

31 kW 窄线宽线偏振纳秒全光纤激光器

李川, 韩一平, 赵文娟

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 报道一种高峰值功率、线偏振、窄线宽、纳秒脉冲的全光纤激光器。种子源激光器产生的单频连续激光通过一个电光强度调制器实施调制, 为抑制受激布里渊散射(SBS), 脉宽设置为 2.8 ns, 重复频率为 1.59 MHz。经两级预放、一级功率放大进行放大, 激光最大平均输出功率为 139 W, 峰值功率为 31 kW。实验过程中未发现受激拉曼散射(SRS), 功率的提升受限于 SBS。在最高功率输出情况下, 激光器的光束质量小于 1.3。受限于 $(6+1) \times 1$ 保偏合束器, 激光器的偏振消光比为 14.5 dB。

关键词 激光器; 光纤激光; 高峰值功率; 受激布里渊散射; 纳秒脉冲; 线偏振; 窄线宽

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0401015

31 kW Narrow-Linewidth Linearly Polarized Nanosecond Polarization-Maintaining All-Fiber Laser

Li Chuan, Han Yiping, Zhao Wenjuan

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shanxi 710071, China

Abstract A 31 kW narrow-linewidth linearly polarized nanosecond all-fiber laser is proposed. The single-frequency continuous laser generated by the seed-source laser is modulated by an electro-optic intensity modulator. To suppress stimulated Brillouin scattering (SBS), the pulse width is set to 2.8 ns, and the repetition rate is 1.59 MHz. After two levels of pre-amplification, and primary power amplification for amplification, the maximum average output power of laser can reach 139 W while the peak power is 31 kW. As stimulated Raman scattering (SRS) is not found during the experiment, the increase in power is limited by SBS. The laser beam quality is less than 1.3 at the maximum output power. The polarization extinction ratio is 14.5 dB, which is limited by the polarization-maintaining $(6+1) \times 1$ fiber combiner.

Key words lasers; fiber laser; high-peak power; stimulated Brillouin scattering; nanosecond pulse; linearly polarization; narrow linewidth

OCIS codes 140.3510; 320.4240; 290.5900

1 引 言

高峰值功率的纳秒线偏振光纤激光器因具备光束质量好、脉冲波形可控、体积小等优点, 在激光雷达、非线性频率变换、激光加工等方面^[1-7]有广阔的应用及发展前景。在窄线宽种子信号的放大过程中, 无论是高功率连续激光器还是高峰值功率脉冲

激光器, 受激布里渊散射(SBS)效应往往是最终的限制因素。天津大学、国防科技大学等单位在抑制 SBS 效应, 提高窄线宽脉冲光纤激光器的峰值功率方面做了大量工作。Shi 等^[8-9]在功放级采用了 10~30 cm 长的超短重掺杂的掺铒光纤, 在 80 ns 和 15 ns 的情况下, 获得了平均功率为瓦量级的 2 μm 激光输出, 峰值功率为 2.75 kW 和 63 kW。缩短脉

收稿日期: 2017-08-31; 收到修改稿日期: 2017-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61675159)、中国博士后科学基金(2016M601253)

作者简介: 李川(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事高功率光纤激光器、光纤放大器方面的研究。

E-mail: chuan_li@live.cn

导师简介: 韩一平(1963—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事目标激光散射特性分析、激光粒度分析与测量, 以及微腔发光特性等方面的研究。E-mail: yphan@xidian.edu.cn(通信联系人)

冲宽度,使 SBS 声波场无法建立,也可以抑制 SBS 效应的产生^[10]。Su 等^[11]基于 6 ns 的脉宽,实现了峰值功率为 7.9 kW、平均功率为 505 W、具有非保偏结构的激光输出。Ran 等^[12]报道了一种脉冲宽度为 3 ns、平均功率为 136 W、峰值功率为 8.5 kW、重复频率为 5 MHz 的保偏全光纤激光器,偏振消光比(PER, R_{PE})为 15.8 dB,光束质量因子 M^2 为 1.1。

