

增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器*

张万儒 陈思雨 粟荣涛[†] 姜曼 李灿 马阎星 周朴

(国防科技大学前沿交叉学科学院, 长沙 410073)

(2022年4月27日收到; 2022年5月17日收到修改稿)

报道了一台线偏振单频脉冲光纤激光器. 采用全保偏环形腔结构搭建全光纤振荡器, 在腔内熔接一段未抽运的保偏掺镱光纤作为饱和吸收体, 产生超窄带的动态光栅进行滤波选模, 实现了激光器的单频输出. 利用 976 nm 半导体激光器作为抽运源, 产生脉冲加连续的混合抽运激光, 实现了重频 10—90 kHz、脉宽 1—8 μ s 的长脉冲输出. 实验研究了抽运功率和重复频率等参数对输出激光的时域、频域和功率特性的影响. 实验发现输出激光的频域特性在一定功率范围内存在光学双稳态现象, 分析了激光功率特性对动态光栅选模机制的影响. 通过参数优化, 最终实现了中心波长 1064 nm、线宽约 23.5 MHz、重频 10—90 kHz、脉宽 4—8 μ s、偏振消光比约 29 dB 的单频脉冲激光输出.

关键词: 光纤激光, 增益开关, 脉冲激光, 单频激光**PACS:** 42.55.Wd, 42.60.Rn, 42.25.Ja, 42.60.Fc**DOI:** 10.7498/aps.71.20220829

1 引言

单频光纤激光器具有相干性好、结构紧凑、光束质量好等优点, 研究人员基于不同结构原理实现了高性能的单频连续激光输出^[1-4]. 相比于单频连续光纤激光, 单频脉冲光纤激光具有更高的峰值功率, 在激光雷达、非线性频率转换、遥感探测等领域具有广泛的应用前景^[5-7]. 目前, 获得单频脉冲光纤激光的典型方法是利用声光调制器或电光调制器对单频连续激光进行强度调制, 可以在调制器的调节范围内产生任意重频、脉宽的脉冲激光. 但是, 强度调制输出的激光种子功率较低, 通常需要多级放大器进行功率放大^[8-11]. 因此, 研究人员对调 Q 单频光纤激光器开展了相关研究, Shi 等^[12]报道了一种基于分布式布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR) 超短腔主动调 Q 的单频光纤激光器技术方案, 通过压电陶瓷挤压光栅来改变

腔内的反射损耗, 实现了单频脉冲激光输出. Zhang 等^[13]在 DBR 超短腔光纤激光器中使用半导体可饱和吸收镜, 基于饱和和吸收效应实现了被动调 Q 单频脉冲输出. Li 等^[14]在环形腔结构中加入具有饱和吸收特性的二维材料作为腔内 Q 开关, 同时利用未抽运的掺铒光纤进行纵模选择, 获得了单频脉冲输出. Zhao 等^[15]将具有偏振损耗各向异性的 DBR 光纤激光器的输出光进行偏振调制后再返回到腔内, 研制了新型的单频调 Q 光纤激光器. 此外, 研究人员利用种子光注入调 Q 技术, 将单频种子光注入至高增益的调 Q 光纤激光器中, 诱导激光器中与单频种子光最邻近的潜在纵模先建立激光振荡, 实现了单频脉冲激光输出^[16-20].

增益开关技术是对激光器的抽运源进行调制, 利用脉冲抽运的方式周期性调节激光器增益, 可以实现脉冲激光输出. 该方法无需外部调制器件, 通过对抽运源电信号的调制即可实现脉冲输出, 脉冲重复频率以及脉冲宽度随电信号可调. Geng 等^[21]

* 国家自然科学基金 (批准号: 62005316) 和长沙市杰出创新青年培养计划 (批准号: kq2106005) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: surongtao@126.com

采用 1.95 μm 的掺铥脉冲光纤激光器作为抽运源, 通过同带抽运的方式实现了 2.05 μm 的增益开关单频脉冲输出. Hou 等^[22] 利用调制脉冲抽运源抽运 DBR 超短腔结构光纤激光器, 获得了单频脉冲激光输出, 中心波长为 1063 nm, 脉冲宽度约 150 ns, 光谱线宽为 14 MHz. Poozesh 等^[23] 报道了一台增益开关线形腔激光器, 在 100 kHz 处产生脉冲宽度为 427 ns, 线宽小于 7.5 MHz, 中心波长为 1017 nm. Fang 等^[24] 利用脉冲激光器抽运 DBR 超短腔结构, 在 2 μm 处获得了重复频率为 1—500 kHz、脉冲宽度为 19—106 ns 的单频脉冲输出.

由于增益开关脉冲激光器的脉冲宽度与谐振腔的腔长正相关, 为了满足长脉冲应用领域的需求, 则需要进一步增大大激光器的腔长. 但是在线形腔激光器中, 增大大腔长则难以实现单频输出. 为此, 本文提出了一种基于长腔长环形腔结构的增益开关长脉冲单频激光输出方法, 实现了中心波长 1064 nm、线宽约 23.5 MHz、重频 10—90 kHz、脉宽 4—8 μs 、偏振消光比约 29 dB 的单频激光输出.

