

# 吉赫兹级窄线宽、高峰值功率纳秒光纤激光器

邹峰<sup>1,2</sup> 王兆坤<sup>1,2</sup> 王子薇<sup>1,2</sup> 周翠芸<sup>1</sup> 刘源<sup>1</sup> 杨燕<sup>1</sup> 周军<sup>1</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

**摘要** 报道了基于主振荡功率放大(MOPA)工作方式的吉赫兹级窄线宽、高峰值功率光纤激光器。该激光器以脉冲调制的分布反馈式单频半导体激光器为种子源, 波长为 1064.12 nm, 脉冲宽度为 3.92 ns, 重复频率在 10~50 kHz 内连续可调。采用光纤双程放大结构的预放大级以增加小信号放大能力并抑制强抽运下的自放大辐射, 优化功率放大级光纤长度以抑制窄线宽激光放大过程中的受激布里渊散射, 在重复频率为 10 kHz 时, 获得光谱线宽为 1.5 GHz、峰值功率达 15 kW 的脉冲激光输出。实验研究了不同重复频率时的输出激光脉冲特性。

**关键词** 激光器; 光纤激光器; 窄线宽纳秒脉冲; 半导体激光器调制

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0701001

## Gigahertz Narrow-Linewidth High-Peak Power Nanosecond Fiber Laser

Zou Feng<sup>1,2</sup> Wang Zhaokun<sup>1,2</sup> Wang Ziwei<sup>1,2</sup> Zhou Cuiyun<sup>1</sup>

Liu Yuan<sup>1</sup> Yang Yan<sup>1</sup> Zhou Jun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Lasers 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

**Abstract** A GHz narrow-linewidth high-peak power nanosecond fiber laser based on the master oscillator power amplifier (MOPA) is reported. The modulated distributed feedback single-frequency diode laser seed delivers pulses with wavelength of 1064.12 nm, pulse width of 3.92 ns, and tunable repetition rate from 10 kHz to 50 kHz. A double-pass structure is used in the preamplifier to boost small signal and suppress amplification of spontaneous emission under intense pump. In the power amplifier the stimulated Brillouin scattering is avoided by shortening fiber length. Pulsed laser with 1.5 GHz linewidth and 15 kW peak power is obtained at a repetition rate of 10 kHz. The output pulse characteristics at different repetition rates are studied.

**Key words** lasers; fiber lasers; narrow-linewidth nanosecond pulse; modulation of diode laser

**OCIS codes** 140.3510; 140.3538; 140.2020

## 1 引言

光纤激光器输出激光光束质量好、热管理方便、结构紧凑, 并可以产生高重复频率(千赫兹量级)、窄脉宽(纳秒量级)的脉冲, 作为光发射源在激光雷达、测距与成像方面具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。目前获得纳秒脉冲的主要有调 Q 和主振荡功率放大(MOPA)两种方法<sup>[4]</sup>。以单模半导体激光器为种子源的 MOPA 结构,

收稿日期: 2016-01-07; 收到修改稿日期: 2016-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(U1330134, 61308024, 11174305)、上海市自然科学基金(11ZR1441400)、山东省高等学校科技计划(J13LJ06)、中国科学院青年创新促进会项目、曲阜师范大学博士科研启动项目(bsqd033000112)

作者简介: 邹峰(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率脉冲光纤激光技术等方面的研究。

E-mail: fengzou@siom.ac.cn

导师简介: 周军(1972—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率光纤激光器和准分子激光器等方面的研究。

E-mail: junzhousd@siom.ac.cn(通信联系人)

可以灵活调节种子光源的重复频率、脉冲宽度等参数,并进行功率放大,是脉冲光纤激光器研究的热点。2013年,Teodoro等<sup>[5]</sup>加载相位调制展宽单频脉冲种子,由棒状光子晶体光纤放大获得峰值功率为1.5 MW、脉冲宽度为1.55 ns的脉冲输出。同年,Saracco等<sup>[6]</sup>采用薄片纳秒激光种子加大模场光纤放大获得峰值功率为100 kW、脉冲宽度为1.5 ns的激光输出。上述报道中,MOPA放大级数较多,且功率放大级采用空间耦合方式,系统复杂、体积较大。2011年,周翠芸等<sup>[7]</sup>采用脉冲调制单模带尾纤半导体激光器,全光纤放大,获得波长为1030 nm、峰值功率为16 kW、脉冲宽度为6.53 ns的脉冲输出。但由于采用宽光谱种子,放大后光谱展宽较为严重,超过了激光雷达探测系统中接收滤波器带宽(约为1 nm),导致雷达探测接收过程中有效脉冲能量降低,背景噪声干扰加大。

