

引用本文: 吕宏伟, 李宝琳, 韦佳天, 等. 高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展[J]. 光通信技术, 2024, 48(4): 1-8.

高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展

吕宏伟¹, 李宝琳², 韦佳天¹, 李晓晖¹, 邢宇鹏¹, 金奇¹, 杨万里¹, 谢宝荣¹, 杨小亮¹

(1. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004; 2. 桂林电子科技大学, 广西 桂林 541004)

摘要: 被动谐波锁模(HML)技术作为一种快速提高光纤激光器输出脉冲重复频率的有效方法, 显著提升了光纤激光器的输出脉冲重复频率。该技术通过在激光器内部集成参数可调的可饱和吸收体, 实现了高阶谐波输出, 从而大幅提高了脉冲重复频率。综述了目前被动 HML 光纤激光器中常用的几类可饱和吸收体, 详细阐述了它们的技术原理及优势, 并分析了国内外该领域的最新技术进展。最后, 指出了被动谐波锁模光纤激光器的未来发展趋势。

关键词: 高重复频率脉冲; 谐波锁模; 研究进展

中图分类号: TN91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)04-0001-08

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.04.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research progress of high repetition rate passive harmonic mode-locked fiber lasers

LYU Hongwei¹, LI Baolin², WEI Jiatian¹, LI Xiaohui¹, XING Yupeng¹, JIN Qi¹,

YANG Wanli¹, XIE Baorong¹, YANG Xiaoliang¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: Passive harmonic mode-locking(HML) technology, as an effective method for rapidly increasing the output pulse repetition frequency of fiber lasers, significantly improves the output pulse repetition frequency of fiber lasers. This technology achieves high-order harmonic output by integrating parameter adjustable saturable absorbers inside the laser, thereby significantly increasing the pulse repetition frequency. This paper summarizes several commonly used types of saturable absorbers in passive HML fiber lasers, elaborates on their technical principles and advantages, and analyzes the latest technological progress in this field at home and abroad. Finally, this paper points out the future development trend of passive harmonic mode-locked fiber lasers.

Key words: high repetition frequency pulses, harmonic mode-locking, research progress

0 引言

高重复频率锁模光纤激光器凭借其高脉冲重复频率和短脉冲宽度的优势, 在科学研究、生物医疗和精密制造等领域展现出了巨大的潜在应用价值^[1-3]。由于激光器腔长的限制, 激光器的基频脉冲重复频率通

常被限制在 GHz 级别以下。通过增大入射泵浦功率, 谐波锁模(HML)技术能够产生多脉冲, 进而显著提高激光器的脉冲重复频率, 因此 HML 技术成为了一种快速提高输出脉冲重复频率的有效方法^[4]。HML 光纤激光器工作原理描述如下: 谐振腔内的激光主要被分为孤子脉冲和非孤子脉冲两部分。当激光脉冲在谐振腔内传播时, 由于腔内非线性色散的相互作用, 脉冲的形状及宽度会自动演化为孤子脉冲。单孤子脉冲的峰值功率受限于孤子面积理论^[5]和峰值功率钳制效应^[6]。若进一步增加泵浦光功率, 脉冲将累积过多的非线性相移, 导致单脉冲分裂为多脉冲, 通常表现为脉冲团簇形式, 其中脉冲的间隔和幅度各异。此时, 通过调节偏振控制器(PC)来控制激光脉冲的偏振态, 可改

收稿日期: 2024-01-22。

基金项目: 广西重点研发计划(合同号: MY2326001)资助。

作者简介: 吕宏伟(1982—), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为新型光纤激光器及主振功率放大器光纤激光系统。负责完成了数十项国家级及地方级重大科技专项项目, 研究成果在国家某科学装置的工程建设任务中得到推广与应用。

* 通信作者: 韦佳天(1989—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为新型光纤激光器及单频光纤激光系统。



吕宏伟,李宝琳,韦佳天,等:高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展

变腔内增益、色散波与孤子间的相位差,从而实现多脉冲在谐振腔内以相同幅度和相同间隔运转,进而形成 HML 状态。2019 年,浙江大学 LIU X M 等人^[7]对 HML 状态的形成进行了深入研究,发现其过程涵盖了多个阶段,包括弛豫振荡、拍频动力学过程、单个巨脉冲的产生、自相位调制引发的脉冲不稳定性、单脉冲分裂为多脉冲以及多脉冲间的相互排斥与分离,最终形成稳定的 HML 状态。非孤子脉冲中包含的色散波^[8]、声波^[9]以及增益损耗和恢复过程^[10],在 HML 状态形成的前期、中期和后期,分别主导着相邻脉冲间的斥力,诱导多脉冲以相同的幅度和间隔在谐振腔内运转。目前,产生高阶谐波主要采用以下 2 种方法:一是当谐振腔内的非线性系数和色散系数恒定时,通过提高入射谐振腔的泵浦光功率,可以诱导单脉冲劈裂为多脉冲,进而产生高阶谐波;二是当谐振腔内泵浦光功率保持不变时,通过增强腔内非线性系数或减小色散系数,同样可以实现单脉冲的劈裂并产生高阶谐波。其中,被动 HML 技术具有重复频率自稳定 and 无需添加额外的主动调制器件^[11-12]的优势,仅通过改变增益材料本身的非线性效应或者可饱和吸收体(SA)的吸收特性就可以在激光器中实现高重复频率锁模脉冲输出,这极大地提升了 HML 激光器的可设计性。与主动 HML 技术相比,被动 HML 光纤激光器的结构设计更为紧凑。

