

引用本文: 杨小亮, 韦佳天, 吕宏伟, 等. Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器[J]. 光通信技术, 2023, 47(5): 58–62.

Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器

杨小亮, 韦佳天, 吕宏伟, 陈 峰, 刘志强

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对特殊应用领域对高可靠性、轻量化、输出功率大于 100 mW、重频大于 50 MHz 的飞秒激光器的需求, 设计了一种 Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器, 通过在腔锁模振荡器中引入 $\pi/2$ 相移偏置, 降低了振荡器的自启动锁模阈值。实验结果表明: 当泵浦功率为 130 mW 时, 振荡器可获得平均功率为 12 mW、重频为 85.89 MHz、脉冲宽度为 249 fs 的稳定锁模脉冲序列输出; 采用一级正色后向泵浦散掺铒增益光纤放大器进行放大后, 最终可获得平均功率为 113 mW、脉冲宽度为 107 fs 的飞秒脉冲序列输出。

关键词: 保偏; Figure-9 腔; 激光器; 锁模; 非线性放大光纤环

中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2023)05-0058-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Figure-9 cavity mode-locked all polarization maintaining erbium-doped fiber femtosecond laser

YANG Xiaoliang, WEI Jiatian, LYU Hongwei, CHEN Feng, LIU Zhiqiang

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: A Figure-9 cavity mode-locked erbium-doped fiber femtosecond laser is designed to reduce the self-starting mode-locked threshold by introducing $\pi/2$ phase-shift bias into the cavity mode-locked oscillator to meet the need for high reliability, lightweight femtosecond lasers with output power greater than 100 mW and and repetition frequency greater than 50 MHz in special application fields. The experimental results show that the stable mode-locked pulse train output with average power of 12 mW, repetition frequency of 85.89 MHz and pulse width of 249 fs is obtained at the pump power of 130 mW. The output of femtosecond pulse sequences with a average power of 113 mW and a pulse width of 107 fs is obtained by using a stage of normal dispersion backward pumped erbium-doped fiber amplifier.

Key words: polarization maintaining, Figure-9 cavity, laser, mode-locking, nonlinear amplification fiber ring

0 引言

光纤飞秒激光器因具有高带宽、高峰值功率、高重频、超短脉冲持续时间等优良特性, 被广泛应用于光钟^[1]、中红外对抗超连续谱光源产生^[2]、微波光子学^[3]、工业微纳精细冷加工^[4]等领域。迄今为止, 基于半导体可饱和吸收反射镜(SESAM)、石墨烯等真实可饱和吸收体(SA)锁模^[5-6]以及基于非线性偏振旋转(NPR)、Lyot 滤波、非线性放大光纤环形镜(NALM)等虚拟可

收稿日期: 2023-07-11。

作者简介: 杨小亮(1989—), 男, 湖南衡南人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新型光纤激光种子源、主振荡器的功率放大器光纤激光系统、超快脉冲激光技术研究, 负责完成了国家级重点科技专项项目子课题 1 项, 省部级重大专项项目子课题 1 项。



饱和吸收体锁模机制^[7-10]均已成功用于构建光纤飞秒激光器。然而, SA 锁模存在损伤阈值低、寿命短的致命缺陷^[11]; NPR、Lyot 滤波锁模必须使用非保偏光纤与偏振控制器件来调控腔内的损耗机制, 对外部环境非常敏感^[12]。相比之下, NALM 锁模不依赖于可饱和吸收体等锁模器件且易于构建全保偏光纤架构, 在实现高可靠性与长期环境稳定性的飞秒光纤激光器方面具有天然的优势。全保偏光纤架构的 NALM 锁模机制主要有 2 种腔型, 分别是 Figure-8 腔型和 Figure-9 腔型。相较于 Figure-8 腔型, Figure-9 腔型在腔体结构简单化、自启动锁模、低成本以及轻量化方面更具优势^[13-14]。因此, 针对特殊应用场景要求重频大于 50 MHz、输出功率大于 100 mW 的飞秒激光器应具备高可靠性、轻量化的特点, 本文设计一种 Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器。