为满足相干探测系统对光源的要求,本文研究了窄线宽脉冲种子激光的全光纤放大特性,实现了窄线宽、高峰值功率的纳秒级光纤激光器。该激光器系统以直接脉冲调制的单频半导体激光器为种子源,通过双程光纤功率预放和优化主放大光纤的长度,获得了光谱线宽为1.5 GHz,峰值功率达15 kW的脉冲激光输出。以该激光器作为发射光源可以提高探测接收效率,增强信号对比度。该激光器为全光纤化系统,结构简单,便于小型化,应用前景广阔。

## 2 实验装置

窄线宽、窄脉宽、高峰值功率光纤激光器实验结构原理如图1所示。以电调制的分布反馈式单频半导体激光器(DFB-LD)为种子源(连续输出时线宽为2 MHz),中心波长为1064.12 nm,输出调制脉冲宽度为3.92 ns。种子光经过隔离器后进入由环形器、光纤布拉格光栅(FBG)及单模掺镱光纤(SM-YSF)所构成的一级双程光纤预放大结构,FBG(中心反射波长为1064.68 nm,反射谱半峰全宽为1.65 nm)只对信号光高反,残余抽运光和自发辐射放大(ASE)经光栅滤除从另一端透射输出,其中隔离器和环形器可以隔离后向传输的光,保护种子源,预放大级抽运源为976 nm单模激光二极管(LD),通过波分复用器(WDM)耦合到SM-YSF。信号光反射二次放大后经环形器进入主放大级,主放大级抽运源采用一个多模976 nm LD,经过(2+1)×1合束器与信号光一起耦合进入双包层掺镱光纤(DC-YDF),光纤缠绕直径为10 cm。掺镱光纤输出端熔接20 cm无源输出光纤,并在熔点处涂覆高折射率胶进行抽运滤除(PS)。主放与预放之间加入(1064±4) nm带通滤波器滤除ASE,之后加入2×2的1:9耦合器以监测前、后向激光。预放光栅与主放激光输出端面都切斜8°角,避免端面的菲涅耳反射产生激光寄生振荡。

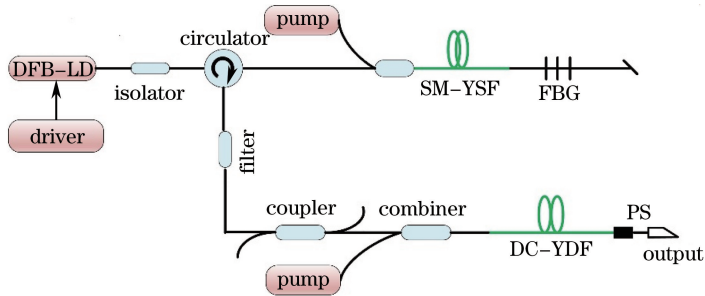


图1 脉冲激光 MOPA 系统结构图

Fig. 1 Schematic of pulsed laser MOPA system

## 3 实验结果与分析

### 3.1 种子源及双程光纤预放

实验中种子源采用高速的金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)驱动单模带尾纤输出的DFB-LD,得到重复频率连续可调的纳秒级信号光输出<sup>[8]</sup>。重复频率为10 kHz时,调制DFB-LD输出光脉冲宽度为3.92 ns,平均功率为4.4 μW。由于种子光功率较低,在放大过程中比较容易容易出现ASE,从而降低系统信噪比,影响放大器放大效率。为抑制ASE,实验中预放级通过环形器与光纤光栅实现单级双程光纤放大,小信号经过SM-YSF放大后被FBG反射进行二次放大,ASE则经由FBG高透滤除。与之对比,保持其他条

件不变,仅除去 FBG 和环形器,种子光经过隔离器后与抽运光通过 WDM 耦合进入相同的 SM-YSF 进行直通放大,两种情况下输出激光光谱如图 2 所示。结果表明,双程预放结构输出激光信噪比和功率都明显优于直通结构,大大增强了单模光纤对小信号的放大能力,并有效抑制了强抽运光下产生的 ASE。

