

基于半导体激光器增益开关技术的 掺铒光纤激光器

师红星 王 潜 刘 江 周冠锐 王 璞

北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124

摘要 报道了基于半导体增益开关技术的皮秒脉冲掺铒激光器, 该激光器可输出脉冲宽度为 80 ps 的光脉冲, 具有重复频率可调的特点(100 kHz~20 MHz)。在重复频率为 20 MHz 时, 经过主功率振荡放大器(MOPA)后, 激光器输出的平均功率为 9.3 W, 相应的脉冲峰值功率为 5.8 kW; 最高功率输出时, 脉冲信噪比达 40 dB。

关键词 激光器; 增益开关; 主振荡功率放大器; 皮秒脉冲

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s214002

Picosecond Erbium-Doped Fiber Laser based on Gain-Switched Laser Diode

Shi Hongxing Wang Qian Liu Jiang Zhou Guanrui Wang Pu

Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract A picosecond erbium-doped fiber laser based on gain-switched laser diode is demonstrated. The gain-switched laser diode seed can produce 80 ps pulses with tunable repetition rates from 100 kHz to 20 MHz. After master-oscillator power-amplifier (MOPA), this fiber laser yields 9.3 W average power at 20 MHz repetition rate, corresponding to 5.8 kW peak power.

Key words lasers; gain-switched; master-oscillator power-amplifier; picosecond pulses

OCIS codes 140.2020; 060.2320; 060.3510

1 引 言

增益开关半导体激光(GSSL)技术是一种产生高质量超短脉冲的有效方法, 基于该技术的激光器具有结构紧凑、性能稳定、重复频率可调等特点。近年, 随着光纤主振荡功率放大技术的成熟, 以增益开关半导体激光器作为种子源的高能量皮秒激光系统取得新的进展。在 $1\ \mu\text{m}$ 波段, 高平均功率、高峰值功率的皮秒光纤激光器得到了广泛的关注与报道。例如 2006 年, Dupriez 等^[1]通过增益调制半导体激光器得到脉冲宽度为 20 ps 的激光输出^[1]。2010 年, Chen 等^[2]利用全保偏主振荡功率放大器(MOPA)将增益调制脉冲信号进行放大得到 26 ps 的激光脉冲。2011 年, 德国汉诺威中心的 Kanzelmeyer 等^[3]在大模场面积掺铒光纤中获得 40 ps 的脉冲输出^[3]。在 $2\ \mu\text{m}$ 波段, 2013 年南安普顿大学的 Heidt 等^[4]通过增益开关技术, 首次获得脉冲宽度为 33 ps 的脉冲输出^[4]。在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段, 增益开关半导体技术在激光频率梳^[5]、超连续光谱^[6]、激光测量^[7]等领域已经被广泛应用。但目前报道的 $1.5\ \mu\text{m}$ 增益开关半导体激光器输出功率较低。例如 2006 年, Moon 等^[6]使用增益开关半导体作为种子源, 采用三级掺铒光纤放大器放大后得到重复频率为 1 MHz, 脉

收稿日期: 2015-01-20; **收到修改稿日期:** 2015-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61177048)、北京市自然科学基金重点项目(KZ2011100050011)

作者简介: 师红星(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事增益开关半导体、微片激光器、光纤放大器等方面的研究。

E-mail: shihongxingll@163.com

导师简介: 王 璞(1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤激光器、光纤放大器及新型光纤光学功能性器件等方面的研究。E-mail: wangpuemail@bjut.edu.cn(通信联系人)

冲宽度为 30 ps 的激光脉冲,而平均功率只有 50 mW。2014 年,Abrardi 等^[8]使用增益调制半导体技术,得到脉冲宽度为 40 ps,重复频率为 1 MHz 的脉冲输出,平均功率只有 0.5 W。高功率 1.5 μm 增益调制半导体激光器输出功率需进一步提高,以满足激光器在激光测量、激光频率转换等方面的应用。

本文报道了基于增益开关半导体技术的皮秒脉冲光纤激光器,输出脉冲宽度为 80 ps,脉冲重复频率从 100 kHz 到 20 MHz 连续可调。经过四级掺铒光纤放大器后,在重复频率为 20 MHz 时,掺铒光纤激光器的最大输出功率达到 9.3 W,相应的峰值功率为 5.8 kW,激光中心波长为 1547.7 nm,光谱宽度为 0.09 nm。

