

单频窄线宽窄脉宽高重复频率光纤激光器

占浩^{1,2}, 张鑫^{2*}, 孟俊清^{1,3**}, 张大伟¹, 钟朝阳², 侯霞², 陈卫标⁴¹上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;²中国科学院上海光学精密机械研究所航天激光工程部, 上海 201800;³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;⁴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

摘要 报道了基于保偏光纤结构的窄线宽窄脉宽高重复频率光纤激光器。采用主振荡器功率放大器(MOPA), 主放大级采用芯径为 40 μm 的光子晶体光纤(PCF), 获得了重复频率为 10 kHz、脉宽为 1.34 ns、光谱宽度为 0.05 nm、脉冲能量为 298 μJ 的稳定激光输出。通过腔外倍频的方式, 使用长度为 40 mm 的温度匹配型三硼酸锂(LBO)晶体, 获得了能量为 155.5 μJ 的 532 nm 激光输出, 倍频效率为 52%, 横向和纵向光束质量分别为 $M_x^2=1.28$ 和 $M_y^2=1.26$ 。该激光器可应用于基于单光子探测技术的空间激光探测雷达。

关键词 激光器; 光纤激光器; 窄线宽; 脉冲激光; 高峰值功率; 自相位调制

中图分类号 TN248.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL230562

1 引言

激光雷达作为一种新型的遥感探测技术, 由于具有探测距离大、精度高、距离分辨率高等优点, 在地表探测和深空探测等相关领域中获得了广泛应用。与传统的线性光电探测技术相比, 单光子探测技术对激光的能量要求更低, 但同时也对激光器提出了新的要求: 1) 更窄的脉冲宽度; 2) 更窄的线宽^[1-3]。2018 年美国国家航空航天局(NASA)成功发射了 ICESat-2 卫星, 对冰层厚度、地形、植被、树冠高度等进行了测量。ICESat-2 卫星采用了单光子探测技术, 提高了数据的获取率, 在 10 kHz 的高重复频率下, 使用交叉通道(CTC)的方法产生了沿轨道的间隔 0.7 m 的重叠轨迹, 光子计数探测器在每个重叠轨迹中检测到一个光子的概率约为 80%^[4]。ICESat-2 上搭载了先进的地形激光测高仪(ATLAS), 其激光器采用主振荡器功率放大器(MOPA)生成 1064 nm 的激光, 以 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质, 使用磷酸氧钛铷(RTP)电光调 Q 的方式, 获得了重复频率为 10 kHz、能量为 200 μJ 、脉宽小于 1.5 ns 的种子激光, 再通过放大级获得了能量为 1.8 mJ 的短脉冲和近衍射极限光束质量的激光, 最后采用温度控制的三硼酸锂(LBO)晶体, 得到能量为 1.2 mJ 的输出线宽可调谐的 532 nm 倍频光输出, 脉冲宽度为 1.3 ns^[5]。ICESat-2 利用多波束激光对地探测, 提高了探测精度, 通过了解地表特征和景观的变化, 加

强了对地球资源的管理和应用。美国的 LIST 计划利用衍射光学元件, 将多台激光器光束分成 1000 束微脉冲, 实现了高分辨率、高精度、高灵敏度的空间探测^[6-7]。LIST 激光器采用 MOPA 实现了高重复频率的脉冲激光输出, 振荡器采用激光二极管泵浦的 Yb:YAG 微芯片, 使用 Cr³⁺:YAG 晶体作为被动调 Q 的可饱和吸收体, 使用窄线宽布拉格光栅(VBG)作为输出耦合器, 获得了重复频率为 10 kHz、脉宽为 820 ps、光谱宽度为 17 pm、中心波长为 1030.2 nm、输出能量为 100 μJ 、光束质量(M^2)为 1.3 的脉冲激光^[8]。ATLAS 和 LIST 激光器采用固体激光器的技术, 获得了窄线宽窄脉宽的激光雷达光源。全光纤结构的激光器具有结构紧凑、稳定性好、散热良好、工作寿命长、光电转换效率高等优点^[9], 在全光纤激光链路的前级放大中, 可插入激光分束器对光束进行分束, 并对分束后的每路激光进行独立放大。在保证各波束输出激光波长一致、时序相同的前提下, 对各波束的能量进行独立调节便于后期的波束扩展。此外, 相较于固体激光器, 光纤本身的表面积与体积比更大, 且热源分散, 因此热控难度相对较小, 便于散热。为了满足未来空间激光雷达探测技术对多波束光源的需求, 我们利用全光纤结构的技术, 结合温度匹配的 LBO 晶体倍频技术, 研制出窄线宽纳秒激光雷达光源。

窄线宽的光纤激光器功率主要受受激布里渊散射(SBS)和自相位调制(SPM)的限制, 但是在脉冲激

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-04-06; 录用日期: 2023-04-26; 网络首发日期: 2023-05-06

基金项目: 中国科学院青年创新促进会人才项目(2021243)