2 实验结构与原理

基于增益开关的全保偏环形腔结构光纤激光器的实验装置如图 1 所示. 增益光纤采用长度为 1 m、纤芯/包层直径分别为 6/125 μm 的保偏掺镱光纤 (polarization maintaining ytterbium doped fiber, PM-YDF1). 中心波长为 976 nm 的半导体抽运激光器 (laser diode, LD) 通过一个 976/1064 nm 保偏波分复用器 (polarization maintaining wavelength division multiplexer, PM-WDM) 将抽运激光耦合到环形腔内. 976 nm LD 的重频和脉宽可以根据信号发生器 (arbitrary function generator, AFG) 的输入信号进行调节, 20 kHz 重频下输出的最高平均功率约为 200 mW. PM-YDF1 的一端连接一个保偏环形器 (polarization maintaining circulator,

PM-CIR), 以确保环形腔内光路的单向运行. PM-CIR 的第 2 个端口连接一段未抽运保偏掺镱光纤 (PM-YDF2) 作为可饱和吸收体, 光纤长度和参数与 PM-YDF1 相同. 在 PM-YDF2 的另一端熔接一个保偏光纤布拉格光栅 (polarization maintaining fiber Bragg grating, PM-FBG), 其中心波长约为 1064 nm, 带宽为 0.08 nm, 反射率约为 90%. PM-FBG 可以对腔内纵模进行初步选择, 并实现激光的耦合输出, 其反射率对输出脉冲特性会产生影响, 反射率在 30%—40% 时振荡器效率最高^[25,26]. PM-FBG 的另一个重要功能是结合 PM-YDF2 选择出单一纵模, 信号光经过 PM-FBG 的反射后与入射的信号光在 PM-YDF2 上产生干涉驻波, 饱和吸收特性使光强与折射率沿光纤纵向方向产生周期性变化, 形成带宽极窄的瞬态布拉格光栅, 从而选出单频激光. 高反射率的 PM-FBG 可以缩小 PM-YDF2 上往返光束的光强差, 提高干涉光强衬比度, 形成更加稳定的单频选模机制. 综合考虑上述因素, 本文重点关注激光器的单频特性, 因此采用了反射率为 90% 的 PM-FBG. 此外, 普通掺镱光纤作为可饱和吸收体时, 信号光的偏振态容易发生变化, 影响形成的驻波的稳定性, 采用保偏掺镱光纤则可以保持信号光的偏振态, 实现更加稳定的单频选模机制.

基于增益开关的脉冲激光其脉冲宽度 t_p 与谐振腔长度正相关, 与抽运功率负相关^[22,27], 即:

$$t_p \propto \sqrt{L/P_{\text{abs}}}, \quad (1)$$

式中, $L = 6.3 \text{ m}$ 为激光器腔长, P_{abs} 为吸收的抽运功率.

激光器谐振腔内相邻纵模的频率间隔可以表示为

$$\Delta\nu = \frac{c}{n_{\text{eff}}L}, \quad (2)$$

式中, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 为真空中的光速, $n_{\text{eff}} = 1.47$

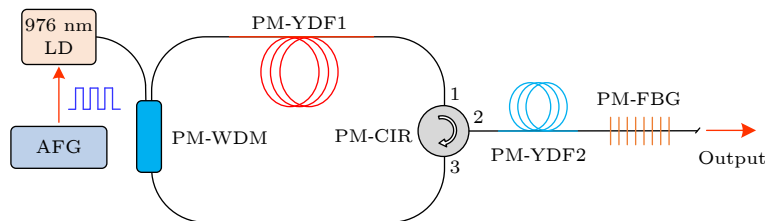


图 1 增益开关单频脉冲光纤激光器结构示意图

Fig. 1. Experiment setup of the gain-switched single-frequency pulsed fiber laser.

为光纤有效折射率, $L = 6.3 \text{ m}$ 为激光器腔长. 由 (2) 式可知纵模间隔 $\Delta\nu$ 约为 32 MHz. PM-FBG 的光谱宽度为 0.08 nm, 在 1064 nm 处对应的线宽约为 21 GHz, 远远大于纵模间隔, 谐振腔支持多纵模振荡. 实验中采用未抽运保偏掺镱光纤上形成的动态光栅作为窄带滤波器, 进行纵模选择. 根据耦合模理论, 所形成动态光栅的带宽表达式为^[28,29]

$$\Delta f \approx \frac{\Delta n c \delta}{\lambda^2 n_{\text{eff}}^2} \sqrt{\Delta n^2 + \frac{\lambda^2}{L_{\text{YDF2}}^2}}, \quad (3)$$

式中, $\Delta n < 2 \times 10^{-7}$ 是折射率的调制幅度, $\delta = 1 \text{ m}$ 是模式耦合的尺寸补偿参数, $\lambda = 1064 \text{ nm}$ 为波长, $n_{\text{eff}} = 1.47$ 为有效折射率, $L_{\text{YDF2}} = 1 \text{ m}$ 为未抽运保偏掺镱光纤的长度. 由 (3) 式可知动态光栅带宽 Δf 约 27 MHz, 小于纵模间隔 32 MHz, 因此可以选出单纵模, 实现单频输出. 由 (3) 式也可看出未抽运保偏掺镱光纤长度 L_{YDF2} 越长, 动态光栅的带宽越窄, 越有利于选出单一纵模, 但是信号光的吸收损耗也会随之增大, 导致激光器的输出功率与斜率效率降低, 同时激光器的阈值功率也会随之提高^[30]. 实验中对比了不同未抽运保偏掺镱光纤长度下的纵模选择效果, 发现采用 2 m, 1.5 m 和 1 m 长的未抽运保偏掺镱光纤长度均可以实现稳定无跳模的单频输出; 而采用 0.5 m 长的未抽运保偏掺镱光纤进行纵模选择时, 稳定性不佳, 会出现跳模现象. 最终, 优选 1 m 长的未抽运保偏掺镱光纤作为饱和吸收体.

