

# 高功率全光纤掺镱皮秒光纤激光器

林怀钦 郭春雨 阮双琛 欧阳德钦 杨锦辉 伍一鸣

(深圳大学电子科学与技术学院, 深圳市激光工程重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要** 采用四级主振荡功率放大(MOPA)结构, 研制了高功率全光纤掺镱皮秒光纤激光器。种子源采用基于非线性偏振旋转(NPR)效应的被动锁模光纤激光器, 中心波长为 1062.8 nm, 重复频率为 17.51 MHz, 谱线宽度为 5 nm, 平均功率为 7.14 mW。为了抑制功率放大过程中的非线性效应, 通过全光纤重复频率扩展器将种子脉冲激光的重复频率提高到 281.7 MHz。主功率放大级以长度为 4.8 m 的大模场面积掺镱双包层光纤作为增益介质。在抽运功率为 60 W 时, 获得的最大平均输出功率为 31.2 W, 光-光转换效率为 52%。输出激光脉冲的中心波长为 1063.7 nm, 脉冲宽度为 10.2 ps, 重复频率为 281.7 MHz, 谱线宽度为 7 nm, 并对激光脉冲的时域和频域特性进行了分析。

**关键词** 激光器; 皮秒光纤激光器; 主振荡功率放大; 掺镱双包层光纤; 被动锁模光纤激光器; 全光纤

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0702013

## High-Power All-Fiber Yb-Doped Picosecond Fiber Laser

Lin Huaiqin Guo Chunyu Ruan Shuangchen Ouyang Deqin  
Yang Jinhui Wu Yiming

(Shenzhen Key Laboratory of Laser Engineering, College of Electronic Science and Technology,  
Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract** A high-power all-fiber Yb-doped picosecond fiber laser is achieved via a four-stage master oscillator power amplifier (MOPA) configuration. The seed source is a passively mode-locked fiber laser based on nonlinear polarization rotation (NPR) effect, with a central wavelength of 1062.8 nm, a repetition rate of 17.51 MHz, a spectral linewidth of 5 nm and an average power of 7.14 mW. To suppress the nonlinear effects in the process of power scaling, the repetition rate is upgrade to about 281.7 MHz through an all-fiber repetition rate extender. A 4.8 m large mode area (LMA) Yb-doped double clad fiber is utilized as gain medium in the main power amplifier. The maximal average output power of 31.2 W is obtained at the pump power of 60 W, corresponding to an optical-to-optical conversion efficiency of 52%. The output laser pulse has a central wavelength of 1063.7 nm, a pulse duration of 10.2 ps, a repetition rate of 281.7 MHz and a spectral linewidth of 7 nm. Moreover, the characteristics of the laser pulse are analyzed both in time and frequency domain.

**Key words** lasers; picosecond fiber lasers; master oscillator power amplifier; Yb-doped double clad fiber; passively mode-locked fiber laser; all-fiber

**OCIS codes** 140.3538; 140.3615; 060.2320; 060.3510

## 1 引 言

高功率皮秒光纤激光器具有峰值功率高和热稳定性好的特性, 在材料表面处理、通信遥感、生物医

学、超连续谱产生、光学参量振荡、倍频等方面有着重要的应用<sup>[1-6]</sup>。尤其随着双包层光纤和全光纤包层抽运技术的快速发展<sup>[7-9]</sup>, 皮秒光纤激光器的输

**收稿日期**: 2013-01-17; **收到修改稿日期**: 2013-03-06

**基金项目**: 国家 973 计划(2010CB735904)、国家自然科学基金(61275144)、深圳市科技研发基金基础研究计划(JC201005250048A、110430002983024)和深圳大学科研基金资助面上项目(201203)

**作者简介**: 林怀钦(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率光纤激光器和放大器等方面的研究。

E-mail: linhuaiqin@email.szu.edu.cn

**导师简介**: 阮双琛(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器及超连续谱等方面的研究。

E-mail: scruan@szu.edu.cn(通信联系人)

