

doi:10.3788/gzxb20174605.0506002

# 基于全保偏八字腔结构锁模的光纤 激光器及其功率放大

温如华<sup>1</sup>, 胡澄之<sup>1</sup>, 魏凯华<sup>2</sup>, 张兵<sup>1</sup>, 乐文杰<sup>1</sup>, 吴波<sup>1</sup>, 姜培培<sup>1</sup>, 沈永行<sup>1</sup>

(1 浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

(2 杭州电子科技大学 生命信息与仪器工程学院, 杭州 310018)

**摘 要:**采用包层泵浦的全保偏八字腔结构搭建了一种脉宽可调的掺镱锁模光纤激光器, 实现了中心波长为 1 064 nm、重复频率为 4.683 MHz、脉冲宽度可调范围为 0.8~5 ns、对应平均功率范围为 74.8~429.7 mW 的耗散孤子共振方波脉冲输出. 腔内无需偏振控制器, 仅通过调节泵浦输入即可实现锁模状态的自启动, 并能够长时间保持稳定, 在剧烈振动条件下亦不会失锁. 采用两级光纤放大器进行功率放大, 实现了 100 W 的平均功率输出, 峰值功率高达 26.68 kW.

**关键词:**激光器; 掺镱锁模光纤激光器; 非线性环形镜; 耗散孤子共振方波脉冲; 脉宽可调

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0506002-6

## All-PM “Figure-of-eight” Cavity Mode-locked Fiber Laser and Its Power Amplification

WEN Ru-hua<sup>1</sup>, HU Cheng-zhi<sup>1</sup>, WEI Kai-hua<sup>2</sup>, ZHANG Bing<sup>1</sup>, YUE Wen-jie<sup>1</sup>,  
WU Bo<sup>1</sup>, JIANG Pei-pei<sup>1</sup>, SHEN Yong-hang<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 College of Life Information Science & Instrument Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** A Yb-doped mode-locked fiber laser with a tunable pulse width was built by using a cladding pumped all-PM (Polarization Maintaining) “figure-of-eight” cavity. The Dissipative Soliton Resonance (DSR) square pulses with a central wavelength of 1 064 nm, a repetition rate of 4.683 MHz, a tunable pulse width range from 0.8 ns to 5 ns and an average power range from 74.8 mW to 429.7 mW, are achieved. There is no polarization controller in the cavity. The mode locking state can be self-started only by adjusting the pump input, and then can be keep stable for a long time, and without lock-lose even under the condition of violent vibration. By using the two stage fiber amplifiers to amplify the power, the laser output with an average power of 100 W and the peak power as high as 26.68 kW is achieved.

**Key words:** Laser; Yb-Doped mode-locked fiber laser; Nonlinear optical loop mirror; Dissipative soliton resonance square pulses; Tunable pulse duration

**OCIS Codes:** 060.3510; 140.4050; 140.3615; 140.3538; 060.2320

## 0 引言

近年来, 高功率脉冲光纤激光器在科学研究、工业加工、生物医学等方面引起了广泛关注, 特别是在材料

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 11304277)、国家高技术研究发展计划 (No. ss2014AA020903) 和浙江省自然科学基金 (No. LQ16F050002) 资助

**第一作者:** 温如华 (1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤激光器. Email: 13082809535@163.com

**导师 (通讯作者):** 沈永行 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤激光器、光纤传感器. Email: physyh@zju.edu.cn

**收稿日期:** 2016-11-14; **录用日期:** 2017-02-20

<http://www.photon.ac.cn>

加工领域,如精细机械加工、表面处理、脉冲激光沉积和打标等<sup>[1-3]</sup>,这种光纤激光器因其结构简单、成本低廉和使用简便等优势而具有重要的应用价值.得益于成熟的全光纤包层泵浦技术以及改进的新型大模场面积双包层光纤,基于主振荡功率放大(Master Oscillator Power Amplifier, MOPA)结构的脉冲光纤激光器的功率水平已突破千瓦量级.传统获得纳秒级脉冲激光输出的手段主要包括声光调Q<sup>[4]</sup>、电光调Q<sup>[5]</sup>、被动调Q<sup>[6]</sup>和增益开关半导体激光器<sup>[7]</sup>等.但前两者需引入相应的声光或者电光调制器,破坏了全光纤结构且引起额外插入损耗.被动调Q则一般受环境干扰较大,不利于长期稳定工作.而增益开关半导体激光器作为种子源功率一般太小,需要多级放大才能实现千瓦级的峰值功率激光输出,这样就会导致系统复杂,成本过高.