为了进一步理解被动 HML 光纤激光器的前沿研究及应用,本文综述基于低维纳米材料 SA^[13-14]、非线性偏振旋转(NPR)^[15-16]、非线性多模干涉(NL-MMI)^[17-19]及 Mamyshev 振荡器^[20]等技术的被动 HML 光纤激光器研究进展,阐述各自的原理及技术优势,并对被动 HML 光纤激光器的应用前景及发展趋势进行展望。

1 被动 HML 光纤激光器技术分析

1.1 基于低维纳米材料 SA 技术

低维纳米材料具有结构简单、制造成本低及光学非线性性能优异等特点,因此非常适合作为锁模激光器的 SA。低维纳米材料对激光的吸收系数会随着入射泵浦激光强度的增大而减小。当入射泵浦光强度较低时,低维纳米材料吸收光子但未达到饱和状态,因此光透过率较低;当入射泵浦光强度较高时,材料的吸收逐渐达到饱和状态,当达到饱和值时光透过率达到最大,此时利用 SA 的可饱和吸收特性则可对激光器腔内的损耗进行调制,从而产生超短脉冲。目前,低维纳米材料族有碳纳米管(CNT)、石墨烯、过渡金属二卤

族化合物、黑磷(BP)、拓扑绝缘体(TI)等。

1) CNT 作为低维纳米材料的先驱,推动了纳米科学和技术的飞速发展。2004 年, SZE Y S 等人^[21]首次将单壁碳纳米管(SW-CNT)用于掺铒光纤激光器中,最终实现了脉冲宽度为 1.1 ps 的超短脉冲输出。2011 年,韩国科学技术院的 YEOM D-I1 课题组^[22]将 SW-CNT 涂覆在具有大倏逝场的 D 形侧抛光纤上,形成了一个新型 SA,并基于此 SA 在掺铒光纤激光器内产生了高阶谐波。该激光器在泵浦功率为 7 mW 时实现了重复频率为 27.74 MHz 的基频锁模脉冲输出;当泵浦功率提升到 195 mW 时,产生了相对强度噪声为 -140 dBc/Hz、信噪比(SNR)为 75 dB、谐波阶次为 34 阶、重复频率为 943.16 MHz 的 HML 脉冲。此外,研究表明通过旋转腔内 PC,可改变基阶孤子脉冲能量以促进脉冲分裂,最终产生了谐波阶次为 61 阶、重复频率为 1.692 GHz 的 HML 脉冲,但激光器的稳定性也有所下降,相对强度噪声减小为 -120 dBc/Hz。次年,该课题组^[23]使用同样的激光器结构,通过控制腔内单模光纤(SMF)的长度来改变腔内色散,进而控制腔内孤子脉冲能量,促进脉冲分裂。最后,将激光器的泵浦功率效率提升到了 13 MHz/mW,并在泵浦功率为 400 mW 时实现了 SNR 为 40 dB、谐波阶次为 128 阶、重复频率为 5 GHz 的谐波脉冲输出。2019 年,上海大学的 MOU C B 课题组^[24]在掺铒光纤激光器中基于 CNT 实现了锁模,之后他们通过改变 SMF 的长度优化了腔内色散,从而有效管理了单脉冲能量。最终,在泵浦功率为 205 mW 的条件下,成功实现了中心波长为 1 597.53 nm、谐波阶次为 201 阶且重复频率为 2.08 GHz 的 HML 脉冲输出。2021 年,该课题组同样使用 CNT 作为锁模 SA,并通过改变高非线性光纤(HNLF)的长度,探索了腔内非线性系数对 HML 的影响,成功将该激光器的泵浦效率提升到了 19 MHz/mW,最终,在泵浦功率为 280 mW 的条件下,实现了中心波长为 1 563.28 nm、光谱宽度为 3.35 nm、脉冲宽度为 936 fs、谐波阶次为 91 次、重复频率为 4 GHz 的谐波脉冲输出^[27]。实验结果表明,较大的非线性系数有助于提高谐波阶数。然而,如果非线性系数过大,则可能导致一些特殊的多脉冲模式,例如噪声脉冲^[25]和孤子雨^[26]等现象。

2) 石墨烯不仅具有高机械强度,还拥有高三阶非线性系数和高载流子迁移率,这些特性使得它成为产生高阶 HML 的理想材料^[28]。2012 年,弗罗茨瓦夫理工大学的 SOBON G 等人^[29]提出了基于多层石墨烯 SA 的掺铒 HML 光纤激光器。通过增加入射泵浦功率,该激

光器在 230 mW 的泵浦功率下成功产生了脉冲宽度为 900 fs、SNR 为 40 dB、谐波阶次高达 21 阶、重复频率为 2.22 GHz 的优质谐波脉冲。

3)过渡金属二卤族化合物具有与石墨烯相同的高阶非线性吸收特性,可以应用于超快激光领域。2014 年,华南师范大学的 XU W C 课题组^[30]将薄层 MoS₂ 沉积在锥腰直径为 11 μm 的微纳光纤(MNF)上,形成了 MoS₂ SA。在掺铒光纤激光器中,当泵浦功率达到 181 mW 时,成功输出了脉冲宽度为 3.0 ps、谐波阶次为 369 阶、重复频率为 2.5 GHz 的谐波脉冲。实验结果表明,基于 MNF 的 MoS₂ SA 是一种具有较高光学非线性和饱和吸收性能的锁模器件。