通信作者: *zhangxin@siom.ac.cn; **jqmeng@siom.ac.cn

光器中, SBS 阈值取决于脉冲的宽度, 增益介质的响应是由几个纳秒的声子寿命决定的^[10], 所以在 ~ 1 ns 脉冲宽度中不会出现 SBS 的现象。光纤激光器中的脉冲谱线宽度由于 SPM 而变宽, 这会降低激光器的相干性, 从而影响性能。例如, 在 3 m 长的单模光纤 (SMF)-28 光纤中传播后, 1 kW 峰值功率脉冲激光器的线宽从 50 MHz 展宽到了 150 MHz。为了削弱 SPM 效应, 一种较好的方法就是使用大模场高掺杂浓度的有源光纤。另外, 对于包含有较长无源光纤的光纤器件, SPM 所引起的光谱展宽不可忽略, 在实验过程中需要控制无源光纤的长度。由于光谱展宽是由时间相关的非线性相移引起的, 通过相位调制来补偿非线性相移, 可以抵消光谱展宽^[11-14]。2019 年, Su 等^[11]发现, 方形脉冲激光能抑制 SPM 引起的光谱展宽, 在 5 ns 脉冲宽度下获得了峰值功率为 9.30 kW、线宽为 200.1 MHz 的激光。2021 年, Shi 等^[15]将种子激光整形为三角形, 在 20 kHz 脉冲重复频率下获得了峰值功率为 31.4 kW、线宽为 63 MHz 的激光, 线宽接近 8 ns 三角脉冲的变换极限。2021 年, Huang 等^[16]基于保偏大模场锥形双包层光纤, 在重复频率为 80 kHz、脉冲宽度为 3.8 ns 的条件下, 获得了线宽为 283.3 MHz、脉冲能量为 110 μ J 的激光输出。同年, 盛泉等^[17]利用锯齿波种子光的光强随时间的变化率为常数的特性, 有效抑制了 SPM 效应导致的光谱展宽, 获得了重复频率为 20 kHz、脉冲宽度为 6.5 ns、峰值功率为 24 kW、线宽为 83 MHz 的 1064 nm 单频激光输出。通过相位调制预补偿的方式可以实现对 SPM 的抑制, 栗荣涛等^[18]进行了自相位调制预补偿的研究, 将脉冲宽度从 1.4 GHz 压缩到了 120 MHz。但是, 对于面向空间应用的激光雷达, 这种调制技术需要较高的带宽和高速的信号驱动, 而高速信号驱动在空间中的应用难度较大, 因此需要寻找一条合适的技术路线。

2005 年, Di Teodoro 等^[19]利用大纤芯掺镱的光子晶体光纤在 1064 nm 波段产生了脉宽为 450 ps 的脉冲, 脉冲能量大于 0.5 mJ, 对应的峰值功率大于 1.1 MW, 平均功率大于 7 W, 光谱线宽为 8 GHz。2012 年, Chen 等^[20]基于半导体二极管种子多级级联光纤放大, 在主放大级选用了掺镱的光子晶体光纤 (PCF), 通过自由空间耦合系统将信号光耦合到 PCF 中, 获得了波长为 1063 nm、重复频率为 1.5 MHz、平均功率为 88 W、脉冲宽度为 2 ns、峰值功率为 112 kW 的激光输出, 光谱宽度为 0.065 nm, 横向光束质量 $M_x^2=1.24$, 纵向光束质量 $M_y^2=1.18$ 。2013 年, Di Teodoro 等^[21]基于 MOPA 结构, 结合 100/290 掺镱光子晶体光纤放大, 通过使用伪随机噪声信号对种子源进行相位调制以抑制 SBS, 在 10 kHz 重复频率下, 获得了脉冲能量为 2 mJ、脉冲宽度为 1.55 ns、峰值功率为 1.5 MW 的大能量激光输出。这种大能量纳秒脉冲光纤激光器均采用了自由空间的耦合方式, 将种子光

耦合进掺杂的光子晶体光纤中进行放大。但是, 面对对地探测的激光雷达上的光源, 现有的单光子探测技术对全光纤结构的窄线宽窄脉宽激光器提出了新的技术指标, 即要求激光器具有高重复频率和窄线宽, 可配合使用窄带滤光片以获得更高的信噪比, 具有纳秒级别的脉冲宽度, 响应度满足现有探测器的要求。

本文设计了以 PCF 作为主放光纤的可抑制 SPM 效应的光纤激光器。通过信号发生器产生矩形波, 控制电光调制器 (EOM) 得到脉冲种子光。采用四个保偏光纤放大器, 主放大级采用保偏 (PM) 掺镱的 PCF 作为有源光纤, PCF 的纤芯直径为 40 μ m。与普通的 PM 光纤相比, 保偏掺杂光子晶体光纤使效率更高, 在脉冲重复频率为 10 kHz 和脉冲宽度为 1.34 ns 的条件下获得了最大单脉冲能量为 298 μ J、峰值功率为 223 kW、激光光谱宽度为 0.05 nm 的窄线宽激光输出。通过腔外倍频的方式, 使用 40 mm 长的温度匹配型 LBO 获得了能量为 155.5 μ J 的 532 nm 激光输出, 倍频效率为 52%, 光束质量 $M_x^2=1.28$ 和 $M_y^2=1.26$ 。

相较于 ICESat-2 上搭载的 ATLAS, 所设计的激光器的单束激光能量更高, 脉宽更小, 有利于增加激光雷达的探测距离, 提高探测精度。除此以外, 全光纤结构激光器的光-光转换效率高于固体激光器, 散热性能优于固体激光器, 能进一步提高卫星资源的利用率。