近年来,锁模激光器因其结构简单紧凑而得到了越来越多的关注和研究,其输出指标也得到了显著提升.2011年,Song R等<sup>[8]</sup>利用半导体可饱和吸收镜被动锁模皮秒光纤激光器作为种子,通过三级MOPA结构放大实现了157W的平均功率输出.同年,Özgören K等<sup>[9]</sup>采用纤芯泵浦的非线性环形镜(Nonlinear Optical Loop Mirror, NOLM)锁模腔作为种子,通过两级MOPA放大实现了平均功率为83W的亚纳秒脉冲输出,并将之应用于Ti表面的处理研究中.2014年,J-J Chi等<sup>[10]</sup>采用基于非线性偏振旋转(Nonlinear Polarization Rotation, NPR)效应锁模的环形腔种子源加两级功率放大的结构实现了120W的亚纳秒脉冲激光输出.然而,上述研究中采用半导体可饱和吸收镜作为锁模器件导致成本较高,而且会存在一个损伤阈值;而基于NPR或者NOLM锁模的种子源都采用了随机偏振的光纤系统,其稳定性容易受到振动、温度变化等因素的影响.

针对上述问题,本文提出一种基于包层泵浦的全保偏八字腔锁模技术,实现了较高功率输出的高稳定种子源,并通过两级放大,获得了百瓦平均功率的亚纳秒脉冲光纤激光输出.其种子源无需偏振控制器的机械调节即可自启动,实现了脉宽可调范围为0.8~5 ns,对应平均功率范围为74.8~429.7 mW的耗散孤子共振<sup>[11]</sup>(DSR)方波脉冲输出,且因为采用了全保偏光纤结构而具有非常优异的稳定性和长时间在较强振动环境等恶劣条件下保持不失锁.

据文献所知,在2012年,Miro Erkintalo等<sup>[12]</sup>采用纤芯泵浦的全保偏的八字腔结构进行锁模种子研究,但其系统是工作在孤子锁模区域,输出功率较小,脉冲能量低.而本文研究则在包层泵浦的全保偏八字腔锁模光纤激光激光器中实现耗散孤子共振方波脉冲,种子输出功率较大.正是得益于此,后续通过两级MOPA功率放大即轻松实现了100W的脉宽可调的掺镱光纤激光器.激光输出平均功率与吸收的泵浦功率呈线性关系,且光谱没有出现明显的受激喇曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)特征,表明通过继续加大抽运功率可以进一步提升激光的输出功率.系统整体结构相对紧凑,具有良好的实用前景.基于其比较高的峰值功率(可高达26.68 kW),本系统除了在材料表面处理、激光打标等方面外,在超连续谱产生<sup>[13]</sup>、光学参量振荡<sup>[14]</sup>、倍频<sup>[15]</sup>等方面也会有比较重要的应用价值.

## 1 高功率掺镱脉冲光纤激光器系统结构

高功率掺镱脉冲光纤激光器的系统架构如图1.采用全保偏八字腔锁模光纤系统作为种子,主要分为线

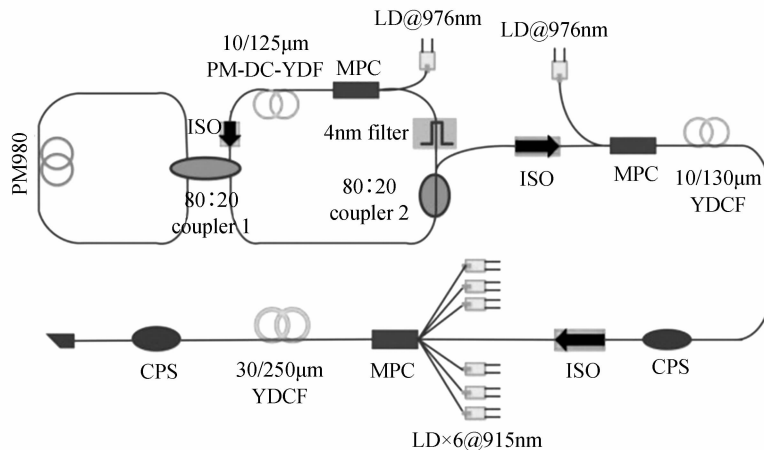


图1 高功率掺镱脉冲光纤激光器系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of high-power Yb-doped pulsed fiber laser