4)BP 的光学特性与石墨烯很相似,因此被认为是能与石墨烯相媲美的二维材料。此外,其带隙为直接带隙且可调,带隙可从 0.3 eV 改变为 2 eV,这一特性引起了学者们的广泛关注。2015 年,YU H 等人^[31]首次将 BP 纳米片沉积在锥腰直径为 10 μm 的 MNF 上,形成了 BP SA。在铈/钛掺杂光纤激光器中,当泵浦功率达到 510 mW 时,成功实现了重复频率为 705.9 MHz 的 37 阶 HML 脉冲输出。

5)TI 具有独特的光电及非线性光学特性,随着薄膜制备工艺的发展,TI 被广泛用于光纤激光器中^[32]。Bi₂Te₃ 作为 TI 材料之一,其内部结构类似于石墨烯中的“狄拉克锥”带隙结构,且该结构便于载流子的跃迁;同时,其三阶非线性系数比石墨烯高出 4 个数量级^[33-34],因此它非常适合用于产生 HML 脉冲输出。2013 年,华南师范大学的 LOU Z C 课题组^[35]首次成功将 Bi₂Te₃ 沉积在锥腰直径为 12 μm 的 MNF 上,制备得到了 TI SA 锁模器件。随后,他们将这一器件放入掺铒光纤激光器中,经过一系列实验和测试,最终在泵浦功率为 126 mW 时实现了脉冲宽度为 2.49 ps、谐波阶次为 418 阶、重复频率为 2.04 GHz 的高阶谐波脉冲输出。该实验结果首次证明了 TI 同时具有高非线性和饱和吸收效应。2015 年,深圳大学的 YAN P 课题组^[36]采用激光脉冲沉积法将 Bi₂Te₃ 沉积在锥腰直径为 54 μm 的 MNF 上,形成了具有高非线性的 TI SA,并将此 TI SA 放进掺铒光纤激光器中,在入射泵浦功率为 395 mW 时,通过调节 PC 获得了输出功率为 45.3 mW、脉冲宽度为 920 fs、谐波阶次为 170 阶、重复频率为 2.95 GHz 的谐波脉冲输出。2022 年,长春理工大学的 WANG Y J 课题组^[37]使用溶胶-凝胶技术将 Bi₂Te₃ 纳米片包裹在 SiO₂ 中有效提升了 Bi₂Te₃ 纳米片的抗损伤阈值,并在掺铒光纤激光器中实现了超短脉冲输出。最终,在泵浦功率

为 395 mW 时,产生了谐波阶次为 119 阶、重复频率为 2.84 GHz 的 HML 脉冲输出。

综上所述,低维纳米材料具有结构简单、制造成本低及高三阶非线性系数等优点,可在锁模光纤激光器中实现高阶谐波脉冲输出。但纳米材料易受环境湿度影响且抗损伤阈值较低,常涂覆于 D 型侧抛光纤、MNF,或嵌入具有高损伤阈值的介质中以提高其抗损伤阈值。因此,研制具有不易受环境温湿度影响、高损伤阈值、低制造成本和长使用寿命的低维纳米材料 SA,成为了一个亟需且值得研究人员深入研究的问题。

1.2 基于 NPR 技术

NPR 锁模具有抗损伤阈值高、响应时间快、调制深度大等优点,一直是超短脉冲光纤激光器的研究热点。近年来,NPR 常被应用在环形腔中,通过结合 HML 技术,产生高重复频率。NPR 通常由 2 个 PC 和 1 个偏振相关隔离器构成。其中,偏振相关隔离器被用作起偏器,以产生单向线性偏振光。同时,2 个 PC 用于调整超短脉冲进出起偏器时的偏振态,从而起到等效 SA 的作用。超短脉冲在激光器内进行多次循环传输后,最终实现超短脉冲输出。

1992 年,南安普顿大学的 MATSAS V J 等人^[38]首次将掺铒光纤激光器中基于 NPR 实现了光谱宽度为 1.7 nm、脉冲宽度为 1.55 ps 的超短脉冲输出。此外,通过控制 PC 进而改变腔内的双折射,观察到了双波长及波长可调谐现象。此次实验结果标志着光纤激光器的研究进入了一个新时代。2016 年,中国科学技术大学的 TAO S 等人^[39]在掺铒 NPR 锁模光纤激光器中,通过在其谐振腔内加入 HNLF,增强了腔内的非线性系数;同时,通过调整 SMF 的长度,有效控制了腔内色散系数。最终,在入射泵浦功率为 485 mW 的条件下,该激光器实现了 SNR 高达 40 dB、谐波阶次为 2 192 阶、重复频率为 22.132 GHz 的稳定脉冲输出。

近年来,随着具有小芯径、高非线性的光子晶体光纤(PCF)的出现,使得光电子技术出现了新的生机。2013 年,德国马克斯普朗克光科学研究所的 RUSSELL P S J 课题组^[40]首次将长度为 15 m、纤芯直径为 1.8 μm 的 PCF 加入到掺铒 NPR 锁模光纤激光器。该激光器在泵浦功率为 60 mW 时,实现了脉冲宽度为 130 ps、谐波阶次为 337 阶、重复频率为 1.8 GHz 的谐波脉冲输出。2015 年,RUSSELL P S J 课题组^[41]在掺铒光纤激光器中仅使用长度为 60 cm、纤芯直径为 1.8 μm 的 PCF,在泵浦功率为 670 mW 时获得了脉冲宽度为 2 ps、谐波阶次为 126 阶、重复频率为 2.122 GHz、脉冲幅度