输出功率得到不断的提高。2006年, Dupriez等<sup>[10]</sup>采用20 ps法布里-珀罗增益开关半导体激光器作为种子源, 利用主振荡功率放大(MOPA)技术实现了平均输出功率为321 W的激光输出。但是该方案采用的是自由空间透镜耦合和光纤熔接两者结合方式, 不利于光纤激光器的实用化和产品化。因此, 全光纤化的光纤激光器成为了新的研究方向。2009年, 陈胜平等<sup>[11]</sup>利用半导体可饱和吸收镜(SESAM)被动锁模皮秒光纤激光器作为种子, 采用MOPA放大方案实现了96 W单模激光输出的全光纤化皮秒光纤激光器。2011年, 宋锐等<sup>[12]</sup>采用相同的全光纤化MOPA方案将平均输出功率提高到157 W。这些光纤激光器的种子源都是采用半导体可饱和吸收镜被动锁模方案。在本研究中, 采用基于非线性偏振旋转(NPR)效应的环形腔被动锁模光纤激光器作为种子源。NPR锁模具有自启动特性, 锁模状态稳定, 不存在类似SESAM的损伤阈值, 能产生更高单脉冲能量的锁模脉冲序列。本课题组已利用非线性环形腔被动锁模光纤激光器作为种子源, 通过三级MOPA功率放大后获得了平均功率为18.4 W的皮秒光纤激光器<sup>[13]</sup>。另外, 由于光纤纤芯中出现的受激拉曼散射(SRS)和自相位调制(SPM)等非线性效应会抑制脉冲光纤激光器的平均输出功率, 因此通过全光纤重复频率扩展器对激

光脉冲的重复频率进行了扩展, 以降低MOPA后脉冲的峰值功率, 减小不良非线性效应对系统的影响。最终, 通过四级MOPA功率放大实现了平均输出功率为31.2 W, 中心波长为1063.7 nm, 脉冲宽度为10.2 ps, 重复频率为281.7 MHz, 谱线宽度为7 nm的全光纤皮秒光纤激光器。

## 2 实验装置

图1为基于四级MOPA结构的高功率皮秒光纤激光器实验装置图。[如图1(a)所示]种子源是基于非线性偏振旋转效应的环形腔被动锁模光纤激光器, 由一个单模976 nm激光二极管通过980/1060 nm波分复用器(WDM)对增益介质进行抽运。为减小色散并增大重复频率, 采用长度为2.4 m的高掺杂浓度(975 nm处的吸收系数约250 dB/m)单模(SM)单包层掺镱光纤作为增益介质, 其纤芯直径为7.5 μm, 数值孔径为0.11, 包层直径为125 μm。脉冲在环形腔内传输, 由于自相位调制(SPM)效应和交叉相位调制(XPM)效应会引起强度依赖的偏振态变化。通过控制偏振控制器1(PC1)和偏振控制器2(PC2)的位置, 可以将激光脉冲中心的高能量部分调整为线偏振并通过起偏器(ILP), 而脉冲两翼则被阻隔, 从而使脉冲在腔中不断地被压缩, 实现窄脉冲输出。此外, 由于腔内的模式竞争效应, 通过调整可调起偏器使其处于