2 实验装置

图 1 为单频窄线宽窄脉宽高重复频率光纤激光器的结构示意图。该系统采用的是全光纤结构, 包括脉冲种子光源、三个前置放大器、一个主放大器。种子光源采用分布反馈式半导体激光器 (DFB-LD), 光功率为 62.6 mW, 波长为 1064.44 nm, 线宽为 1 MHz。使用调制带宽为 18 GHz 的电光调制器 (EOM) 将连续激光斩波为重复频率为 10 kHz、脉冲宽度为 ~ 2 ns 的脉冲激光, 驱动脉冲信号由信号发生器产生。信号发生器的矩形波形的持续时间和重复频率分别设置为 2 ns 和 10 kHz, 信号电压高电平设置为 4.5 V, 低电平设置为 0 V。采用自制偏压控制电路使 EOM 工作于“无光”状态, 施加脉冲信号时 EOM 产生脉冲激光。在 EOM 输出端熔接保偏分束器 (PMTIC) 对种子光脉冲及光谱进行监测, 获得了重复频率为 10 kHz、脉宽为 1.67 ns、光谱宽度为 0.036 nm 的脉冲种子光。第一级预放泵浦源选用 976 nm 单模半导体激光器 (SM-LD), 增益光纤使用单包层掺镱光纤, 在增益光纤输出端熔接保偏分束隔离带通滤波器 (PMTIBP), 用来抑制一级预放的放大自发辐射 (ASE), 并监测一级预放后的功率及光谱。利用环形器 (CIR) 进行第二级双程放大, 采用 976 nm 的单模半导体激光器熔接滤波器 (BP) 作为泵浦源, 通过波分复用器 (WDM) 将泵浦光耦合进单

包层掺镱光纤,信号光经保偏光纤镜(PMOFM)反射后被双程放大。在一级预放和二级双程放大后接入了声光调制器(AOM),对前级的连续波成分进行滤除,提高脉冲对比度。三级放大选用了 976 nm 多模半导体激光器(MM-LD)和 $(2+1) \times 1$ 的泵浦合束器(PMPC),PMPC 匹配光纤为大模场双包层无源光纤(LMA-GDF-15/130),控制信号输入光纤和输出光纤长度均为 0.2 m。选用保偏大模场掺镱双包层有源光纤(PLMA-YDF-15/130)作为增益光纤,在 PMPC 与 YDF-15/130 光纤熔接处进行涂覆处理。在三级放大后,接入高功率保偏隔离滤波器(HPMIBP),通过对 HPMIBP 的光纤长度进行优化,

获得了平均功率为 106.7 mW 的脉冲光,即峰值功率约为 7.11 kW。主放级选用的两个 976 nm MM-LD 经过 BP 被接入到 $(2+1) \times 1$ 合束器,再通过 PCF 进行增益放大,PCF 输出端接上光纤准直器(HPPMFC)输出激光。最后,在空间选用温度匹配型 LBO 晶体作为倍频晶体,晶体长度为 40 mm,晶体切割角度为 $\theta=90^\circ$, $\varphi=0^\circ$ 。基频光依次通过半波片(HWP)和聚焦透镜聚焦到 LBO 晶体内,通过调节半波片改变基频光偏振方向,选用合适的聚焦镜,调节 LBO 晶体位置以及温控炉温度以获得更高的倍频效率,使用双色镜[增透(AR)@532 nm & 高反(HR)@1064 nm]滤除基频光后,对 532 nm 激光进行光学特性的测量。