吕宏伟,李宝琳,韦佳天,等:高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展

噪声小于 2.5% 的稳定脉冲输出。同年 9 月,该课题组^[42]在掺铒 NPR 锁模光纤激光器内插入了一个法布里-珀罗可调滤波器,使得激光器的光谱在 1 532~1 566 nm 波段实现了连续可调谐。除此之外,该掺铒 NPR 锁模光纤激光器基于长度为 2 m、纤芯直径为 2 μm 的 PCF,在泵浦功率为 1.6 W 时产生了脉冲幅度噪声小于 0.2%、谐波阶次为 389 阶、重复频率为 1.882 6 GHz 的稳定 HML 脉冲。2016 年 9 月,RUSSELL P S J 课题组^[43]首次在掺铒光纤激光器中使用长度为 0.6 m、纤芯直径为 1.76 μm 、芯中心的纳米孔直径为 0.56 μm 的 PCF,最终在泵浦功率为 500 mW 时实现了谐波阶次为 52 阶、重复频率为 1.446 GHz 的 HML 脉冲输出。2019 年 3 月,RUSSELL P S J 课题组^[44]将长度为 2 m 的实心 PCF 进行锥化后放置进掺铒光纤激光器中,最终在泵浦功率为 700 mW 时,得到了谐波阶次可调范围为 194~198 阶、重复频率可调谐范围为 2.042~2.108 GHz 的高阶谐波脉冲输出。经过锥化处理的 PCF 纤芯,其光声相互作用显著增强,光声增益带宽扩大至 47 MHz,这一数值是未锥化前的 3 倍。

2020 年 6 月,浙江大学的 LIU X M 课题组^[45]将锥腰长度为 16 cm、直径为 1.56 μm 的 MNF 加入到掺铒 NPR 锁模光纤激光器中。实验结果表明,在泵浦功率分别为 310 mW 和 260 mW 时,脉冲重复频率分别可以锁定在 2.382 8 GHz(对应第 300 阶谐波)和 1.785 2 GHz(对应第 224 阶谐波),分别对应于 MNF 中 R_{01} 和 TR_{21} 的声模频率,此次实验结果证实了在 MNF 中可通过增强光声共振实现 HML。

综上所述,基于 NPR 锁模的 HML 主要通过谐振腔内增加高非线性材料(如 PCF 或 MNF)来增强非线性系数,从而实现 HML。虽然 NPR 具有高抗损伤阈值、响应时间快及调制深度大等优点,但是其在应用过程中也存在一些挑战。例如,锁模状态较易受到外界环境的干扰,一旦失锁且未及时恢复,可能会导致后级系统损坏。目前,智能锁模技术和偏振控制技术的发展显著增强了 NPR 锁模光纤激光器中的偏振控制调节能力,进而大幅提升了激光器的稳定性,对 NPR 锁模光纤激光器的进一步发展产生了深远影响^[46]。

1.3 基于 NL-MMI 技术

NL-MMI 技术采用具有抗损伤阈值高、制造简单及价格低廉等优点的多模光纤(MMF)作为核心锁模器件,成为了近年来 SA 研究的重点。渐变折射率多模光纤(GIMF)和阶跃折射率多模光纤(SIMF)均可作为锁模器件使用。其中,GIMF 的耦合效率相对于 SIMF

更为优异^[47]。当光束通过 MMF 时,会激发其内部大量的高阶模式。通过调整入射光束的光强,可以有效调节非线性效应的强度,进而改变自成像点拍长,实现非线性可饱和吸收特性。此外,微调 MMF 的长度也能对可饱和吸收特性产生影响。

2013 年,威斯康星大学的 MAFI A 和 NAZEMOS-ADAT E^[17]对 NL-MMI 进行了理论研究,并证实单模光纤-渐变折射率 MMF-单模光纤结构(SMS)可作为 SA 使用。自此之后,基于 NL-MMI 的激光器引起了科学家们广泛研究,并已成功应用于锁模^[48-50]、耗散孤子锁模^[51-52]及调 Q 激光器^[53]中。

2018 年,中国计量大学的 WANG Z K 课题组^[54]使用氢氟酸在 GIMF 前端面刻蚀了一个深度为 45 μm 的微腔,并在其两端熔接了 SMF 形成 SA。由于微腔的存在,当光束进入渐变折射率 MMF 时,能够激发出更多的高阶模式,这极大地促进了可饱和 SA 实现其可饱和吸收特性的能力。当泵浦功率为 92.3 mW 时,在掺铒光纤激光器中实现了重复频率为 14.34 MHz 的基频锁模。此外,通过增大输入泵浦光功率实现了谐波阶数为 6 阶、重复频率为 86.07 MHz 的谐波脉冲输出^[54]。除此之外,在基于 NL-MMI 效应的锁模光纤激光器中,首次观察到了谐波脉冲的产生,但这些脉冲的稳定性并不理想,它们在短时间后失去同步并再次随机定位。2020 年,长春理工大学的 LIANG J 课题组^[55]将 150 m 长的 SMF 加入到基于 NL-MMI 效应的掺铒光纤激光器内以增强谐振腔内非线性系数,最终在泵浦功率为 257 mW 时,实现了谐波阶次为 880 阶、重复频率为 1.127 GHz 的 HML 脉冲输出。这是基于 NL-MMI 锁模的首个 GHz 级别的 HML 光纤激光器。然而,150 m 长的 SMF 造成了激光器基频锁模频率和集成度的下降,不利于激光器的小型化。2022 年 1 月,该课题组^[56]将 MNF 集成到 SMS 上,提高了光纤激光器的集成度,即通过锥化 SMS 尾部缩短了 GIMF 中的自成像点周期并增强了腔内的非线性系数。基于锥形 SMS 的掺铒 HML 光纤激光器在泵浦功率为 300 mW 时实现了谐波阶次为 16 阶、重复频率为 285 MHz、SNR 为 51 dB 的稳定脉冲输出。同年 11 月,该课题组^[57]又使用同样的激光器结构,通过对 GIMF 进行拉锥,有效地抑制了自像点因模式耦合而产生的强度波动,并增强了谐振腔内的非线性系数。最终,基于锥腰直径为 12 μm 的锥形 GIMF,在泵浦功率为 594 mW 时实现了谐波阶次为 22 阶、重复频率为 1.26 GHz 的 HML 脉冲输出。