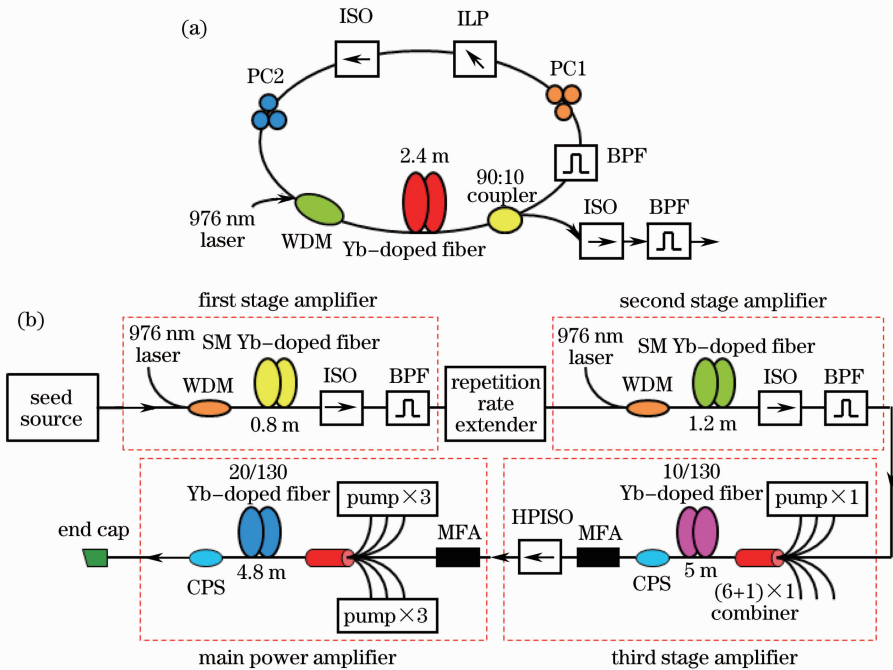


图1 高功率皮秒光纤激光器的实验装置图。(a) 种子源; (b) 四级功率放大级的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of high-power picosecond fiber laser. (a) Seed source; (b) four-stage power amplifier

不同的偏振态时,可以获得中心波长在1027 nm到1072 nm之间的一系列激光脉冲。因此,为了稳定输出激光脉冲的中心波长,在环形腔中加入了一个中心波长为1064 nm,3 dB带宽为10 nm的光纤滤波器(BPF),而偏振无关隔离器(ISO)则保证了激光脉冲在环形腔内的单向传输。在调整偏振控制器得到稳定的锁模脉冲后,采用一个10:90的光纤耦合器将一部分锁模能量输出腔外。

图1(b)为四级功率放大级的实验装置图。第一功率放大级采用长度为0.8 m的单模单包层掺镱光纤作为增益介质,抽运源仍采用单模976 nm激光二极管,通过980/1060 nm波分复用器进行耦合,然后连接一个光纤隔离器和一个带通光纤滤波器。为了有利于后续激光脉冲功率的扩展,采用全光纤重复频率扩展器将第一级输出激光脉冲的重复频率扩展到281.7 MHz。第二级功率放大级采用与种子源、第一功率放大级同类型的单模单包层掺镱光纤作为增益介质,长度为1.2 m,抽运源同样采用单模976 nm激光二极管。在种子源、第一功率放大级和第二功率放大级的输出端,分别连接一个光纤隔离器和一个10 nm带通光纤滤波器,能够避免反馈光对种子源和抽运源的损坏,并抑制不利的放大自发辐射(ASE)。第三功率放大级的增益介质是长度为5 m的掺镱双包层光纤,纤芯直径为10  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.075,内包层直径为130  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.46,975 nm吸收系数约5 dB/m。采用一个大功率多模976 nm激光器作为抽运源,并利用正向抽运的方式通过一个(2+1) $\times$ 1光纤合束器(抽运效率约96%,信号光插入损耗约0.35 dB),将激光耦合进入双包层光纤的内包层中。主功率放大级的增益介质是长度为4.8 m的大模场面积掺镱双包层光纤,纤芯直径为20  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.08,内包层直径为130  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为0.46,975 nm吸收系

数约8.25 dB/m。采用4个大功率多模976 nm激光器作为抽运源,同样利用正向抽运的方式通过一个(6+1) $\times$ 1光纤合束器(抽运效率约95%,信号光插入损耗约2.57 dB)进行耦合。为了消除在内包层中残留的抽运光,泄漏的激光以及ASE能量,在最后两个功率放大级中采用了自制的包层功率剥离器(CPS)。同时自制的光纤模场适配器(MFA)能够有效降低单模光纤和各种双包层光纤之间的熔接损耗。最后,对输出端进行了处理,利用8°的光纤端帽(end cap)来消除光反馈并减少端面损伤。