1 Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器设计

1.1 Figure-9 腔锁模机制

Figure-9 腔锁模光纤振荡器是从传统的“8 字”腔 NALM 锁模光纤振荡器演变而来, 它采用直线型腔臂替代“8 字”腔 NALM 锁模振荡器的次环腔, 形成了一种“9 字”型腔体结构^[13-14], 如图 1 所示。假定 1 束光 E_{in} 从线性臂输入, 通过 2×2 耦合器后分成 2 束相向传输的光信号。由于环内引入了光放大器, 2 束光在环内放大传输时会累积与光强度相关的非线性相移^[15] Φ_{NL} , $\Phi_{NL} = n_2 k_0 L |E|^2$ (n_2 为非线性折射率系数, k_0 为波矢量, L 为有效光纤长度, E 为光场强度), 最终返回至耦合器输出端发生干涉。干涉形成的反射谱取决于 2 束光的相移差, 该相移差与光强度相关, 不同的光强在非线放大光纤环内所积累的相移差会存在差异性, 进而表现出不同的反射率, 由此可构建与光强度相关的虚拟可饱和吸收体损耗机制以实现锁模。

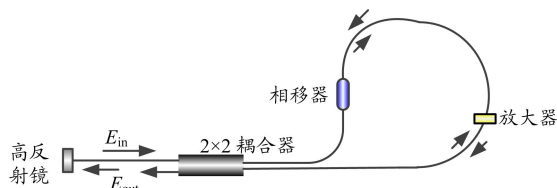


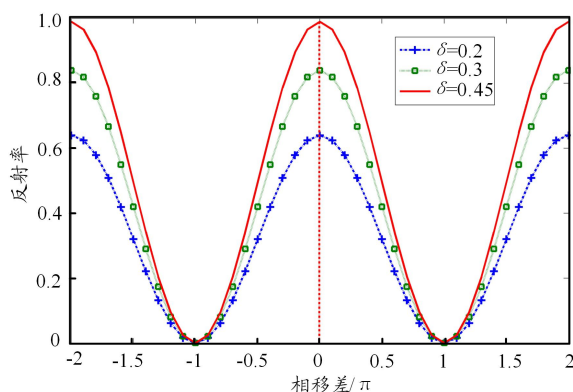
图 1 Figure-9 腔体结构示意图

1.2 Figure-9 腔非线性放大光纤环参数设计

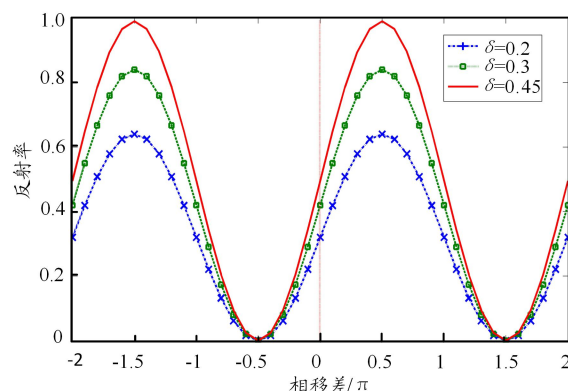
定义 2 束相向光在环内放大传输积累的非线性相移量分别为 $\delta \phi_1$ 、 $(1 - \delta) \delta \phi_2$, 其中 δ 为耦合器的分光比, ϕ_1 与 ϕ_2 为相移量, 则 2 束光累积的相移差 $\Delta \phi = (1 - \delta) \delta \phi_2 - \delta \phi_1$, 此时非线性放大光纤环的反射率^[16]可表示为

$$R = 2\delta(1 - \delta)[1 + \cos(\Delta \phi)] \quad (1)$$

由式(1)可知, 非线性放大光纤环的反射率 R 与耦合器的分光比 δ 、两相向传输光在环内累积的相移差 $\Delta \phi$ 息息相关。本文对反射率曲线进行了数值仿真研究, 以便于振荡器的设计优化, 仿真结果如图 2、图 3 所示。从图 2(a)可看出, 未引入相移偏置时, 在相移差 $0 \sim 0.5\pi$ 区间, 随着相移差的增大, 反射率呈下降趋势, 根据 1.1 节锁模机制可知, 相移差与光强度正相关, 此时振荡器内强光部分反射率低于弱光部分, 违背了可饱和吸收体锁模损耗机制。若要实现“强光漂白”的损耗机制, 振荡器内应提供反射率上升的正反馈区间, 对应于图 2(a)中的相移差区间为 $1\pi \sim 2\pi$ 。由于此时振荡器自启动锁模阈值较高, 因此可能无法实现正常的自启动锁模。从图 2(b)可以看出, 引入相