相对于其它锁模方式,NL-MMI 锁模具有全光纤

结构、抗损伤阈值高、不受偏振态影响及价格低廉等优点,为高重复频率、高集成度、轻便化的 HML 锁模光纤激光器提供了一种新的解决思路。但是, NL-MMI 锁模光纤激光器产生的脉冲重复频率仍然偏低且抗环境干扰能力差,需要更进一步提高输出脉冲的重复频率及提升锁模稳定性。

1.4 基于 Mamyshev 振荡器技术

Mamyshev 振荡器由于具有超高的调制深度、结构简单、脉冲稳定性高等优点,常被用作传统固体激光器的替代品,并在高功率超短脉冲的产生领域吸引了许多科研工作者的关注。Mamyshev 振荡器通常由 2 个 Mamyshev 再生器串联组成^[58]。每个 Mamyshev 再生器由 1 段高增益光纤、2 个带通滤波器以及 2 个输出耦合器组成,其中 2 个带通滤波器的中心波长有一定的偏移以避免连续光起振。Mamyshev 振荡器的锁模机制依赖于自相位调制引起的光谱展宽和偏置光谱滤波。当入射到 Mamyshev 振荡器的光脉冲足够强时,自相位调制会使得光谱展宽量足够大以覆盖 2 个滤波器的光谱间隔,从而使光脉冲在谐振腔内不断循环放大并窄化,实现饱和吸收。理论研究表明, Mamyshev 振荡器可以实现 100% 的调制深度,且其锁模状态与偏振状态无关,这为获得高峰值功率超短脉冲提供了天然优势^[59-60]。

2017 年,康奈尔大学 WISE F 课题组^[61]发明了一种高稳定性的级联掺铒 Mamyshev 振荡器。在实验中,该掺铒 Mamyshev 振荡器实现了重复频率为 17 MHz、脉冲能量为 50 nJ、峰值功率为 1 MW 的超短脉冲输出。此外,模拟结果显示由 SMF 构成的 Mamyshev 振荡器可产生峰值功率超过 10 MW 超短脉冲。相对于使用 SMF 搭建的锁模光纤激光器而言, Mamyshev 振荡器具有超高的调制深度,使得输出脉冲的峰值功率提升了一个数量级。但其超高的调制深度亦限制了脉冲的自启动锁模及重复频率的增加^[62]。因此,如何有效地实现锁模脉冲的自启动,并产生高重复频率的脉冲,成为了当前科研领域一个亟待研究的课题。

2020 年,法国的 ETIENNE P 等人^[63]首次介绍了一种基于阶跃光纤的全光纤结构的掺铒 Mamyshev 振荡器,该掺铒 Mamyshev 振荡器在泵浦功率为 2.7 W 时得到了平均功率为 1.3 W、谐波阶次为 14 阶、重复频率为 107.8 MHz、SNR 为 48 dB 的 HML 脉冲输出。这是高阶 HML 在掺铒 Mamyshev 振荡器中的首次实验演示,但是仍然无法实现自启动锁模。2021 年,波兰物理化学研究所 BERNARD P 等人^[64]首次展示了一种全

保偏光纤结构的掺铒 Mamyshev 振荡器,通过增大入射到腔内的泵浦功率及改变输出耦合器的分束比,最终得到了谐波阶次可调范围为 1~19 阶、重复频率可调谐范围为 16~305 MHz 的高阶谐波脉冲输出。尽管该振荡器成功实现了谐波阶数的可调谐,但自启动锁模脉冲生成的问题仍未得到解决,目前仍需依赖在腔体外部加入种子源来启动锁模^[65]。2023 年,长春理工大学的 LIANG J 课题组^[66]首次介绍了掺铒 Mamyshev 高阶 HML 振荡器。当泵浦功率达到 1 150 mW 时,该振荡器通过 2 个固定带宽分别为 12.6 nm 和 2.9 nm 的带通滤波器,成功产生了高达 89 阶的谐波,并具备 395.2 MHz 的重复频率。此外,该振荡器的各阶脉冲的 SNR 均高于 60 dB,证明了该振荡器产生的脉冲较为稳定。这一结果较好地平衡了 Mamyshev 振荡器的自启动锁模和高重复频率脉冲生成之间的矛盾,使得 Mamyshev 振荡器向实际工程应用迈出了新的一步。

综上所述,在 Mamyshev 振荡器中运用 HML 技术产生的高阶谐波脉冲具有脉冲峰值功率高、稳定性好的优点。然而, Mamyshev 振荡器具有的超高调制深度阻碍了自启动锁模和脉冲分裂的实现。尽管使用 2 个固定带宽带通滤波器的 Mamyshev 振荡器已初步实现锁模脉冲的自启动功能,但是,由于其腔体结构复杂且较长,导致基频锁模频率偏低,从而限制了脉冲重复频率的提升。因此,研制出兼具锁模脉冲自启动功能、短腔长、高集成度以及高脉冲重复频率的 Mamyshev 振荡器,已成为当前亟待解决的重要任务。