2 实验原理及实验装置

2.1 实验原理

增益开关半导体技术是产生超短脉冲激光的一种有效途径。其利用快速的电信号驱动激光二极管产生超快的光信号:快速的电脉冲激发弛豫振荡的第一个光脉冲尖峰,并且在第二个光脉冲尖峰产生之前快速关闭,从而使得半导体激光器输出一个很窄的光脉冲。由于弛豫振荡现象的存在,使得增益开关技术输出的光脉冲比输入的电信号宽度短很多。增益开关的原理如图 1 所示。增益开关过程中,半导体激光器置于直流电压偏置条件下(1 V)。当半导体激光二极管上加载方形脉冲时,激光器中的电子密度会迅速增加直至达到激光输出阈值。电子密度增加的同时,半导体激光器腔内的光子数也会增加,光子数的增加会消耗禁带内的载流子的数量;载流子的降低反过来同时又降低了腔内光子数量,从而输出一个光脉冲,并且光脉冲的时间宽度比电脉冲的宽度窄很多,这就是增益开关形成光脉冲的过程。增益开关过程中,反转粒子数越多越容易输出更窄的光脉冲^[9-10]。

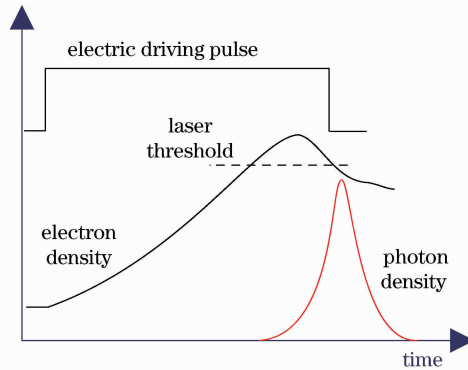


图 1 增益开关过程中半导体光子密度与载流子密度的变化

Fig. 1 Variation of photons and carriers density during gain-switched process

半导体激光器的腔内载流子密度 n 与光子密度 S 可用以下速率方程描述增益开关过程中二者的动态形成过程:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{j(t)}{eV} - \frac{n}{\tau_s} - \alpha(n - n_t)S, \quad (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = \alpha(n - n_t)S - \frac{S}{\tau_{ph}} + \frac{n}{\tau_s}, \quad (2)$$

式中 e 表示腔内的电子密度, V 为腔内体积, $j(t)$ 为电流密度, τ_{ph} 表示自发辐射寿命, n/τ_s 为腔内自发辐射损耗的电子数, $\alpha(n - n_t)S$ 表示受激发射消耗的电子数(或者吸收的电子数), α 为吸收或者增益常数(取决于 $n > n_t$ 还是 $n < n_t$), n_t 为常量,代表阈值腔内电子数。(2)式中 S/τ_{ph} 代表腔内的光子损耗, n/τ_s 为自发辐射光子数。

2.2 实验装置图

实验装置如图 2 所示,实验中采用的半导体二极管由 Agere Systems 公司生产(型号为 D2570,中心波长为 1547.7 nm,光谱半峰全宽为 0.05 nm)。半导体激光器处于 1V 直流电压偏置条件下,增益开关输出脉冲重复频率可以从 100 kHz 到 20 MHz 连续调谐。实验中,采用两级纤芯抽运放大器对信号进行放大。增益光纤为 3 m 长的掺铒光纤(Coractive 公司),纤芯/包层尺寸为 6/125 μm ,纤芯数值孔径(NA)为 0.22,光

纤在 980 nm 抽运光处的纤芯吸收为 7 dB/m。实验中抽运源采用 980 nm 半导体激光器,最大输出功率为 400 mW。在第一级预放大器后使用可调光纤滤波器,滤掉放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)。