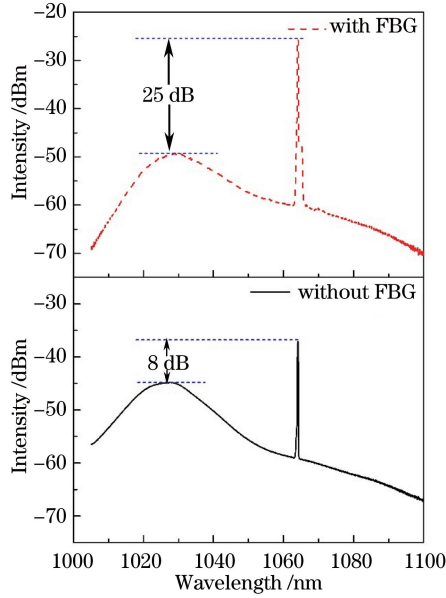


图 2 双程与直通预放大结构输出光谱对比关系

Fig. 2 Output spectra of double-passed pre-amplification and single-passed pre-amplification

### 3.2 重复频率 10 kHz

进入主放之前,预放激光经过 $(1064 \pm 4)$  nm 带通滤波器滤除 ASE,功率达到 4 mW,小信号增益大于 25 dB。图 3 所示为经过主放光纤后输出信号光功率随抽运功率的变化情况。当主放入纤抽运功率达到 3.7 W 时,输出激光功率为 460 mW,相应的光光转换效率为 12.5%。随着抽运增大,输出功率逐渐呈线性增长,并未观察到饱和现象。

滤除包层抽运光后,测量最高功率为 460 mW 时的输出激光光谱,中心波长为 1064.12 nm,ASE 较低,与信号光峰值强度相差约 40 dB,如图 4 所示。图 4 中插图是光谱精细结构,半峰全宽(FWHM)为 0.037 nm,计算可得光谱在 $(1064.12 \pm 0.5)$  nm 范围内信号光能量占总能量比例超过 90%,高的光谱强度保证雷达探测系统可以充分接收信号光,并提高抗背景噪声能力。实验中对各项实验参数加以控制,因而没有观察到受激布里渊散射(SBS)与受激拉曼散射(SRS)等非线性现象。受测量所用光谱仪(AQ6370, YOKOGAWA, 日本)的分辨率(0.02 nm)限制,分辨极限值附近的光谱线宽测量并不准确,下文将会讨论使用法布里-珀罗(F-P)标准具进一步测量线宽。采用示波器(LeCroy 610Zi, Teledyne, 美国)和高速光电探头(DET025AFC, Thorlabs, 美国)测量输出功率为 460 mW 时的激光脉冲序列与波形,如图 5 所示,插图中蓝

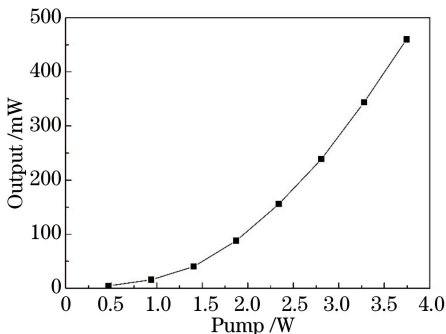


图 3 激光输出平均功率随抽运功率的变化

Fig. 3 Average output power versus launched pump power

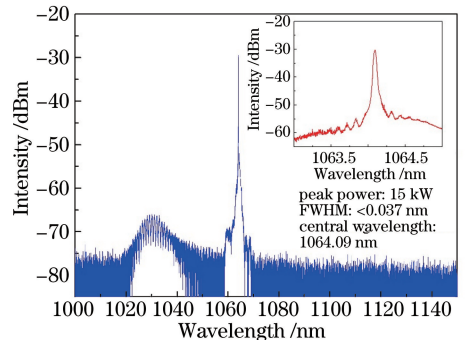


图 4 输出激光光谱

Fig. 4 Spectra of output laser

色为种子脉冲波形,红色为放大后脉冲波形。图5中放大后输出激光脉冲稳定,波形与种子脉冲形状相比基本保持不变,但是脉冲后沿下降更快导致脉宽压窄约0.9 ns。原因为激光放大过程中存在瞬态增益,脉冲前沿先于脉冲后沿到达增益光纤,提前消耗部分反转粒子,使脉冲后沿增益略微减小,导致脉冲宽度的压缩。脉冲宽度由初始的3.92 ns经放大光纤压窄为3.06 ns,对应的脉冲峰值功率达到15 kW。脉宽压缩也会导致峰值功率提高,可以增大激光雷达探测距离。采用光束质量分析仪(LQM-HP PRIMES,德国)测得光束质量因子 $M^2$ 为1.226,如图6所示。

