

人眼安全高重频窄脉宽单模全光纤激光器特性研究

张鑫^{1,2}, 刘源¹, 贺岩¹, 杨燕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 空间激光信息传输与探测技术重点实验室, 上海 201800;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 介绍了基于主振荡功率放大结构的人眼安全全光纤激光器。首先对比了电光调制及直接调制产生的种子激光在百 kHz 重复频率、纳秒级脉冲宽度的激光放大器中优缺点, 综合系统需求选择直接调制方式; 之后对窄脉冲单模放大中出现的脉冲分裂现象进行了研究, 选用 10 μm 纤芯的双包层铒镱共掺光纤, 仅通过两级放大即获得了 1 550 nm, 重复频率为 200 kHz, 脉冲宽度为 4.07 ns, 峰值功率为 1.02 kW 的单模激光输出。具有结构紧凑、稳定可靠的特点, 可用于三维视频激光雷达。

关键词: 激光器; 光纤光学; 主振荡-功率放大; 单模输出; 三维成像

中图分类号: TN248.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2015)04-1105-05

Characteristics of eye-safe high repetition frequency narrow pulse width single mode all fiber laser

Zhang Xin^{1,2}, Liu Yuan¹, He Yan¹, Yang Yan¹, Hou Xia¹, Chen Weibiao¹

- (1. Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An eye-safe, all fiber, single mode, fiber laser based on master oscillator power amplifier configuration was presented. The advantages and disadvantages were compared between using a directly modulated diode laser and an electro-optical modulated continuous-wave diode as seed laser in sub-Mega Hertz, nanosecond fiber amplifier. The main restriction of power scaling in nanosecond fiber laser was pulse split. 10 μm core double cladding erbium ytterbium co-doped fiber was employed as gain fiber of power amplifier. The directly modulated seed laser was then amplified by only two stage amplifiers. Finally, a peak power of 1.02 kW with 4.07 ns pulse duration at 200 kHz pulse repetition frequency with single-mode output was obtained and it is applicable in three dimensional video imaging lidar system.

Key words: laser; fiber optics; master oscillator power amplification; single mode output; three-dimensional imaging

收稿日期: 2014-08-13; 修订日期: 2014-09-20

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项任务(2012YQ18012202)

作者简介: 张鑫(1986-), 男, 博士生, 主要从事光纤激光技术方面的研究。Email: zx_optical@163.com

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、遥测和激光雷达等方面的研究。Email: wbchen@mail.shcnc.ac.cn

0 引言

三维视频激光雷达是在三维激光扫描仪技术上发展起来的新型成像技术,能够以 25 帧/s 的视频速度获取目标的三维图像。目前,三维激光扫描仪已经广泛地应用于森林资源调查、数字城市、地形绘制、文物保护及复原及 3D 打印等领域^[1];而三维视频激光雷达将在目标寻的、避障和安全监控等需要高速三维图像获取的领域发挥重要的作用,如火星探测中着陆器所携带的三维光学成像敏感器使着陆器在丢弃降落伞后的最后阶段对预定着陆区进行扫描,自动选取预定区域内较为平坦的地方进行着陆^[2]。高重频窄脉宽人眼安全激光器是激光三维扫描成像激光雷达的重要组成部分^[3]。高精度三维视频激光雷达的成像速度、可测距离范围及精度分别与激光器的重复频率、峰值功率及脉冲宽度有关。欲实现单帧图像分辨率为 63×63 , 帧频为 25 帧/s 的三维图像扫描,激光重频需达到 99.225 kHz ($25 \times 63 \times 63$)。激光峰值功率与成像距离相关,同时,在保证峰值功率的前提下,激光的脉冲宽度要与探测系统的电学带宽相匹配,从而获得最佳的信噪比。根据三维视频激光雷达的系统参数,需要研制的激光器峰值功率为 kW 量级,重频为百 kHz 量级,脉宽为 5 ns 左右。单模脉冲输出可以保证测距精度和雷达系统的成像结果。此外,人眼安全对雷达的实际应用也十分重要。