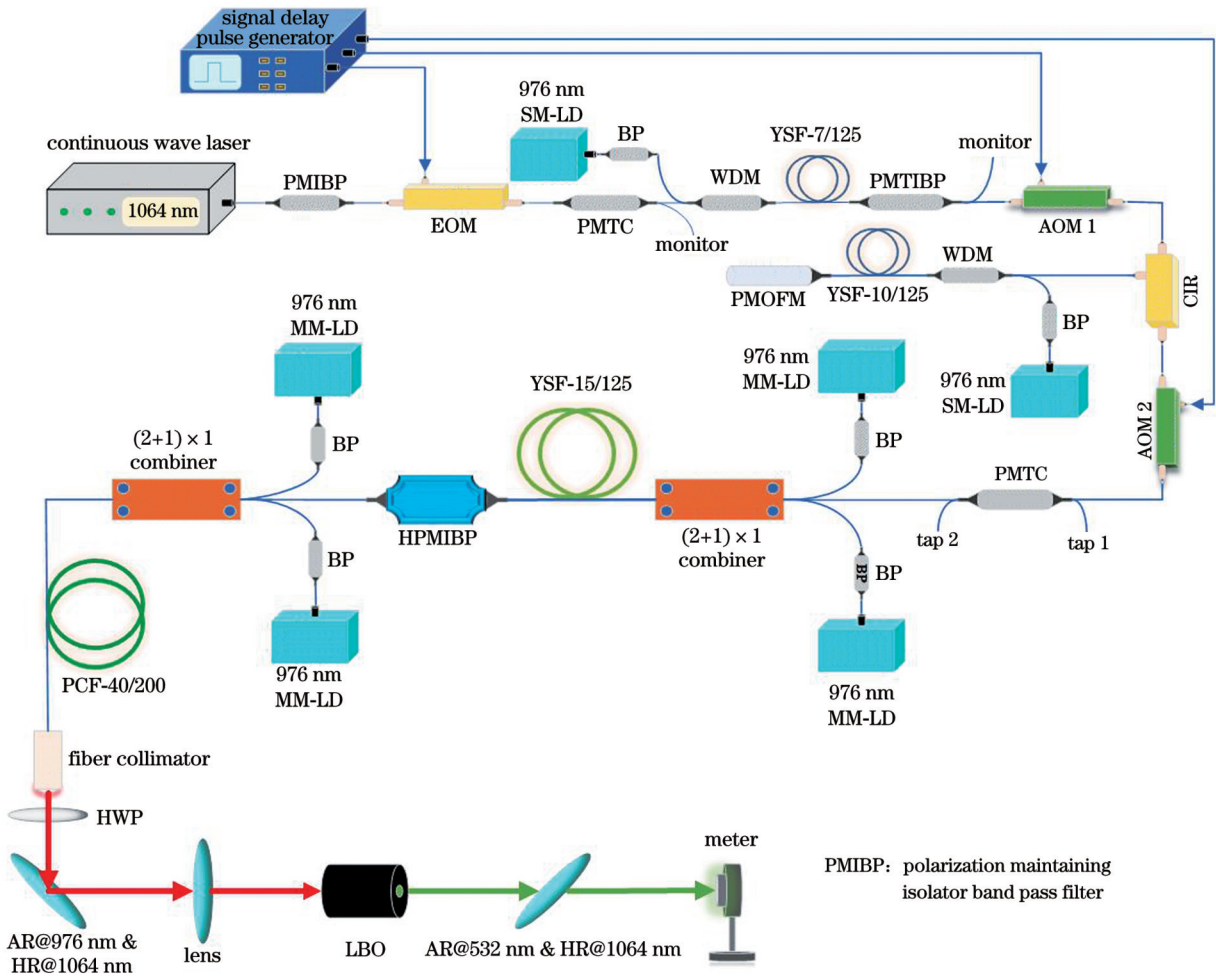


图 1 单频窄线宽窄脉宽高重复频率光纤激光器的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of fiber laser with single frequency, narrow line width, narrow pulse width, and high repetition frequency

3 实验结果与讨论

首先,选择分布式反馈激光二极管DFB-LD作为种子源,因为DFB-LD可以提供稳定的波长和窄线宽的连续光输出,通过调节种子源的温度控制种子源波长。对连续种子光的功率及光谱宽度进行测量,连续种子光功率为 62.6 mW,波长为 1064.44 nm,3 dB 带宽下的光谱宽度为 0.037 nm,光信噪比(OSNR)大于

50 dB,光谱如图 2 所示。

根据目前的激光雷达对激光器的脉宽需求以及现有探测器设备的响应度可知,纳秒级的宽度更能满足激光雷达对地探测的需求。信号延迟脉冲发生器控制的 EOM 产生了矩形种子光,半峰全宽(FWHM)为 1.67 ns,种子光经过第一级预放后接入 AOM1,获得了重复频率为 10 kHz、波长为 1064.43 nm、脉宽为 1.50 ns、光谱宽度为 0.037 nm、平均功率为 140 μ W、

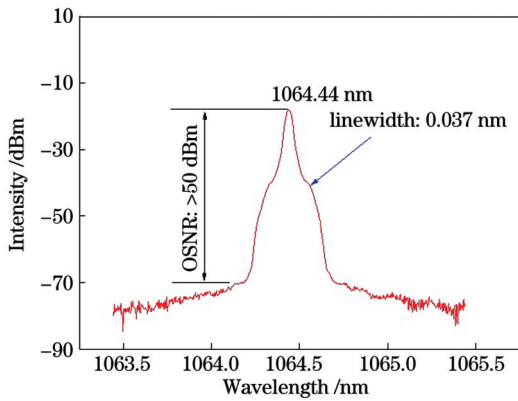


图 2 62.6 mW 连续种子光的光谱图
Fig. 2 Spectrum of 62.6 mW continuous seed light

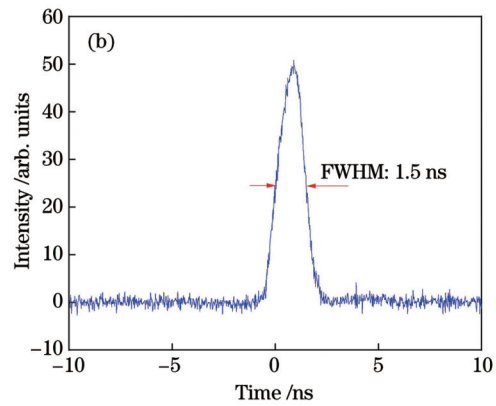
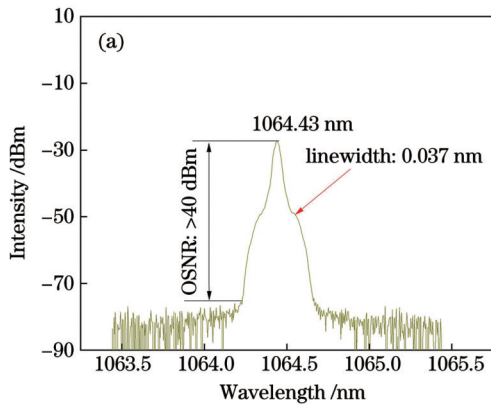


图 3 一级放大后的脉冲波形及光谱。(a) 脉冲光谱图; (b) 脉冲波形
Fig. 3 Pulse waveform and spectrum after primary amplification. (a) Pulse spectrum; (b) pulse waveform

