

激光雷达用高性能光纤激光器

史 伟^{1,3}, 房 强^{2,3}, 李锦辉^{2,3}, 付士杰¹, 李 鑫¹, 盛 泉¹, 姚建铨^{1,3}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 山东海富光子科技股份有限公司, 山东 威海 264209; 3. 天津市现代激光与光学研究院, 天津 300384)

摘 要: 系统研究了窄线宽低噪声单频连续光纤激光器、高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器以及高峰值功率纳秒短脉冲光纤激光器三类高性能光纤激光器: 实现了工作于 1、1.5 及 2 μm 波段的单频连续光纤激光器, 典型光谱线宽小于 3 kHz, 强度噪声接近于散粒噪声极限; 实现了高能量单频光纤激光器, 脉冲能量超过 200 μJ , 重复频率 20 kHz, 脉冲宽度 100~500 ns, 激光波长位于 1.5 μm 波段; 实现了高峰值功率纳秒短脉冲光纤激光器, 峰值功率超过 700 kW, 重复频率 10 kHz, 脉冲宽度 3 ns; 同时还实现了高重频高功率纳秒短脉冲光纤激光器, 峰值功率超过 200 W, 重复频率 3 MHz, 脉冲宽度 1~5 ns。文中阐述了以上几类高性能光纤激光器在激光雷达探测系统中的应用前景。

关键词: 光纤激光器; 单频; 纳秒激光脉冲; 高能量; 窄线宽; 高功率

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0802001

High-performance fiber lasers for LIDARs

Shi Wei^{1,3}, Fang Qiang^{2,3}, Li Jinhui^{2,3}, Fu Shijie¹, Li Xin¹, Sheng Quan¹, Yao Jianquan^{1,3}

(1. College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. HFB Photonics Co. Ltd., Weihai 264209, China;
3. Tianjin Institute of Modern Laser & Optics Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: Three kinds of high-performance fiber lasers were systematically investigated including the single frequency continuous wave (CW) fiber lasers with narrow linewidth and low relative intensity noise (RIN), the high energy long-nanosecond-pulsed single frequency fiber lasers and the high peak power short-nanosecond-pulsed fiber lasers. The single frequency CW fiber lasers operating in 1 μm , 1.5 μm and 2 μm regions were developed. The typical spectral linewidth was less than 3 kHz and the RIN approached the shot noise limit. One high energy nanosecond pulsed single frequency fiber laser in 1.5 μm region was developed. It can produce 200 μJ single frequency laser pulses with 100–500 ns pulse width at 20 kHz repetition rate. A fiber laser producing pulses with 700 kW peak power, 3 ns pulse width at 10 kHz was developed. High repetition rate (up to 3 MHz) nanosecond fiber lasers was also developed, which can provide 1–5 ns laser pulses with 200 W peak power. The applications of these lasers in laser LIDARs are addressed in this paper.

Key words: fiber laser; single frequency; nanosecond laser pulses; high energy; narrow linewidth; high peak power

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 863 计划(2014AA041901); 山东省自然科学基金(ZR2014FP015)

作者简介: 史伟(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高性能光纤激光器、太赫兹技术及其应用方面的研究。Email: shiwei@tju.edu.cn

0 引言

激光雷达是以发射激光束探测目标的位置、速度等特征量的雷达系统,具有极高的分辨本领和抗干扰能力,被广泛应用于巡航导弹的制导和导航、激光测距、低飞目标跟踪、目标飞行姿态的测量、宇宙飞船导航、大气遥感和测量以及测绘等众多军用及民用领域^[1-2]。

激光光源作为激光雷达的核心部件,其性能直接影响着整套雷达系统的性能。光纤激光作为新一代激光技术,具有光束质量优、功率/脉冲能量高、可柔性传输、维护简单等优秀特质,近年来获得广泛研究,光纤激光器在输出功率/能量、线宽、脉冲宽度、工作波段等性能方面得以快速发展,同时应用领域得以大大拓展,从激光先进制造到激光医疗,从科学研究到雷达探测均得到广泛应用^[3-4]。

