

1030 nm 高重复频率纳秒脉冲全光纤放大器

周翠芸^{1,2} 刘 源¹ 杜松涛¹ 杨 燕¹ 吴姚芳¹ 侯 霞^{1*} 陈卫标¹

(¹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)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 采用脉冲调制的单模带尾纤输出的半导体激光器作为种子源,以掺镱光纤为增益介质,采用主振荡功率放大(MOPA)结构,实现了 1030 nm 全光纤脉冲激光放大。脉冲重复频率在 50~100 kHz 范围内可调,在重复频率 50 kHz 时,实现了脉冲宽度为 6.53 ns,峰值功率为 16.08 kW 的脉冲输出,相应的斜率效率为 69%,输出激光的中心波长在 1029.49 nm。实验还研究了不同重复频率下输出激光脉冲的时域特性。该激光器的输出波长在激光雷达探测器的光谱响应范围内,可作为激光雷达发射光源。

关键词 激光技术;脉冲放大器;主振荡功率放大;高重复频率;全光纤

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0802010

1030 nm High Repetition Rate Nanosecond Pulse All Fiber Amplifier

Zhou Cuiyun^{1,2} Liu Yuan¹ Du Songtao¹ Yang Yan¹ Wu Yaofang¹
Hou Xia¹ Chen Weibiao¹

(¹Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An all fiber pulse master oscillator power amplifier (MOPA) system with Yb³⁺-doped fiber is reported. The seeder is a single longitudinal mode directly modulated laser diode which operates in wavelength of 1030 nm and tunable repetition rate ranging from 50 kHz to 100 kHz. This all-fiber amplifier could generate up to 16.08 kW peak power at the center wavelength of 1029.49 nm, with a pulse duration of 6.53 ns and a slope efficiency of 69% (at 50 kHz repetition rate). The output average power and pulse temporal characteristics with variation of repetition rate are also studied. The output laser wavelength is in the spectral responsivity range of lidar detectors and could be used as laser source for lidar.

Key words laser technique; pulse amplifier; master oscillator power amplifier; high repetition rate; all fiber

OCIS codes 060.2320; 060.2390; 060.3510; 140.3070; 140.3280

1 引 言

光纤激光器以其结构紧凑,高的转换效率以及良好的光束质量,在激光雷达、测距与成像方面得到越来越广泛的应用^[1~3]。脉冲光纤激光器在保证上述优势的同时又具有较高的峰值功率,传输距离更远,更利于实际应用。目前光纤激光器产生脉冲激

光的方式主要有 3 种:调 Q、锁模和种子光主振荡放大(MOPA)^[4]。其中 MOPA 结构可以根据种子光的不同特性实现不同时域特性和频域特性的脉冲激光放大,并且性能稳定,是目前研究的热点^[5~8]。对于采用硅探测器的激光雷达来说,探测器的光谱响应峰值在 980 nm 附近,激光波长越靠近 980 nm,探

收稿日期: 2011-02-23; 收到修改稿日期: 2010-04-21

基金项目: 上海市自然科学基金(10ZR1433600)资助课题。

作者简介: 周翠芸(1984—),女,博士研究生,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: zhoucuiyun536@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间激光器、激光雷达等方面的研究。

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

* 通信联系人。E-mail: hou_xia@siom.ac.cn

测器的响应系数越高。对于 1030 nm 波段的光纤激光器与放大器,目前国内外已经进行了相关的研究报告^[8,9],光路结构主要基于空间耦合的方式。本文利用 MOPA 结构,采用 1030 nm 单模(SM)带尾纤半导体激光器作为种子光源,掺镱光纤作为增益介质,实现了全光纤结构的脉冲放大。采用 1030 nm 作为放大光源出于两方面考虑:1)掺镱光纤在 1030 nm 波段附近有较高的增益^[10];2)对于激光雷达中常用的硅光电探测器,1030 nm 波段比传统的 1064 nm 波段响应系数高,约是 1064 nm 波段的 1.8 倍^[11],非常适合作为雷达光源。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,种子光源采用单模带尾纤的半导体激光器,经过电流调制后输出脉冲信号光功率在百微瓦量级,种子光中心波长为 1029.27 nm,脉冲宽度为 8.84 ns。通过调节驱动电路可以方便地在 50~100 kHz 范围内改变种子光脉冲输出的重复频率。因为种子信号光功率很弱,在进入主放大级之前要对其进行必要的预放大。