本文采用全光纤保偏激光器结构,实现了峰值功率为 31 kW 的纳秒脉冲激光输出。结果表明:选用高掺杂的增益光纤,压缩脉冲宽度至远小于 10 ns, SBS 以及受激拉曼散射(SRS)效应均得到有效抑制。当激光器重复频率工作在 1.59 MHz、脉冲宽度为 2.8 ns 时,激光输出功率近 140 W,平均功率和峰值功率的进一步提高受限于 SBS 效应。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,连续波(CW)种子源经脉冲调制后,经两级预放一级功放,将脉冲光信号进行放大。种子源激光器采用 NKT Photonics 公司 KoherasAdjustik Y10,其最大输出功率为 100 mW,线宽为 10 kHz,波长为 1064 nm。自主研发的任意波形发生器(AFG)驱动电光强度调制器(EOM)对单频连续波种子源输出的连续波光信号进行调制,生成脉冲光信号,其信号的脉冲宽度和重复频率通

过 AFG 的电信号设置为 2.8 ns 和 1.59 MHz。为有效缩短光纤长度,提高 SBS 效应阈值,预放级采用规格为 10/125 μm (纤芯直径为 10 μm ,包层直径为 125 μm ,下同)的 Nufern 公司高掺杂保偏掺镱光纤(PLMA-YDF-10-125-HI-8),976 nm 处吸收系数为 6 dB/m,光纤长度为 2.4 m。第一级预放后,通过带宽为 2 nm 的带通滤波器实现放大自发辐射(ASE)光谱滤波,各放大级之间插有光隔离器(ISO),实现反向光的隔离,避免损坏前级器件。在进入功放级前,接入一个 1:999 的 Tap 耦合器,实现对功放级反向光的实时监测。功放级级采用规格为 30/250 μm 高掺杂大模场保偏光纤(PLMA-YDF-30-250-HI-8),在中心波长 976 nm 处吸收系数为 7.2 dB/m,光纤长度为 3 m。为滤除光纤中高阶模,提高激光器输出的光束质量,增益光纤的盘绕半径约为 5 cm。功放级的抽运源为锁波长机制,工作的中心波长为 976 nm,输出光纤芯径/包层直径为 105/125 μm ,数值孔径为 0.15,最大输出功率为 50 W。(6+1) \times 1 保偏合束器(PMC)的输入端为 10/125 μm ,输出端为 30/250 μm ,内部集成模场匹配功能。功放级增益光纤的尾端连接一个尾纤长度为 55 cm 的包层光剥离器,用于剥离光纤包层中残余的抽运光。输出的脉冲激光用 50 mm 焦距的透镜进行准直,穿过光阑和半波片(HWP),经高功率

