

文章编号: 0258-7025(2010)06-1501-04

用于分布式光纤传感的全光纤激光器

高存孝¹ 朱少岚^{1,2} 冯 莉¹ 宋志远^{1,2} 曹宗英¹ 何浩东¹ 牛林全^{1,2}

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119)
² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 报道了一台适用于分布式光纤传感的全光纤激光器。激光器基于主振荡功率放大(MOPA)技术,种子光源为半导体激光器,放大器为掺铒光纤放大器。实现了重复频率和脉冲宽度分别独立可调的激光输出,中心波长为 1550 nm,光谱的 3 dB 带宽小于 0.2 nm,获得的最高峰值功率为 1.1 kW,输出的激光脉冲中放大自发辐射(ASE)功率分数的最大值低于 10%。

关键词 激光器;光纤激光器;掺铒光纤放大器;分布式光纤传感

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1501

An All Fiber Laser for Distributed Optical Fiber Sensor

Gao Cunxiao¹ Zhu Shaolan^{1,2} Feng Li¹ Song Zhiyuan^{1,2} Cao Zongying¹
He Haodong¹ Niu Linqun^{1,2}

(¹ State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract An all fiber laser which is suitable for distributed optical fiber sensor is reported. The laser is based on the technique of master-oscillator-power-amplifier (MOPA), whose seed laser is a laser diode and amplifier is Er³⁺ doped fiber amplifier. The laser operates in wavelength of 1550 nm with the tunable repetition rate and the pulsewidth, and the 3 dB width is less than 0.2 nm. The maximum peak power 1.1 kW of laser pulse is obtained, and the power of amplified spontaneous emission (ASE) in the output pulse is less than 10% in all condition.

Key words lasers; fiber laser; Er³⁺ doped fiber amplifier; distributed optical fiber sensor

1 引 言

分布式光纤传感技术是集光、机、电为一体的综合性技术,具有寿命长、耐高电压、抗电磁干扰和系统简单等优点,可以实现连续的空间温度测量、气体泄漏的在线监测等,目前已经广泛用于电力冶金、石油化工、交通运输和火灾预防报警等诸多领域^[1~4]。在分布式光纤传感系统中光纤既作为传输通道,同时又是传感的功能元件,可以非常容易地获得链路上被测量参数的空间分布和时间变化信息,这是传统光纤传感所无法比拟的。

目前的分布式光纤传感技术主要有:基于光纤拉曼散射或布里渊散射的光时域反射及频域反射技

术、基于光纤瑞利散射的偏振光时域反射技术、长距离光干涉技术、菲涅耳反射技术以及准分布式光纤布拉格光栅复用技术等^[5~12]。这些技术分别有各自的特点,适合于不同的应用场合。对于基于光纤拉曼散射的光时域反射技术而言,其工作原理是利用光纤背向拉曼散射的温度效应,即光纤所处空间各点的温度场能够改变光纤中背向拉曼散射光的强度,通过测量拉曼反射光的强度就可以得到相应的温度值,并使用光时域反射技术来确定所测温度点的位置。这种分布式光纤传感技术系统结构简单、成本低和应用范围广,目前已经实现了 10 km 以上的测量距离,是一种很有市场前景的技术。

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-16

作者简介: 高存孝(1979—),男,助理研究员,主要从事脉冲光纤激光器、放大器以及脉冲半导体激光器技术等方面的研究。E-mail: cxgao@opt.ac.cn

由于分布式拉曼散射光纤传感是基于光时域反射原理来实现测量的,因此其光源必须是具有一定功率的脉冲光源,并且要容易耦合进入光纤。常用的光源有直接调制高功率半导体激光器,通过空间耦合进入到光纤里^[13],其优点是结构简单,缺点是使用空间耦合装置,稳定性较差,调制时需要大电流脉冲,电路干扰大。还有一种是通过外调制器将光纤输出的高功率激光调制成脉冲激光,该方法的稳定性和激光输出的特性较好,但是过于复杂,激光功率浪费多,效率低。此外,光纤调Q激光器可以获得激光脉冲输出,但其脉冲宽度较宽,重复频率和脉冲宽度不能单独调节,而且波形一般不是矩形^[14,15]。

本文报道的激光器采用主振荡功率放大(MOPA)技术,种子光源为光纤输出的半导体激光器,其中心波长为1550 nm,光谱宽度小于0.2 nm,放大器采用掺铒光纤放大器,输出激光的重复频率和脉冲宽度分别独立可调,最大峰值功率为1.1 kW。整个激光器采用光纤熔接的方法,实现了全光纤化,使得激光器结构紧凑、稳定可靠,非常适合作为分布式光纤传感的光源。