性腔(右环)和非线性腔(左环),腔内除了泵浦源之外均采用保偏器件和保偏光纤.具体为:

- 1) LD@976 nm: 波长为 976 nm 多模半导体激光器,作为泵浦源,最大输出功率为 10 W;
- 2) Multimode Pump Combiner, MPC: 多模泵浦合束器,其作用是把 LD 的泵浦光耦合到增益光纤中;
- 3) Polarisation Maintaining Double Clad Yb Doped Fiber, PM-DC-YDF: Nufern 公司生产的双包层保偏掺镱光纤,作为增益介质,使用长度为 2.5 m,其纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.075、包层直径为 125  $\mu\text{m}$ 、976 nm 处的吸收系数为 4.95 dB/m;
- 4) Isolator, ISO: 保偏隔离器,保证了激光脉冲在线性腔内单向传输;
- 5) Coupler1: 保偏耦合器,分光比为 80 : 20,其两个输出端与一段 30 m 的保偏单模光纤 (PM980) 焊接在一起构成非线性腔;
- 6) Coupler2: 与 Coupler1 相同,都是分光比为 80 : 20 的保偏耦合器,其作用是向腔外输出 80% 的激光能量;
- 7) Filter: 保偏商用滤波器,中心波长为 1 064 nm、3 dB 带宽为 4 nm. 其作用是稳定锁模激光的输出波长,减少锁模脉冲的啁啾和带宽来确保锁模条件.

对于八字腔锁模,主要依赖于非线性腔的 NOLM 效应.具体来说,注入到非线性腔的入射光被分为幅值不等、方向相反的两束,它们在线性腔中传输时由于自相位调制和交叉相位调制等非线性效应而引入不同的非线性相移,而且其相位差随脉冲色散形状变化.如此两束光重新回到耦合器发生干涉耦合的时候只有脉冲中央的较强部分获得足够的相移从而被透射,脉冲边沿部分由于功率小,获得的相移较小,从而被反射.这种强度相关的透过特性类似于快速可饱和吸收体的作用.脉冲每经过一次非线性腔,NOLM 效应将对脉冲进行一次强度调制,使得脉冲越来越窄,最终与腔内的色散效应达到一个平衡,从而实现锁模脉冲激光输出.而本实验研究的全保偏 8 字腔的腔长较长,在这种腔参量下,锁模一般工作在 DSR 区. DSR 早在 2008 年已被 Wonkeun Chang 等提出,并基于五阶金斯伯格朗道方程模拟了 DSR 的脉冲行为<sup>[16]</sup>.其特征是没有脉冲分裂,其输出的方波脉冲的脉宽理论上可以随着泵浦功率的增加而无限增大,而脉冲幅值则保持不变.在腔长较长的八字腔锁模中,非线性腔的周期性的强度相关透过率曲线对脉冲强度较高的部分会产生一个压制作用,如此将会导致脉冲峰值功率的钳制效应从而产生耗散孤子共振方波脉冲.

种子源实现锁模脉冲后,后续通过两级随机偏振的 MOPA 全光纤结构进行功率放大.第一放大级仍采用一个 10 W 的 976 nm 波长的激光管作为泵源通过一个 (2+1)  $\times$  1 结构的多模光纤合束器对增益光纤进行泵浦,增益光纤为 2.5 m 的双包层掺镱非保偏光纤,纤芯直径为 10  $\mu\text{m}$ ,包层直径为 130  $\mu\text{m}$ ,数值孔径为 0.075,对 976 nm 泵浦的吸收系数为 4.80 dB/m.为了消除内包层残留的泵浦光以及泄露在内包层的激光,在增益光纤之后的一小段裸纤上涂覆高折射率胶,并将其封装在散热铝板上制成包层泵浦剥离器 (Cladding Pump Stripper, CPS).

第二放大级则采用纤芯直径为 30  $\mu\text{m}$ 、包层直径为 250  $\mu\text{m}$ 、数值孔径为 0.06 的大模场掺镱双包层光纤,其在 915 nm 波长处的吸收系数为 1.7 dB/m,接入了 6 m 的长度,并采用 6 个 30 W 的 915 nm 多模激光二极管通过一个 (6+1)  $\times$  1 的合束器对其进行泵浦.大模场增益光纤之后同样进行了包层泵浦剥离处理.另外,为了避免反馈光对种子源和泵浦源的损坏,分别在第一和第二放大级之前连接了一个光纤隔离器.