光纤激光器具有结构紧凑稳定、高的转化效率及良好的光束质量的特点,并可以产生高重频 (>20 kHz)、窄脉宽 (<10 ns) 的脉冲,适于高分辨率和快速采集系统^[4]。目前得到纳秒量级脉冲激光器的方法主要有调 Q 和主振荡功率放大器(MOPA)两种^[5]。调 Q 激光器的重频和脉宽有关,无法实现分别调节重频或者脉宽。而 MOPA 结构放大则可以通过改变种子源来精确控制输出参数(重频、脉宽甚至是输出波形等)^[6]。该技术路线具有如下特点:全光纤化,无自由空间行程,光纤间及各无源器件间均通过熔接连接,无需调节光路,抗震动,更适于外场实验应用。2002 年,德国 Jena 研究所采用 $30 \mu\text{m}$ 的光纤放大 Nd:YAG 调 Q 激光器获得平均功率为 100 W,重频为 50 kHz,脉宽为 90 ns 的脉冲激光输出^[7]。2009 年中国科学院西安光学精密机械研究所采用三级级联放大并用钕镜双掺光纤直接输出,获得重频 30 kHz,脉宽宽度 3.3 ns,

单脉冲能量 25 μJ 的脉冲输出^[8]。

采用 MOPA 结构放大时,种子激光器的选取是关键。文中首先对比了分别采用电光调制和直接调制获得高重频窄脉宽种子源的优缺点,之后种子源采用直接调制的半导体激光器,经两级放大最终获得了脉宽为 4.07 ns,重频 200 kHz 时获得峰值功率为 1.02 kW 的单模脉冲激光输出。该激光器系统的主要优点在于采用直接调制种子源技术和二级放大结构,结构简单、器件成熟、且全光路均使用单模器件,弯曲半径小,为小型化提供了便利,之后的工作将集中于产品小型化研究。

1 不同调制方式的比较

直接调制是指直接改变加载于半导体激光器上的电流信号来获得目标波形;外调制包括声光调制、电光调制等方式。其中声光调制器的响应时间慢,无法产生几 ns 级别的脉冲。故能够获得重频几百 kHz,脉宽几 ns 量级的种子激光输出的技术路线主要有两种:电光调制及直接调制。

目前电光调制器可达 10 G 调制速率,即可得的最小脉宽为 0.1 ns,远小于直接调制所能得到的脉宽(最小约 1 ns,受限于直接调制电路)。另外可以任意调节脉冲形状,如对种子脉冲进行预补偿以抵消放大过程中的增益饱和效应。电光调制器^[9]是基于马赫-泽德干涉原理,输入线偏振激光经 1:1 分束器后分别通过波导的两个支路,两路激光在光波导中产生等值异号的相移,然后在第二个 1:1 分束器处干涉合成一个光波输出,调节两个光波导上的电压即可改变两路光的位相差,由此来改变输出光强,其原理及偏置点示意图见图 1。

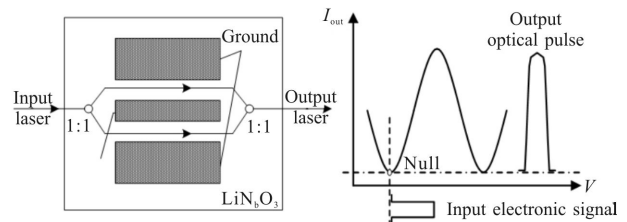


图 1 电光调制器原理及偏置点示意图

Fig.1 Schematic diagram of electro-optical modulator's principle and bias

工作时,首先将其偏置点置于 Null 处,之后加入

驱动电信号即可获得高速可调的波形,但其透过率曲线因外界温度变化、输入波长、功率及偏振态等因素变化会随时间缓慢变化,导致最佳工作点漂移。实际应用中需要结合偏压控制器使用(如图 2 所示),结构复杂、器件较多,稳定性差,不易于小型化集成,影响其应用。

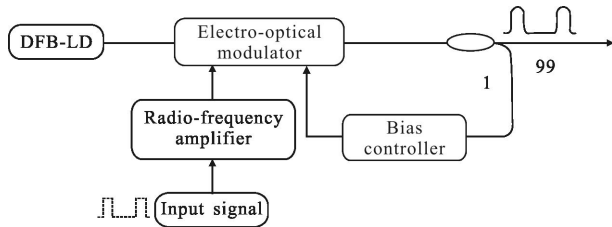


图 2 电光调制方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of electro-optics modulation