### 3 实验结果及分析

通过调整偏振控制器的偏振方向,种子源实现了中心波长为1062.8 nm、重复频率为17.51 MHz、谱线宽度为5 nm、平均功率为7.14 mW的稳定锁模脉冲激光输出。图2为种子源的输出光谱。

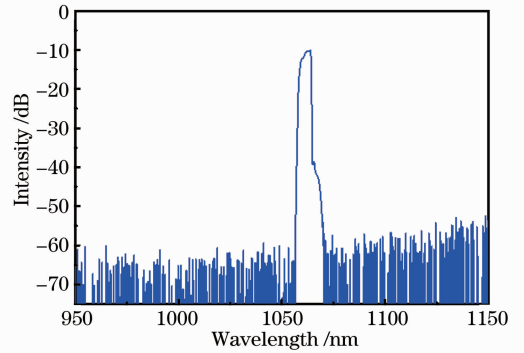


图2 种子源的输出光谱

Fig. 2 Output spectrum of seed source

为了抑制非线性效应并提高输出功率,采用光脉冲重复频率扩展器,获得了重复频率为281.7 MHz的脉冲激光输出。图3(a)和(b)为种子源和重复频率扩展后激光脉冲在时域输出的脉冲序列,重复频率分别为17.51、281.7 MHz。

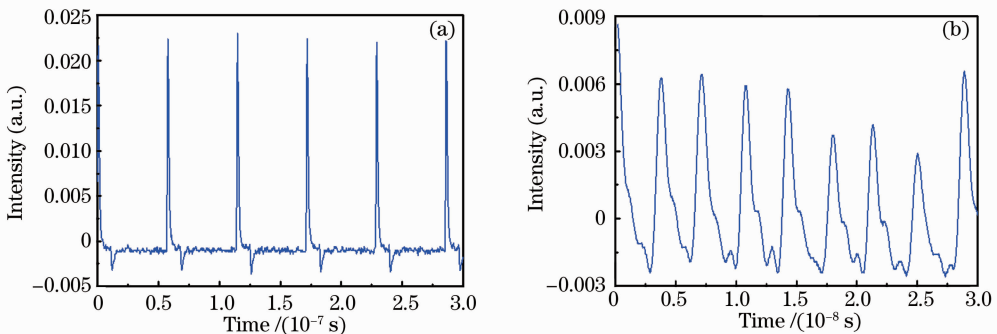


图3 (a) 种子源和 (b) 重复频率扩展后激光脉冲的时域输出脉冲序列

Fig. 3 Output pulse train of (a) seed source and (b) extended repetition frequency laser pulse in time domain

经过第一、二级功率预防大后,获得了平均输出功率为 60.1 mW,重复频率为 281.7 MHz 的稳定锁模脉冲,并且在 50 dB 强度范围内没有出现任何非线性效应。图 4 显示了第三功率放大级输出功率从 0.53 W 增加到 3.01 W 对应输出的光谱。当抽运入纤功率为 8.5 W 时,最大输出激光平均功率为 3.01 W,光-光转换效率为 35.4%。由于所用的 CPS 能够将大量的抽运光剥离掉,因此谱线中没有出现任何的抽运光成分。当输出功率为 2.52 W 时,产生了明显的非线性效应,中心波长为 1062.8 nm 的锁模激光频率下移 13.2 THz,在 1116.2 nm 附近出现了受激拉曼散射(SRS)。而当输出功率达到 3.01 W 时,放大自发辐射(ASE)也比较明显。

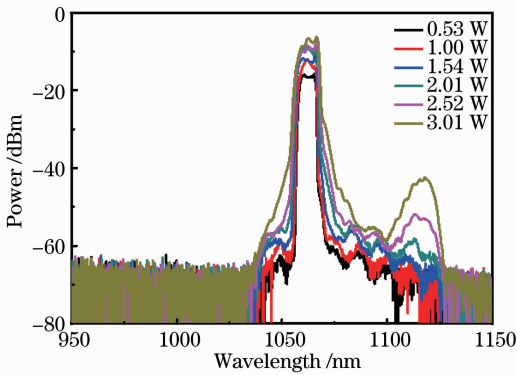


图 4 第三功率放大级在不同输出功率时输出的光谱  
Fig. 4 Output spectra under different output powers of the third-stage power amplifier