预放采用两级结构,预放增益光纤采用单模掺镱光纤,预放抽运源均为 976 nm 单模激光二极管(LD),通过波分复用器(WDM)耦合到单模掺镱光纤中。经过两级预放得到合适的信号光强度后,由一个(6+1)×1 合束器的信号端耦合入主放光纤,主放级抽运源采用 4 个 976 nm 多模抽运 LD,同样由(6+1)×1 合束器的抽运端耦合到主放光纤中。(6+1)×1 合束器本身对信号光与抽运光的插入损耗均小于 0.5 dB,合束器输出端光纤是与掺镱主放光纤相匹配的传输光纤,与掺镱主放光纤熔接点损耗小于 0.1 dB。主放光纤为双包层掺镱光纤,纤芯直径 30 μm,内包层为八角形,直径 250 μm,长度 2.2 m,缠绕成直径 20 cm 的圆环。光纤输出端切成斜 8°,以减少返回光对放大器的影响。输出激光经准直镜与一个双色片(对抽运光高反,信号光高透)后进入功率计探头。各放大级之间加入隔离器以避免后向散射光的干扰,同时,各级之间加入滤波器用来滤除放大过程中产生的放大自发辐射(ASE)噪声。实验中除输出准直镜与双色片之外,所有光学元件均通过光纤熔接技术连接,实现了光路的全光纤化。

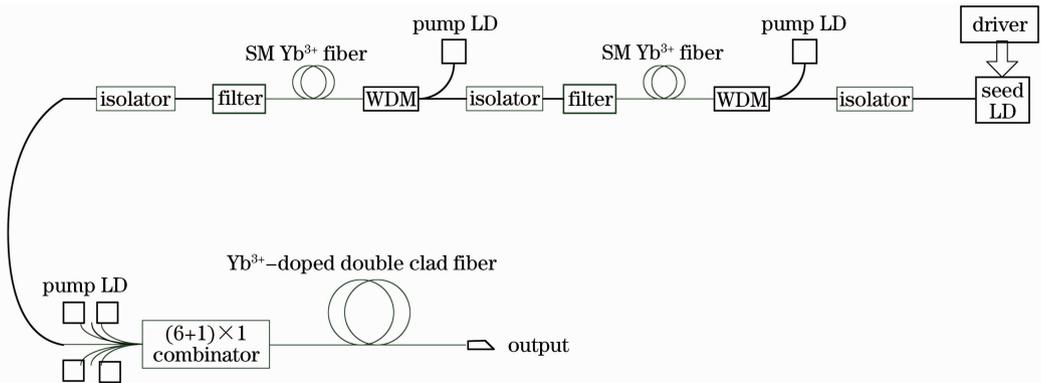


图 1 全光纤结构脉冲放大器示意图
Fig. 1 Setup of all-fiber pulse laser

3 实验结果

3.1 重复频率为 50 kHz

当种子脉冲重复频率保持 50 kHz 时,种子光平均功率为 153 μW,两级预放隔离器之后输出功率为 47 mW。主放光纤后输出功率随抽运功率的变化如图 2 所示,当主放抽运功率达到 10.45 W 时,输出激光平均功率为 5.07 W。相应的斜率效率为 67%,此时脉冲宽度为 6.53 ns,脉冲峰值功率为 16.08 kW。

输出激光经准直镜与双色片后的激光光谱如图 3 所示,中心波长为 1029.49 nm,3 dB 带宽为

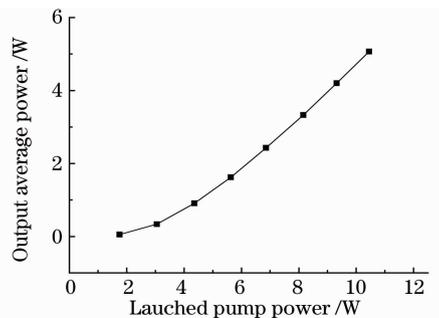


图 2 放大后激光输出平均功率随抽运功率的变化关系
Fig. 2 Output average power of the fiber power amplifier versus launched pump power

1.2 nm。在 1060~1100 nm 范围内有较低的 ASE，与信号光峰值强度相差约 40 dB。实验过程中未观察到受激布里渊散射与受激拉曼散射等非线性现象。

图 4(a)为用 CCD 相机采集的输出激光光斑形状。图 4(b)为 CCD 相机采集到的输出激光束腰附近光斑尺寸并进行二次曲线拟合，得到输出激光的光束质量 $M^2=1.91$ 。