(a) 环内未引入相移偏置



(b) 环内引入相移偏置

图 2 不同分光比下环形镜反射率与相移差的关系

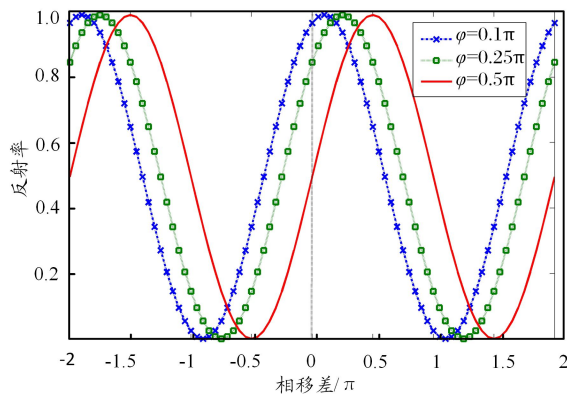


图 3 分光比为 0.45 时不同相位偏置下环形镜反射率与相移差的关系

移偏置后, 振荡器内需要的正反馈反射相移差区间为 $0 \sim 0.5\pi$, 这使得振荡器的自启动锁模阈值显著降低。此外, 从图 2 还可以看出, 在相同的相移差条件下, 分光比越大, 光纤环的反射率也越大, 这就意味着提供的腔内反馈更强, 更有利于锁模的实现。考虑到器件制作工艺无法实现绝对的分光比 $50 : 50$ ($\delta = 0.5$), 而分光比为 $45 : 55$ ($\delta = 0.45$) 的分束器技术成熟且易于实现, 因此本文设计的振荡器采用 $45 : 55$ 分光比。从图 3 可知, 相移偏置量为 0.1π 、 0.25π 时正反馈反射区

杨小亮, 韦佳天, 吕宏伟, 等: Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器

间较小,即可自启动锁模区间较小。这可能会导致振荡器实现自启动锁模的条件较苛刻。因此,本实验中振荡器引入 0.5π 相移偏置。1.3 激光器实验装置搭建

激光器实验装置如图4所示,主要由Figure-9腔锁模振荡器与全保偏光纤放大部分组成。整个装置采用全保偏器件与保偏光纤,以降低外界环境的干扰,提高激光器的稳定性。作为种子激光的振荡器,它由线性臂与非线性放大光纤环组成,通过一个分光比为45:55的 2×2 光纤耦合器连接构成一个谐振腔。振荡器光纤环内包括一个用于将泵浦光耦合进腔内的980/1550 nm波分复用器(WDM)、一段长度为0.6 m的掺铒增益光纤(Nlight, Er-80-PM)以及一个非互易性反射式 $\pi/2$ 相移器(PS);线性臂部分由高反射镜(HRM)与 2×2 光纤耦合器的55%端口熔接构成,耦合器另一端连接光纤隔离器(OI)作为输出端,OI的作用是防止输出端的端面反射干扰振荡器锁模的稳定运转。环内 $\pi/2$ PS为振荡器实现锁模的关键器件,其光路结构如图5所示。 $\pi/2$ PS是由准直镜(CM)、偏振分光棱镜(PBS)、法拉第旋转晶体(FR)、1/8波片(WP)、HRM与保偏光纤构成的高度集成化保偏光纤无源器件。两保偏光纤的慢轴分别对准PBS的p光与s光方向,1/8 WP的光轴与光纤慢轴夹角为 45° 。在光纤环内顺时针方向,线偏振光沿PBS的p光方向注入,经FR后偏