3 实验结果与分析

由于实验中利用动态光栅进行纵模选择依赖于信号光产生的干涉驻波, 信号光发生有效干涉时, 动态光栅建立; 信号光消失, 动态光栅也随之消失. 但是动态光栅的建立和消失并不是瞬时的, 而是需要一定的时间, 称为动态光栅的特征时间. 由于在掺镱光纤中产生动态光栅的特征时间为亚毫秒量级^[31], 因此实验中发现重频在 10 kHz 以下时就难以实现单频脉冲输出. 实验中通过仔细调节抽运参数, 在 10—90 kHz 均实现了单频脉冲输出, 输出脉宽在 4—8 μs , 线宽约 23 MHz. 由于激光器搭建过程中采用了全保偏器件, 利用偏振消光比测量仪对输出激光的偏振特性进行测量, 在不同重频和功率条件下, 脉冲激光的偏振消光比均优于 29 dB.

后文将从时域、频域及功率特性等方面对实验结果进行详细分析.

3.1 时域特性

为了保证输出激光脉冲的稳定性, 减少对抽运脉冲能量的要求, 实验中抽运源采用脉冲加连续的混合抽运工作模式^[32]. 抽运源中脉冲光与连续光成分的功率均可以单独设置, 利用 AFG 的输入信号可以灵活改变抽运脉冲的重频与脉宽. 激光器的连续激光抽运阈值约为 40 mW, 将抽运光中连续光成分的功率设为 30 mW, 低于激光器的抽运阈值功率. 当脉冲抽运光叠加在连续抽运光上时, 输入功率才能大于阈值, 实现激光输出.

首先, 将抽运脉冲的重频设为 20 kHz, 脉宽设为 3 μs , 改变抽运功率, 利用高速光电探测器与数字示波器测量抽运脉冲与输出脉冲的时域特性. 如图 2(a)—(c) 所示, 蓝色代表抽运脉冲, 红色代表激光脉冲. 当抽运平均功率由 53 mW 提升至 137 mW (连续抽运光成分均为 30 mW) 时, 脉冲宽度从 4.2 μs 下降至 1.3 μs . 这是因为脉冲持续时间则随抽运功率的提升而缩短, 如 (1) 式所示. 当抽运平均功率进一步提升至 154 mW (连续抽运光成分均为 30 mW) 时, 在一个抽运周期内出现了两个输出脉冲. 这是随着抽运功率的提升, 脉冲建立时间进一步缩短, 在输出第 1 个激光脉冲后, 仍有足够的抽运功率可以产生第 2 个激光脉冲.

然后, 继续保持抽运脉冲的重频为 20 kHz, 将抽运脉宽增大为 5 μs , 将抽运平均功率设为 137 mW (连续抽运光成分均为 30 mW), 抽运脉冲与输出脉冲的时域特性如图 2(d) 所示. 对比图 2(b) 与 (d) 可知, 在保证抽运能量相同的情况下, 利用不同脉宽的抽运脉冲可以获得相同的输出脉冲宽度.

最后, 将抽运脉宽设为 3 μs , 抽运重频分别设为 20 kHz, 40 kHz, 60 kHz 和 80 kHz. 在上述重频下对应的抽运平均功率分别设为 86 mW, 172 mW, 258 mW 和 344 mW (连续抽运光成分均为 30 mW), 使抽运平均功率与重复频率的比值相同. 如图 3(a) 所示为激光器在不同抽运重频下的输出脉冲序列, 可见输出脉冲的重频与抽运脉冲重频保持一致, 脉冲序列的稳定性较好, 脉冲峰值波动均小于 5%. 如图 3(b) 所示为激光器在不同抽运重频下的单脉冲形状, 脉冲波形近似满足高斯分布, 随着重频的提高, 输出脉冲的宽度随之降低, 从 20 kHz 的 2.2 μs