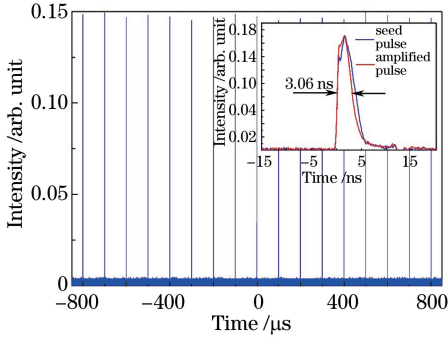


图5 460 mW 输出激光脉冲序列与波形

Fig. 5 Pulse sequence and shape at 460 mW laser output

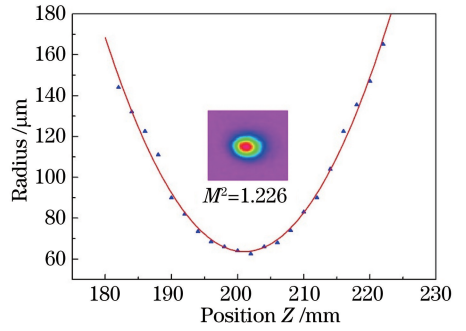


图6 460 mW 输出激光  $M^2$  因子

Fig. 6  $M^2$  factor at 460 mW laser output

实验中,DFB-LD调制脉冲种子线宽极窄且已超过光谱仪分辨极限,因此采用F-P标准具(FPI100 4 GHz, Toptica,德国)测量最高输出峰值功率时的激光线宽。图7所示为放大激光F-P扫腔光谱,F-P腔自由光谱范围为4 GHz,并且定义激光线宽为峰值强度一半处所对应的光谱范围,因此测得激光线宽为 $10/26.1 \times 4 = 1.53$  GHz。

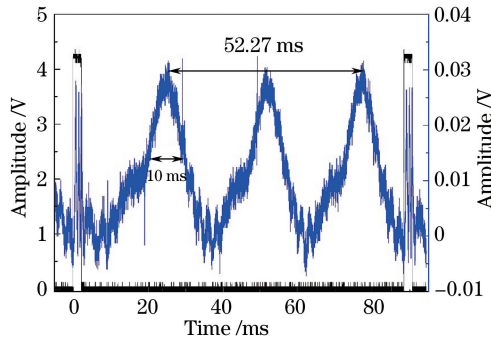


图7 放大激光F-P扫腔光谱

Fig. 7 F-P scanning spectra of amplified laser

在单频或者窄线宽纳秒脉冲光纤激光放大系统中,SBS是阈值最低且首先出现的非线性效应,其产生的后向传输脉冲会被放大,甚至由于峰值功率过高而破坏前级器件<sup>[9]</sup>。针对SBS抑制,研究人员提出了缩短光纤有效长度、使用大模场面积光纤、相位调制、加温度/应力梯度、声场剪切等方案<sup>[10-11]</sup>。实验中由于激光线宽窄(放大后为1.53 GHz)且峰值功率较高,考虑到未来小型化应用应保证系统的简便性,所以采用优化光纤长度的方案来抑制SBS的产生,最终获得了窄线宽、15 kW 高峰值功率的脉冲激光输出,但是较短的增益光纤长度导致抽运光吸收不充分,降低了放大级的光光转换效率。

### 3.3 调节重复频率

改变种子光脉冲重复频率研究输出激光特性。调节外部信号发生器触发频率在10~50 kHz范围内变化,间隔为10 kHz。由于单个DFB-LD种子光脉冲宽度和强度由驱动板充放电回路电流大小与放电时间决定,只改变重复频率,种子脉冲波形、幅值、脉冲宽度与输出光谱并无改变<sup>[8]</sup>,种子光输出平均功率随重复频率的增大呈线性上升。保持主放级抽运功率为3.7 W不变,输出激光功率与单脉冲能量变化情况如图8所示。随着重复频率的增加,信号光变强,提取了更多抽运光功率,导致输出平均功率增大,但是在一定的抽运强度下,增益光纤中可提取的能量有限,并不能随重复频率成倍增加,因此单脉冲能量会减弱。此时输出脉



冲宽度与重复频率的关系如图 9 所示。重复频率减小,脉冲宽度压窄,且随着重复频率降低,脉冲宽度压缩越发严重。这种脉冲宽度变化趋势由光纤放大器中瞬态增益的低频响应特性导致<sup>[12]</sup>。瞬态增益导致脉冲峰值向前沿转移,在相同抽运功率下,低频脉冲消耗更多的反转粒子数会加大脉冲前后沿之间的增益差别,从而进一步窄化脉冲。