另外,电光调制器能达到的消光比为 30 dB,而系统中占空比约为 0.5% (即 $-10 \times \log(100 \text{ kHz} \times 5 \text{ ns}) = 33 \text{ dB}$),基底功率所占种子总功率比重约 50%。在放大过程中基底的连续光分量会消耗很多反转粒子数,导致放大后有用的脉冲能量变小。

因此实验中选用直接调制半导体激光器来获得脉冲种子光。无电流加载时对应半导体激光器为全关状态,无任何基底,可以保证放大过程及放大结果为完全的脉冲能量而无连续分量。此外种子源中没有使用多余器件,整个系统的小型化及成本控制更有利。调制会使光谱展宽至约 0.2 nm,在三维视频激光雷达系统中接收滤波器带宽约 1 nm,此展宽不影响系统性能。

2 实验装置及分析

系统基于主振荡功率放大结构(如图 3 所示),采用直接调制的半导体激光器做为种子光,其光谱

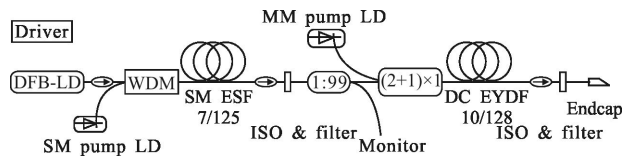


图 3 基于 MOPA 结构的全光纤单模光纤激光器示意图

Fig.3 Schematic diagram of single mode all fiber laser based on MOPA configuration

由半导体激光器本身和调制电路决定,脉宽由电路充放电时间决定,脉冲重频由外部触发,输出脉宽为 4.5 ns,可实现 10~300 kHz 之间连续可调。调节脉冲

重频时种子激光器输出的光谱和脉冲特性不发生改变,平均功率与重频成正比,单脉冲能量与峰值功率保持不变(如图 4 所示)。

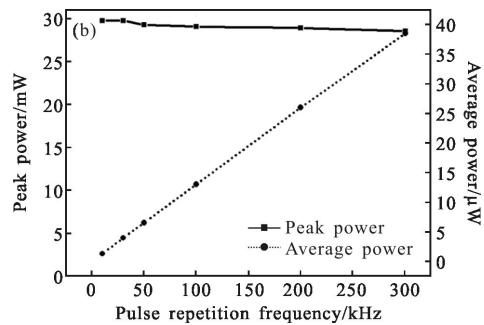
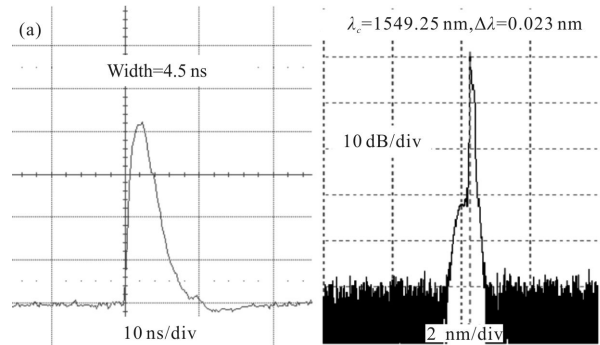


图 4 脉冲调制的种子 LD 输出脉冲、光谱特性(a)及不同重频下种子平均功率与峰值功率变化曲线(b)

Fig.4 Pulse shape and spectrum of directly modulated diode laser (a) and average power vs peak power of seed with different pulse repetition frequency (b)

种子光之后接入一个隔离器防止放大级中的返回光损坏种子激光器。放大光路采用两级放大,预放级采用波分复用器将单模 976 nm 泵浦光耦合入增益光纤纤芯,增益光纤采用纤芯为 7 μm 单模掺铒光纤,其吸收系数在 976 nm 为 24 dB/m。预放之后加入 1:99 分束器,1 端输出光用于检测预放级光学参数,包括光谱、脉宽、功率等。主放级泵浦光选用 976 nm 多模半导体激光器,并通过(2+1)×1 合束器将其耦合入双包层铒镱双掺增益光纤的内包层中。两级间熔入隔离器和滤波器,作用分别是防止后级放大链路回光并有效防止自激振荡和滤除受激自发辐射(ASE)。二级增益光纤由于纤芯数值孔径过大导致其非单模输出,故在其之后熔入标准单模光纤(SMF-28e)光纤制作的隔离器和滤波器,在防止自激振荡和抑制 ASE 的同时保证最终输出为单模输出。并在熔点上涂高折射率胶作泵浦滤除,最后光纤输出为防止功