2 实验装置

脉冲全光纤 MOPA 激光器的实验装置结构示意图如图 1 所示。种子光源是中心波长为 1550 nm 的分布反馈(DFB)半导体激光器,内部封装有半导

体制冷器(TEC),可以通过外部电路实现温度控制,从而使输出波长稳定。采用电流脉冲信号对该半导体激光器直接调制,激光器输出矩形脉冲的脉冲宽度在 9~25 ns 范围内可调谐,重复频率在 1~10 kHz 范围内可调谐,种子光源输出的峰值功率为 40 mW。激光放大器为 Nufern 公司生产的型号为 EDFC980-HP 的单模掺铒光纤,其在 976 nm 波长处的吸收系数约为 3 dB/m。抽运光源为单模(SM)光纤耦合输出的功率为 100 mW,波长为 976 nm 的半导体激光器,通过 980 nm 光纤分束器将抽运光功率按 40:60 的比例一分为二,并分别和两个 980 nm/1550 nm 的波分复用器(WDM)连接,将抽运光耦合进掺铒光纤。两段增益光纤的长度分别为 4.5 m 和 8 m,使用光纤隔离器隔离开来,用以防止反馈光造成的干扰,并使用带通滤波器滤除放大器中产生的放大自发辐射(ASE)光,以防止前级放大器中产生的 ASE 对后级放大器造成饱和而使信号光放大效率下降。在不同的重复频率和脉冲宽度下放大器获得的最小增益大于 32 dB,在重复频率为 1 kHz,脉冲宽度为 9 ns 时,获得了峰值为 1.1 kW 的脉冲输出。采用 Lecroy8600 型示波器(带宽 6 GHz)和 Newfocus1142(带宽 45 GHz)光电探测器测量脉冲的时域波形,用 Ando 6315A 光谱仪(最高精度为 0.05 nm)测量激光器的输出光谱,激光脉冲的输出功率由 Spectra-Physics 407 光功率计测量。

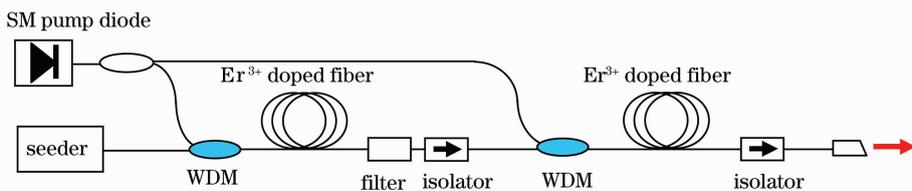


图 1 全光纤脉冲 MOPA 激光器结构示意图

Fig. 1 Configuration of all-fiber pulse MOPA laser

3 实验结果及讨论

由于半导体激光器可以直接用电流进行调制,因此可以通过电路的设计来实现输出激光脉冲的可调谐,针对该种子半导体激光器特性以及光纤传感的应用要求设计了一套基于数字电路的脉冲电流源,在该电路的驱动下种子激光器实现了脉冲宽度在 9~25 ns 范围内可调谐,重复频率在 1~10 kHz 范围内可调谐。种子激光器在不同脉冲宽度调制下输出的时域波形如图 2 所示,其输出波形的脉冲宽

度和电脉冲宽度基本一致。由于数字电路所用芯片精度和电路板设计等方面的限制,使得脉冲宽度有一定程度的抖动,并且随着重复频率的降低和脉冲宽度的增加而增加,最大的脉冲宽度抖动小于 500 ps。图 3 为重复频率 1 kHz,脉冲宽度 25 ns 时的多次脉冲波形叠加的结果,示波器采用上升沿触发,从后沿抖动可以看出脉冲宽度约有 500 ps 的抖动。在各种调制情况下的最小抖动约为 200 ps。

在放大器抽运光功率为 80 mW 时,测量了不同调制频率和脉冲宽度下光纤放大器的输出功率,激

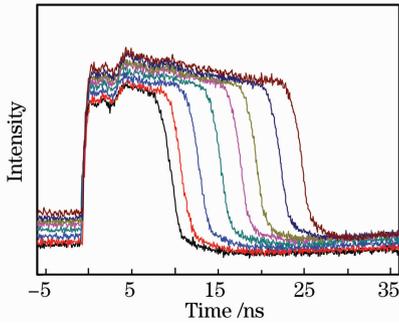


图 2 重复频率 1 kHz 时种子激光的时域波形
Fig. 2 Output pulse temporal trace of seed laser at repetition rate of 1 kHz