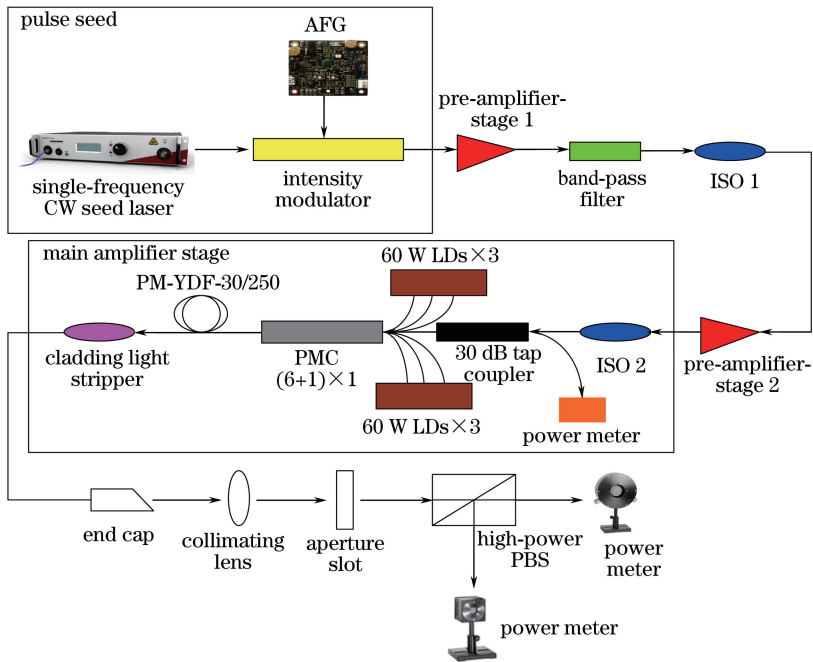


图 1 高功率、窄线宽、纳秒、保偏全光纤放大器的实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of nanosecond polarization-maintaining all-fiber amplifier system with high-peak power and narrow linewidth

偏振分光棱镜 (PBS) 分光, 测量偏振消光比。脉冲种子的线宽、脉冲功率、脉冲形状、光谱特性和光束质量由法布里-珀罗 (F-P) 干涉仪、功率计、光电探测器、示波器、光谱分析仪和光束质量分析仪测量。

3 实验结果与分析

在窄线宽光纤激光器放大过程中, SBS 和 SRS 两类非线性效应随着峰值功率的提高逐步呈现。对于窄线宽光纤激光器来说, SBS 的峰值增益系数 g_0 较 SRS 的增益系数高 3 个数量级。在高峰值功率情况下, 光纤中较先出现 SBS 效应, 造成的反向巨脉冲可能对前级器件和种子源造成损伤。在实验过程中, 压缩激光器脉宽至小于 10 ns, 使 SBS 声波场

不能有效建立, 可提高 SBS 的阈值功率。

种子源激光经强度调制器调制为脉宽 2.8 ns、重复频率 1.59 MHz 的激光, 激光器输出功率与抽运功率的变化曲线如图 2(a) 所示, 输出功率随抽运光的增加呈线性增长, 斜率效率为 81.7%。当功率超过 120 W 时, 后向光监测功率呈非线性增长, 意味着 SBS 效应已经产生, 如图 2(b) 所示, 由于隔离器的存在, 尚未对功率放大及前级器件产生影响。当输出功率为 139 W 时, 反向光功率约为 2.4 mW。

在距离光纤输出端约 1.5 m 的位置放置一个光电探测器进行脉宽和重复频率的采集, 激光器输出脉宽为 2.8 ns, 重复频率为 1.59 MHz, 如图 3 所示。

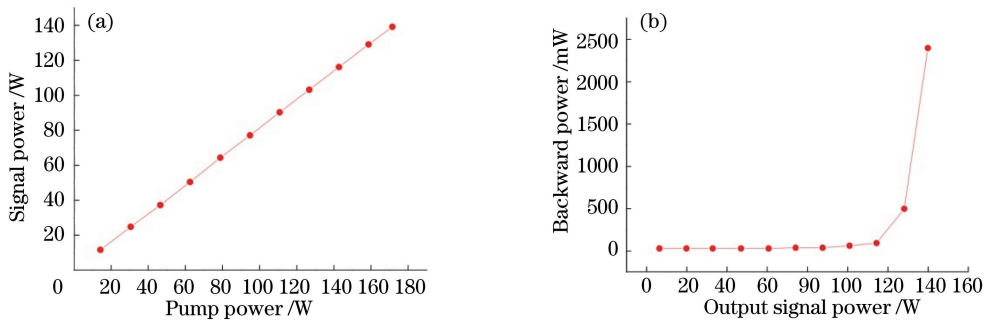


图 2 (a) 激光输出功率与抽运功率的变化; (b) 反向光监测功率与激光输出功率的变化

Fig. 2 (a) Output power and pump power; (b) monitored backward power and output power