## 2 实验结果与分析

种子源采用全保偏结构,无需外加偏振控制器,通过一定泵浦的输入就能实现锁模脉冲的自启动,同时能维持良好的稳定性.在 1.5 W 的泵浦阈值下,种子源实现中心波长为 1 064 nm、重复频率为 4.683 MHz (与 44 m 的激光腔腔长相对应)、脉冲宽度为 0.784 ns、谱线宽度为 0.9 nm 的稳定锁模脉冲激光输出.图 2 为此时种子源输出的锁模脉冲及其光谱.其中脉冲的测量仪器包括一个带宽为 20 GHz 的 InGaAs 红外光电探测器和 Tektronix 公司的数字示波器 (型号为 DSA71254,带宽为 12.5 GHz,采样率为 50 GS/s).

在实现锁模自启动之后,继续增加泵浦功率,输出的方波脉冲的脉宽将随之增加,如图 3 和图 4 所示,脉宽连续可调,最大脉宽可达 5 ns,输出功率亦从 74.8 mW 到 429.7 mW 线性增加.同时,在实验中可以看到,光谱形状和光谱宽度基本没有变化.由于种子系统中用到的隔离器和滤波器可承受的功率为 500 mW,因

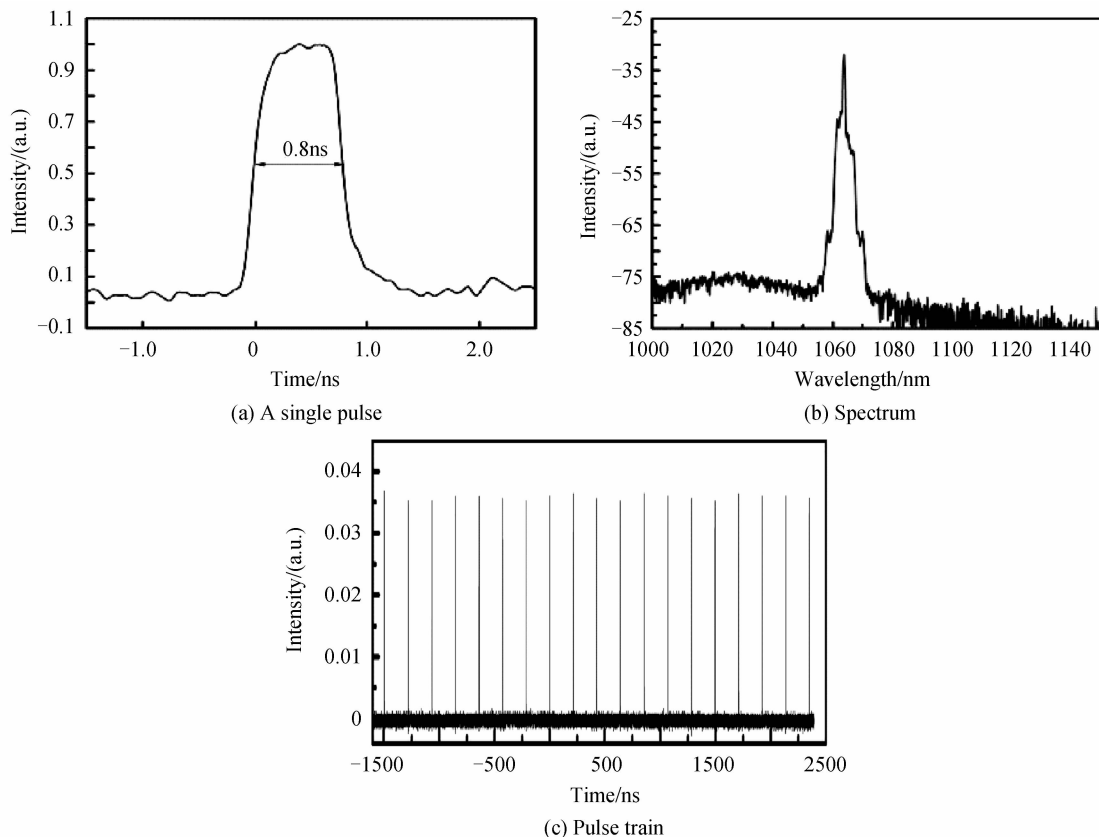


图 2 1.5 W 泵浦输入时种子源输出的典型方波脉冲的单脉冲图、光谱图和脉冲序列图

Fig. 2 A single pulse, spectrum and pulse train of typical square pulse output of seed source under 1.5 W pump input

