

文章编号: 0258-7025(2009)07-1857-04

人眼安全相干多普勒测风激光雷达全光纤单频激光器

刘 源 刘继桥 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 为了满足近距离相干测风激光雷达对激光发射源的需求,采用种子源振荡-放大(MOPA)的工作方式,对小型化、全光纤、高重复频率、窄线宽并处于人眼安全工作波段的激光雷达用单频脉冲激光器进行了研究。实现激光输出波长 1542.4 nm,重复频率 10 kHz,脉冲宽度 500 ns,线宽 1 MHz,平均输出功率 50 mW,峰值功率 10 W,单脉冲能量 5 μ J。该激光器可作为近距离相干激光雷达发射源。

关键词 激光技术;相干多普勒激光雷达;单频激光器;高重复频率;全光纤;

中图分类号 TN248.1; TN958.98 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093607.1857

An All-Fiber Single Frequency Laser for Eye-Safe Coherent Doppler Wind Lidar

Liu Yuan Liu Jiqiao 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 In order to meet the requirements of coherent Doppler wind lidar laser transmitter, a compact all-fiber master-oscillator power-amplifier(MOPA) laser is studied. On the other hand, high pulse repetition rate, narrow frequency linewidth, eye-safe and all-fiber configuration are required. This kind of all-fiber laser is presented with 10 kHz pulse repetition rate, 500 ns pulse duration, 1 MHz frequency linewidth, 50 mW average power and 5 μ J pulse energy, which will become the laser transmitter of a coherent Doppler lidar to measure wind in lower atmosphere layer.

Key words laser technique; coherent Doppler lidar; single frequency laser; high pulse repetition frequency; all-fiber

1 引 言

近距离低空大气风场的实时高精度测量,在航空安全保障和军事弹道校正等方面具有重要应用。多普勒测风激光雷达^[1]以其高分辨率、高精度、大探测范围并能提供晴空条件下三维风场信息的能力,引起了世界多个国家的关注和重视。多普勒激光雷达主要包括两种工作方式:直接探测和相干探测。相干激光雷达能够以较高的距离分辨率和速度分辨率实时获取风速,从 20 世纪 60 年代开始,就进行了

广泛的研究,先后出现了地基和机载的相干激光雷达。为了获得距离分辨的风速,发射激光器常工作在脉冲方式,高的风速测量精度要求单频激光器具有窄的谱线^[2]。激光源方面先后出现 CO₂ 激光器、激光二极管抽运的全固态激光器^[3]、双包层光纤激光器^[4]等。所用波长有 10 μ m, 1 μ m, 1.5 μ m, 2 μ m。其中 1.5 μ m 光纤激光器具有的优势是:1)工作在人眼安全波段;2)光纤通信的快速发展,使得全光纤激光雷达的发射源、连接件和探测器等容易获得,因

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-05-21

基金项目: 上海市科学技术委员会(08DZ2230400)资助课题。

作者简介: 刘 源(1981—),男,博士研究生,主要从事光纤激光技术方面的研究。E-mail: liuyuandt@126.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)

此成本低、结构紧凑、效率高;3)相对 $2\ \mu\text{m}$ 和 $10\ \mu\text{m}$ 波长相干激光雷达,短波长的距离分辨率和速度分辨率乘积更小。为了进行低空风速测量,同时满足时空分辨率和速度分辨率等的需求,相干多普勒测风激光雷达对发射激光源提出了一定的要求,如线偏振输出的、高重复频率、脉宽数百纳秒、脉冲能量达数十微焦耳等^[5]。为满足人眼安全相干激光雷达对单频激光发射源的要求,目前国外最新的激光器均采用全光纤结构的种子源振荡-放大(Master-oscillator power-amplifier, MOPA)的工作方式,不过大多数采取连续的工作方式^[6,7],近年国外也开始关注激光雷达应用的脉冲式窄线宽光纤激光器^[8,9]。国内这几年逐步关注这方面的工作,开始研究光纤环境下的种子源放大结构的激光器^[10],已经有 $1\ \mu\text{m}$ 附近的窄线宽光纤放大器的相关报道^[11]。