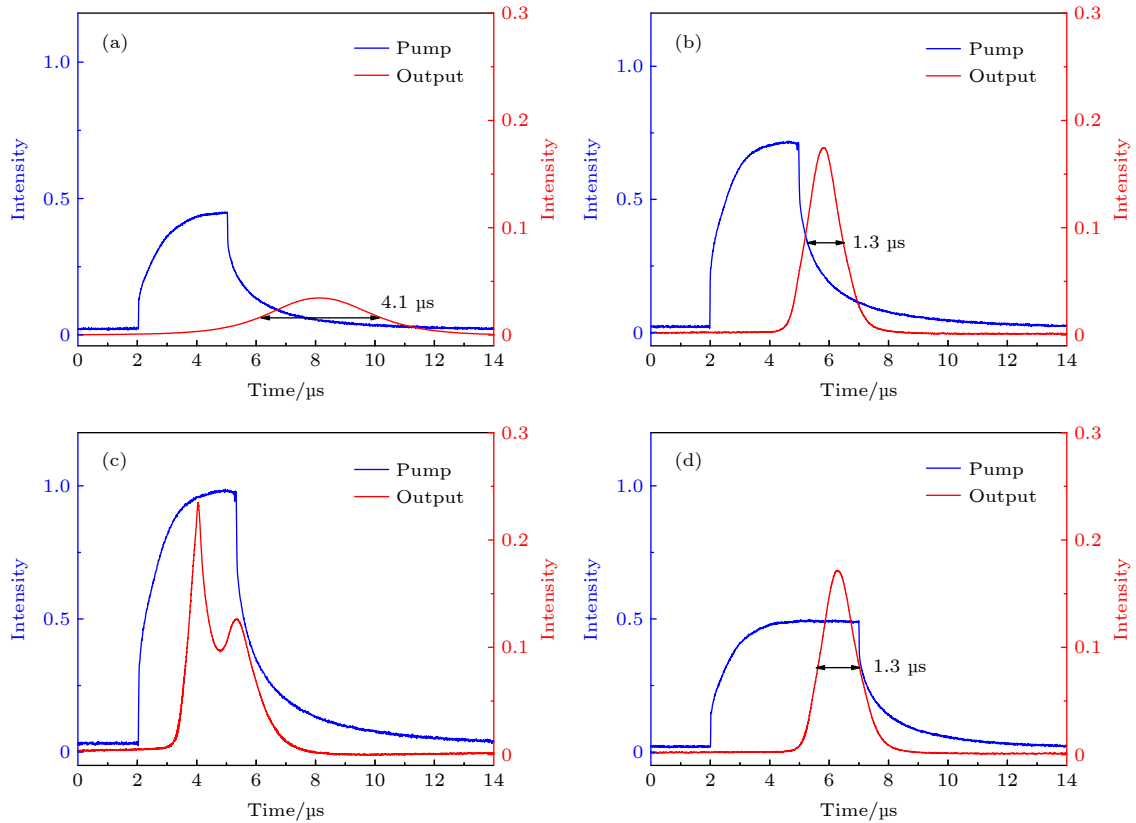


图 2 脉冲时域特性随抽运激光特性的变化情况 (a) 抽运平均功率 53 mW、抽运脉宽 3 μ s; (b) 抽运平均功率 137 mW、抽运脉宽 3 μ s; (c) 抽运平均功率 154 mW、抽运脉宽 3 μ s; (d) 抽运平均功率 137 mW、抽运脉宽 5 μ s

Fig. 2. Pulse time domain characteristics with different pump characteristics, the average pump power and pump pulse duration are: (a) 53 mW, 3 μ s; (b) 137 mW, 3 μ s; (c) 154 mW, 3 μ s; (d) 137 mW, 5 μ s.

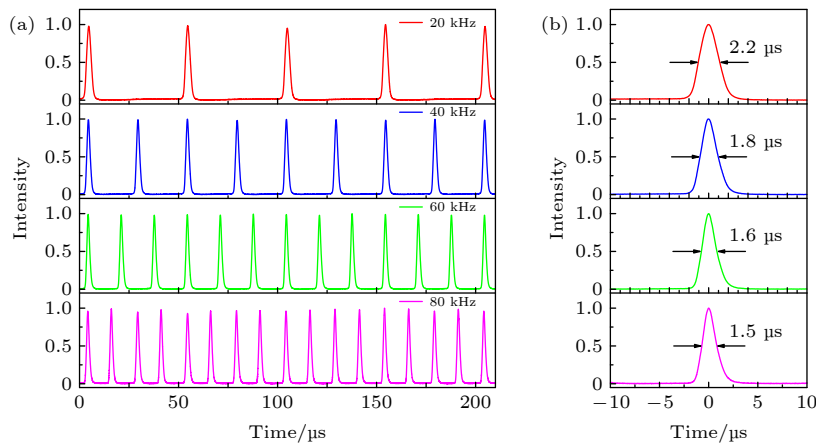


图 3 脉冲时域特性随抽运激光重频的变化情况 (a) 脉冲序列; (b) 脉冲波形

Fig. 3. Pulse time domain characteristics with different pump repetition rate: (a) Pulse trains; (b) pulse waveform.

下降至 80 kHz 的 1.5 μ s. 虽然抽运平均功率与重复频率的比值相同, 但是, 由于抽运激光中有 30 mW 的连续光成分, 脉冲抽运光的脉冲能量在 20 kHz, 40 kHz, 60 kHz 和 80 kHz 条件下分别为 2.8 μ J, 3.5 μ J, 3.8 μ J 和 3.9 μ J, 在脉宽保持抽运脉宽 3 μ s 的情况下, 抽运峰值功率是随重频增大

大而增大, 由 (1) 式可知输出脉冲宽度也会随着抽运功率的提高而变窄.

