

文章编号: 0258-7025(2009)08-1932-05

基于 LD 脉冲调制的全光纤 MOPA 结构激光器

冯宇彤 杜松涛 杨 燕 周 军 陈卫标

(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)

摘要 报道了一台实用化的基于主振荡-功率放大(MOPA)方式工作的全光纤高重复频率脉冲激光器。以基于高速 MOSFET 驱动电源的调制激光二极管(LD)作为种子激光器,采用两级串联的单模双包层光纤作为预放,利用双包层光纤为主放。该器件可以得到重复频率高达 600 kHz 的窄脉冲输出。在重复频率 125 kHz 时,得到脉宽 10 ns,平均功率 2.4 W 的激光输出。研制的激光器具有较好的稳健性,将应用到空基的三维成像激光雷达中。

关键词 激光器;光纤激光器;主振荡功率放大;脉冲调制

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.1932

All-Fiber Laser Based on LD Pulse-Modulated MOPA Architecture

Feng Yutong Du Songtao Yang Yan Zhou Jun Chen Weibiao

(*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*)

Abstract A practical pulsed fiber laser based on master-oscillator power amplifier (MOPA) architecture is reported. A laser diode (LD) driver based on high-speed MOSFET is used as seed laser. The single mode double-cladding fiber is used in the two stages as preamplifier, and the double-cladding fiber is used in the booster. The laser can generate narrow pulse width output at repetition frequency of up to 600 kHz. At repetition frequency of 125 kHz, amplified laser with average power of 2.4 W and pulse width of 10 ns is generated. This robust pulsed laser is a good candidate for space-based 3D imaging lidar.

Key words lasers; fiber laser; master-oscillator power amplifier; pulse modulation

1 引 言

以激光二极管(LD)为抽运源,掺杂光纤为工作物质的光纤激光器,具有电光效率高、废热管理简单、结构设计灵活等优点,已成为固体激光技术的研究热点^[1~3],特别是在对功耗和热控有严格要求的场合,如移动设备、太空飞行等应用中,光纤激光器优势更加明显,而高可靠性的光纤激光器也是研究的重点^[4,5]。

基于种子光源主振荡功率放大(MOPA)方式的光纤脉冲激光器,可获得较高脉冲能量和较高平均功率的激光输出,由于其具有斜率效率高、输出脉冲特性可通过种子光源控制等优点,已成为一项研究热点^[6~8]。2002年,Limpert等^[9]以脉冲固体激

光器作为种子源,利用芯径 30 μm 的光纤进行放大,获得了平均功率 100 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 90 ns 的脉冲激光输出。2005年,美国密歇根州大学以单模 LD 为种子光源,采用多级光纤放大的方式,获得了最高 86 mJ 脉冲能量的光纤激光输出^[10]。2009年,中国电子科技集团第十一所以脉冲固体激光器为种子源,通过两级双包层光纤串联结构,获得了平均功率 103 W,重复频率 50 kHz,脉冲宽度 12.7 ns 的脉冲激光输出^[11]。目前,高平均功率的脉冲光纤激光器主要问题是难以兼顾高功率、窄脉冲和高重复频率。

根据三维激光成像雷达的需要,本文开展全光纤、高重复频率、窄脉冲光纤激光器的研究,实现了

收稿日期: 2009-03-10; 收到修改稿日期: 2009-03-20

作者简介: 冯宇彤(1982—),男,博士研究生,主要从事微型全固态激光器方面的研究。E-mail: ytfeng@mail.siom.ac.cn

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光遥感技术等方面的研究。

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

单模的脉冲激光输出,脉冲频率在 50~150 kHz 连续可调,平均功率大于 2 W。详细介绍了激光器的结构和实验数据,并研制出工程样机,将作为空间激光三维扫描激光雷达的候选光源。

2 器件结构

本器件基于全光纤结构,采用窄脉冲调制的种子 LD,两级单模光纤串联的预放和一级双包层的光纤主放 MOPA 结构。图 1 为基于 MOPA 方式工作的全光纤脉冲光纤激光器结构示意图。

