, **10**: 38~45

4 Liu Pengzu, Hou Jing, Zhang Bin *et al.*. 1550 nm passively mode-locked fiber laser with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702017  
刘鹏祖, 侯静, 张斌等. 基于半导体可饱和吸收镜的 1550 nm 被动锁模光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0702017

5 Liu Jiang, Wu Sida, Wang Ke *et al.*. Passively mode-locked and Q-switched Yb-doped fiber lasers with graphene-based saturable absorber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0802001  
刘江, 吴思达, 王科等. 基于石墨烯可饱和吸收体的被动锁模、被动调 Q 掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0802001

6 Liu Wei, Chen Tao, Dai Jianning *et al.*. All-fiberized Yb fiber laser with passively generated sub-nanosecond pulse output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1214003  
刘伟, 陈滔, 戴建宁等. 全光纤化的被动式亚纳秒脉冲 Yb 光纤激光器研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1214003

7 P. DuPriez, A. Piper, A. Malinowski *et al.*. 321 W average power, 1 GHz, 20 ps, 1060 nm pulsed fiber MOPA source[C]. California: Optical Fiber Communication Conference, 2005. PDP3

8 Fabio Di Teodoro, Christopher D. Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3299~3301

9 S. Pierrot, J. Saby, A. Bertrand *et al.*. All fiber high energy, high power picosecond laser[C]. San Jose: Conference on Lasers and Electro-Optics, 2010. CFD3

10 Shengping Chen, Hongwei Chen, Jing Hou *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(26): 24008~24012

11 A. C. Tien, S. Backus, H. Kapteyn *et al.*. Short-pulse laser damage in transparent materials as a function of pulse duration [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1999, **82**(19): 3883~3886

12 Guohua Liu, Deming Liu. Optimization of pumping mode for double-clad fiber lasers[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**: 256~260

13 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. 3rd edition, San Diego: Academic Press, 2001

14 E. Nakazawa, S. Shionoya. Cooperative luminescence in YbPO<sub>4</sub> [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, **25**(24): 1710~1712

15 P. D. Dragic, C. G. Carlson, A. Croteau. Characterization of defect luminescence in Yb doped silica fibers; part I NBOHC[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(7): 4688~4697

栏目编辑: 宋梅梅