文中将报道包括窄线宽单频连续光纤激光器、高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器及高峰值功率纳秒短脉冲光纤激光器在内的几类高性能光纤激光器,并阐述其在激光雷达领域的应用前景。

1 窄线宽低噪声单频连续光纤激光器

单频光纤激光器,因其窄线宽、低噪声以及由此具有的相干长度长的特点,在激光雷达、相干光通信、高分辨光谱分析和引力波探测等领域具有广泛的应用前景,近年来已成为激光技术领域的研究热点。基于布拉格光栅的 DBR 型单频光纤激光器,凭借较高的激光效率、紧凑的结构设计以及稳定的单纵模运转特性,得到了较广泛的研究与应用^[5-7]。

DBR 型单频光纤激光器的结构如图 1 所示,激光谐振腔由一对光纤光栅中间熔接一段 1~2 cm 长的稀土掺杂光纤构成。通过输入端的波分复用器(WDM)将泵浦光耦合到腔内,在输出端通过另一 WDM 滤除剩余的泵浦光,得到信号激光输出。这种短腔结构能够保证激光器具有较大的纵模间距,从而在光纤光栅的窄带滤波作用下,实现激光器的单纵模运转。

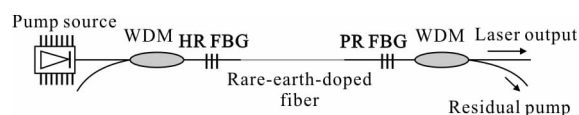
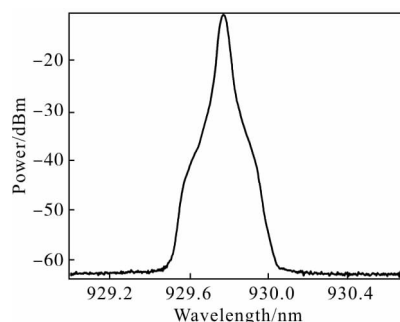


图 1 DBR 型单频光纤激光器结构图

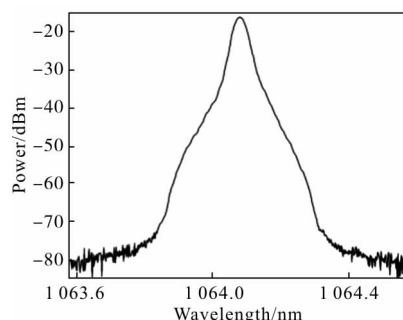
Fig.1 Schematic of the single frequency DBR fiber laser

分别以掺铈、掺镱、铟镱共掺及掺铪石英光纤作为增益介质,研制了工作于 930 nm 波段、1 064 nm 波段、1 550 nm 波段及 1 950 nm 波段的单频光纤激光器,典型的光谱图如图 2 所示。



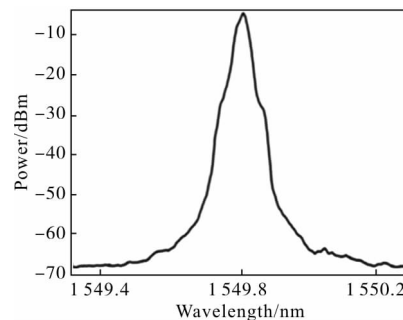
(a) 930 nm 波段单频光纤激光器典型光谱图

(a) Typical spectrum of 930 nm single frequency fiber laser



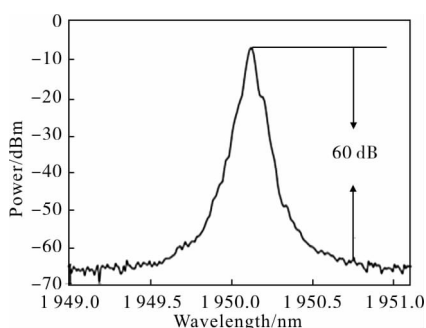
(b) 1 064 nm 波段单频光纤激光器典型光谱图

(b) Typical spectrum of 1 064 nm single frequency fiber laser



(c) 1 550 nm 波段单频光纤激光器典型光谱图

(c) Typical spectrum of 1 550 nm single frequency fiber laser



(d) 1 950 nm 波段单频光纤激光器典型光谱图

(d) Typical spectrum of 1 950 nm single frequency fiber laser

图 2 单频光纤激光器典型光谱图

Fig.2 Typical spectrum of single frequency fiber laser

对工作于以上波段的 DBR 型单频光纤激光的线宽及相对强度噪声进行了测量。激光器线宽由延迟的自外差方式测得，实验测得的典型的自外差信号如图 3 所示，20 dB 线宽 56.7 kHz，对应的激光器的 Lorentz 线宽为 2.835 kHz。