3.2 频域特性

利用自由光谱范围 (free spectral range, FSR) 为 4 GHz、分辨率约 10 MHz 的法布里-珀罗干涉

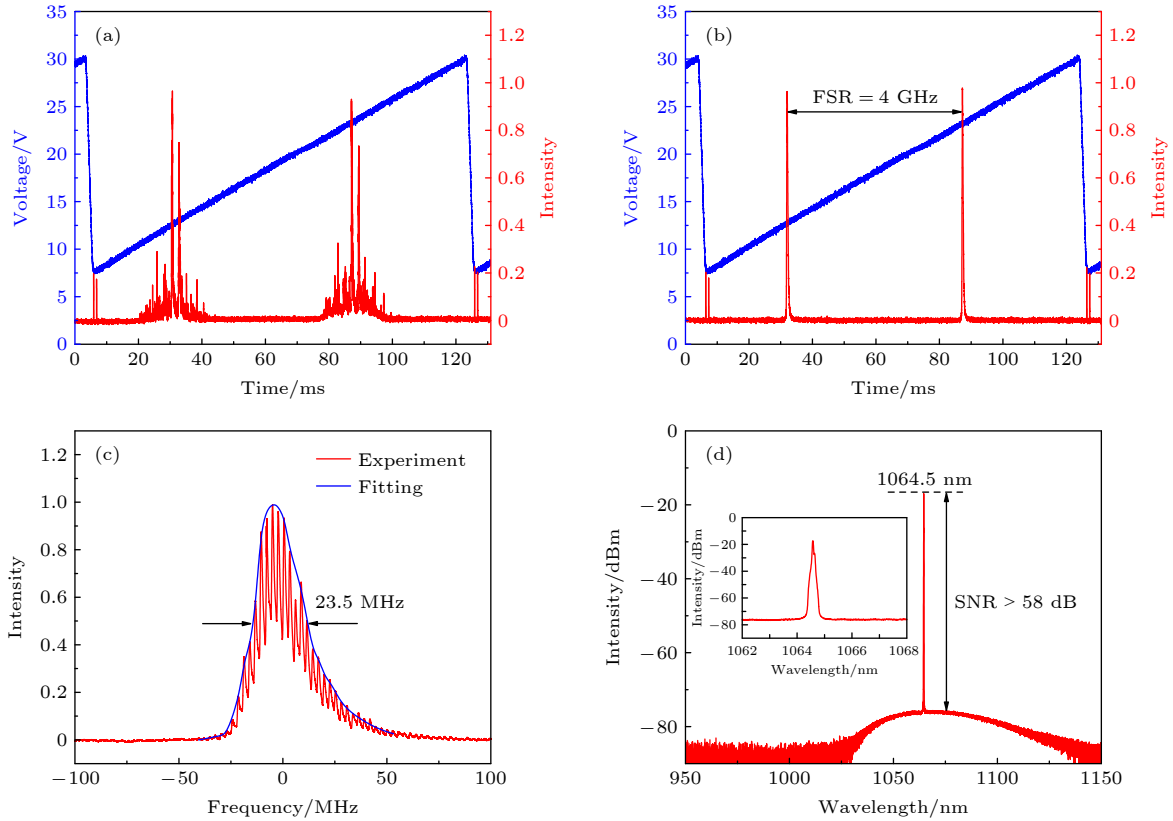


图4 激光器的典型频域特性 (a) 不熔接 PM-YDF2 时的纵模特性; (b) 熔接 1 m 长 PM-YDF2 时的纵模特性; (c) 单纵模线宽; (d) 光谱特性

Fig. 4. Typical frequency domain characteristics of laser: (a) longitudinal mode characteristic without PM-YDF2; (b) longitudinal mode characteristic with 1-m-long PM-YDF2; (c) linewidth of single-longitudinal-mode; (d) optical spectrum characteristic.

仪 (Fabry-Perot interferometer, FPI) 对激光器的纵模输出特性进行测量. 首先, 不熔接未抽运的保偏掺镱光纤, 测得的激光器频域特性如图 4(a) 所示, 可见激光器工作在多纵模 (multi-longitudinal-mode, MLM) 状态. 从前文的分析可知只采用窄线宽的 FBG 进行纵模选择时, 不能实现单频激光输出. 然后, 熔接一段 1 m 长的未抽运的保偏掺镱光纤, 测得的激光器频域特性如图 4(b) 所示, 激光器工作在单纵模 (single-longitudinal-mode, SLM) 状态. 图 4(c) 为单频脉冲激光的典型频域特性, 红色为实验测量数据, 由于是脉冲输出, 谱线表现为离散的尖峰序列, 蓝线为其包络拟合曲线, 其半高全宽约为 23.5 MHz. 激光器的输出光谱特性由 0.02 nm 分辨率的光谱分析仪进行测量, 如图 4(d) 所示, 中心波长为 1064.5 nm, 输出信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 大于 58 dB.

在抽运激光重频为 20 kHz、脉宽为 3 μ s 的情况下, 逐渐增大抽运功率, 观察激光器频域特性随抽运功率的变化情况. 当抽运功率由低到高增大

到 55.5 mW 时, 激光器由 SLM 状态变成 MLM 状态; 然后再逐渐降低抽运功率, 在抽运功率减小至 51.5 mW 时, 激光器才由 MLM 状态变回 SLM 状态. 重复该过程, 现象均能复现, 说明激光器的纵模特性在 51.5—55.5 mW 范围内存在光学双稳态现象. 也就是说, 在抽运功率增大过程中, 该功率范围内激光器为 SLM 状态; 而在抽运功率减小过程中, 该功率范围内激光器为 MLM 状态, 如图 5 所示. 通过长时间的实验观察还发现, 在抽运功率小于 51.5 mW 的 SLM 区, 激光器抗外界环境干扰的能力比较强, 可以稳定地工作于单频状态, 没有观察到纵模跳变; 当激光器处于双稳态的抽运区间时, 纵模状态容易在受到外界扰动时发生变化; 在抽运功率大于 55.5 mW 的 MLM 区, 动态光栅失效, 只有 FBG 粗选纵模, 与不熔接 PM-YDF2 时的纵模特征相似. 这是由于当窄线宽脉冲激光的峰值功率增大时, PM-YDF2 上的折射率调制深度会随之增大, 将产生更强的动态光栅, 动态光栅的反射率也随之提升, 使得大部分的信号光被反射回环

形器, 无法进入 PM-YDF2 参与动态光栅的形成, 造成动态光栅减弱. 当 PM-YDF2 上的动态光栅减弱时, 又可以允许更多的信号光进入 PM-YDF2, 再次形成强动态光栅. 在较高的抽运功率下, 动态光栅一直处于这个循环的过程, 无法建立稳定的选频机制, 激光器工作在 MLM 状态 [33].

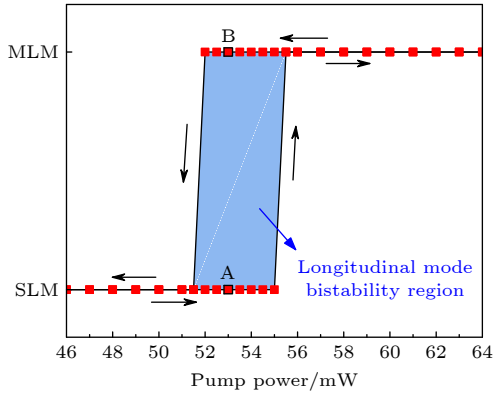


图 5 激光器纵模特性随抽运功率的演化过程

Fig. 5. Evolution of laser longitudinal mode characteristic with pump power.