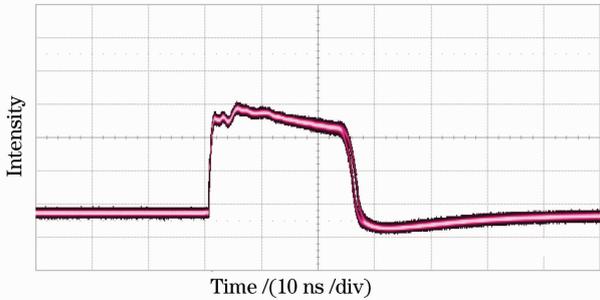


图 3 重复频率 1 kHz, 脉宽 25 ns 时脉冲多次叠加的结果

Fig. 3 Overlap of multipulse at repetition of 1 kHz and pulsewidth of 25 ns

光脉冲的最大峰值功率出现在重复频率为 1 kHz, 脉冲宽度为 9 ns 的位置, 这时功率值为 1.1 kW, 其峰值抖动小于 5%, 在其他调制情况下最大的峰值抖动小于 5%, 最小的峰值抖动小于 3%。用示波器记录了经过光纤放大器后的脉冲时域波形, 如图 4 所示。从对图 4 和图 2 的对比结果中可以看出脉冲波形顶部变得不再平坦, 出现了向下的倾斜, 并且随着脉冲宽度的增加变得更加明显。产生这种现象的原因是由掺铒光纤放大器中所谓的瞬态增益特

性造成的^[16], 即增益光纤中的反转粒子数在不同的种子脉冲传输时会随时间变化, 当多个脉冲同时通过放大器时, 前面脉冲对后面脉冲的行为将会产生影响, 本实验中则是单个脉冲的前沿对后沿产生了影响。引起瞬态增益效应的主要原因是受激辐射的时间相关性及初始状态相关性。在初始时刻, 一个方波信号脉冲到达放大器输入端, 当抽运光足够强时, 信号脉冲前沿经历了小信号增益。然而, 如果输入信号的脉冲持续时间较长, 那么, 由于受激辐射过程, 放大器积累的上能级粒子数会在短时间内抽空, 使得脉冲后沿经历的增益远小于脉冲前沿所经历的增益, 这样从放大器输出的信号已不再是方波脉冲, 从而造成光脉冲波形的畸变。当然, 这种放大器增益在时间上的不均匀分布是不能改变的, 但可以通过对输入的种子激光脉冲的初始形状加以修正, 使得放大后的脉冲波形呈现为期望的形状。这就需要形状可调的电脉冲, 就现在来说实现起来还比较困难, 将在下一步的实验中继续探索研究。

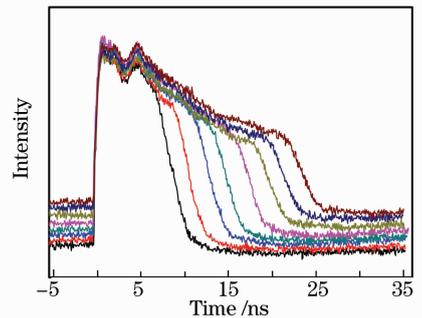


图 4 重复频率 1 kHz 时输出激光脉冲的时域波形
Fig. 4 Output pulse temporal trace of the laser at repetition rate of 1 kHz

从光谱上看, 放大前后的光谱形状变化不大, 由于放大器引入了噪声, 使得激光脉冲的信噪比有所下降。图 5 为种子光和放大器输出的光谱, 光谱的

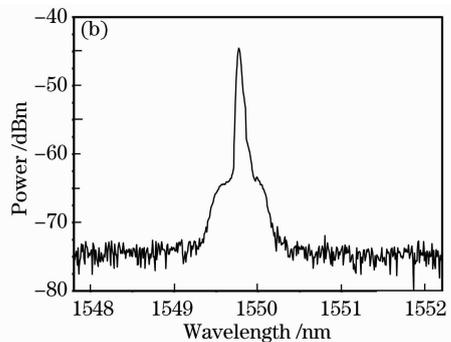
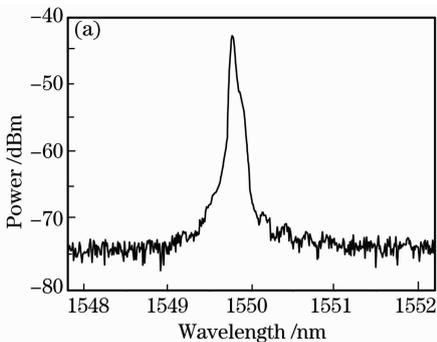