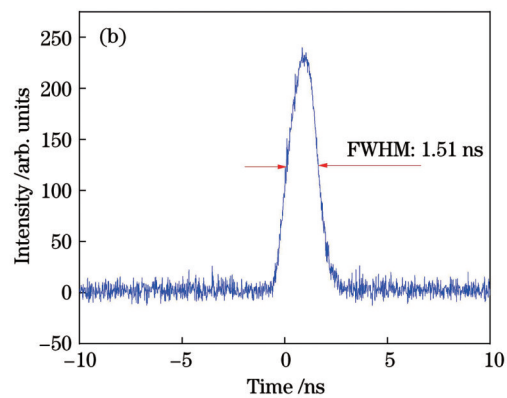
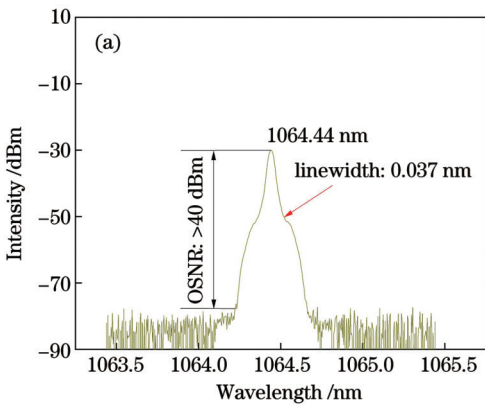


图 4 二级放大后的脉冲波形及光谱。(a) 脉冲光谱图; (b) 脉冲波形
Fig. 4 Pulse waveform and spectrum after secondary amplification. (a) Pulse spectrum; (b) pulse waveform

主放大级分别选用了大模场掺镱实芯光纤 PLMA-YDF-25/250 和光子晶体光纤作为主放光纤, 两种光纤在不同泵浦电流下的脉冲能量变化如图 6 所示。当泵浦电流为 5.5 A 时, PLMA-YDF-25/250 光纤输出的脉冲能量为 290 μJ , 峰值功率为 202 kW, PCF 输出的脉冲能量为 287 μJ , 峰值功率为 190 kW。如图 7 所示, PLMA-YDF-25/250 实芯主放光纤下的光谱展宽较大, 出现了明显的 SPM 现象, 光谱宽度达到了 0.096 nm, 而 PCF 主放光纤下的激光光谱宽度只有 0.05 nm。

峰值功率约为 9.33 W 的脉冲光, 光谱及脉冲波形分别如图 3(a)、(b) 所示。放大后的脉冲宽度较种子光有所减小, AOM 具有压缩脉冲基底、提高脉冲对比度的作用。同时, 光谱没有明显的变化, 信噪比略微降低。

二级双程放大后的信号光经过 AOM2, 获得了脉冲宽度为 1.51 ns、光谱宽度为 0.037 nm、峰值功率约为 383.5 W 的脉冲光, 光谱及脉冲波形分别如图 4(a)、(b) 所示。

进行第三级放大, 在 HPMIBP 后使用功率计, 测得平均功率为 97 mW, 脉冲种子光的光谱宽度在 SPM 的作用下轻微展宽到 0.046 nm, 但是在光谱中并未观察到明显的 SPM 效应, 如图 5(a)、(b) 所示。

因为 SPM 产生的频移与脉冲本身的啁啾特性相关, 一般将 SPM 引起 $\pi/2$ 相移时的峰值功率作为 SPM 的阈值, 表示为

$$P_{th} = \frac{\lambda A_{eff}}{4n_2 L_{eff}}, \quad (1)$$

式中: n_2 表示纤芯折射率; P_{th} 表示阈值功率; L_{eff} 表示光纤的有效长度; λ 表示激光波长; A_{eff} 表示有效模场面积。根据式 (1) 可以看出, 自相位调制的阈值功率与所采用光纤的有效模场面积成正比, 因此选择更大模场面积的光子晶体光纤可以削弱非线性效应,

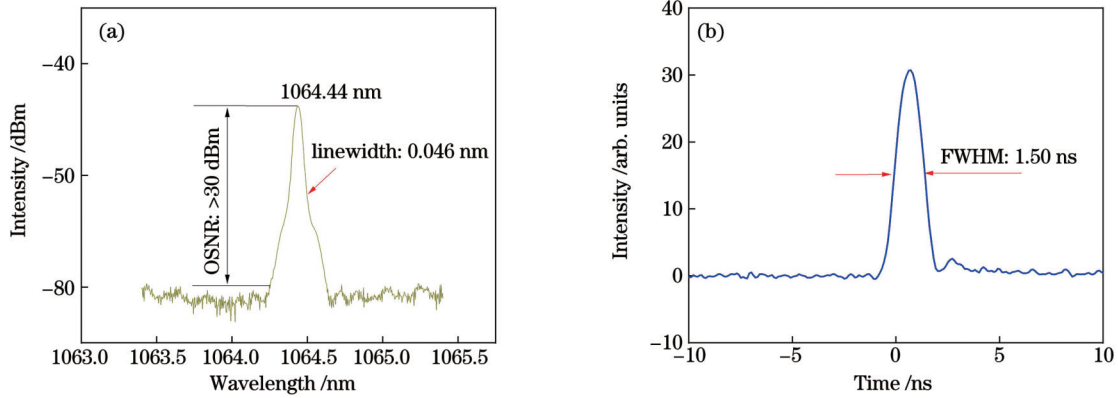


图 5 三级放大后的脉冲波形及光谱。(a)脉冲光谱图;(b)脉冲波形

Fig. 5 Pulse waveform and spectrum after tertiary amplification. (a) Pulse spectrum; (b) pulse waveform