图 6 所示为几个典型抽运功率下的输出脉冲波形和纵模特性. 随着抽运功率的增大, 输出的脉

冲宽度随之减小, 峰值功率随之增大. 当抽运功率依次增大到 44 mW, 51 mW, 56 mW, 97 mW 和 145 mW 时, 输出脉冲的脉宽 t_p 和单脉冲能量 J 分别为 6 $\mu\text{s}/0.025 \mu\text{J}$, 4.3 $\mu\text{s}/0.065 \mu\text{J}$, 2.6 $\mu\text{s}/0.095 \mu\text{J}$, 1.8 $\mu\text{s}/0.34 \mu\text{J}$ 和 1.1 $\mu\text{s}/0.63 \mu\text{J}$, 对应的脉冲峰值功率 P_{peak} 分别为 3.9 mW, 14.2 mW, 34.3 mW, 177.4 mW 和 537.8 mW. 计算过程中采用脉冲峰值功率公式:

$$P_{\text{peak}} = \left(\int_{t_1}^{t_2} I dt / \int_{T_1}^{T_2} I dt \right) \frac{P_{\text{ave}}}{f_R \Delta t}, \quad (4)$$

其中 I 为归一化强度, P_{ave} 为脉冲平均功率, f_R 为脉冲重复频率, t 与 T 如图 6(a) 所示.

需要说明的是, 当抽运功率在双稳态区间时, 相同抽运功率下输出的脉冲宽度存在差异. 例如, 当抽运功率为 53 mW 时, 如果激光器工作在图 5 中 A 点的 SLM 状态, 输出的脉宽和单脉冲能量分别为 4.1 μs 和 0.077 μJ , 对应的峰值功率约为 17.6 mW; 如果激光器工作在 B 点的 MLM 状态, 则输出的脉宽和单脉冲能量分别为 2.7 μs 和 0.083 μJ , 对应的峰值功率约为 28.9 mW. 这是因

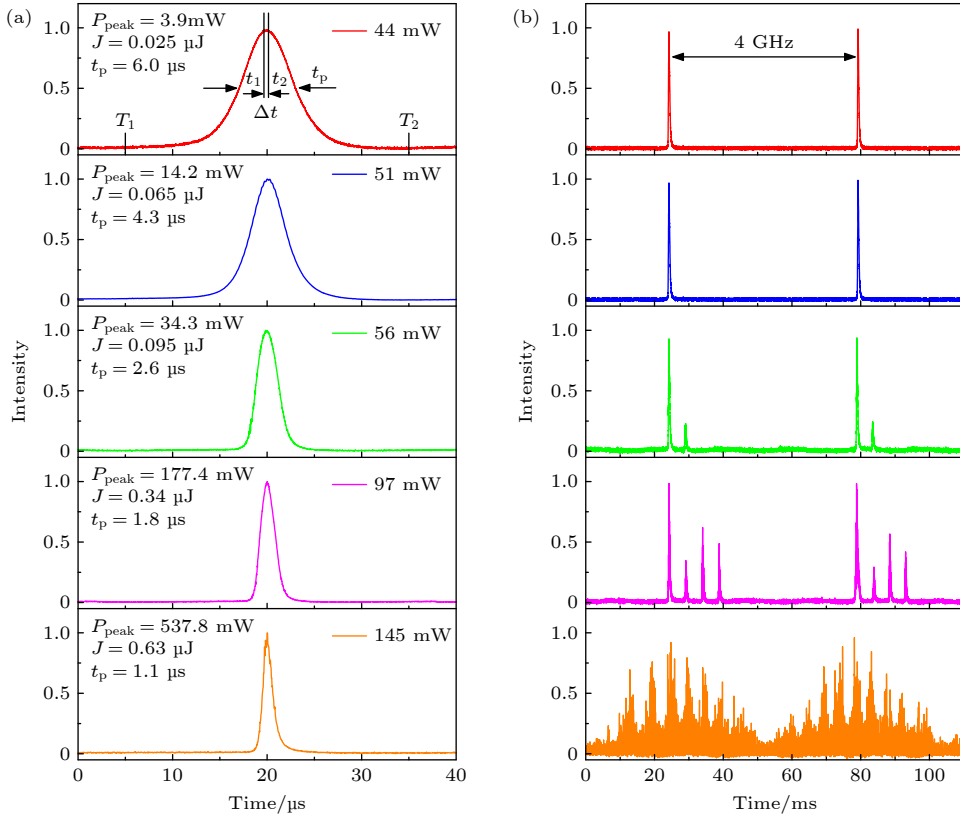


图 6 典型抽运功率下的 (a) 脉冲波形与 (b) 纵模特性

Fig. 6. (a) Pulse waveform and (b) longitudinal mode characteristic with typical pump power.

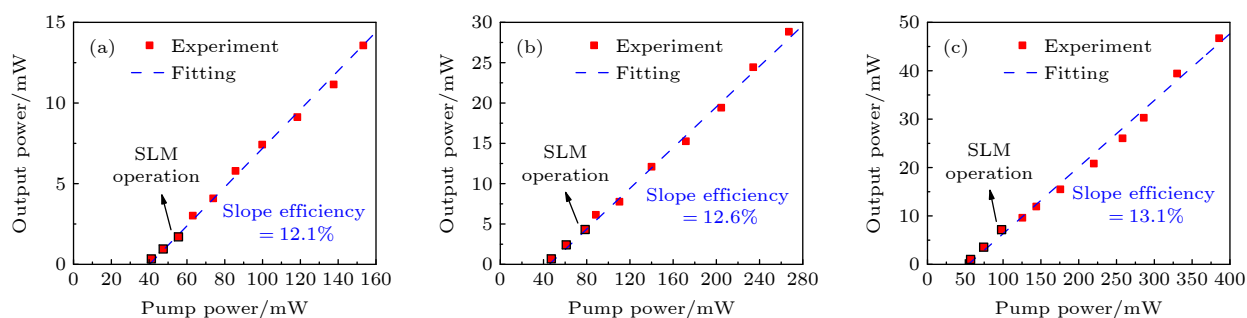


图 7 抽运重频分别为 (a) 20 kHz, (b) 40 kHz, (c) 60 kHz 时激光器输出功率随抽运功率的变化

Fig. 7. Output power of the laser versus pump power with pump repetition rates of (a) 20 kHz, (b) 40 kHz, (c) 60 kHz, respectively.