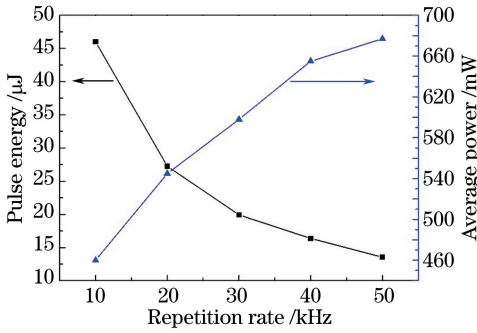


图 8 不同重复频率下的输出脉冲能量与平均功率

Fig. 8 Pulse energy and average power under different repetition rates

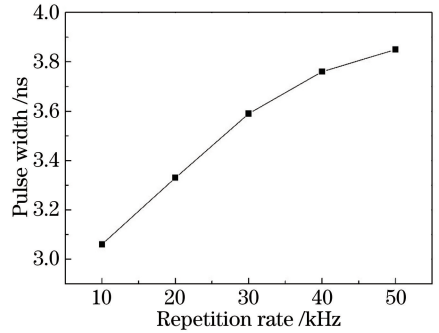


图 9 输出脉冲宽度与重复频率的关系

Fig. 9 Pulse width versus repetition rate

## 4 结 论

报道了吉赫兹量级窄线宽、高峰值功率的纳秒全光纤 MOPA 结构脉冲光纤激光器。实验利用脉冲调制的 DFB-LD 种子源,经两级全光纤 MOPA 放大,预放大级采用双程放大结构,主放大级优化光纤长度以抑制 SBS,获得光谱线宽为 1.5 GHz、峰值功率为 15 kW、脉冲宽度为 3.06 ns 的脉冲激光输出,重复频率在 10~50 kHz 内连续可调。整个系统采用全光纤结构,放大级数少,具有结构紧凑的特点,输出激光线宽窄,谱亮度高,因此抗背景噪声能力强,可用作相干探测系统的光源。

## 参 考 文 献

- Wright M W, Valley G C. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2005, 23(3): 1369-1374.
- Koroshetz J E. Fiber lasers for lidar[C]. IEEE Optical Fiber Communication Conference, Washington, 2005.
- Feng Yutong, Du Songtao, Yang Yan, et al.. All-fiber laser based on LD pulse-modulated MOPA architecture[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 1932-1936.  
冯宇彤, 杜松涛, 杨 燕, 等. 基于 LD 脉冲调制的全光纤 MOPA 结构激光器[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1932-1936.
- Lou Qihong, Du Songtao, Zhou Jun. Advanced fiber laser technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2008, 37(S): 1-7.  
楼祺洪, 杜松涛, 周 军. 先进光纤激光技术[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(S): 1-7.
- Teodoro F D, Morais J, McComb T S, et al.. SBS-managed high-peak-power nanosecond-pulse fiber-based master oscillator power amplifier[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2162-2164.
- Saracco M J, Logan D, Green J, et al.. Compact 17 W average power 100 kW peak power nanosecond fiber laser system [C]. SPIE, 2013, 8601: 86012U.
- Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Du Songtao, et al.. 1030 nm high repetition rate nanosecond pulse all fiber amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0802010.  
周翠芸, 刘 源, 杜松涛, 等. 1030 nm 高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0802010.
- Yang Yan, Yu Dunhe, Wu Yaofang, et al.. Design of a novel drive power for narrow pulse laser diode[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202003.  
杨 燕, 俞敦和, 吴姚芳, 等. 新型窄脉冲半导体激光器驱动电源的研制[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202003.
- Teodoro F D, Belden P, Ionov P, et al.. High-power ns-pulse fiber laser sources for remote sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(6): 688-693.
- Ran Yang, Wang Xiaolin, Su Rongtao, et al.. Research progress of stimulated Brillouin scattering suppression in narrow

linewidth fiber amplifiers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040003.

冉 阳, 王小林, 粟荣涛, 等. 窄线宽光纤放大器中受激布里渊散射抑制研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(4): 040003.

- 11 Ran Yang, Wang Xiaolin, Lü Haibin, *et al.*. Novel suppression method study for stimulated Brillouin scattering by simultaneous phase and intensity modulation in fiber amplifiers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(8): 0805003.

冉 阳, 王小林, 吕海斌, 等. 种子相位和强度同时调制抑制光纤激光放大器 SBS 的新方法研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0805003.

- 12 Kong Lingfeng, Lou Qihong, Zhou Jun, *et al.*. Frequency response and transient gain of Yb-doped double clad fiber amplifier[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(11): 1286-1289.

孔令峰, 楼祺洪, 周 军, 等. 掺 Yb 双包层光纤放大器的瞬态增益和频率响应[J]. *光子学报*, 2004, 33(11): 1286-1289.