2 被动 HML 光纤激光器研究进展

被动锁模光纤激光器常使用的可饱和吸收体(SA)和技术包括低维纳米材料制成的可饱和吸收体、基于非线性偏振旋转(NPR)的器件、利用非线性微积分干涉(NL-MMI)的组件,以及 Mamyshev 振荡器等。这些不同类型的可饱和吸收体各有其优缺点。其中,基于低维纳米材料的 HML 激光器具有结构简单、制造成本低且高非线性特点,然而,受限于环境温湿度的影响和较低的损伤阈值,其难以产生长时间、稳定性好的 HML 脉冲。为改善这一状况,后期可在现有基础上研制具有高损伤阈值且可适应不同环境温湿度条件的高非线性 SA,以优化激光器的性能。NPR 的抗伤阈值高、调制深度大、响应时间快,然而其偏振态易受环境干扰,而智能锁模技术及偏振控制技术已经进一步提高了 NPR 锁模激光器的稳定性,后期可在此基础上再进一步提升 HML 脉冲的重复频率及稳定

吕宏伟,李宝琳,韦佳天,等: 高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展

性。此外,NL-MMI 具有全光纤结构、高抗损伤阈值、制造简单及调制深度可调谐的优点,但抗环境干扰能力差,它依赖于 MMF 长度来实现锁模,并且产生的重复频率较低。未来应进一步提升基于 NL-MMI 锁模技术产生的 HML 脉冲的重复频率和稳定性。Mamyshev 振荡器具有超高的调制深度,产生的 HML 脉冲虽然具有优异的稳定性和高峰值功率,但其调制深度过高,

该振荡器在自启动和产生超高重复频率的锁模脉冲方面遇到了困难,尽管目前已经有了相应的解决方法,但由于振荡器的腔长过长,导致最终产生的脉冲重复频率仍然偏低。同时,Mamyshev 振荡器的整体研究仍处于起步阶段,后续可朝具有高平均输出功率、高峰值功率、高重复频率、高稳定性的 HML 脉冲方向发展。上述的基于不同 SA 的被动 HML 光纤激光器共同推动了 HML 激光器的发展,高重复频率被动 HML 光纤激光器研究进展情况如表 1 所示。可以看出,最高重复频率可实现高达 22 GHz 的稳定脉冲输出,增益介质由掺铒光纤拓展到掺镱光纤和掺铥光纤,HML 激光器的稳定性、可靠性亦取得较大进步,有望进一步朝实用化推进。

表 1 高重复频率被动 HML 光纤激光器研究进展

年份	腔体配置	泵浦功率	重复频率	参考文献
2011	SW-CNT+D 型光纤	195 mW	943.16 MHz	[22]
2012	SW-CNT+D 型光纤	400 mW	5 GHz	[23]
2019	CNT+SMF	205 mW	2.08 GHz	[24]
2021	CNT+HLNF	280 mW	4 GHz	[27]
2012	多层石墨烯	230 mW	2.22 GHz	[29]
2014	MoS ₂ +MNF	181 mW	2.5 GHz	[30]
2015	BP+MNF	510 mW	705.9 MHz	[31]
2013	Bi ₂ Te ₃ +MNF	126 mW	2.04 GHz	[35]
2015	Bi ₂ Te ₃ +MNF	395 mW	2.95 GHz	[36]
2022	Bi ₂ Te ₃ +溶液凝胶	395 mW	2.84GHz	[37]
2015	NPR+HNLF	485 mW	22.132 GHz	[39]
2013	NPR+PCF	60 mW	1.8 GHz	[40]
2015	NPR+PCF	670 mW	2.122 GHz	[41]
2015	NPR+PCF	1.6 W	1.8826 GHz	[42]
2016	NPR+PCF	500 mW	1.446 GHz	[43]
2019	NPR+PCF	700 mW	2.042~ 2.108 GHz	[44]
2020	NPR+MNF	310 mW	2.3828 GHz	[45]
		260 mW	1.7852 GHz	
2018	NL-MMI	—	86.07 MHz	[54]
2020	NL-MMI+SMF	257 mW	1.127 GHz	[55]
2022	NL-MMI+MNF	300 mW	285 MHz	[56]
2022	NL-MMI+MNF	594 mW	1.26 GHz	[57]
2020	Mamyshev	2.7 W	107.8 MHz	[63]
2021	Mamyshev	—	16~305 MHz	[64]
2023	Mamyshev	1 150 mW	395.2 MHz	[66]

3 结束语

科学研究、生物医疗和精密制造等领域的发展持续推动高重复频率被动锁模光纤激光器在性能提升、技术成熟及产业化方面的进步。本文重点介绍了采用被动 HML 技术产生高重复频率的光纤激光器,该技术主要依托低维纳米材料和吸收体、NPR、NL-MMI 及 Mamyshev 振荡器等作为 SA,实现高次谐波输出。未来,提高输出重复频率及稳定性仍是该领域的主要研究方向。同时,探索适合锁模光纤激光器商业化的可饱和吸收体也是研究的关键。因此,针对高重复频率被动锁模光纤激光器的可饱和吸收体研究将受到越来越多的关注。

参考文献:

- [1] KELLER U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424: 831–838.
- [2] LI C H, BENEDICK A J, FENDEL P, et al. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹[J]. Nature, 2008, 452(7187): 610–612.
- [3] NEWBURY N R. Searching for applications with a fine-tooth comb [J]. Nature Photonics, 2011, 5(4): 186–188.
- [4] 陶莎. 高重复频率被动锁模光纤激光器的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [5] NELSON L E, JONES D J, TAMURA K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. Applied Physics B, 1997, 65: 277–294.
- [6] TANG D Y, ZHAO L M, ZHAO B, et al. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers [J]. Physical Review A, 2005, 72(4): 1–9.
- [7] LIU X M, PANG M. Revealing the buildup dynamics of harmonic mode-locking states in ultrafast lasers [J]. Laser & Photonics Reviews, 2019, 13(9): 1–9.
- [8] ZHANG Z X, ZHAN L, YANG X X, et al. Passive harmonically mode-

- locked erbium-doped fiber laser with scalable repetition rate up to 1.2 GHz [J]. *Laser Physics Letters*, 2007, 4(8): 592–596.
- [9] GRAY S, GRUDININ A B, LOH W H, et al. Femtosecond harmonically mode-locked fiber laser with time jitter below 1 ps[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(2): 189–191.
- [10] KUTZ J N, COLLINGS B C, BERGMAN K, et al. Stabilized pulse spacing in soliton lasers due to gain depletion and recovery[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(9): 1749–1757.
- [11] WANG Y, SET S Y, YAMASHITA S. Active mode-locking via pump modulation in a Tm-doped fiber laser [J]. *APL Photonics*, 2016, 1(7): 1–9.
- [12] KOROBUKO D A, STOLIAROV D A, ITRIN P A, et al. Harmonic mode-locking fiber ring laser with a pulse repetition rate up to 12 GHz [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 133: 11–16.
- [13] WANG J L, WANG X L, LEI J J, et al. Recent advances in mode-locked fiber lasers based on two-dimensional materials [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(8): 2315–2340.
- [14] LAU K Y, ZHENG J C, JIN C H, et al. Mono-elemental saturable absorber in near-infrared mode-locked fiber laser: A review[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 122: 1–6.
- [15] FENG L H, ZUO L, YANG A Y. Impacts of operational parameters on nonlinear polarization rotation-based passively mode-locked fiber laser [J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(2): 1–7.
- [16] TAMURA K, IPPEN E P, HAUS H A, et al. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser [J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080–1082.
- [17] NAZEMOSADAT E, MAFI A. Nonlinear multimodal interference and saturable absorption using a short graded-index multimode optical fiber [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(5): 1357–1367.
- [18] RENNINGER W H, WISE F W. Optical solitons in graded-index multimode fibres [J]. *Nature Communication*, 2013, 4: 1–6.
- [19] HOFMANN P, MAFI A, JOLLIVET C, et al. Detailed investigation of mode-field adapters utilizing multimode-interference in graded index fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(14): 2289–2298.
- [20] SIDORENKO P, FU W, WRIGHT L G, et al. Self-seeded, multi-megawatt, Mamyshev oscillator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2672–2675.
- [21] SET S Y, YAGUCHI H, TANAKA Y, et al. Laser mode locking using a saturable absorber incorporating carbon nanotubes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(1): 51–56.
- [22] CHANG S J, JU H I, SANG H Y, et al. Low noise GHz passive harmonic mode-locking of soliton fiber laser using evanescent wave interaction with carbon nanotubes[J]. *Optics Express*, 2011, 19(20): 19775–19780.
- [23] KOO J, PARK J, LEE J, et al. Toward higher-order passive harmonic mode-locking of a soliton fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 37(11): 1862–1864.
- [24] HUANG Q Q, ZOU C H, WANG T X, et al. Influence of average cavity dispersion and spectral bandwidth on passively harmonic mode locked L-band Er-doped fiber laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 1–8.
- [25] WANG Y, LI J, ZHANG E, et al. Coexistence of noise-like pulse and high repetition rate harmonic mode-locking in a dual-wavelength mode-locked Tm-doped fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17192–17200.
- [26] HUANG J J, LIU X Y, LIN J Z, et al. Uni-and bidirectional soliton rains in a NALM mode-locked Tm-doped fiber laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 169: 1–5.
- [27] HUANG Q, DAI L, ROZHIN A, et al. Nonlinearity managed passively harmonic mode-locked Er-doped fiber laser based on carbon nanotube film [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2638–2641.
- [28] BONACCORSO F, SUN Z, HASAN T, et al. Graphene photonics and optoelectronics [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4: 611–622.
- [29] SOBON G, SOTOR J, ABRAMSKI K M. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 1–4.
- [30] LIU M, ZHENG X W, QI Y L, et al. Microfiber-based few-layer MoS₂ saturable absorber for 2.5 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2014, 22(19): 22841–22846.
- [31] YU H, ZHENG X, YIN K, et al. Thulium/holmium-doped fiber laser passively mode locked by black phosphorus nanoplatelets-based saturable absorber [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10290–10294.
- [32] TIAN W, YU W, SHI J, et al. The property, preparation and application of topological insulators: a review [J]. *Materials (Basel)*, 2017, 10(7): 1–45.
- [33] GANEEV R A, POPOV V S, ZVYAGIN A I, et al. Exfoliated Bi₂Te₃ nanoparticle suspensions and films: morphological and nonlinear optical characterization [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(15): 3857–3870.
- [34] HAJLAOUI M, PAPALAZAROU E, MAUCHAIN J, et al. Ultrafast surface carrier dynamics in the topological insulator Bi₂Te₃[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(7): 3532–3536.
- [35] LUO Z C, LIU M, LIU H, et al. 2 GHz passively harmonic mode-locked fiber laser by a microfiber-based topological insulator saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(24): 5212–5215.
- [36] YAN P, LIN R, RUAN S, et al. A 2.95 GHz, femtosecond passive harmonic mode-locked fiber laser based on evanescent field interaction with topological insulator film [J]. *Optics Express*, 2015, 23(1): 154–164.
- [37] WANG Y J, SONG C Y, ZHANG H, et al. 119th harmonic mode-locking in the fiber laser based on a novel saturable absorber thin film obtained by the sol-gel method [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 145: 1–8.
- [38] MATSAS V J, NEWSON T P. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation [J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(15): 1391–1393.
- [39] TAO S, XU L X, CHEN G L, et al. Ultra-high repetition rate harmonic mode-locking generated in a dispersion and nonlinearity managed fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2354–2357.
- [40] KANG M S, JOLY N Y, RUSSELL P S J. Passive mode-locking of fiber ring laser at the 337th harmonic using gigahertz acoustic core resonances [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 561–563.
- [41] PANG M, JIANG X, HE W, et al. Stable subpicosecond soliton fiber laser passively mode-locked by gigahertz acoustic resonance in photonic crystal fiber core [J]. *Optica*, 2015, 2(4): 339–342.
- [42] HE W, PANG M, RUSSELL P S. Wideband-tunable soliton fiber laser mode-locked at 1.88 GHz by optoacoustic interactions in solid-core PCF