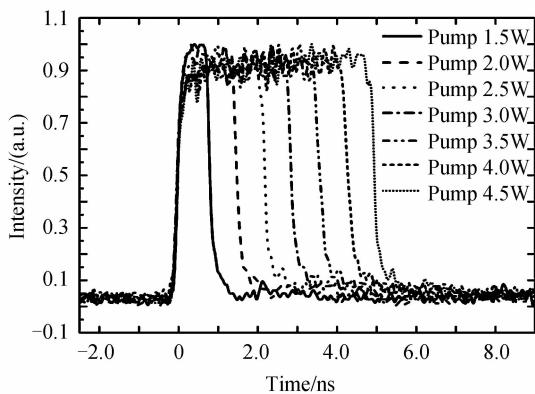


图 3 不同泵浦功率下种子源输出的方波脉冲

Fig. 3 Square pulses of output of seed source under different pump powers

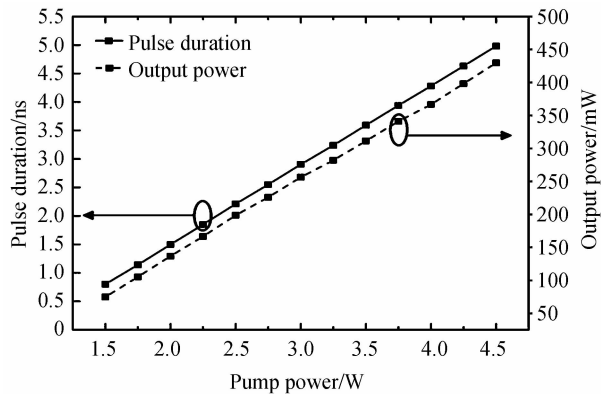


图 4 不同泵浦功率下种子源输出的脉冲宽度与输出功率

Fig. 4 Pulse width and output powers of output of seed source under different pump powers

此,实验中为了避免损坏器件,在输入 4.5 W 的泵浦功率获得 429.7 mw 的锁模激光输出之后不再继续增加泵浦.

图 5 为通过计算所得的脉冲能量与峰值功率随所加泵浦的变化图,可以看到脉冲能量随所加泵浦的增加而线性增加(15.97~91.75 nJ),峰值功率基本锁定在一个稳定值(18 W),这符合耗散孤子共振方波脉冲的特点.已经测试锁模状态能够长时间保持稳定,在四小时内的功率波动小于 0.2%,对剧烈振动亦不敏感.如此良好的稳定性对后续的放大非常有利.

对于种子源的脉宽可调范围,实验中发现,一方面通过延长种子腔长增加腔内色散和非线性效应,可以使得锁模阈值更低,最大输出脉宽更宽,从而获得更低重复频率的大范围可调脉宽的脉冲激光输出,但是当种子腔的长度延到一定程度时,会因为腔内脉冲峰值功率过大而产生受激喇曼散射等非线性效应,不利于后续放大;另一方面,为了获得更窄的脉冲宽度输出,可以适当减少种子腔的长度,但不能太短,特别是非线性

性腔中要提供足够的光纤长度,否则会因为无法提供足够的非线性效应而无法实现锁模。

通过调整泵浦,使得种子源工作在稳定锁模的阈值状态下,输出平均功率为 74.8 mW,脉冲宽度为 0.784 ns 的锁模脉冲激光,此时脉冲宽度最小,并在此基础上进行放大.为了抑制非线性效应并获得更好的功率放大,对种子源进行第一级预放,在保持良好光谱质量(40 dB 的光谱强度范围内没有出现明显的非线性效应)的情况将功率提到 2 W 的水平.之后进行第二级主功率放大,图 6 为输出功率随泵浦功率变化的曲线.当最大泵浦功率为 150 W 时,输出功率达到了 100.3 W,光光转化效率为 65.53%,且功率曲线保持良好的线性增长,没有出现功率饱和的现象。