为在双稳态区间内, 动态光栅的强弱并不稳定, 并且受到上一时刻的激光峰值功率的影响; 同时, 动态光栅的强弱也会反过来影响谐振腔的特性, 进而影响脉冲激光的时域和功率特性. 如果进一步提高抽运功率, 使输出激光的峰值功率进一步提高, 则使动态光栅的完全无法建立. 例如, 当抽运功率为 145 mW 时, 输出脉冲的宽度降为 1.1 μ s, 峰值功率提高到 537.8 mW, 光谱线宽也增大到 2 GHz 左右.

3.3 功率特性

图 7 展示了在抽运源重频分别为 20 kHz, 40 kHz, 60 kHz 时激光器的输出功率随抽运功率的变化情况, 红色方块为实验数据, 蓝色虚线为拟合曲线. 可以发现, 随着抽运功率的增大, 不同抽运重频下激光器的输出功率均近似呈线性增长, 20 kHz, 40 kHz 和 60 kHz 下对应的斜率效率分别为 12.1%, 12.6% 和 13.1%, 对应的阈值功率分别为 40 mW, 45 mW 和 54 mW, 可见随着重频的提高, 激光器的斜率效率与阈值功率略有上升. 在较低抽运功率下, 未抽运的掺镱光纤可以形成有效的窄带动态光栅进行选频. 20 kHz, 40 kHz 和 60 kHz 下能够实现单频输出的最大抽运功率分别为 55.5 mW, 78.6 mW, 98.1 mW, 继续提高抽运功率, 激光器将工作在多纵模状态.

4 结论

提出了增益开关技术与未抽运掺镱光纤选模技术相结合实现窄线宽单频脉冲输出的方案, 通过信号发生器改变抽运激光的重复频率与脉宽, 利用未抽运掺镱光纤形成的动态光栅进行纵模选择, 在 1064 nm 处获得了重频 10—90 kHz、脉宽 4—8 μ s 的单频脉冲输出, 测得单频线宽约 23.5 MHz, 最大

单频脉冲输出峰值功率约 17.6 mW. 通过提升抽运功率可以缩短输出脉冲宽度至 1—4 μ s, 但是实验中动态光栅的选频机制有功率限制, 在较高抽运功率下获得的输出脉冲已无法保持单频状态. 该单频长脉冲激光器经过功率放大后, 有望在激光雷达、非线性频率转换、遥感探测等领域获得应用.

感谢王小林、张汉伟老师在实验中提供的帮助.

参考文献

- [1] Mo C, Chenyu W, Jianfei W, Hong L, Zhou M 2017 *Optics Express* **25** 19216
- [2] Wan Y, Wen J, Jiang C, Tang F, Wen J, Huang S, Pang F, Wang T 2021 *Photon. Res.* **9** 649
- [3] Guan X, Yang C, Tian Q, Wei L, Zhao Q, Tang G, Qian G, Qian Q, Yang Z, Xu S 2018 *Optics Express* **26** 6817
- [4] Wang K, Wen Z, Chen H, Lu B, Bai J 2021 *Optics Lett.* **46** 404
- [5] Shi W, Leigh M, Zong J, Jiang S 2007 *Optics Lett.* **32** 949
- [6] Liu Y, Liu J, Chen W 2011 *Chin. Optics Lett.* **9** 18
- [7] Shi W, Petersen E, Moor N, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2011 *Conference on Nanophotonics and Macrophotonics for Space Environments V* 2011
- [8] Su R, Zhou P, Xiao H, Wang X, Xu X 2012 *Appl. Optics* **51** 3655
- [9] He J, Lin D, Xu L, Beresna M, Zervas M N, Alam S-u, Brambilla G 2018 *Optics Express* **26** 6554
- [10] Lee W, Geng J, Jiang S, Yu A W 2018 *Optics Lett.* **43** 2264
- [11] Shi C, Tian H, Sheng Q, Shi W, Fang Q, Sun S, Zhang J, Deng X, Yao J 2021 *Results in Phys.* **28** 104594
- [12] Shi W, Petersen E B, Moor N, Chavez-Pirson A, Peyghambarian N 2011 *CLEO: 2011-Laser Applications to Photonic Applications* Baltimore, Maryland, May 1, 2011 pCThDD6
- [13] Zhang Y, Wang S, Lin W, Mo S, Zhao Q, Yang C, Feng Z, Deng H, Peng M, Yang Z, Xu S 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 052502
- [14] Li W, Zou J, Huang Y, Wang K, Du T, Jiang S, Luo Z 2018 *Photon. Res.* **6** 35
- [15] Zhao Q, Wu Z, Zhang Z, Lin W, Li C, Guan X, Tan T, Yang C, Cheng H, Gan J, Feng Z, Peng M, Yang Z, Xu S 2018 *Optics Express* **26** 17000
- [16] Zhou R, Shi W, Petersen E, Chavez-Pirson A, Stephen M, Peyghambarian N 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 2589
- [17] Li W, Liu H, Zhang J, Long H, Feng S, Mao Q 2016 *Applied*