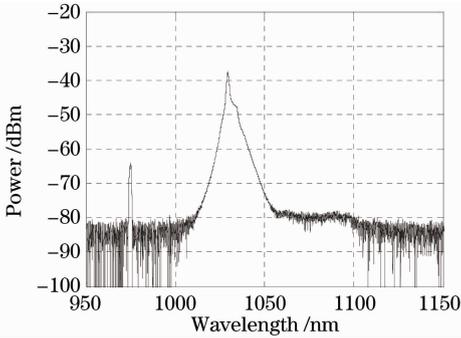


图 3 放大输出光谱

Fig. 3 Spectrum of amplified output laser

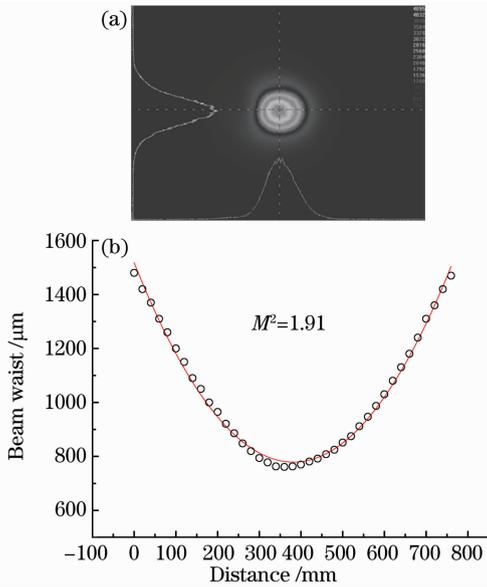


图 4 输出激光光斑(a)和光束质量(b)

Fig. 4 Output laser sport shape (a) and beam quality (b)

图 5 给出了种子脉冲与放大后信号光的脉冲图，其中虚线为种子脉冲波形，实线为放大后脉冲波形。由图可知，主放脉冲前沿与种子脉冲形状基本保持不变，而脉冲后沿却比种子脉冲提早下降。这是因为脉冲前沿到达主放光纤时，消耗了部分的上能级粒子数，使脉冲前沿迅速上升，当脉冲后沿到达时增益变小，没有得到足够的放大，最终导致了脉冲宽度的压缩。脉冲宽度由初始的 8.84 ns 经放大光

路后被压缩至 6.53 ns。

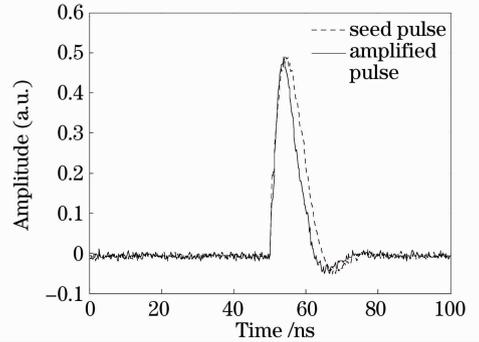


图 5 种子光与放大后激光的时域特性

Fig. 5 Temporal characteristics of seed pulse and amplified pulse

3.2 重复频率在 50~100 kHz 范围内可调

进一步改变种子光脉冲的重复频率，从 50 kHz 调节至 100 kHz，间隔 10 kHz，首先观察种子光的变化特性。在这个过程中种子光输出的平均功率呈线性上升趋势，调节过程中，种子脉冲形状、幅值与输出光谱并无明显改变。

保持抽运功率不变，随着重复频率的增加，主放输出平均功率并未改变，但脉冲能量在逐渐减小。图 6 给出了在 10.45 W 主放抽运功率下输出脉冲能量和脉冲宽度的变化。这主要是由于在几十千赫兹的高重复频率条件下，抽运功率相同时，光纤中可提取的能量是一定的，增加重复频率不能带来平均功率的增加，反而会使单脉冲能量减弱。