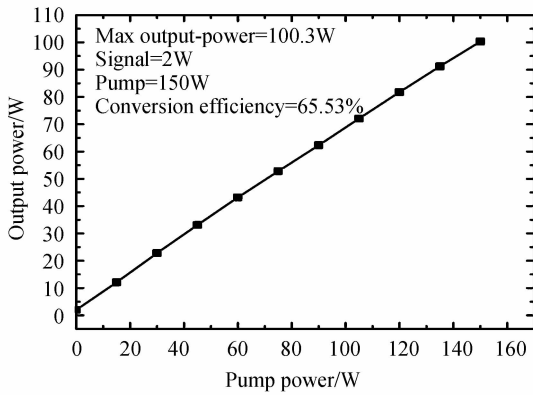


图 6 主功率放大级的输出功率特性

Fig. 6 Output power characteristic of the main power amplifier

图 7 显示了第二放大级输出功率从 25 W 增加到 100 W 对应的几个光谱.可以看到,输出光谱保持良好的质量,只是随着泵浦功率的增加,自相位调制效应(Self-Phase Modulation, SPM)使光谱稍有展宽.在 100 W 的输出功率下也没有出现明显的 SRS 效应,这得益于选取了长度较短、掺杂浓度较高、吸收系数较大的大模场掺镱增益光纤.同时放大的自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)强度与锁模部分光谱强度相差依然有 40 dB 的水平,这则主要由于预放提高了种子功率.另外,由于使用了 CPS 对泵浦光进行剥离,实验中并没有看到残余的泵浦光成分.图 7 中的插图为 100 W 功率输出时的单脉冲图,可以看到,脉宽并没有明显展宽,依然保持在 0.8 ns 的水平.此时,单脉冲能量为 21.35  $\mu$ J,峰值功率达到 26.68 kW.从这些结果来看,经过主功率放大级后的输出功率主要受限于泵浦功率的输入,相信其依然有较大的放大潜力。

在实现最窄脉宽的功率放大之后,通过调节种子泵浦,可以直接调节放大后最终输出的脉冲宽度,调节范围仍然是 0.8 ns 到 5 ns,平均功率输出基本在 100 W 的水平.最终实现了可调脉宽的高功率掺镱光纤激光器。

### 3 结论

采用基于全保偏结构非线性环形镜的八字腔锁模光纤激光器作为种子源,通过一定的泵浦输入即可自启动产生中心波长为 1 064 nm、重复频率为 4.683 MHz、脉宽从 0.8 ns 到 5 ns 连续可调、谱线宽度为 0.9 nm 的稳定锁模脉冲激光输出,然后通过两级 MOPA 结构实现了全光纤化高功率的脉冲激光输出,平均功率可达 100 W.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 40 dB 以

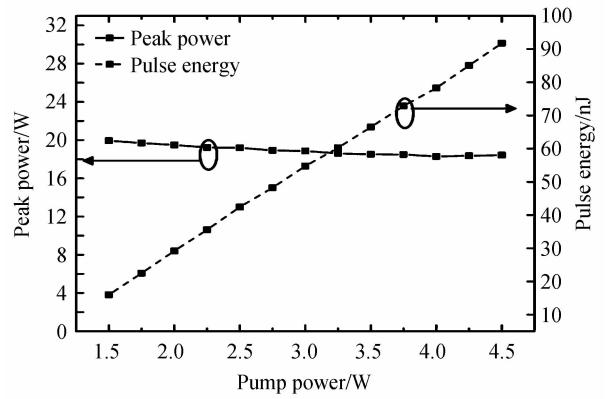


图 5 不同泵浦功率下种子源输出的峰值功率和脉冲能量

Fig. 5 Peak power and pulse energy of output of seed source under different pump powers

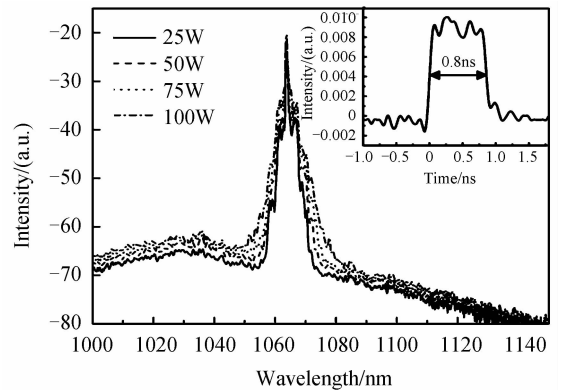


图 7 主功率放大级在不同输出功率时输出的光谱.附图是最大输出功率时的单脉冲

Fig. 7 Output spectra under different output power of the main power amplifier. Inset: a single pulse under the max output power

上,保持了良好的光谱质量.第二级主放大采用 915 nm 的泵浦,故采用了较长的增益光纤.可以考虑换用 976 nm 波长的泵浦,并做好泵浦波长的稳定工作,由于双包层掺镱光纤在 976 nm 处有更高的吸收系数,故可以采用更短的长度,如此更能抑制放大过程可能会出现各种非线性效应,进而可以直接有效地提升激光的输出峰值功率.