种子激光器采用高速的 MOSFET 驱动,得到窄脉冲宽度、重复频率连续可调的信号光输出,该类型驱动电路可实现超高重复频率(>500 kHz)运转,脉冲宽度可以达到小于 10 ns。尾纤输出 LD 的

种子激光源经过隔离器(ISO)后与抽运光通过 980/1064 nm 波分复用器(WDM)耦合进长度为 14 m 的单模双包层掺镱光纤(SM DC Yb-fiber),放大后通过 1064 nm 带通性滤波器(ASE filter)滤波,滤掉未吸收的抽运光和自激辐射激光,得到经过第一级预放大的脉冲激光。第二级预放采用与第一级相似的结构,利用长度为 16 m 的单模双包层掺镱光纤,滤波后得到第二级放大的脉冲输出。预放过程使用的均为国产单模双包层掺镱光纤,光纤参数为 6/125 μm ,数值孔径 0.14;所用的种子源为 Lumics 公司生产的脉冲半导体激光器,中心波长 1064 nm;每一级放大光纤所用的抽运源也为 Lumics 公司产品,最大输出功率 200 mW,中心波长 976 nm。

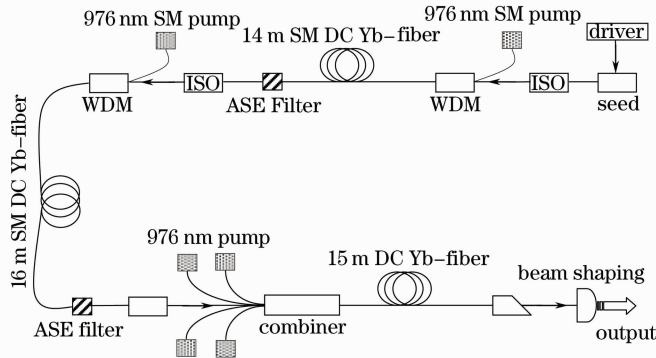


图 1 脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1 Schematic of pulsed fiber laser

通过预放大的脉冲激光经过滤波器和隔离器后,与抽运光通过 ITF 公司生产的 $(6+1)\times 1$ 抽运/信号光合束器(Combiner)耦合进长度为 15 m 的双包层掺镱光纤中,光纤的输出端面磨成大角度斜面,以抑制光纤端面的菲涅耳反射和放大自发辐射(ASE)光的自生振荡。基于 MOPA 方式的光纤放大器为了获得高的放大效率,必须保证信号光在放大光纤的纤芯中,也即掺杂区域传输,所用的 $(N+1)\times 1$ 型光纤合束器的输入端具有 N 根多模光纤用来合束抽运光,中间有一根信号光纤可以低损耗地传输信号光,合束器输出端光纤参数与放大光纤匹配,这种结构可以用来耦合多个多模输出的抽运激光器的功率,并且保证信号光在放大光纤纤芯中传输。所用的 ITF 合束器,抽运输入端光纤参数为 105/125 μm ,数值孔径 0.22,信号光输入端光纤参数为 6/125 μm ,数值孔径 0.14,输出端光纤参数

20/400 μm ,纤芯数值孔径为 0.06,内包层数值孔径为 0.46;所用放大光纤为 Nufern 公司生产,光纤参数与合束器输出端光纤参数匹配,以消除光纤焊接后因参数不匹配带来的损耗;所用抽运源为 Alfalight 公司生产,最大输出功率 2.5 W,中心波长 976 nm。主放级同时采用多个小功率尾纤输出 LD 抽运模块,替代单个大功率 LD 抽运模块的使用,分散了热源,降低了整机热控难度,同时提供了较高的冗余度。

经过主放大后输出的激光经过光束整形后,输出所需的激光发散角。

按照上述参数,研制出一套工程样机,其模装图如图 2 所示,实际尺寸为 320 mm \times 110 mm \times 64 mm。激光器采用全光纤结构,将驱动电路和光学元件一体化设计封装,减少了电路串扰,增加稳健性,激光器只需外部电源模块供电。