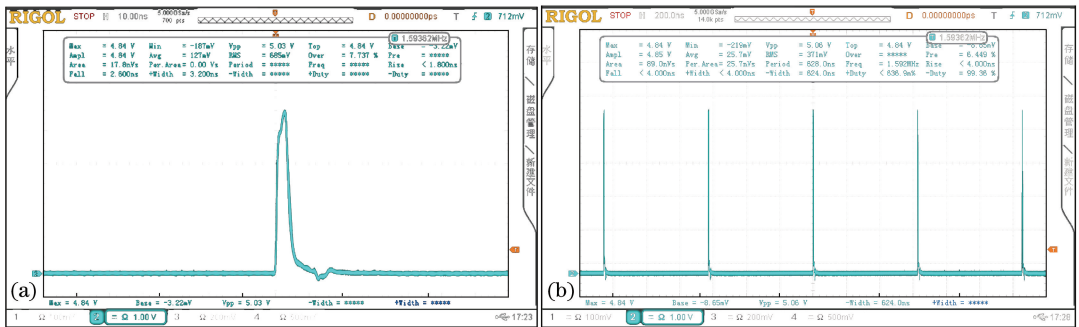


图 3 输出脉冲波形图。(a) 脉冲宽度; (b) 脉冲重复频率

Fig. 3 Output of pulse shape. (a) Single pulse width; (b) pulse repetition cycle

脉冲种子源线宽经一个自由光谱区为 10 GHz 的 F-P 光纤测试, 结果如图 4(a) 所示, 线宽为 330 MHz。输出的光谱情况如图 4(b) 所示。在不考虑残余抽运光的情况下, 输出激光光谱信噪比为 46 dB, SRS 现象被有效抑制, 未发现 SRS 现象的发生。主要原因在于采用了长度仅为 3 m 的高吸收大芯径保偏光纤。光谱长波方向毛刺产生的原因在于电光强度调制器未单独配置偏压控制器, 经测试, 单频种子激光经电光调制器 (EOM) 斩波后始终存

在一个消光比为 25 dB~30 dB 的直流分量, 这个直流分量本身也会在上述范围内不断变化。这些种子光直流分量与脉冲分量被放大后, 产生一些类似于四波混频的非线性效应, 从而产生一些离散的新频率分量。因直流分量在不断变化, 故这些新频率分量在光谱仪上也表现得时有时无。如果同时采用 EOM 和偏压控制器, 直流分量的消光比有望达到 35 dB~40 dB, 在光谱结果上可大幅度减少毛刺现象的发生概率。

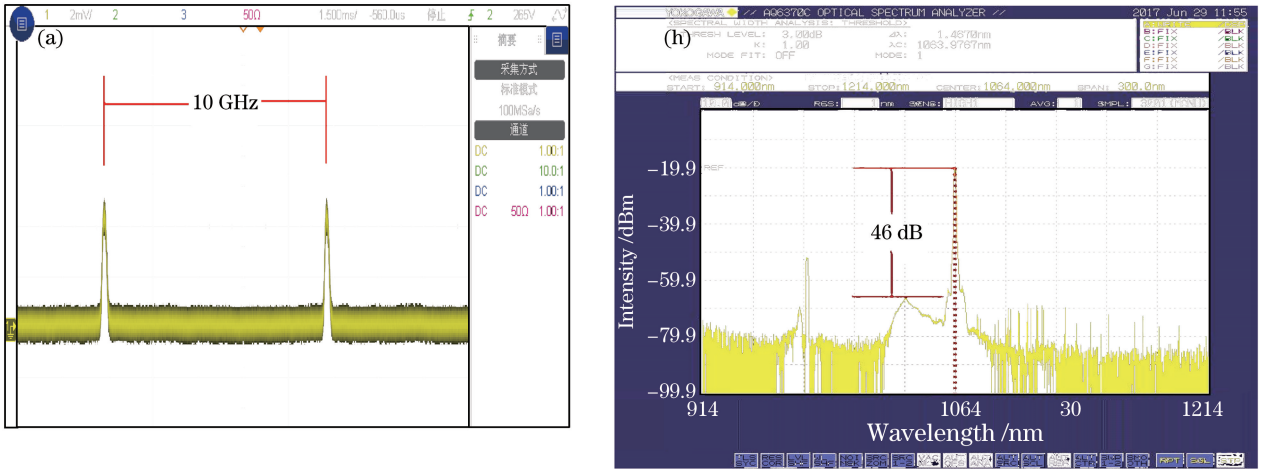


图 4 (a)脉宽为 2.8 ns、重复频率为 1.59 MHz 条件下的种子激光光谱;(b)功率为 139 W、脉宽为 2.8 ns、重复频率为 1.59 MHz 条件下的输出信号光谱