### 参考文献

- [1] O'NEILL W, LI K. High-quality micromachining of silicon at 1064 nm using a high-brightness MOPA-based 20-W Yb fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(2): 462-470.
- [2] ERDOGAN M, ÖKTEM B, KALAYCIOĞLU H, *et al.* Texturing of titanium (Ti6Al4V) medical implant surfaces with MHz-repetition-rate femtosecond and picosecond Yb-doped fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(11): 10986-10996.
- [3] MURAKAMI M, LIU Bing, HU Zhen-dong, *et al.* Burst-mode femtosecond pulsed laser deposition for control of thin film morphology and material ablation[J]. *Applied Physics Express*, 2009, **2**(4): 042501.
- [4] FENG Yu-tong, WANG Xiong-fei, ZHU Chen, *et al.* Experiment research of 100W, all-fiber acousto-optic Q-switched fiber laser[J]. *High Power Laser And Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1444-1448.  
冯宇彤, 王雄飞, 朱辰, 等. 100W 全光纤声光调 Q 光纤激光器实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1444-1448.
- [5] JIN Guang-yong, WU Chun-ting, CHEN Xin-yu, *et al.* An innovative electro-optic Q-switch technology in 1064 nm and 1319nm dual-wavelength operation of a Nd : YAG laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(3): 034209.
- [6] LU Bao-le, CHEN Hao-wei, JIANG Man, *et al.* Graphene-based passive Q-switching for a 2  $\mu\text{m}$  thulium-doped fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2013, **23**(4): 045111.
- [7] TEH P S, ALAM S, LEWIS R J, *et al.* Single polarization picosecond fiber MOPA power scaled to beyond 500 W[J]. *Laser Physics Letters*, 2014, **11**(8): 085103.
- [8] SONG Rui, HOU Jing, CHEN Sheng-ping, *et al.* 157 W all-fiber high-power picosecond laser[J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(13): 2497-2500.
- [9] ÖZGÖREN K, ÖKTEM B, YILMAZ S, *et al.* 83 W, 3.1 MHz, square-shaped, 1 ns-pulsed all-fiber-integrated laser for micromachining[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(18): 17647-17652.
- [10] CHI J J, LI P X, HU H, *et al.* 120 W subnanosecond ytterbium-doped double clad fiber amplifier and its application in supercontinuum generation[J]. *Laser Physics*, 2014, **24**(8): 085103.
- [11] CHANG W, ANKIEWICZ A, SOTO-CRESPO J M, *et al.* Dissipative soliton resonances [J]. *Physical Review Applied*, 2008, **78**(2): 023830.
- [12] ERKINTALO M, AGUERGARAY C, RUNGE A, *et al.* Environmentally stable all-PM all-fiber giant chirp oscillator [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(20): 22669-22674.
- [13] QIAN Kai, WEI Kai-hua, CHEN Tao, *et al.* All fiberized supercontinuum laser source based on "figure of eight" cavity mode-locked Yb Fiber Laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **42**(5): 521-525.  
钱凯, 魏凯华, 陈滔, 等. 基于八字腔锁模 Yb 光纤激光器的超连续谱激光光源[J]. *光子学报*, 2012, **42**(5): 521-525.
- [14] KIENLE F, CHEN K K, ALAM S, *et al.* High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(8): 7602-7610.
- [15] CHEN K K, ALAM S, HAYES J R, *et al.* 56-W frequency-doubled source at 530 nm pumped by a single-mode, single-polarization, picosecond, Yb-doped fiber MOPA[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **22**(12): 893-895.
- [16] CHANG W, ANKIEWICZ A, SOTO-CRESPO J M, *et al.* Dissipative soliton resonances in laser models with parameter management[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, **25**(12): 1972-1977.