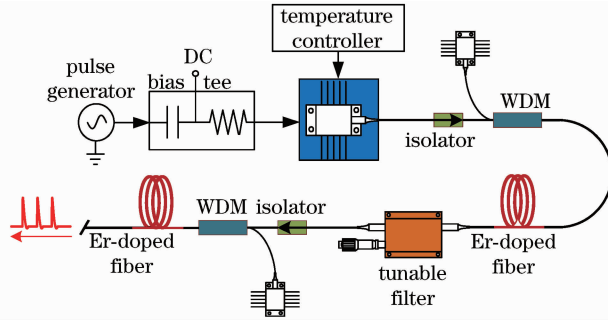


图 2 半导体增益开关种子光及纤芯抽运放大器实验装置图

Fig. 2 Schematic setup of gain-switched LD with two stages of amplifiers

为得到更高的功率输出,实验中采用两级包层抽运放大器将信号进一步放大(如图 3 所示)。在第三级预放大器中,增益光纤采用 3 m 长、6/125 μm 的双包层掺铒光纤(Nufern 公司),纤芯/包层数值孔径为 0.18/0.46,光纤在 976 nm 处的包层吸收率为 7 dB/m。主功率放大器增益光纤为铒/镱共掺双包层光纤(CorActive 公司),光纤长度为 3 m,纤芯/包层直径为 10/128 μm ,纤芯/包层数值孔径为 0.2/0.45,光纤在 976 nm 处的包层吸收率为 7.5 dB/m。抽运源为两个功率为 17 W、中心波长为 976 nm 的多模半导体二极管,通过(2+1) \times 1 的合束器将抽运光耦合到增益光纤中。增益光纤输出后熔接了 0.5 m 的 Nufern 公司 1060-XP 单包层光纤来剥离光纤中的抽运光,光纤输出端采用 8 $^\circ$ 角切割来防止端面反射造成激光寄生振荡。

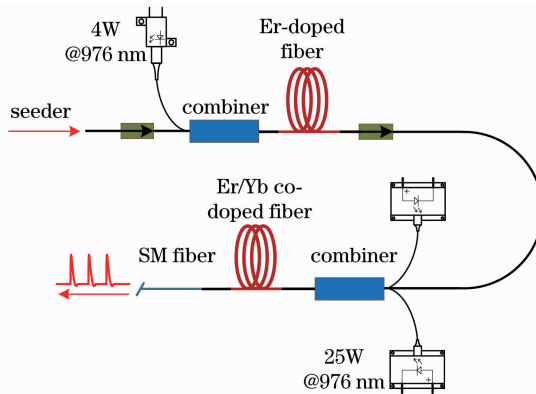


图 3 后级包层抽运放大器实验装置图

Fig. 3 Experimental setup of final amplifier system

3 实验结果与分析

实验中采用的激光半导体驱动可以产生 1 ns 的电脉冲(上升沿为 600 ps),并可输出 1 Hz~20 MHz 的任意频率的驱动信号。当驱动电脉冲宽度为 1.2 ns 时,半导体激光二极管可输出 80 ps 的超短脉冲。图 4 为利用带宽为 25 GHz、可实时测量的高速示波器(DSOX92504A 采用率 80GSa/s)和 12.5 GHz 光电探头(EOT 公司 ET-5000)测量的电脉冲与光脉冲波形。图中黑色曲线为驱动激光二极管的电脉冲波形,脉冲宽度为 1.2 ns。红色曲线为输出的光脉冲,脉冲宽度为 80 ps。图中的插图 of 增益开关半导体种子信号光输出的脉冲串图,从图中可看出信号光具有良好的脉冲稳定性。

重复频率在 100 kHz~20 MHz 范围为调谐时,相应的输出平均功率为 100 nW~8 μW 。当重复频率为 20 MHz 时,输出功率为 8 μW ,由于种子光功率较低,在放大过程中很容易产生较强的 ASE。当第一级预放大器中的抽运功率为 7 mW 时,输出的信号光开始出现 ASE。当抽运功率达到 400 mW 时,输出的平均功率达到 12 mW。通过光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6373)测量,输出光谱中存在大量的 ASE 光,其峰值位于 1530 nm 处。为了使信号光具有较好的光学信噪比(OSNR)以利于后级的功率放大,实验中采用可调谐滤波器消除信号