率过高导致光纤端面损坏, 熔入了一段无芯光纤制作的端帽。

考虑到三维视频激光雷达的成像速度要求, 选择 200 kHz 重频下进行放大。此时, 种子光功率为 26 μW , 脉宽为 4.5 ns, 单脉冲能量在泵浦光为 400 mW 时由 130 pJ 放大至 65 nJ, 增益约为 27 dB。预放后脉冲波形几乎保持不变。

主放级首先采用 6 μm 纤芯的双包层光纤进行放大, 单脉冲能量达到 2.3 μJ (此时对应峰值功率为 564 W)之后脉冲波形会随着泵浦功率的进一步增大而出现分裂, 如图 5 所示。首先脉冲前沿开始分叉, 随着泵浦功率的提高, 前脉冲所占比重逐渐减小至消失, 脉宽变为 2 ns。产生这种现象的原因在于光纤激光器中的非线性效应, 如自相位调制^[10]。

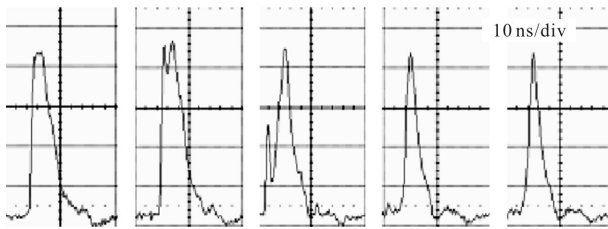


图 5 放大过程中的脉冲分裂示意图

Fig.5 Pulse distortion in amplification process

非线性效应限制了系统功率的进一步提高。可通过提高模场面积或者降低掺杂光纤长度来有效减少非线性效应。之后实验中使用纤芯 10 μm 增益光纤进行放大。长度为 3 m 时获得的最大单脉冲能量为 3.3 μJ , 脉宽 4.05 ns, 对应峰值功率为 815 W; 长度为 2 m 时最终在 6.5 W 泵浦光时获得 827 mW 输出, 光-光转换效率为 12.5%, 对应的峰值功率为 1.02 kW, 功率曲线见图 6。实验中用 1 GHz 的 InGaAs 探头和 1 G 带宽的示波器测得主放后的脉宽由于增益压缩效应

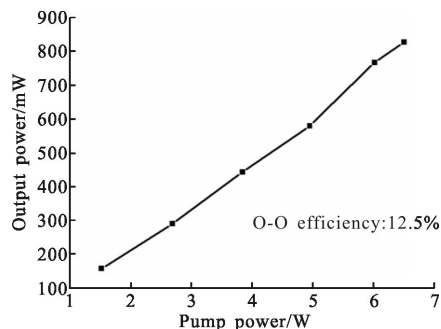


图 6 重频为 200 kHz 时主放级输出光功率曲线
Fig.6 Output power versus pump power at 200 kHz

变为 4.07 ns, 波形稳定且没有分裂。光谱分辨率为 0.02 nm 时测得的光谱信噪比为 30 dB, 由此对应单脉冲能量为 4.13 μJ 。图 7 为最大输出功率时的脉冲图和光谱图。

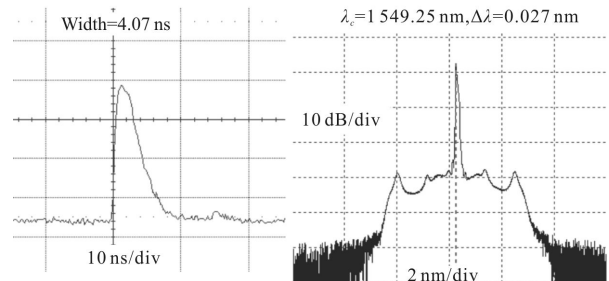


图 7 最大功率输出时脉冲图及光谱图

Fig.7 Temporal shape and spectrum at maximum power

然而, 增大模场面积会导致输出激光模式数增多, 因此, 系统中在增益光纤之后熔接了一段标准单模光纤 (coming SMF-28e) 来确保激光器单模运转, 图 8 为输出光斑图。