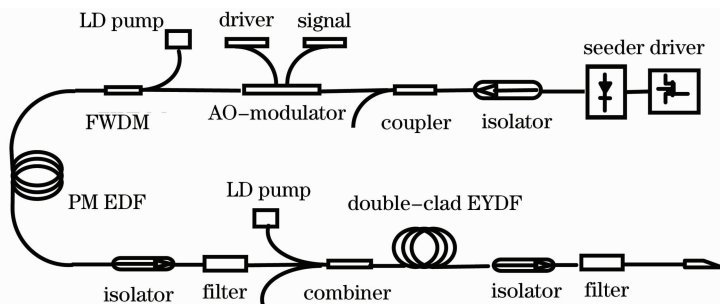


图1 全光纤激光器系统结构图

Fig.1 All-fiber laser diagram

种子源首先经过一个光纤隔离器,再经分光比 1:99 的光纤耦合器分出本征光后,99%能量经调制系统,调制成脉冲激光,调制系统由声光调制晶体、稳压驱动源、信号发生器构成,从而实现脉冲种子源。通过滤波型波分复用器,把种子源和抽运源一起耦合到第一级光纤放大器,抽运源采用单个功率 200 mW 单模尾纤输出中心波长 976 nm 的半导体激光二极管,第一级放大光纤采用长度 1.4 m,吸收系数 23 dB/m 的高掺杂保偏掺钕单模光纤 EDF,纤芯尺寸为 $7/125\ \mu\text{m}$,脉冲激光放大后经光纤隔离器和滤波器后输出。采用一个 ITF 公司的保偏 $(2+1)\times 1$ 的光纤合束器使第一级输出激光和抽运源一起注入到第二级光纤放大器,抽运源采用单个功率 4 W 多模尾纤输出的中心波长 976 nm 半导体激光二极管,第二级放大光纤使用 3 m 长、吸收系数 3 dB/m 的保偏钕共掺双包层光纤,纤芯尺寸是 $7/130\ \mu\text{m}$,放大激光经光纤隔离器、光纤滤波器后输出,实现满足要求的相干激光雷达发射源。

本文使用全光纤的两级放大 MOPA 结构,加入调制器件实现脉冲式放大,并使用偏振控制技术,实现了一台满足相干雷达探测要求的处于人眼安全波段、高重复频率、大脉冲能量、线偏振和窄线宽的 $1.5\ \mu\text{m}$ 激光发射源。

2 全光纤激光器系统结构

激光器系统结构如图 1 所示,采用 MOPA 放大结构,主要由 3 部分构成:种子源、调制系统、光纤放大系统。其中种子源是线偏振带尾纤输出的分布反馈式半导体激光器(Distributed feedback laser diode, DFB),输出功率 10 mW,线宽 700 kHz 左右,中心波长 1542.4 nm;调制系统由声光调制晶体、稳压驱动源、信号发生器构成;光纤放大系统采用两级放大的级联式放大结构。

3 实验结果和讨论

连续种子光输出功率 10 mW,经隔离器、光纤耦合器以及声光调制器后,获得重复频率 10 kHz,脉宽 500 ns,平均功率 $22\ \mu\text{W}$ 的脉冲光,其波形如图 2 所示。在一级放大器抽运源功率 199.6 mW 时,实现平均输出功率 3.3 mW,放大倍数达到 21.7 dB。图 3 为二级光纤放大器在不同抽运功率

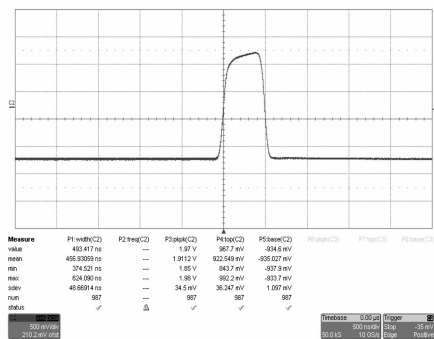


图2 脉冲种子源波形图

Fig.2 Pulse shape of the pulsed seeder

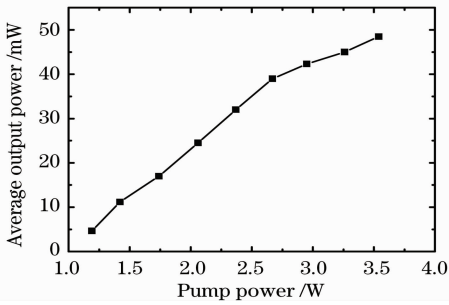


图 3 二级放大后输出功率和抽运功率的关系

Fig. 3 Average output power of the 2nd fiber amplifier increase with pump power

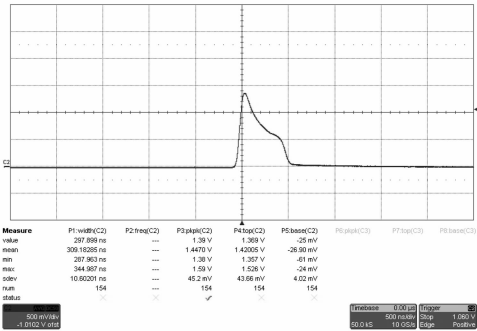


图 4 二级放大后输出脉冲波形图

Fig. 4 Pulse shape of the 2nd fiber amplifier

下的平均输出功率,在抽运源功率 3.5 W 时,输出平均功率达到了 50 mW,放大倍数达到 11.8 dB,其脉冲波形如图 4 所示。经过两级放大后,脉冲波形发生变化,主要体现为脉冲前沿要明显高于后沿。主要是放大过程中脉冲前沿消耗了大量的反转粒子数,从而使得脉冲前沿得到的增益要比后沿大很多,所以放大激光输出波形相对脉冲种子源波形发生改变。