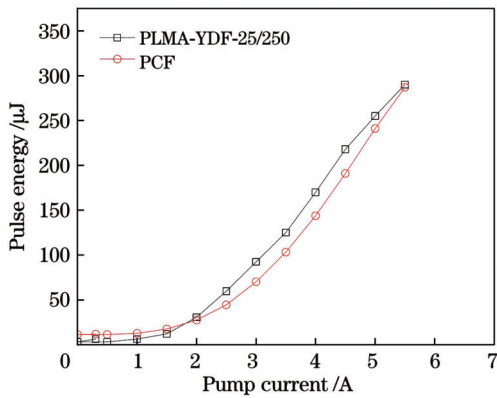


图 6 不同泵浦电流下 PLMA-YDF-25/250 光纤和 PCF 的脉冲能量曲线

Fig. 6 Pulse energy curves of PLMA-YDF-25/250 fiber and PCF under different pump currents

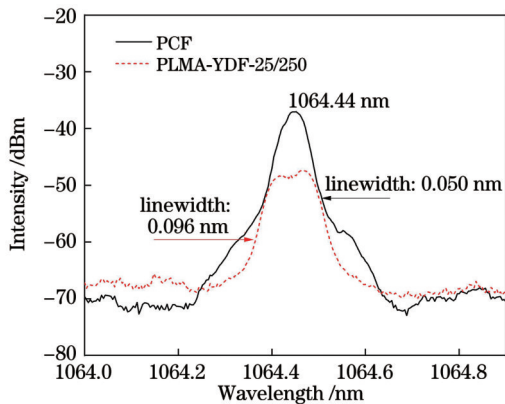


图 7 PLMA-YDF-25/250 光纤和 PCF 下的光谱

Fig. 7 Spectra under PLMA-YDF-25/250 fiber and PCF

减小光谱的展宽。此外,PCF 数值孔径小,可以在较高的峰值功率状态下保持高光束质量的激光输出。在选择相同包层大小的光纤时,大芯径光纤的有效模场面积较大,SPM 的阈值较大,同时大芯径光纤的泵浦吸收效率较高,达到相同放大能量所需的光纤长度相比于小芯径光纤会缩短,进而削弱非线性效应。

为了减小背景噪声对探测精度的影响,尤其是

空间太阳光的影响,通常需要利用光谱带宽低于 0.1 nm 的窄带滤光片抑制背景光,ICESat-2 卫星实现了 30 pm 带宽光谱滤波^[22]。为了获得更窄的线宽并抑制 SPM,主放大级光纤选用 PCF 输出时,继续增大电流到 5.6 A,3 dB 带宽下光谱宽度为 0.050 nm;在准直头输出处进行泵浦滤除,使用能量计测得脉冲能量为 298 μJ,脉宽为 1.34 ns,对应的激光最大峰值功率为~223 kW,光谱如图 8 所示。PCF 输出激光的光谱宽度相较于 PLMA-YDF-25/250 实芯光纤要小,且放大过程中没有观测到受激拉曼散射(SRS)、受激布里渊散射等其他非线性效应,输出稳定。这是因为 PCF 的模场面积更大,非线性效应的阈值有所提高。

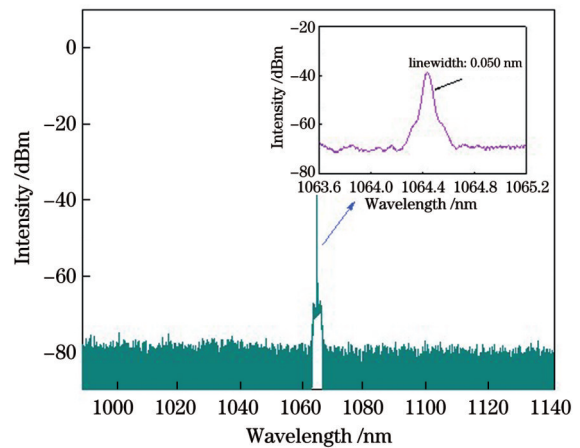


图 8 单脉冲能量为 298 μJ 时的激光光谱

Fig. 8 Laser spectrum when single pulse energy is 298 μJ

当最高能量为 298 μJ 时,根据图 1 所示的光路图,使用 LBO 晶体对基频光进行倍频,当基频光的输出能量为 298 μJ 时,绿光输出能量为 155.5 μJ,倍频转换效率为 52%,倍频能量与效率曲线如图 9 所示。在最高绿光输出功率下,使用光束质量分析仪测得的横向和纵向的光束质量分别为 $M_x^2=1.28$ 和 $M_y^2=1.26$,光束质量如图 10 所示。

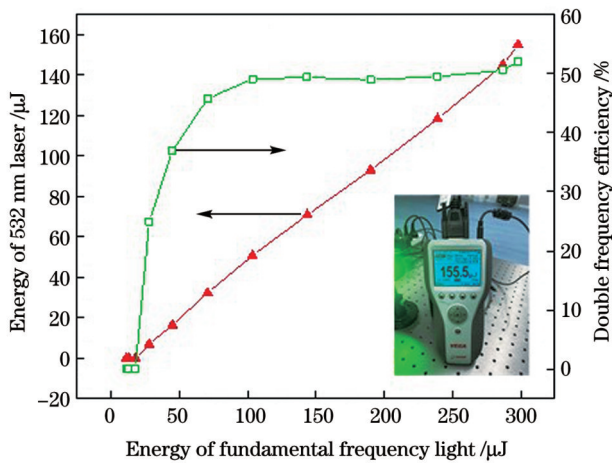


图9 倍频效率和532 nm激光能量随基频光能量的变化曲线
(插图显示绿光输出能量)

Fig. 9 Double frequency efficiency and energy of 532 nm laser versus fundamental frequency energy with output energy of green light shown in inset