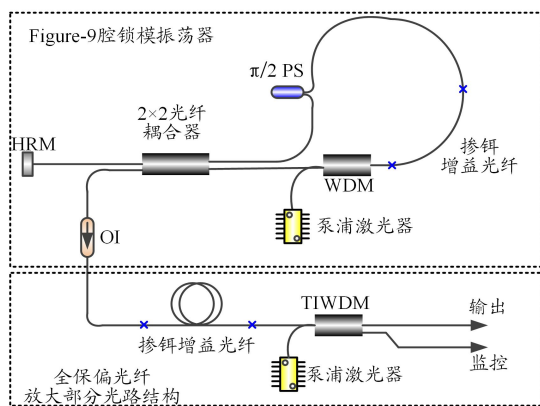


图4 激光器实验装置

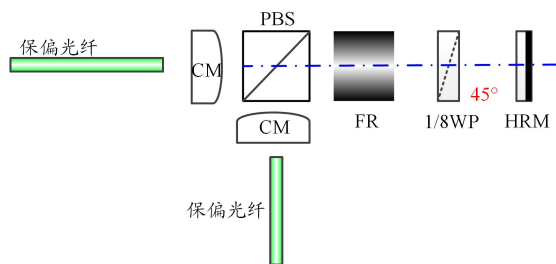


图5 $\pi/2$ PS光路结构

转 45° ,此时光的偏振方向与1/8 WP光轴平行,经HRM反射后原路返回通过1/8 WP,最后经FR再偏转 45° ,此时光的偏振方向与PBS的s光方向平行。光纤环内逆时针方向的光信号同样如此,这样两相向传输光信号会产生一个固定的 $\pi/2$ 相位差,相当于在振荡器的光纤环内引入了一个固定的 $\pi/2$ 相移偏置。

整个振荡器腔体为色散管理腔,腔内光纤总长度约2.03 m,总光程约为2.33 m,腔内无源光纤为常规PM1550光纤(Nufern, PM1550),腔内净群速度色散量(GVD)约为 -0.0228 ps^2 。

图4中的全保偏光纤放大部分光路主要由掺铒增益光纤与隔离分束波分复用器(TIWDM)组成。TIWDM是由WDM、OI与光纤耦合器等分立器件高度集成化的器件,缩减了通过分立器件熔接构成的光路长度,便于在输出末端通过控制光纤长度进行脉冲压缩。放大部分的增益光纤选用与振荡器中同型号的正群速度色散掺铒光纤,有利于超短激光脉冲进行时域拉伸放大,增益光纤长度为1.6 m。

2 实验结果与分析

本文首先对振荡器非线性放大光纤环内的掺铒增益光纤位置进行了实验研究。增益光纤被分别设置在靠近耦合器45%端口、光纤环中心对称位置和靠近耦合器55%端口。实验发现,在环内光程一致的情况下,增益光纤靠近耦合器45%端口时,自启动锁模阈值远高于增益光纤靠近耦合器55%端口的情况。然而,当增益光纤处于光纤环中心对称位置时,无法实现锁模。这是因为非线性相移量不仅与光的强度成正比,而且会随着传输距离的增加而增加。当增益光纤靠近耦合器45%端口或处于光纤环中心对称位置时,高分光比光信号放大后要么传输距离较短,要么与放大后的低分光比光信号传输距离一致,导致两束相向传输的光在环内积累的相移差较小。这种相移差的较小值反映在图3中的反射率(红色曲线)偏低,不利于脉冲在腔内的振荡与锁模实现。

将增益光纤设置在靠近耦合器55%端口,在泵浦功率为280 mW时,振荡器实现自启动锁模,此时振荡器工作在多脉冲状态,输出光谱呈现连续的梳齿包络,这是典型的束缚态孤子脉冲。当泵浦功率逐步下调至170 mW时,振荡器开始出现单脉冲锁模运转,单脉冲锁模稳定运转的泵浦功率区间为120~170 mW。当泵浦功率为130 mW时,脉冲重频为85.89 MHz,3 dB光谱带宽