Fig. 4 (a) Spectra of pulsed seed with pulse width of 2.8 ns and repetition rate of 1.59 MHz; (b) output signal spectra at 139 W with pulse width of 2.8 ns and repetition rate of 1.59 MHz

偏振消光比的测量结果如图 5 所示,输出激光经 HWP 和高功率 PBS 输出,单偏振态下的功率 P 分别为 134.2 W 和 4.8 W,偏振消光比 R_{PE} 为 14.46 dB。当抽运光功率逐步增加时,偏振消光比下降,且出现起伏波动。这种现象可以由光学克尔效应解释:当激光功率增加到一定水平以上时,感应双折射将补偿固有双折射,这使得快轴变得不稳定,导致极化输出状态变化^[13]。同时,偏振消光比受限于 $(6+1) \times 1$ 保偏合束器偏振消光比指标(16 dB)。其中,在进入 $(6+1) \times 1$ 合束器前,预放级偏振消光

比的测量结果约为 20.8 dB。

基于 Spiricon SP620 焦平面探测器、BeamGage 软件,以及电动平移台,搭建了一套光束质量测量系统,在 139 W 输出功率下,光束质量因子 M^2 在 x 、 y 方向分别为 1.29 和 1.27,如图 6(a)所示,光斑形貌如图 6(b)所示。光束质量主要受限于 30/250 μm 的大模场光纤(容纳的模式过多),如果采用输入为 10/125 μm 、输出为 30/250 μm 的模场匹配器,且在功放级使用反向抽运合束器,光束质量可进一步提高。

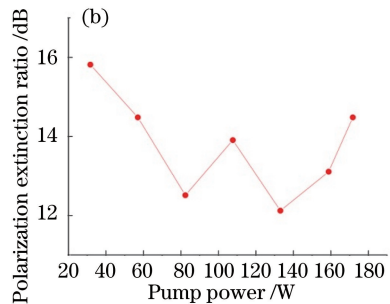
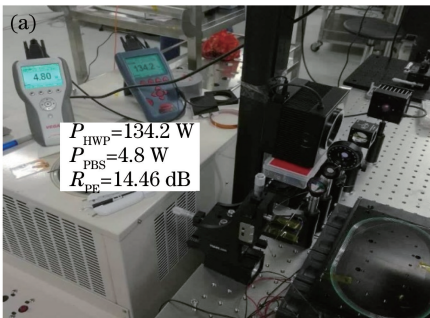


图 5 (a)经高功率偏振分光镜后的输出信号;(b)不同抽运功率下的偏振消光比

Fig. 5 (a) Output signal power after high power polarization beam splitter; (b) polarization extinction ratio at different pump power levels

4 结 论

报道了一种窄线宽、高峰值功率的保偏全光纤激光器。激光器脉冲宽度约为 2.8 ns,峰值功率为 31 kW,重复频率为 1.59 MHz,偏振消光比为 14.5 dB,光束质量因子 M^2 在 x 、 y 方向上分别为

1.29 和 1.27,光谱信噪比为 46 dB。功率进一步的提升受限于 SBS 效应。缩短脉宽可以有效抑制 SBS 效应的产生, $(6+1) \times 1$ 合束器性能的提升可以提高激光器的偏振消光比,采用反向抽运结构可提高激光器的光束质量。后续工作方向是加强 SBS 抑制手段研究,将梯度变化的温度、应力作用于增益光