从图 3 可看到,二级放大功率在过了阈值后有明显上升,但是在 3 W 附近上升缓慢。主要因为光纤长度偏短使得反转粒子数不够,导致光纤放大的整体增益不够,从而转换效率下降,趋于饱和。

4 激光器频率线宽测量和分析

为了检验脉冲光纤激光器频率线宽是否满足相干激光雷达窄线宽要求,采用了外差相干拍频方法^[12,13],准确地测量输出激光频率线宽,测量装置组成如图 5 所示,种子源连续光一部分光进入延时光纤,另一部分经过声光调制器和光纤放大器系统后输出,两部分光经过耦合器混频,由探测器接收,通过示波器检测相干拍频信号,傅里叶变换后就可以计算频率线宽。为了评价频率稳定性,采用了 20 km 的延时光纤。种子源测量线宽如图 6 所示,二级光纤放大器后测量的线宽如图 7 所示,由延时自拍频的理论可以得到,当延时时间远大于相干时间时频率谱体现出明显的准洛伦兹线形。所以用 Lecroy wavepro 7000 1 GHz Oscilloscope 示波器采集数据之后,在 Origin 软件中采用洛伦兹线形拟合离散光谱计算频率线宽。

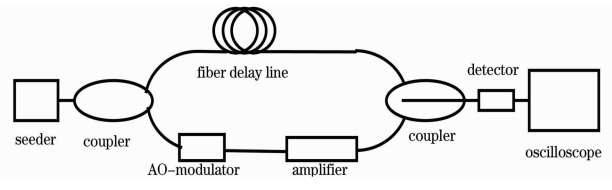


图 5 光纤激光器频率线宽测量系统组成

Fig. 5 Frequency linewidth measurement setup of fiber laser

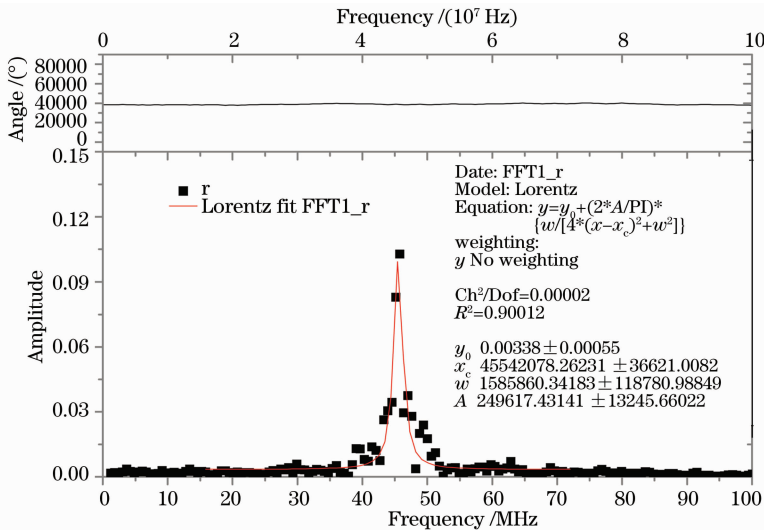


图 6 脉冲种子源测量的频率线宽

Fig. 6 Frequency spectrum measurement of pulsed seeder

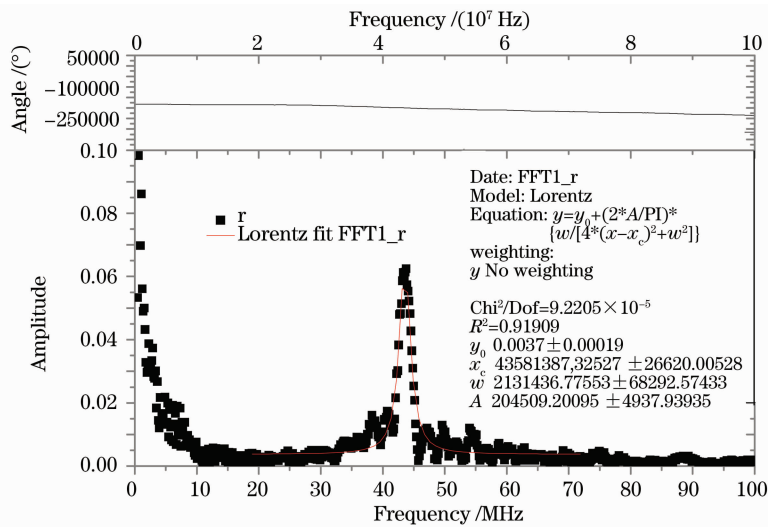


图7 二级光纤放大器测量的频率线宽

Fig. 7 Frequency linewidth measurement of the 2nd fiber amplifier

对比图6和图7可以看出,种子源线宽接近800 kHz,而经过两级光纤放大器后,激光线宽有微小展宽,达到1 MHz左右,展宽的原因为中心频率的光子增益即消耗反转粒子数达到饱和后边频的光子还没有饱和,所以会继续放大,这样多级放大后就造成了一个微小的展宽,但是展宽很有限,仍较好地保持了单频特性。

5 结 论

对人眼安全波段高重复频率窄线宽的全光纤激光器进行了研究,采用了外差相干拍频方法测量了频率线宽,最终实现了高重复频率、窄线宽的单频脉冲光纤激光输出,满足了全光纤相干激光雷达对发射源的需求。将作为全光纤相干多普勒测风激光雷达的激光发射源,开展近距离200 m实时大气风速测量^[14],具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- Zhou Xiaolin, Sun Dongsong, Zhong Zhiqing *et al.*. Development of Doppler wind lidar[J]. *J. Atmospheric and Environmental Opt.*, 2007, **2**(3): 161~168
周小林, 孙东松, 钟志庆等. 多普勒测风激光雷达研究进展[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(3): 161~168
- Guy N. Pearson, P. John Roberts, Justin R. Eacock *et al.*. Analysis of the performance of a coherent pulsed fiber lidar for aerosol backscatter applications [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**: 6442~6450
- Chen Weibiao, Zhou Jun, Liu Jiqiao *et al.*. Doppler lidar and its all solid-state single frequency laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(1): 57~60
陈卫标, 周 军, 刘继桥等. 多普勒激光雷达及其单纵模全固态激光器[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(1): 57~60
- Lou Qihong, Zhou Jun, Kong Lingfeng *et al.*. Recent progress of high-power pulsed fiber lasers [J]. *Chinese J. Quantum*

- Electronits*, 2005, **22**(4): 510~515
楼棋洪, 周 军, 孔令峰等. 高功率脉冲双包层光纤激光器的新进展[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 510~515