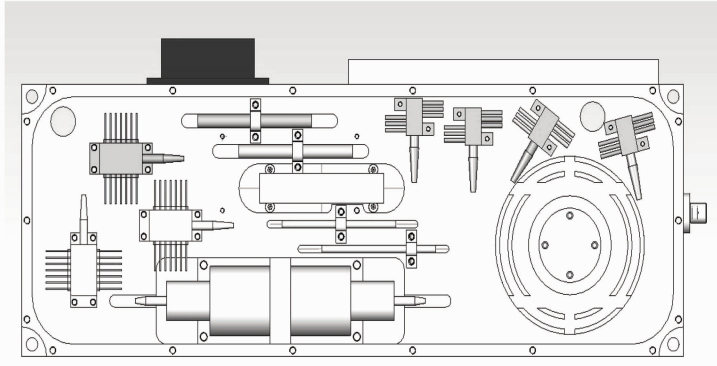


图 2 脉冲光纤激光器装配图

Fig. 2 Mechanical assembly of pulsed fiber laser

3 实验结果

3.1 LD 驱动特性

采用单模尾纤输出的脉冲调制的半导体激光器作为种子光源,然后进行放大。MOSFET 是电压驱动型器件,开关速度快,所需驱动功率低。根据 LD 脉冲驱动的特点和应用的需求,研制了基于高速 MOSFET 栅极驱动的 LD 脉冲驱动电路。利用主动调 Q 的全固态激光器作为种子源时,当改变重复频率时,脉冲宽度也会发生相应改变。本文研制的高速驱动电路,重复频率改变时,脉冲宽度不发生变化,可满足高重复频率窄脉冲宽度三维成像扫描激光雷达的需求。

利用驱动电路对种子源的输出脉冲特性进行了测试,结果如图 3 所示。从图中可以看出,当重复频率大于 150 kHz 时,种子源信号光强度随着重复频率的增大而降低,脉冲宽度也减小。这是因为功率 MOSFET 驱动电路的最大重复频率由栅极充放电回路的充放电时间决定,实际中测得所用驱动电路的最大频率约为 145 kHz,当重复频率大于 145 kHz 时,电容尚未充满便开始放电,导致峰值电流减小,信号光强度降低,同时放电时间也减少,信号光脉冲宽度变窄。采用更小阻值的电阻或电容可以缩短充放电时间,提高驱动电路的重复频率。当重复频率增大到 600 kHz 时,种子源依然可以响应输出,说明选用合适的电阻电容,系统可以工作在更高的重复频率下。根据所选择的种子激光二极管,最高输出重复频率可以达到 1 MHz 以上。

3.2 系统放大性能

由于三维扫描激光雷达对光源的要求在 100 kHz 左右,因此以下的放大特性实验均在 150 kHz 重复频率下测试。种子源信号光脉冲宽度为 10 ns,在预放级抽运功率恒定的情况下,不同重

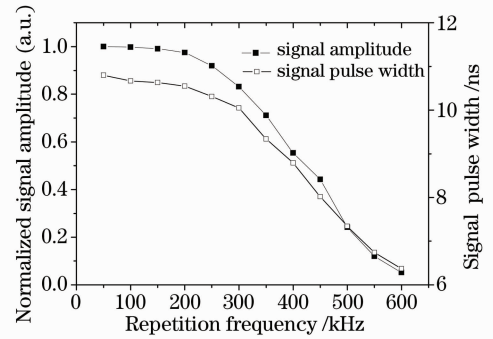


图 3 信号光脉冲强度和脉冲宽度随重复频率的变化

Fig. 3 Signal pulse amplitude and pulse width versus repetition frequency

复频率下分别经过两级单模光纤放大后的平均功率如图 4 所示。从图中可以看出,在信号光脉冲强度和脉冲宽度不变的情况下,随着重复频率的增大,信号光总功率增大,经过放大后的平均功率也增大。