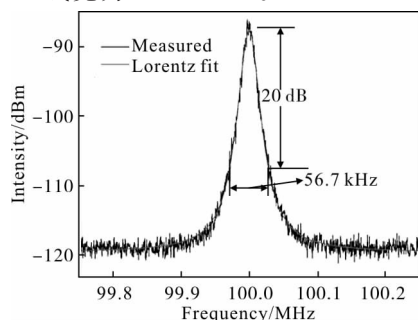


图 3 延迟自外差方法测得的 DBR 型单频光纤激光器的典型线宽图

Fig.3 Typical linewidth of DBR single frequency fiber laser measured with delayed self-heterodyne method

图 4 为实验测得的激光器的相对强度噪声，激光弛豫振荡强度小于 -125 dB/Hz，随着频率逐渐增

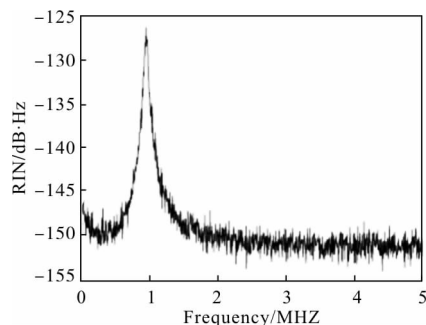


图 4 DBR 型单频光纤激光器的典型相对强度噪声

Fig.4 Typical relative intensity noise of DBR single frequency fiber laser

加，噪声强度逐渐降低，在高频处趋于 -150 dB/Hz，接近背景散粒噪声。

对以上单频光纤激光器进行了系统集成，研制出了便携式窄线宽低噪声单频光纤激光器整机，可工作于高低温环境，具有防震、防电磁干扰的功能，整机图片如图 5 所示。此类激光器具备相干长度长、噪声低的优点，是应用于水听雷达、相干探测雷达、激光陀螺、相干光通信等领域的优质光源。

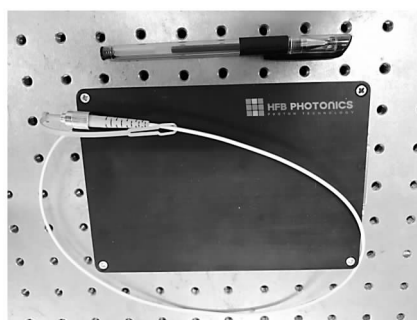


图 5 窄线宽低噪声单频连续光纤激光器整机

Fig.5 Narrow-linewidth low-noise single frequency fiber laser module

2 高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器

高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器具备线宽窄、相干长度长、峰值功率高等优异特质，是应用于相干雷达、多普勒雷达、遥感探测等领域的优质光源，近年来成为光纤激光技术的研究热点^[8-11]。

文中报道了一台工作于 1 550 nm 波段的脉冲能量超过 200 μJ 的纳秒长脉冲单频光纤激光器，激光器结构图如图 6 所示。激光器由单频脉冲种子源模块，两级纤芯泵浦预放大器，一级双包层光纤放大器和一级功率放大器组成。其中种子源模块由一个