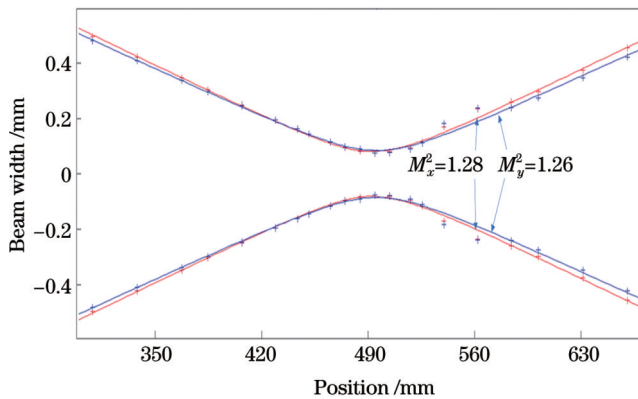


图10 能量为155.5 μJ时532 nm激光的光束质量

Fig. 10 Beam quality of 532 nm laser with energy of 155.5 μJ

4 结 论

介绍了一种单频窄线宽窄脉宽高重复频率的光纤激光器。采用MOPA结构,结合电光调制的脉冲种子光,选用PCF对脉冲种子光进行放大,当工作频率为10 kHz时,获得了0.05 nm窄线宽的1064.44 nm波长的基频光,倍频后得到能量为155.5 μJ的绿光,光束质量为 $M_x^2=1.28$ 和 $M_y^2=1.26$,可以作为空间探测激光雷达的光源使用。下一步工作是将种子光分束,进行多束种子光放大以获得多束激光,将其应用在激光雷达上,从而实现一定范围内的网格化远程探测。

参 考 文 献

- [1] 刘琪, 孟俊清, 祖继锋, 等. 适于空间应用的高重复频率窄脉宽电光调Q激光器[J]. 中国激光, 2017, 44(6): 0601005.
Liu Q, Meng J Q, Zu J F, et al. High repetition frequency narrow pulse electro-optically Q-switched laser for space applications[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(6): 0601005.
- [2] 王遨游, 陶宇亮, 李旭, 等. 高重复光子计数激光雷达样机设计

及测距试验[J]. 激光与红外, 2017, 47(7): 803-807.

- Wang A Y, Tao Y L, Li X, et al. Design and test of high repetition frequency photon counting lidar prototype[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7): 803-807.
- [3] 张雅楠, 孟俊清, 王明建, 等. 高重复频率窄脉宽单频激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(9): 0901005.
Zhang Y N, Meng J Q, Wang M J, et al. High repetition frequency narrow pulse width single frequency laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(9): 0601005.
- [4] Abdalati W, Zwally H J, Bindaschadler R, et al. The ICESat-2 laser altimetry mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 735-751.
- [5] Sawruk N W, Burns P M, Edwards R E, et al. ICESat-2 laser technology readiness level evolution[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9342: 93420L.
- [6] Yu A W, Krainak M A, Stephen M A, et al. Spaceflight laser development for future remote sensing applications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8182: 818204.
- [7] Yu A W, Krainak M A, Harding D J, et al. Multi-beam laser altimeter system simulator for the Lidar Surface Topography (LIST) mission[C]//2012 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), May 6-11, 2012, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 2012.
- [8] Yu A W, Betin A, Krainak M A, et al. Highly efficient Yb:YAG master oscillator power amplifier laser transmitter for future space flight missions[C]//Advanced Solid-State Photonics 2012, January 29-February 1, 2012, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: Optica Publishing Group, 2012: AW4A.26.
- [9] Richardson D J, Nilsson J, Clarkson W A. High power fiber lasers: current status and future perspectives[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2010, 27(11): B63-B92.
- [10] 田浩, 史朝督, 付士杰, 等. 0.59 mJ单频掺Yb³⁺百纳秒脉冲全光纤激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(13): 1301005.
Tian H, Shi C D, Fu S J, et al. 0.59 mJ single-frequency Yb³⁺ 100-nanosecond pulsed all-fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(13): 1301005.
- [11] Su R T, Ma P F, Zhou P, et al. High-peak-power temporally shaped nanosecond fiber laser immune to SPM-induced spectral broadening[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7(2): e27.
- [12] Geng J H, Wang Q, Jiang Z, et al. Kilowatt-peak-power, single-frequency, pulsed fiber laser near 2 μm[J]. Optics Letters, 2011, 36(12): 2293-2295.
- [13] Fang Q, Shi W, Petersen E, et al. Half-mJ all-fiber-based single-frequency nanosecond pulsed fiber laser at 2-μm[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(5): 353-355.
- [14] 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.
- [15] Shi C D, Tian H, Sheng Q, et al. High-power single-frequency pulsed fiber MOPA via SPM suppression based on a triangular pulse[J]. Results in Physics, 2021, 28: 104594.
- [16] Huang L, Ma P F, Su R T, et al. Comprehensive investigation on the power scaling of a tapered Yb-doped fiber-based monolithic linearly polarized high-peak-power near-transform-limited nanosecond fiber laser[J]. Optics Express, 2021, 29(2): 761-782.
- [17] 盛泉, 王盟, 史朝督, 等. 基于锯齿波脉冲抑制自相位调制的高功率窄线宽单频脉冲光纤激光放大器[J]. 物理学报, 2021, 70(21): 214202.
Sheng Q, Wang M, Shi C D, et al. High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(21): 214202.
- [18] 栗荣涛, 肖虎, 周朴, 等. 窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究[J]. 物理学报, 2018, 67(16): 164201.