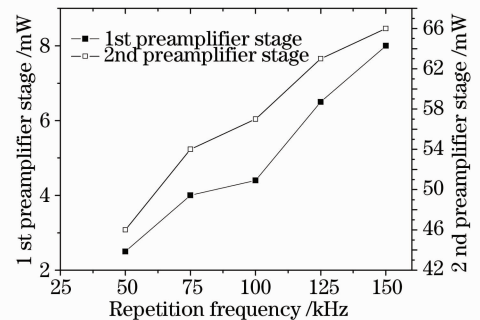


图 4 每一级单模放大后平均功率随重复频率的变化

Fig. 4 Amplified power after SM DC fiber versus repetition frequency

对经过主放大后的激光,测量了不同重复频率下的平均输出功率,能量提取效率和脉冲能量随抽运功率的变化曲线,分别如图 5~7 所示。

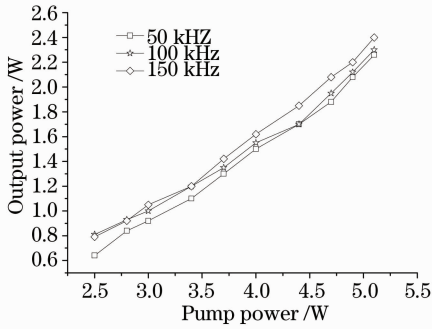


图 5 不同重复频率下平均输出功率随抽运功率的变化

Fig. 5 Averaged output power versus pump power at different repetition frequency

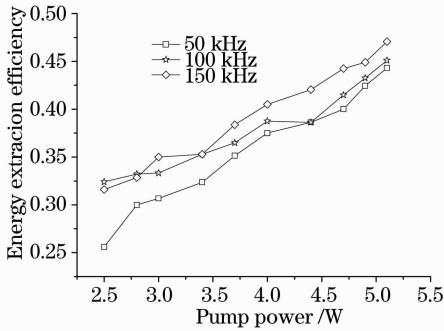


图 6 不同重复频率下能量提取效率随抽运功率的变化

Fig. 6 Energy extraction efficiency versus pump power at different repetition frequency

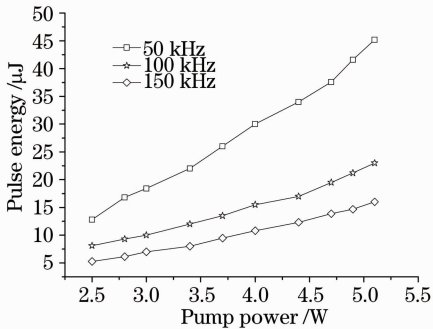


图 7 不同重复频率下脉冲能量随抽运功率的变化

Fig. 7 Pulse energy versus pump power at different repetition frequency

结合图 3 可以看出,在同一抽运功率下,随着重复频率的增加,平均输出功率和能量提取效率增大,脉冲能量减少;在同一重复频率下,随着抽运功率的增大,平均输出功率和能量提取效率增大,脉冲能量增加。实验中对放大激光的脉冲波形和光谱曲线进行了监测,重复频率 125 kHz,输出激光平均功率 2.4 W 时的脉冲波形和光谱输出分别如图 8 和图 9 所示。输出性能可满足空基三维成像激光雷达的性能指标。