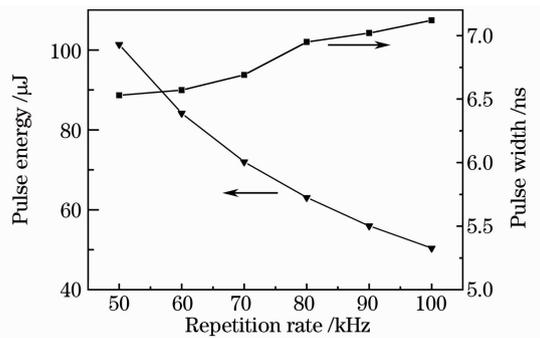


图 6 不同重复频率下的输出脉冲能量与脉冲宽度

Fig. 6 Pulse energy and pulse width under different repetition rates

实验观察到的另一个现象就是放大后的脉冲宽度随重复频率的变化。在种子光脉冲宽度保持 8.84 ns 不变条件下，重复频率越高，放大光路对输出脉冲宽度的压缩效果越弱。如图 6 所示，在 50 kHz 时输出脉宽为 6.53 ns，随着重复频率的增加，输出脉冲宽度缓慢增加，当重复频率达到 100 kHz 时输出脉冲宽度为 7.12 ns。不同重复频

率下的脉冲宽度变化可由掺镱光纤放大器的速率方程^[12]给出解释: Yb^{3+} 在 1030 nm 波长处的辐射跃迁可以简化为两能级系统来处理, 对于给定的掺镱光纤, 上能级离子数越多, 放大信号光功率随传播距离与时间的变化速率就越快。在本实验中, 抽运功率相同, 脉冲重复频率越低, 两个相邻脉冲之间抽运时间就越长, 脉冲到达时光纤中积累的上能级离子数越多, 则脉冲功率的变化速率就越快。这种变化的直观表现就是脉冲上升沿变陡, 最终输出的脉冲宽度就越窄, 对脉冲的压缩效果越明显。相反, 脉冲重复频率越高, 脉冲的压缩效果就会越弱。

4 结 论

通过 MOPA 结构, 实现了中心波长为 1029.49 nm、脉冲宽度 6.53 ns 的高重复频率全光纤脉冲激光放大器, 具有结构紧凑、输出稳定等优点。其输出波长在硅光电探测器的光谱响应范围内, 为激光雷达提供了一种稳定的激光光源。实验中采用的主放抽运 LD 功率较低, 通过增加主放 LD 抽运功率有望得到更高功率的激光输出。

参 考 文 献

- 1 Malcolm W. Wright, George C. Valley. Yb-doped fiber amplifier for deep-space optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(3): 1369~1374
- 2 Yutong Feng, Jun Zhou, Songtao Du *et al.*. All-fiber pulsed laser transmitter for space-based 3D imaging lidar[C]. CLEO/Pacific Rim, Shanghai, China'09. 2009; 10950713
- 3 John E.. Koroshetz fiber lasers for lidar [C]. Optical Fiber

- Communication Conference, Anaheim, California, U. S., 2005, OFJ4
- 4 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. Recent progress of high-power fiber lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(2): 135~138
楼祺洪, 周 军, 朱健强 等. 高功率光纤激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(2): 135~138
- 5 J. Limpert, S. Hofer, A. Liem *et al.*. 100-W average-power, high energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(4): 477~479
- 6 Wang Yuanxiang, Jiang Peipei, Yang Dingzhong *et al.*. All-fiberized master oscillator power amplifier structured pulsed Yb fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1861~1865
汪园香, 姜培培, 杨丁中 等. 全光纤结构主振荡功率放大大型掺镱脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1861~1865
- 7 Songtao Du, Xia Liu, Jun Zhou *et al.*. 156-W average power, high repetition rate, nanosecond pulse from a large-mode area fiber amplifier[J]. *Opt. Engng.*, 2010, **49**(2): 024201
- 8 Wenxue Li, Qiang Hao, Ming Yan *et al.*. Tunable flat-top nanosecond fiber laser oscillator and 280 W average power nanosecond Yb-doped fiber amplifier [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(12): 10113~10118
- 9 M. Hildebrandt, M. Frede, D. Kracht. Single-frequency fiber amplifier emitting 7.8 W at 1030 nm[C]. OSA/ASSP Nevada U. S., 2006, MB6
- 10 Rüdiger Paschotta, Johan Nilsson, Anne C. Tropper *et al.*. Ytterbium-doped fiber amplifiers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(7): 1049~1056
- 11 Li Jianjun, Zheng Xiaobing, Lu Yunjun *et al.*. Accurate calibration of the spectral responsivity of silicon trap detectors between 350 nm and 1064 nm[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(9): 6273~6278
李健军, 郑小兵, 卢云君 等. 硅陷阱探测器在 350~1064 nm 波段的绝对光谱响应度定标[J]. 物理学报, 2009, **58**(9): 6273~6278
- 12 Yong Wang, Hong Po. Dynamic characteristics of double-clad fiber amplifiers for high-power pulse amplification [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(10): 2262~2270