为了抑制非线性效应并获得更好的功率放大,采用第三功率放大级输出功率为 2.01 W 的激光作为主功率放大级的种子源。图 5 为在功率 2.01 W 的种子光注入下,主功率放大级的输出功率随抽运功率变化的曲线。当最大抽运功率为 60 W 时,输出功率达到了 31.2 W,光-光转换效率为 52%,且功率曲线保持

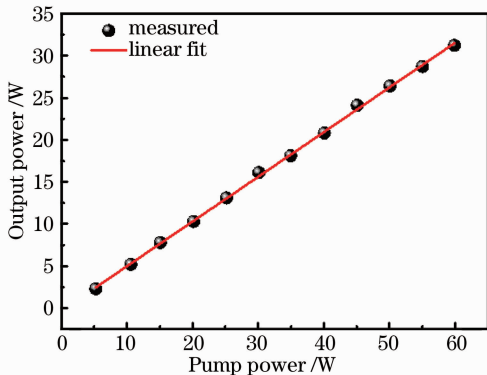


图 5 主功率放大级的输出功率特性  
Fig. 5 Output power characteristic of the main power amplifier

良好的线性增长,没有出现功率饱和现象。

输出的激光脉冲中心波长为 1063.7 nm,重复频率为 281.7 MHz。此外通过自相关仪对输出脉冲的宽度进行了测量,呈现对称的高斯型强度自相关曲线,脉冲宽度为 10.2 ps,如图 6 所示。图 7 显示了主功率放大级输出功率从 5.24 W 增加到 31.2 W 对应输出的光谱。从图中可见,在 977.2 nm 处出现了未吸收完的抽运功率谱线,与锁模部分强度相差 38 dB 以上。主要是由于抽运激光中心波长出现漂移,偏离了双包层光纤的最佳吸收波长范围,造成了抽运光的残余。另外,随着抽运功率的提高,自相位调制效应使脉冲谱线宽度有 2 nm 的扩展,达到 7 nm。在最大输出功率为 31.2 W 时,峰值功率达到 10.86 kW,ASE 光强度与锁模部分强度相差近 35 dB,得到光谱特性良好的皮秒激光脉冲。

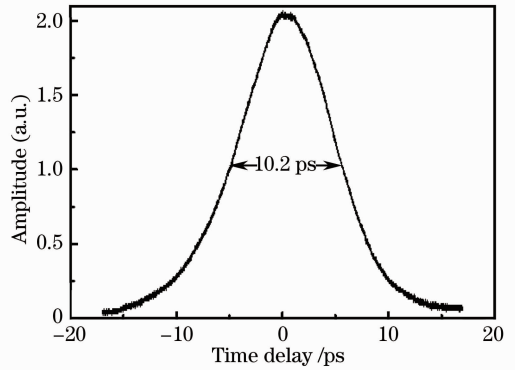


图 6 最大输出功率时测量的自相关曲线  
Fig. 6 Measured autocorrelation trace of the maximum output power

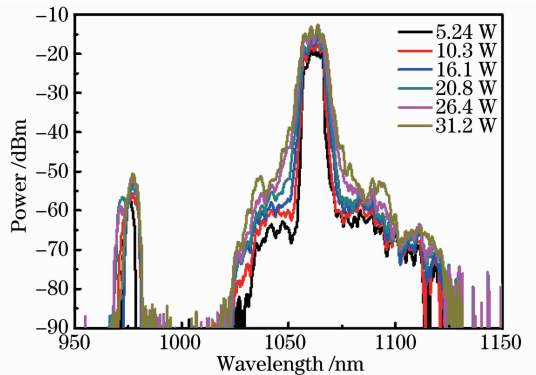


图 7 主功率放大级在不同输出功率时输出的光谱  
Fig. 7 Output spectra under different output powers of the main power amplifier