图 5 输出光谱图。(a)种子激光器;(b)放大器
Fig. 5 Output spectrum. (a) seed laser; (b) amplifier

3 dB 带宽小于 0.2 nm, 放大器输出光谱的底座为没有滤除干净的 ASE, 实验中发现 ASE 的功率分数随着重复频率和脉冲宽度的增加而减小。经过测量, 所有条件下激光器输出脉冲中 ASE 的功率分数最大值小于 10%。

4 结 论

采用 MOPA 技术, 设计并实现了一种用于分布式光纤传感的全光纤激光器, 激光器脉冲宽度和重复频率分别独立可调, 可针对不同的光纤传感系统选出最优的激光参数。获得的激光脉冲的峰值功率最高达到了 1.1 kW, 足够用于长距离的光纤传感探测, 是一种非常实用、可靠的分布式光纤传感光源。下一步工作将对实验中出现的进一步的问题进行进一步的改进, 以提高激光器的输出指标。

参 考 文 献

- Li Rongwei, Li Yongtao. Application of distributed optical sensor in submarine cable detection [J]. *Telecommunications for Electric Power System*, 2010, **31**(2): 45~48
李荣伟, 李勇涛. 分布式光纤传感在海底电缆检测中的应用 [J]. *电力系统通信*, 2010, **31**(2): 45~48
- Jiang Qi. Application of fiber-optic distributed temperature sensor to tunnel monitoring system [J]. *J. Applied Optics*, 2005, **26**(3): 20~22
蒋 奇. 分布式光纤温度传感技术在隧道监测中的应用 [J]. *应用光学*, 2005, **26**(3): 20~22
- Li Rongwei, Li Yongqian. High-voltage cable detection system based on distributed fiber optic sensing [J]. *Optical Fiber and Electric Cable*, 2010, (1): 38~41
李荣伟, 李永倩. 高压电缆用分布式光纤传感检测系统应用技术 [J]. *光纤与电缆及其应用技术*, 2010, (1): 38~41
- Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127
杭利军, 何存富, 吴 斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 123~127
- Zhang Ying, Zhang Juan, Guo Yujing *et al.*. Current status and developing trend of distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2007, (8): 1~9
张 颖, 张 娟, 郭玉静等. 分布式光纤温度传感器的研究现状及趋势 [J]. *仪表技术与传感器*, 2007, (8): 1~9
- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐 平, 庞拂飞, 陈 娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- Zhang Xuping, Wang Feng, Lu Yuangang. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 14~20
张旭苹, 王 峰, 路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 14~20
- Huang Junfen, Huang Minshuang, Tang Jian. Research progress on high spatial resolution distributed sensing technique [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 47~50
黄军芬, 黄民双, 唐 建. 高空间分辨率分布式光纤传感技术的研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 47~50
- Xie Kongli, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light ϕ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 569~572
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 ϕ -光时域反射计光纤分布式传感系统 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 569~572
- Li Jianzhong, Rao Yunjiang, Ran Zengling. Distributed fiber-optic intrusion sensor system based on POTDR [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2789~2794
李建中, 饶云江, 冉曾令. POTDR 分布式光纤传感及其在安防监测中的应用 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2789~2794
- Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 29~33
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用 [J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 29~33
- Zhang Zhiguo, Zhang Min, Ye Peida. Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on linear-cavity fiber Raman laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1073~1077
张治国, 张 民, 叶培大. 基于线型腔拉曼光纤激光器的长距离光纤布拉格光栅传感 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1073~1077
- Zhang Zaixuan, Shen Lixue, Wu Xiaobiao. Distributed optical fiber temperature sensor system and its application [J]. *Laser and Infrared*, 1996, **26**(4): 250~252
张在宣, 沈力学, 吴孝彪. 分布型光纤温度传感器系统及其应用 [J]. *激光与红外*, 1996, **26**(4): 250~252
- Xing Lei, Feng Xue, Zhang Lei *et al.*. Stimulated Brillouin scattering hybrid Q-switched Er-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 338~342
邢 磊, 冯 雪, 张 磊等. 受激布里渊散射被动混合调 Q 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 338~342
- Gao Cunxiao, Zhao Wei, Wang Yishan *et al.*. Actively Q-switched Yb³⁺-doped all fiber ring laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 651~654
高存孝, 赵 卫, 王屹山等. 掺 Yb³⁺ 全光纤环形腔主动调 Q 光纤激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(5): 651~654
- Desurvire, C. R. Giles, J. R. Simpson. Gain dynamics of erbium-doped fiber amplifiers [C]. *SPIE*, 1989, **1171**: 103~118