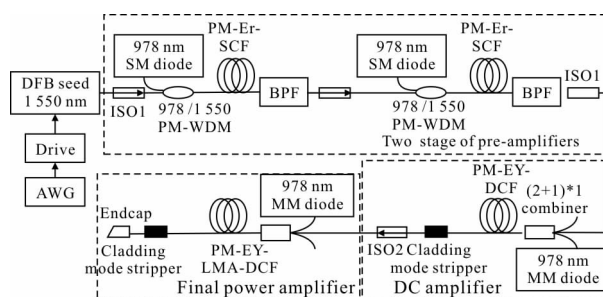


图 6 1 550 nm 波段高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器结构图

Fig.6 Schematic of 1 550 nm high energy long-pulsed single frequency fiber laser

任意波形发生器(AWG),一个蝶形半导体激光器驱动和一个单频光纤耦合半导体激光器组成,可产生脉冲宽度 100~500 ns 可调,重复频率 20 kHz 的单频激光脉冲,通过调整 AWG 产生的调制电脉冲形状,可任意调整单频激光脉冲的形状。

图 7 所示为激光器在不同泵浦功率下输出的脉冲能量,此时脉冲重复频率为 20 kHz,最大脉冲能量约 200.5 μJ ,典型脉冲形状如图 8 所示,脉冲宽度约 363.1 ns,通过调整种子源脉冲宽度及形状,可以实现 100~500 ns 可调。

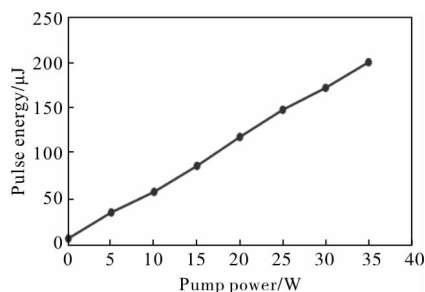


图 7 不同泵浦功率下的脉冲能量

Fig.7 Output pulse energy under different pump levels

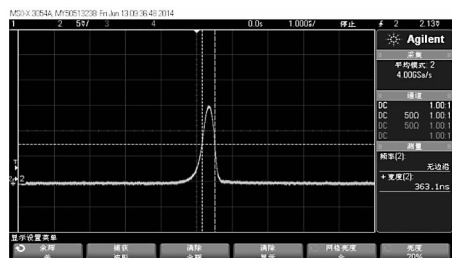


图 8 典型的激光脉冲

Fig.8 Typical output laser pulse

对以上单频光纤激光器进行了系统集成,研制出了高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器整机,具备相干长度长、峰值功率高、脉冲能量高的优点,是应用于相干探测雷达、多普勒气象雷达等领域的优质光源。

3 高功率纳秒短脉冲光纤激光器

纳秒短脉冲光纤激光器可提供峰值功率高达几百千瓦的峰值功率,可应用于激光测距、火控雷达等应用领域,近年来得到了广泛研究^[12-13]。

文中报道了一台峰值功率达到 700 kW 的纳秒短脉冲光纤激光器,激光器结构图如图 9 所示。激光器由纳秒脉冲种子源模块,三级纤芯泵浦预放大器,一级双包层光纤放大器和一级功率放大器组成。其

中种子源模块由一个任意波形发生器(AWG),一个蝶形半导体激光器驱动和一个单频光纤耦合半导体激光器组成,可产生脉冲宽度为 1~5 ns 可调,重复频率 10 kHz 的激光脉冲。

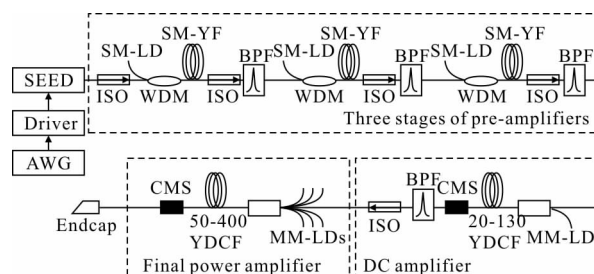


图 9 高功率纳秒短脉冲光纤激光器结构图

Fig.9 Schematic of high-peak-power short-nanosecond-pulsed fiber laser

图 10 所示为激光器在不同泵浦功率下输出的脉冲能量及相应的脉冲峰值功率,此时脉冲重复频率为 10 kHz,最大脉冲能量约 2.3 mJ,典型脉冲形状如图 10 所示,脉冲宽度约 3.3 ns,峰值功率达到 697 kW。