## 4 结 论

采用基于非线性偏振旋转效应的环形腔被动锁模光纤激光器作为种子源,通过四级 MOPA 结构实

现了全光纤化高功率的皮秒脉冲激光输出,其中心波长为 1063.7 nm,谱线宽度为 7 nm,脉冲宽度为 10.2 ps,重复频率为 281.7 MHz,平均输出功率为 31.2 W,光-光转换效率为 52%。在最高输出激光功率时,并没有出现 SRS 等非线性效应,而且激光与 ASE 光的强度差在 30 dB 以上。实验中,由于所使用的多模 976 nm 激光器输出激光的中心波长漂移严重(从达到激光输出阈值时的 969.6 nm 变化到最高功率输出时的 984.6 nm),而主功率放大级的双包层光纤的最大吸收系数在 976 nm 附近,因而抽运激光大量剩余,导致光-光转换效率较低。接下来的工作将在抽运输出激光波长的稳定,系统结构的改进,不同光纤之间熔接损耗的降低,光纤中非线性效应的抑制等方面进一步研究,有效提升激光的输出功率。

### 参 考 文 献

- 1 K K Chen, S Alam, J H V Price, *et al.*. Picosecond fiber MOPA pumped supercontinuum source with 39 W output power[J]. *Opt Express*, 2010, 18(6): 5426-5432.
- 2 F Kienle, K K Chen, S Alam, *et al.*. High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode[J]. *Opt Express*, 2010, 18(8): 7602-7610.
- 3 K K Chen, S Alam, J R Hayes, *et al.*. 56 W frequency-doubled source at 530 nm pumped by a single-mode, single-polarization, picosecond Yb<sup>3+</sup>-doped fiber MOPA[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2010, 22(12): 893-895.
- 4 Chen Hongwei, Chen Shengping, Hou Jing. 4.6 W All-fiber supercontinuum generation using homemade photonic crystal fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2541-2543.
- 5 Chen Shengping, Chen Hongwei, Hou Jing, *et al.*. 30 W picosecond pulsed fiber laser and high power supercontinuum generation[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(8): 1943-1949. 陈胜平, 谌鸿伟, 侯静, 等. 30 W 皮秒脉冲光纤激光器及高功率超连续谱的产生[J]. *中国激光*, 2010, 37(8): 1943-1949.
- 6 An Hongbo, Niu Lihong, Su Binghua, *et al.*. Experimental study on intra-cavity frequency-doubling at 532 nm in an Yb-doped fiber laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(7): 071403. 安宏波, 牛丽红, 苏秉华, 等. 掺镱双包层光纤激光器内腔倍频绿光实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(7): 071403.
- 7 E Snitzer, H Po, F Hakimi, *et al.*. Double clad, offset core Nd fiber laser[C]. *Optical Fiber Sensors*, OSA Technical Digest Series, 1998. 2: PDS.
- 8 S G Anikitchev, K E Lindsay, A Starodoumov. Method for manufacturing a multimode fiber pump power combiner[P]. US Patent: 7272956, 2007.
- 9 V Dominic, S Maccormack, P Waarts, *et al.*. 110 W fibre laser [J]. *Electron Lett*, 1999, 35(14): 1158-1160.
- 10 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.
- 11 S P Chen, H W Chen, J Hou, *et al.*. 100 W all fiber picosecond MOPA laser[J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 24008-24012.
- 12 R Song, J Hou, S Chen, *et al.*. 157 W all-fiber high-power picosecond laser[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(13): 2497-2500.
- 13 Guo Chunyu, Ruan Shuangchen, Chen Zucong, *et al.*. An all-fiber supercontinuum source pumped with a 18.4 W picoseconds fiber laser[J]. *J Shenzhen University (Science & Engineering)*, 2011, 28(3): 218-224. 郭春雨, 阮双琛, 陈祖聪, 等. 18.4 W 皮秒光纤激光器及其全光纤化超连续谱源[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2011, 28(3): 218-224.

栏目编辑: 宋梅梅