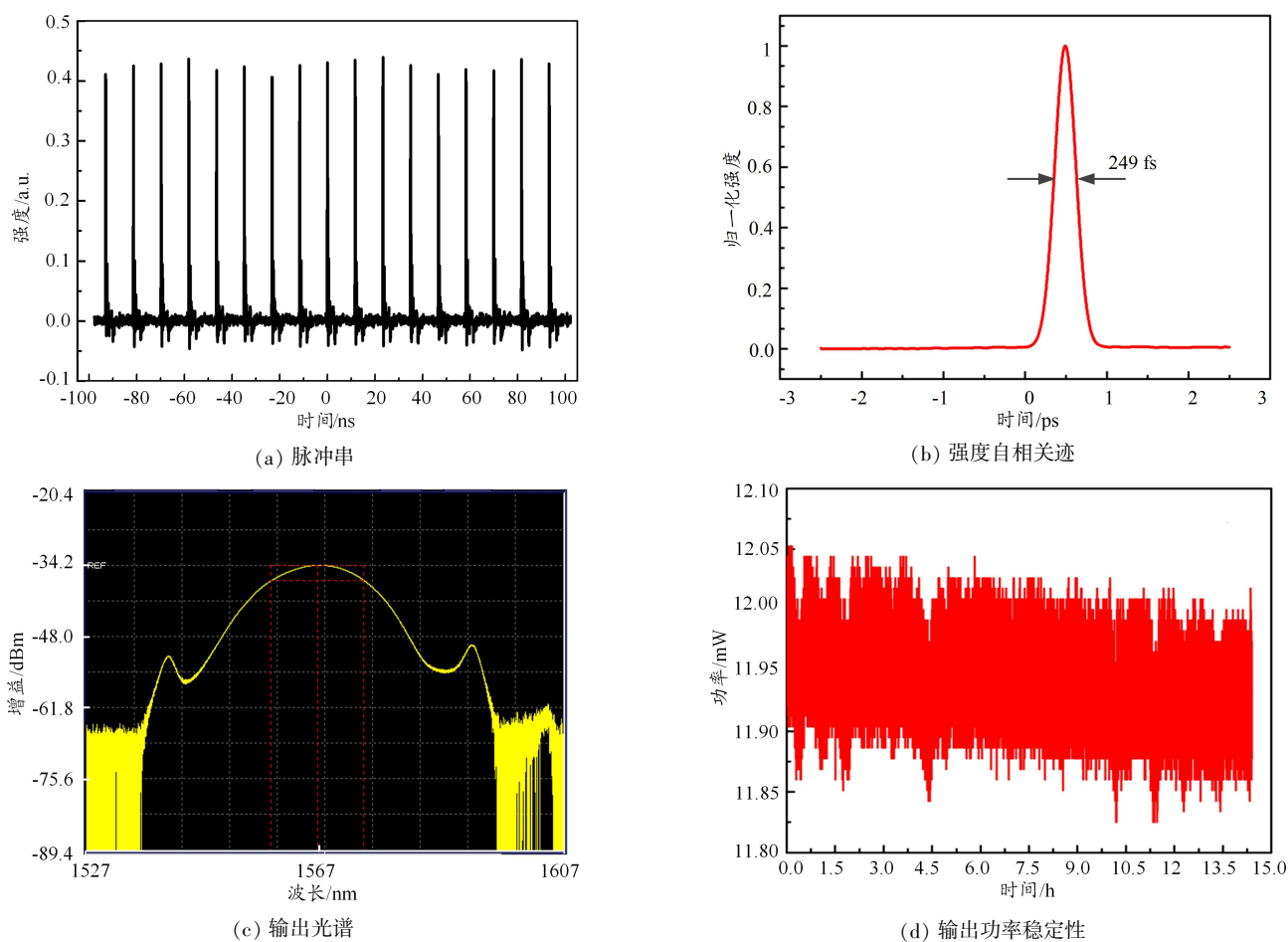


图6 振荡器输出结果

为 15.6 nm, 具体输出结果如图 6 所示。其中, 图 6(a) 为输出时域脉冲串, 其时域稳定性较好。图 6(b) 为脉冲强度自相关迹, 脉宽为 249 fs (高斯拟合), 可通过计算得到激光单脉冲能量为 0.14 nJ, 时间带宽积约为 0.475, 接近于傅里叶变换极限高斯型脉冲。从图 6(c) 中可以看出, 激光脉冲中心波长为 1565.81 nm, 输出光谱存在明显的克尔边带, 显示出负色散腔孤子锁模激光器的典型特征, 由色散波与非线性相互作用演变而来。为了评估振荡器输出功率稳定性, 本文在实验室室温条件下对振荡器连续测试了 15 h, 得到测试结果如图 6(d) 所示。可以看出, 振荡器的输出功率主要集中在 11.9~12.0 mW, 稳定性较好。此外, 本文对振荡器进行了 100 余次开关切断重启实验, 每次实验均能实现自启动锁模。

由于振荡器输出的种子激光脉冲平均功率较低, 因此采用一级后向泵浦正色散增益光纤放大器对其进行放大, 这样能够承受更大的非线性相移, 更有利于脉冲能量的提取。随着放大器泵浦功率的增加, 激光输出光谱产生了明显的展宽, 光谱展宽量大于 3 dB。继续

增加泵浦功率至 550 mW, 此时放大器处于饱和放大状态, 其输出平均功率为 113 mW, 相应的单脉冲能量为 1.3 nJ。使用常规 PM1550 光纤进行非线性压缩, 并在输出端采用自相关测试仪测量其强度自相关曲线。当逐步缩短光纤长度至 0.6 m 时, 测得激光脉冲宽度约为 107 fs。具体结果如图 7 所示。从自相关仪的测试结果可以看出, 压缩后的激光脉冲强度自相关迹曲线