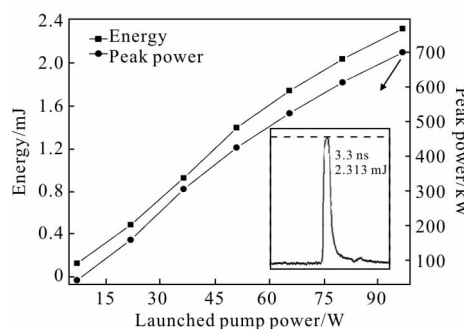


图 10 不同泵浦功率下的脉冲能量及峰值功率;最高输出脉冲能量下的激光脉冲

Fig.10 Output pulse energy and peak power under different pump levels, output pulse with maximum pulse energy

对以上光纤激光器进行了系统集成,研制出了高功率纳秒短脉冲光纤激光器整机(如图 11 所



图 11 高功率纳秒短脉冲光纤激光器整机

Fig.11 High peak power short-nanosecond-pulsed fiber laser

示),具备峰值功率高、脉冲能量高、结构紧凑、免维护的优点,是应用于激光测距雷达、火控雷达等领域的优质光源。

针对激光雷达应用,笔者还开发了一款高重频高峰值功率纳秒短脉冲光纤激光器,峰值功率超过 200 W,重复频率 3 MHz,脉冲宽度 1~5 ns。

4 结 论

实现了窄线宽、低噪声单频连续光纤激光器,高能量纳秒长脉冲单频光纤激光器以及高峰值功率纳秒短脉冲光纤激光器三类激光雷达用高性能光纤激光器并开发了相关高性能光纤激光器产品,在相干雷达、多普勒雷达、激光测距雷达及激光火控雷达等激光雷达测控领域有着广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Dai Y J. Principle of Laser Radar [M]. Beijing: Beijing National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [2] Ni Shuxin, Li Yifei. Trend of laser radar for military [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32 (2): 111-114. (in Chinese)
- [3] Shi W, Fang Q, Zhu X, et al. Fiber lasers and their applications[J]. *Appl Opt*, 2014, 53(28): 6554-6568.
- [4] Henderson S W, Suni P J M, Hale C P, et al. Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1993, 31(1): 4-15.
- [5] Qiu T, Suzuki S, Schulzgen A, et al. Generation of watt-level single-longitudinal-mode output from cladding-pumped short fiber lasers[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(20): 2748-2750.
- [6] Zhu X, Shi W, Zong J, et al. 976 nm single frequency distributed Bragg reflector fiber laser [J]. *Opt Lett*, 2012, 37 (20): 4167-4169.
- [7] Fang Q, Xu Y, Fu A S, et al. Single frequency distributed Bragg reflector Nd-doped silica fiber laser at 930 nm [J]. *Opt Lett*, 2016, 41(8): 1829-1832.
- [8] Shi Q, Petersen E B, Yao Z, et al. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1 530 nm [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(14): 2418-2420.
- [9] Shi W, Petersen E B, Nguyen D T, et al. 220 μJ monolithic single-frequency Q-switched fiber laser at 2 μm by using highly Tm-doped germanate fibers [J]. *Opt Lett*, 2011, 36 (18): 3575-3577.
- [10] Dilley C E, Stephen M A, Savage-Leuchs M P. High SBS-threshold narrow band erbium co-doped with ytterbium fiber amplifier pulses frequency-doubled to 770 nm [J]. *Opt Express*, 2007, 15(22): 14389-14395.
- [11] Wan P, Liu J, Yang L, et al. Low repetition rate high energy 1.5 μm fiber laser [J]. *Opt Express*, 2011, 19(19): 18067-18071.
- [12] Fang Q, Shi W, Kieu K, et al. High power and high energy monolithic single frequency 2 μm nanosecond pulsed fiber laser by using large core Tm-doped germanate fibers: experiment and modeling [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16410-16420.
- [13] Fang Q, Shi W, Fan J. 700-kW-Peak-Power monolithic nanosecond pulsed fiber laser [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2014, 26(16): 1676-1678.