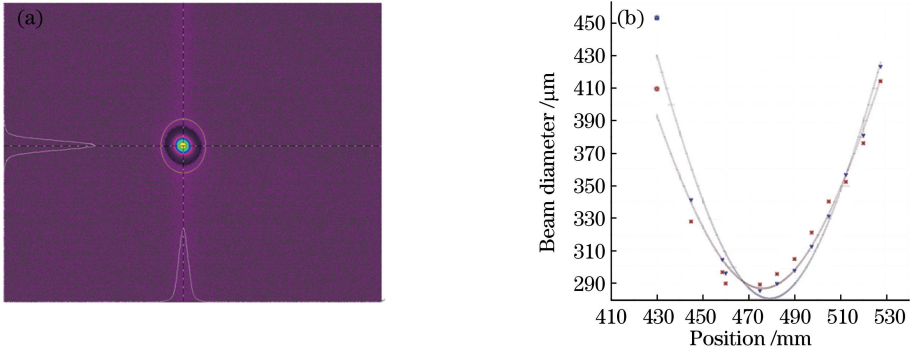


图 6 输出激光的光束质量和二维光斑形貌

Fig. 6 (a) Output beam quality (M^2 factor) of output laser; (b) two dimensional beam profile

纤,以进一步提高SBS阈值。该激光器可广泛应用于雷达探测、激光频率变频等领域。

参 考 文 献

[1] Leigh M A, Shi W, Zong J, *et al.* Narrowband pulsed THz source using eyesafe region fiber lasers and a nonlinear crystal [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 21(1): 27-29.

[2] Carlson C G, Dragic P D, Price R K, *et al.* A narrow-linewidth, Yb fiber-amplifier-based upper atmospheric doppler temperature lidar [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 15(2): 451-461.

[3] Wu W D, Ren T Q, Zhou J, *et al.* Frequency doubling of narrow-linewidth pulsed fiber laser [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(5): 050604.

[4] Schröder T, Lemmerz C, Reitebuch O, *et al.* Frequency jitter and spectral width of an injection-seeded Q-switched Nd:YAG laser for a doppler wind lidar [J]. Applied Physics B, 2007, 87(3): 437-447.

[5] Liu A, Norsen M A, Mead R D. 60-W green output by frequency doubling of a polarized Yb-doped fiber laser [J]. Optics Letters, 2005, 30(1): 67-69.

[6] Yang Q B, Liu S J, Wang Y T, *et al.* Superhydrophobic micro-nano structures on aluminum surface induced by nanosecond laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 091406. 杨奇彪, 刘少军, 汪于涛, 等. 纳秒激光诱导铝板表面超疏水微纳结构 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 091406.

[7] Chen N, Liu Y X, Du S Z, *et al.* Research progress in applications of nanosecond and femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(5): 050003. 陈娜, 刘尧香, 杜盛喆, 等. 纳秒、飞秒激光诱导击穿光谱技术的应用研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(5): 050003.

[8] 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]. Optics Letters, 2011, 36(18): 3575-3577.

[9] Shi W, Petersen E, Fang Q, *et al.* mJ-level 2 μm transform-limited nanosecond pulses based on highly tm-doped germanate fibers [C]. Fiber Laser Applications, 2012, FTh4A: FTh4A.1.

[10] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics [M]. Beijing: Beijing World Publishing Corporation, 2005: 339-360.

[11] Su R T, Wang X L, Zhou P, *et al.* All-fiberized master oscillator power amplifier structured narrow-linewidth nanosecond pulsed laser with 505 W average power [J]. Laser Physics Letters, 2012, 10(1): 015105.

[12] Ran Y, Su R T, Ma P F, *et al.* High power narrow-linewidth linearly polarized nanosecond all-fiber amplifier with near-diffraction-limited beam quality [J]. Journal of Optics, 2016, 18(1): 015506.

[13] Hutchings D C, Arnold J M. Polarization stability of solitons in birefringent optical fibers [J]. Journal of the Optical Society of America B, 1999, 16(4): 513-518.