- Optics* **55** 4584
- [18] Zhang Y, Yang C, Li C, Feng Z, Xu S, Deng H, Yang Z 2016 *Optics Express* **24** 3162
- [19] Li W, Liu H, Zhang J, Yao B, Feng S, Wei L, Mao Q 2017 *IEEE Photon. J.* **9** 1
- [20] Wang W, Qi H, Song Z, Guo J, Ni J, Wang C, Peng G 2020 *Opt. Commun.* **467** 125747
- [21] Geng J, Wang Q, Luo T, Case B, Jiang S, Amzajerdian F, Yu J 2012 *Optics Lett.* **37** 3795
- [22] Hou Y, Zhang Q, Qi S, Feng X, Wang P 2016 *Optics Express* **24** 28761
- [23] Poozesh R, Madanipour K, Parvin P 2019 *Optics Lett.* **44** 122
- [24] Fang S, Zhang Z, Yang C, Lin W, Cen X, Zhao Q, Feng Z, Yang Z, Xu S 2022 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **34** 255
- [25] Fei W, Deyuan S, Hao C, Dianyuan F, Qisheng L 2011 *Optical Rev.* **18** 360
- [26] Luan K P, Shen Y L, Tao M M, Zhu F, Huang C, Chen H W, Yi A P 2019 *Acta Optica Sin.* **39** 9 (in Chinese) [栾昆鹏, 沈炎龙, 陶蒙蒙, 朱峰, 黄超, 谌鸿伟, 易爱平 2019 *光学学报* **39** 9]
- [27] Larsen C, Hansen K P, Mattsson K E, Bang O 2014 *Optics Express* **22** 1490
- [28] Li Y, Huang L, Gao L, Lan T, Cao Y, Ikechukwu I P, Shi L, Liu Y, Li F, Zhu T 2018 *Optics Express* **26** 26896
- [29] Bai Y, Yan F P, Feng T, Han W G, Zhang L N, Cheng D, Bai Z Y, Wen X D 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 64 (in Chinese) [白燕, 延凤平, 冯亭, 韩文国, 张鲁娜, 程丹, 白卓娅, 温晓东 2019 *中国激光* **46** 64]
- [30] Zhang J, Sheng Q, Zhang L, Shi C, Sun S, Bai X, Shi W, Yao J 2021 *Optics Express* **29** 21409
- [31] Stepanov S, Fotiadi A A, Mégret P 2007 *Optics Express* **15** 8832
- [32] Pal D, Paul A, Chowdhury S D, Pal M, Sen R, Pal A 2018 *Appl. Optics* **57** 3546
- [33] Yin T, Song Y, Jiang X, Chen F, He S 2019 *Optics Express* **27** 15794

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser*

Zhang Wan-Ru Chen Si-Yu Su Rong-Tao[†] Jiang Man
 Li Can Ma Yan-Xing Zhou Pu

(College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 27 April 2022; revised manuscript received 17 May 2022)

Abstract

Single-frequency pulsed fiber lasers have aroused intense interest due to their excellent performances in terms of good coherence, compact structure and good beam quality, which have been widely used in different areas, such as coherent LIDAR, nonlinear frequency conversion, and remote sensing. In this paper, a linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser is reported. The narrow linewidth all-fiber oscillator is built by using an all-polarization-maintaining ring cavity structure. A section of unpumped polarization-maintaining ytterbium doped fiber is fused in the cavity as a saturated absorber to produce ultra-narrow bandwidth dynamic grating, which can be used for longitudinal mode selection. Thus, the laser can realize single-frequency operation. A 976-nm semiconductor laser is used as a pump source to generate a hybrid pump laser, which contains both pulsed component and continuous component. As a result, a long-pulse laser is achieved with a repetition rate of 10–90 kHz and a pulse duration of 1–8 μ s. At the same time, the effects of pump power and repetition rate on the time domain, the frequency domain and the power characteristics of the output laser are investigated. It is found that there is an optical bistability in the frequency domain characteristic of the output laser within a certain power range. And the influence of the laser power characteristic on the longitudinal mode selection mechanism of dynamic grating is analyzed. Finally, through parameter optimization, single-frequency pulsed fiber laser is achieved with a center wavelength of 1064 nm, a linewidth of about 23.5 MHz, a repetition rate of 10–90 kHz, a pulse duration of 4–8 μ s, and a polarization extinction ratio of about 29 dB.

Keywords: fiber laser, gain-switched, pulsed laser, single-frequency laser

PACS: 42.55.Wd, 42.60.Rn, 42.25.Ja, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.71.20220829

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62005316) and the Outstanding Innovative Youth Fostering Program of Changsha, China(Grant No. kq2106005).

[†] Corresponding author. E-mail: surongtao@126.com



增益开关线偏振单频脉冲光纤激光器

张万儒 陈思雨 粟荣涛 姜曼 李灿 马阎星 周朴

Gain switched linearly polarized single-frequency pulsed fiber laser

Zhang Wan-Ru Chen Si-Yu Su Rong-Tao Jiang Man Li Can Ma Yan-Xing Zhou Pu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 194204 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220829

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220829>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

国产长锥形光纤实现400 W单频单模激光输出

400-W single-mode single-frequency laser output from homemade tapered fiber

物理学报. 2021, 70(20): 204204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210682>

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

High-power narrow-linewidth single-frequency pulsed fiber amplifier based on self-phase modulation suppression via sawtooth-shaped pulses

物理学报. 2021, 70(21): 214202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210496>

基于等离激元纳米结构非线性响应的超快光开关及脉冲激光器

Ultrafast optical switches and pulse lasers based on strong nonlinear optical response of plasmon nanostructures

物理学报. 2020, 69(18): 189101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200456>

飞秒光纤激光相干合成技术最新进展

Recent progress of coherent combining technology in femtosecond fiber lasers

物理学报. 2021, 70(3): 034206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201683>

1064 nm固体激光器和光纤激光器在制备压缩真空态光场实验中的对比研究

Comparative study of squeezed vacuum states prepared by using 1064-nm solid-state and fiber-laser as pump source

物理学报. 2019, 68(12): 124201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182304>

窄线宽脉冲光纤激光的自相位调制预补偿研究

Self-phase modulation pre-compensation of narrowlinewidth pulsed fiber lasers

物理学报. 2018, 67(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180486>