光中的 ASE。可调谐滤波器的调谐范围为 1510~1550 nm,光谱半峰全宽为 0.05 nm,经过滤器后,信号光中的 ASE 被滤除(如图 5 中蓝色曲线所示)。经过滤器后信号光功率由 12 mW 变为 3 mW。

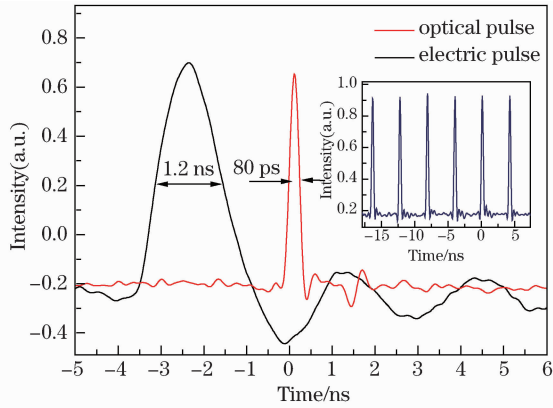


图 4 驱动激光二极管电脉冲与输出光脉冲的波形

Fig. 4 Waveform of electric driving pulse and output optical pulse

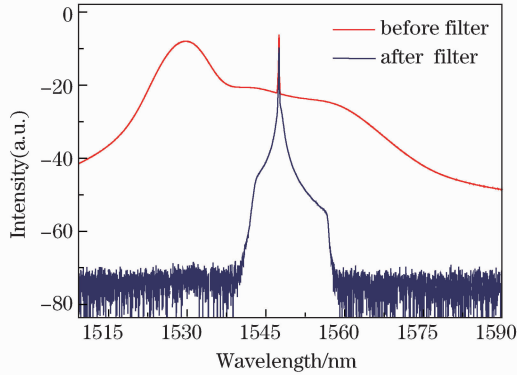


图 5 一级放大器与滤波器后光谱图

Fig. 5 Spectra after the first stage amplifier and tunable filter

在第二级纤芯抽运预放大器中,抽运功率为 400 mW 时,输出信号光平均功率达到 48 mW。为了使信号光进入主功率放大器时具有足够的能量,第三级预放大器中采用多模 793 nm 半导体激光器二极管作为抽运源。在抽运功率为 4 W 时,输出平均功率达到 460 mW。放大过程中没有观察到 ASE 的出现,这使得信号光能够保持良好的光学信噪比,以利于在主功率放大器中进行放大。

主功率放大器采用两个 17 W 的 976 nm 半导体激光器作为抽运源,两个多模半导体激光器通过(2+1)×1 的合束器将抽运光耦合到增益光纤中,经过合束器耦合后的抽运功率为 31.8 W,抽运耦合效率为 93%。图 6 为输出激光功率与抽运功率的变化关系曲线,输出功率随抽运功率线性增长。当抽运功率为 31.8 W 时,输出激光平均功率达到最高值 9.3 W。此时单脉冲能量达到 0.465 μJ,相应的峰值功率为 5.8 kW。最高功率输出时,输出功率对应抽运功率的抽运斜效率为 27%。

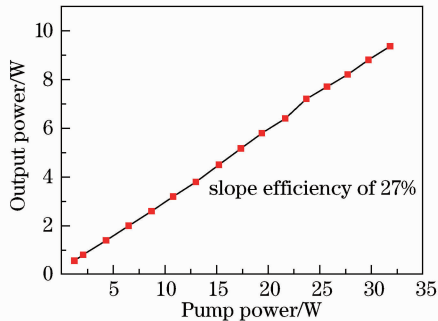


图 6 光纤放大器输出功率与抽运功率关系线

Fig. 6 Average output power versus pump power

如图 7 所示,通过带宽为 7.5 GHz 的频谱仪(Agilent N900A-507)测得主功率放大器输出脉冲信号的频谱信息,频谱仪扫描中心频率设定为 20 MHz,分辨率带宽(RBW)设置为 2 kHz,扫描宽度为 110 kHz。基频为 20 MHz 时的信噪比大于 40 dB,说明经过 MOPA 后的信号依然保持良好的稳定性。