- Su R T, Xiao H, Zhou P, et al. Self-phase modulation pre-compensation of narrow linewidth pulsed fiber lasers[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(16): 164201.
- [19] Di Teodoro F, Brooks C D. 1.1 MW peak-power, 7 W average-power, high-spectral-brightness, diffraction-limited pulses from a photonic crystal fiber amplifier[J]. Optics Letters, 2005, 30(20): 2694-2696.
- [20] Chen H, Yan P, Xiao Q, et al. PCF based high power narrow line width pulsed fiber laser[J]. Applied Physics B, 2012, 108(3): 635-639.
- [21] Di Teodoro F, Morais J, McComb T S, et al. SBS-managed high-peak-power nanosecond-pulse fiber-based master oscillator power amplifier[J]. Optics Letters, 2013, 38(13): 2162-2164.
- [22] Troupaki E, Denny Z H, Wu S, et al. Space qualification of the optical filter assemblies for the ICESat-2/ATLAS instrument[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9346: 93460H.

Fiber Laser with Single Frequency, Narrow Line Width, Narrow Pulse Width, and High Repetition Frequency

Zhan Hao^{1,2}, Zhang Xin^{2*}, Meng Junqing^{1,3**}, Zhang Dawei¹, Zhong Chaoyang², Hou Xia²,
Chen Weibiao⁴

¹*School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

²*Space Laser Engineering Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;*

³*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;*

⁴*Key Laboratory of Space Laser Communication and Detection Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*

Abstract

Objective With the development of single-photon detection technology, human exploration of Earth and space has enhanced the study of Earth's surface changes, such as those in ice, terrain, and vegetation, and improved the understanding of the impact of glaciers on sea level change. These detections have led to new requirements for the light source of LiDAR technology, including lasers with high repetition rates, narrow pulse widths, and narrow linewidths for improved detection distance and accuracy, enabling better observations of changes in surface characteristics. Lasers with all-fiber structures are more compact and stable, which have higher photoelectric conversion efficiency and longer lifespan. The optical fiber structure is more conducive to the multi-beam ground detection. This is because a certain detection blind zone between the beams exists, and the detection of multiple beams reduces the distance interval between the beams, resulting in a certain degree of gridded high-precision detection. All-fiber lasers are expected to enable thousand-beam laser ground detection and direct ground measurement.

Methods In this study, a continuous seed light of 62.6 mW is used, which is modulated into pulsed light by an electro-optical modulator through a rectangular pulse signal from a signal generator. First, the pulsed seed light is amplified by a gain optical fiber to obtain pulsed light with a wavelength of 1064.43 nm, a linewidth of 0.037 nm, and a peak power of approximately 9.33 W. Then, through a gain fiber for two-stage two-pass amplification, the pulsed light with a linewidth of 0.037 nm and a peak power of approximately 383.5 W is obtained. After the first two-stage amplification, an acousto-optic modulator (AOM) is connected to filter out the continuous wave components of the front stage and improve the contrast of the pulsed light. The third-stage amplification is done through a PLMA-YDF-15/130 double-clad gain fiber to obtain pulsed light with a linewidth of 0.046 nm and a peak power of 7.11 kW. The main amplification stage uses the PLMA-YDF-25/250 and photonic crystal fiber (PCF) for amplification effect comparison. The PCF amplified linewidth is smaller than that of the PLMA-YDF-25/250, with no spontaneous radiation, stimulated Raman scattering, or other nonlinear effects. It obtains a wavelength of 1064.44 nm, pulse energy of 298 μ J, and pulse width of 1.34 ns for lasers with a linewidth of 0.05 nm. The corresponding maximum peak power of the laser is approximately 223 kW. The temperature-matched lithium triborate (LBO) is used for the frequency doubling of fundamental frequency light at an energy of 298 μ J, resulting in a green light output of 155.5 μ J. The frequency doubling conversion efficiency is 52%, and a beam quality of $M_x^2=1.28$ and $M_y^2=1.26$ are also obtained.

Results and Discussions To simplify the optical path and maintain the stability of the output, the forward amplification method is selected (Fig. 1). The main amplification stage uses the PLMA-YDF-25/250 and PCF for comparison. Under varying pump currents (Fig. 6), the former exhibits slightly higher optical conversion efficiency than the latter. At a current of 5.6 A, the PLMA-YDF-25/250 exhibits self-phase modulation effects, as shown by the spectral comparison (Fig. 7). Because the mode field area of the PCF is larger than that of PLMA-YDF-25/250, the threshold of nonlinear effects is increased, and other nonlinear effects, such as amplified spontaneous radiation and stimulated Raman scattering, are not observed at 298 μ J (Fig. 8). The optical path design uses a

temperature-matched LBO crystal for frequency doubling on fundamental frequency light of 1064 nm, resulting in 155.5 μJ green light output with a frequency doubling conversion efficiency of 52% (Fig. 9).

Conclusions In this study, a master oscillator power amplifier (MOPA) structure combined with photonic crystal fiber is used to obtain stable fundamental frequency light with a repetition rate of 10 kHz, a wavelength of 1064.44 nm, a linewidth of 0.05 nm, an energy of 298 μJ , and a peak power of approximately 223 kW. After the temperature-matched LBO frequency doubling, the resulting 155.5 μJ green light with a frequency doubling efficiency of 52% and beam quality of $M_x^2=1.28$ and $M_y^2=1.26$ can be used as a light source for space detection lidar.

Key words lasers; fiber lasers; narrow line width; pulse laser; high peak power; self-phase modulation