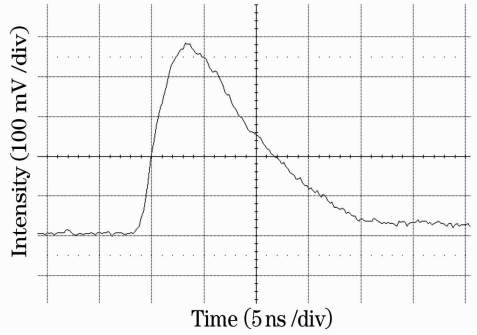


图 8 放大激光的脉冲波形

Fig. 8 Pulse shape after amplification

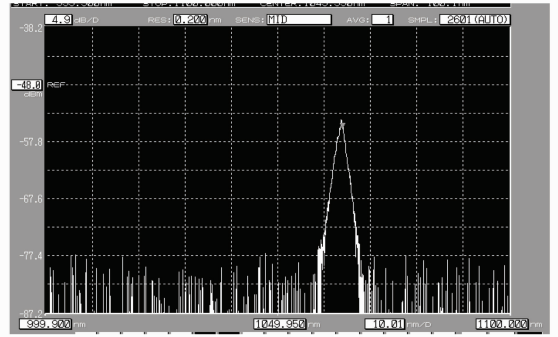


图 9 放大激光的光谱特性

Fig. 9 Optical spectrum of the amplified laser

相对于信号光,在不同重复频率下随着抽运功率的增大,放大激光的脉冲宽度和脉冲波形无明显变化,光谱宽度略有展宽,这是由于自相位调制引起的,放大过程中 ASE 现象不明显,也没有观察到 SRS 等非线性效应。从图 4 和图 5 中,没有观察到增益饱和,表明随着抽运功率的提高,放大激光功率还可以进一步提高。激光器的输出模式为近衍射输出,为了满足扫描三维成像激光雷达对光束形状的要求,主放大器光纤输出后,利用光学系统整形形成线光束输出。

实验中光纤输出的平均功率通过 Spectra-Physics 407 A 光功率计测量,输出激光的光谱特性和脉冲波形通过 YOKOGAWA AQ6370 光谱分析仪和 LeCroy WaveRunner 62Xi 数字示波器监测。

4 结 论

基于 MOPA 结构,对电脉冲调制的种子 LD 的信号光进行了三级放大,其中前两级采用单模双包层光纤放大,第三级采用双包层光纤放大。研制出一台结构紧凑、全光纤结构的脉冲激光器工程样机。对不同重复频率下种子源驱动性能进行了测试,并在低重复频率下对系统的放大性能进行了测试,在

重复频率 125 kHz 时,得到了脉冲宽度 10 ns,平均功率 2.4 W 的输出激光,表明采用全光纤结构的脉冲激光器可以满足三维成像扫描激光雷达的需求。

参 考 文 献

- 1 Y. Jeong, J. K. Sahu, D. N. Payne *et al.*. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(25): 6088~6092
- 2 Zhao Hong, Zhou Shouheng, Zhu Chen *et al.*. High power fiber laser with exceeded 1.2 kW output power [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1359
赵 鸿,周寿恒,朱 辰等. 大功率光纤激光器输出功率超过 1.2 kW[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10): 1359
- 3 Zhou Jun, Lou Qihong, Zhu Jiangqiang *et al.*. A continuous-wave 714 W fiber laser with China-made large-mode-area double-clad fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1119~1120
周 军,楼祺洪,朱健强等. 采用国产大模场面积双包层光纤的 714 W 连续光纤激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1119~1120
- 4 M. W. Wright, G. C. Valley. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1369~1374
- 5 V. Philippov, C. Codemard, Y. Jeong. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2590~2592
- 6 F. D. Teodoro, C. D. Brooks. Multistage Yb-doped fiber amplifier generating megawatt peak-power, subnanosecond pulses [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(24): 3299~3301
- 7 J. Swiderski, A. Zajac, M. Skorzakowski. Pulsed ytterbium-doped large mode area double-clad fiber amplifier in MOFPA configuration [J]. *Opto-Electronics Review*, 2007, **15**(2): 98~101
- 8 Lou Qihong, Zhu Jianqiang, Zhou Jun *et al.*. 133 W pulsed high average power fiber amplifier with double clad fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 552
楼祺洪,朱健强,周 军等. 双包层光纤放大器获得 133 W 高平均功率脉冲激光输出[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 552
- 9 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**: 477~479
- 10 Ming-Yuan Cheng, Yu-Chung Chang, A. Galvanauskas *et al.*. High-energy and high-peak-power nanosecond pulse generation with beam quality control in 200-mm core highly multimode Yb-doped fiber amplifiers [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(4): 358~360
- 11 Li Yao, Zhu Chen, Wang Xiongfei *et al.*. Experimental study on hundred-watt output power high repetition rate narrow pulse duration fiber lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 281~284
李 尧,朱 辰,王雄飞等. 百瓦级高重复频率窄脉宽光纤激光器实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 281~284

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右;综述文章字数最多不超过 10000 字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件 word 版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部