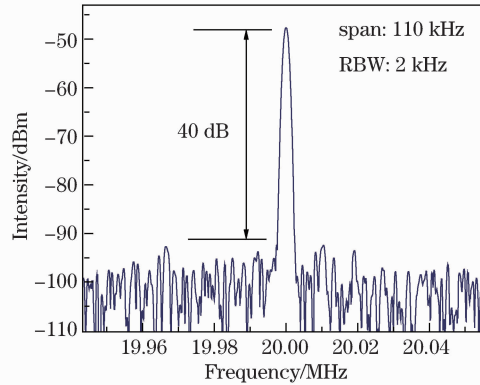


图 7 主功率放大输出的射频频谱信号图

Fig. 7 RF spectrum of final amplifier

主功率放大输出的光谱由光谱分析仪(YOKOGAWA, AQ6373)测量。如图 8 所示,当输出功率达到 9.3 W 时,由于光纤非线性效应,使输出光谱加宽,输出光谱宽度为 0.09 nm。输出光谱的光学信噪比(OSNR)保持在 24 dB,说明放大后的大部分能量集中在信号光光谱范围内。

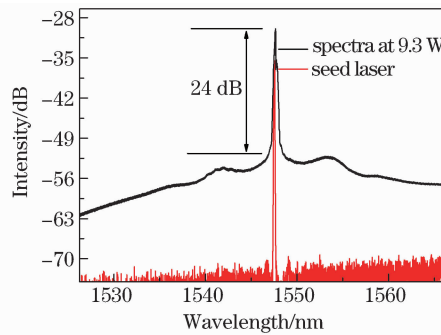


图 8 种子光与最后放大级 9.3 W 输出后光谱图

Fig. 8 Schematic setup of gain-switched LD with two stages of amplifiers

4 结 论

通过使用全新结构的增益开关半导体激光器技术获得 80 ps 的短脉冲激光输出,重复频率可在 100 kHz 到 20 MHz 范围调谐;当重复频率为 20 MHz 时,通过使用光纤 MOPA 结构放大信号光最终得到 9.3 W 平均功率,5.8 kW 的峰值功率输出,在最高功率输出时,脉冲信噪比达 40 dB。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 K K Chen, J H V Price, S Alam, *et al.*. Polarisation maintaining 100W Yb-fiber MOPA producing μ J pulses tunable in duration from 1 to 21 ps [J]. *Opt Express*, 2010, 18(14): 14385-14394.
- 3 S Kanzelmeyer, H Sayinc, T Theeg, *et al.*. All-fiber based amplification of 40 ps pulses from a gain-switched laser diode [J]. *Opt Express*, 19(3): 1854-1859.
- 4 Z Li, A M Heidt, P S Teh, *et al.*. High-energy diode-seeded nanosecond 2 μ m fiber MOPA systems incorporating active pulse shaping [J]. *Opt Lett*, 2014, 39(6): 1569-1572.
- 5 C Heras, J Subias, J Pelayo, *et al.*. Subpicometer wavelength accuracy with gain-switched laser diode in high-resolution optical spectrometry [J]. *Opt Express*, 2008, 16(14): 10658-10663.
- 6 S Moon, D Y Kim. Generation of octave-spanning supercontinuum with 1550-nm amplified diode-laser pulses and a dispersion-shifted fiber [J]. *Opt Express*, 2006, 14(1): 270-278.
- 7 Y P Wang, D N Wang, W Jin. Measuring optical fiber length by use of a short-pulse optical fiber ring laser in a self-injection seeding scheme

- [J]. Appl Opt, 2006,45(25): 6469-6472.
- 8 L Abrardi, M A Gusowski, T Feurer. High-fidelity all-fiber amplification of a gain-switched laser diode [J]. Appl Opt, 2014,53(20): 4611-4615.
- 9 D M Pataca, P Gunning, M L Rocha, *et al.*. Gain-switched DFB lasers [J]. Microwaves Optoelectron, 1997,1(1):46-63.
- 10 Chen He, Chen Shengping, Hou Jing, *et al.*. Research progress on ultrafast gain-switching laser diode system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(11):110001.
- 陈 河,陈胜平,侯 静,等. 超短脉冲增益开关半导体激光系统研究进展[J]. 激光与光电子学进展,2012, 49(11):110001.

栏目编辑: 宋梅梅