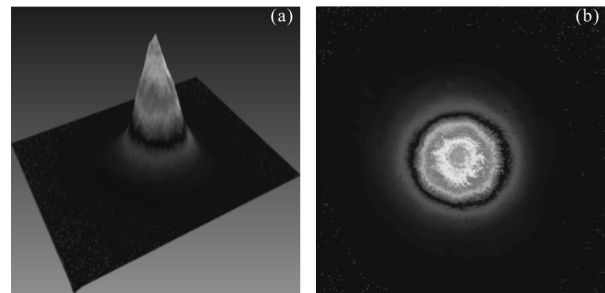


图 8 输出激光的光斑图及三维分布图

Fig.8 Profile of output beam spot and its 3D distribution

3 结论

文中针对三维视频激光雷达的应用背景, 首先对比了电光调制及直接调制产生的种子激光在百 kHz 重复频率、纳秒级脉冲宽度的结构光纤放大器中优缺点, 指出在单模窄脉宽放大中功率提高主要受限于脉冲分裂。选择直接调制方式, 经两级放大即获得了重复频率为 200 kHz, 脉冲宽度为 4.07 ns 的 kW 级峰值功率单模脉冲输出。整个系统采用全光纤结构, 具有结构紧凑, 稳定可靠的特点, 可用作三维视频激光雷达的激光源。

参考文献:

- [1] Luo Yuan, He Yan, Hu Shanjiang, et al. Three-dimensional video imaging lidar system based on acousto-optic laser

- scanning[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2014, 41(8): 0802005. (in Chinese)
- 罗远, 贺岩, 胡善江, 等. 基于声光扫描的三维视频激光雷达技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(8): 0802005.
- [2] Lafontaine J de, Ulitsky A, Tripp J W, et al. LAPS: the development of a scanning lidar system with GNC for autonomous hazard avoidance and precision landing [C]// SPIE, 2004, 5418: 81–93.
- [3] Yun Jian, Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, et al. High-peak-power, single-mode, nanosecond pulsed, all-fiber laser for high resolution 3D imaging LIDAR system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10: 121402–121402.
- [4] Zhou Cuiyun, Liu Yuan, Zhu Ren, et al. High-energy nanosecond all-fiber Yb-doped amplifier [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11: 081403.
- [5] Lou Qihong, Du Songtao, Zhou Jun. Advanced fiber laser technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 1–7. (in Chinese)
- 楼祺洪, 杜松涛, 周军. 先进光纤激光技术[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(2): 1–7.
- [6] Swiderski J, Maciejewska M, Pichola W, et al. Eye-safe, pulsed, kW –peak power, high repetition rate, all-fiber MOPA source [C]//SPIE, 2012, 84331E: 1–7.
- [7] Limpert J, S Höfer, A Liem, et al. 100–W average-power, high-energy nanosecond fiber amplifier [J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(5): 477–479.
- [8] Gao Cunxiao, Zhu Shaolan, Zhao Wei, et al. Eye-safe, high-energy, single-mode all-fiber laser with widely tunable repetition rate[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(7): 611–613.
- [9] Tan Xuechun, Wu Zhichao, Ling Ming, et al. High power and high rate LiNbO₃ electro-optic modulator applied in communication field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 436–439. (in Chinese)
- 谭雪春, 武志超, 凌铭, 等. 通信用高功率高速率 LiNbO₃ 电光调制器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36(1): 436–439
- [10] Kuang Hongshen, Zhao Fangzhou, Gao Jing, et al. Experimental research on self-phase modulation of high power fiber laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 2849–2853. (in Chinese)
- 匡鸿深, 赵方舟, 高静, 等. 高功率光纤激光器中自相位调制的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(9): 2849–2853.