- Valery Philippov, Christophe Codemard, Yoonchan Jeong *et al.*. High-energy in-fiber pulse amplification for coherent lidar applications [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2590~2592
- Michael Harris, Guy N. Pearson, Kevin D. Ridley *et al.*. Single-particle laser Doppler anemometry at 1.55 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **40**: 969~973
- Michael Harris, Graham Constant, Carol Ward. Continuous-wave bistatic laser Doppler wind sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **40**: 1501~1506
- S. Kameyama, T. Ando, K. Asaka *et al.*. Compact all-fiber pulsed coherent Doppler lidar system for wind sensing[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**: 1953~1962
- B. Steinhauser, A. Brignon, E. Lallier *et al.*. High energy, single-mode, narrow-linewidth fiber laser source using stimulated Brillouin scattering beam cleanup [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(10): 6464~6469
- Du Weimin, Wu Bo, Hou Tianjin *et al.*. Experimental study on Er³⁺/Yb³⁺ co-doped double-clad fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 9~12
杜伟敏, 伍 波, 侯天晋等. Er³⁺/Yb³⁺共掺双包层光纤放大器实验研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 9~12
- Duan Yunfeng, Zhang Peng, Huang Bangcai *et al.*. Dual-stages all-fiber narrow-linewidth fiber amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 640~642
段云锋, 张 鹏, 黄榜才等. 全光纤结构的两级分布式窄线宽双包层光纤放大器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 640~642
- L. E. Richter, H. I. Mandelburg, M. S. Kruger *et al.*. Linewidth determination from self-heterodyne measurements with subcoherence delay times [J]. *IEEE J. Quantum. Electron.*, 1986, **QE-22**(11): 2070~2074
- Yu Benli, Qian Jingren, Yang Yinghai *et al.*. Homodyne method for measuring narrow linewidth lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(4): 351~354
俞本立, 钱景仁, 扬瀛海等. 窄线宽激光的零拍测量法[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(4): 351~354
- Jean Pierre Cariou, Béatrice Augere, Matthieu Valla. Laser source requirements for coherent lidars based on fiber technology [J]. *C. R. Physique*, 2006, **7**: 213~223