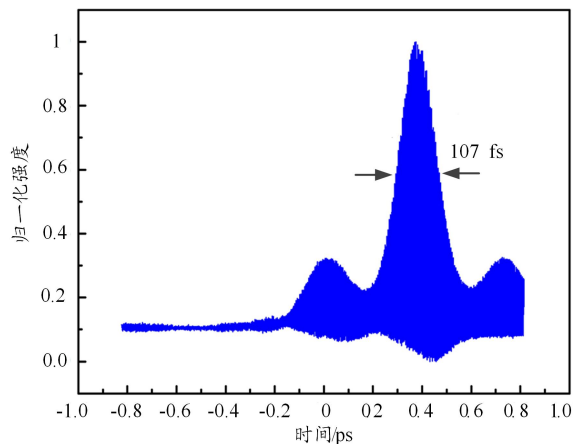


图7 压缩后的输出激光脉冲的强度自相关迹

杨小亮, 韦佳天, 吕宏伟, 等: Figure-9 腔锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器

呈现出了明显的基座,这是由于在放大压缩过程中过量的非线性相移积累和高阶色散增强所导致的。

3 结束语

本文设计并构建了一种基于 Figure-9 的锁模全保偏掺铒光纤飞秒激光器。该激光器能够产生脉冲重复频率为 85.89 MHz 的稳定锁模激光脉冲序列。经过一级正色散掺铒光纤放大器放大后,激光器的平均输出功率达到 113 mW。经过光纤压缩后,脉冲宽度为 107 fs。这种激光器采用全保偏光纤元器件,结构简单,具有良好的环境适应性,有望满足时频信号传递光钟、中红外对抗、微波光子学等领域的应用需求。

参考文献:

- [1] KIM J, SONG Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency comb: principles, status, and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465–540.
- [2] 杨林永, 张斌, 侯静. 高功率 3~5 微米波段超连续谱光纤激光研究进展[J]. *中国激光*, 2022, 49(1): 11–32.
- [3] TOKEL O, TUMAL A, MAKEY G, et al. In-chip microstructures and photonic devices fabricated by nonlinear laser lithography deep inside silicon[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(10): 639–645.
- [4] ZHU Z W, LIU Y. Low-noise, robust, all-polarization-maintaining mode-locked Er-doped fiber ring laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(12): 1139–1142.
- [5] ZHU Z, LIU Y, LUO D, et al. Tunable optical frequency comb from a compact and robust Er: fiber laser [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8(2): 60–65.
- [6] 郑佳琪, 丛振华, 刘兆军, 等. 高重复频率超短激光脉冲产生及频率变换技术发展[J]. *中国激光*, 2021, 48(12): 126–146.
- [7] LIU C, WU Q, YAO Y, et al. Dissipative-soliton-resonance generation in anomalous-dispersion fiber lasers based on spectral filtering effect[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2020, 224(2): 165387-1–165387-6.
- [8] LIU Z, ZIEGLER Z M, WRIGHT L G, et al. Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator[J]. *Optica*, 2017, 4: 649–650.
- [9] CHO S B, SONG H, GEE S, et al. Self-starting passive mode-locked ytterbium fiber laser with variable pulse width[J]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7580: 75802C-1–75802C-11.
- [10] ZHOU J Q, QI W, PAN W W, et al. Dissipative soliton generation from a large anomalous dispersion ytterbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(20): 5768–5771.
- [11] WALTER F U, LOGANG W R, PAVEL S I, et al. Several new directions for ultrafast fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9432–9463.
- [12] HNSEL W, HOOGLAND H, GIUNTA M, et al. All polarization-maintaining fiber laser architecture for robust femtosecond pulse generation[J]. *Applied Physics B Lasers & Optics*, 2017, 123(1): 1–6.
- [13] JIANG T X, CUI Y, LU P, et al. All PM fiber laser mode locked with a compact phase biased amplifier Loop mirror[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(16): 1786–1789.
- [14] LI X, ZHOU J Q, CHENG Z, et al. Generation of 978 nm dispersion-managed solitons from a polarization-maintaining Yb-doped figure-of-9 fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(11): 3051–3054.
- [15] AGRAWAL G P. *Nonlinear Fiber Optics* [M]. New York: Academic Press, 2013.
- [16] MORSE J L, SICKLER J W, CHEN J, et al. High repetition rate, high average power, femtosecond erbium fiber ring laser [C]//*Lasers and Elec-*