吕宏伟, 李宝琳, 韦佳天, 等: 高重复频率被动谐波锁模光纤激光器研究进展

- [J]. Optics Express, 2015, 23(19): 24945–24954.
- [43] PANG M, HE W, RUSSELL P. Gigahertz-repetition-rate Tm-doped fiber laser passively mode-locked by optoacoustic effects in nanobore photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2016, 41(19): 4601–4604.
- [44] YEH D H, HE W, PANG M, et al. Pulse-repetition-rate tuning of a harmonically mode-locked fiber laser using a tapered photonic crystal fiber [J]. Optics Letters, 2019, 44(7): 1580–1583.
- [45] HUANG L, ZHANG Y, CUI Y, et al. Microfiber-assisted gigahertz harmonic mode-locking in ultrafast fiber laser [J]. Optics Letters, 2020, 45(17): 4678–4681.
- [46] PU G Q, ZHANG L, HU W S, et al. Automatic mode-locking fiber lasers: progress and perspectives[J]. Science China Information Sciences, 2020, 63(6): 1–23.
- [47] 陈润秋, 刘艳, 高松. 渐变折射率多模光纤中的多模干涉应用研究 [J]. 光电技术应用, 2014, 29(3): 17–20.
- [48] WANG Z K, WANG D N, YANG F, et al. Er-doped mode-locked fiber laser with a hybrid structure of a step-index-graded-index multimode fiber as the saturable absorber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017, 35(24): 5280–5285.
- [49] LI H, WANG Z, LI C, et al. Mode-locked T_m fiber laser using SMF-SIMF-GIMF-SMF fiber structure as a saturable absorber[J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26546–26553.
- [50] WANG Z, WANG D N, YANG F, et al. Stretched graded-index multimode optical fiber as a saturable absorber for erbium-doped fiber laser mode locking [J]. Optics Letters, 2018, 43(9): 2078–2081.
- [51] TEGIN U, ORTAC B. All-fiber all-normal-dispersion femtosecond laser with a nonlinear multimodal interference-based saturable absorber [J]. Optics Letters, 2018, 43(7): 1611–1614.
- [52] LUO Y, XIANG Y, SHUM P P, et al. Stationary and pulsating vector dissipative solitons in nonlinear multimode interference based fiber lasers [J]. Optics Express, 2020, 28(3): 4216–4224.
- [53] FU S, SHENG Q, ZHU X, et al. Passive Q-switching of an all-fiber laser induced by the Kerr effect of multimode interference [J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17255–17262.
- [54] YANG F, WANG D N, WANG Z K, et al. Saturable absorber based on a single mode fiber - graded index fiber-single mode fiber structure with inner micro-cavity [J]. Optics Express, 2018, 26(2): 927–934.
- [55] WANG T B, JIN L, ZHANG H W, et al. Gigahertz harmonic mode-locked fiber laser based on tunable SMS ultrafast optical switch [J]. Annalen der Physik, 2020, 532(5): 1–8.
- [56] WANG R Y, JIN L, WANG J Z, et al. Harmonic mode-locked fiber laser based on microfiber-assisted nonlinear multimode interference [J]. Chinese Optics Letters, 2022, 20(1): 1–5.
- [57] LI X H, JIN L, WANG R Y, et al. GHz-level all-fiber harmonic mode-locked laser based on microfiber-assisted nonlinear multimode interference [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 155: 1–8.
- [58] PITOIS S, FINOT C, PROVOST L, et al. Generation of localized pulses from incoherent wave in optical fiber lines made of concatenated Mamyshev regenerators [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2008, 25(9): 1537–1547.
- [59] ROCHETTE M, CHEN L R, SUN K, et al. Multiwavelength and tunable self-pulsating fiber cavity based on regenerative SPM Spectral Broadening and Filtering [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(17): 1497–1499.
- [60] 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.
- [61] LIU Z, ZIEGLER Z M, WRIGHT L G, et al. Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator [J]. Optica, 2017, 4(6): 649–654.
- [62] ZELUDEVICIUS J, MICKUS M, REGELSKIS K. Investigation of different configurations and operation regimes of fiber pulse generators based on nonlinear spectral re-shaping [J]. Optics Express, 2018, 26(21): 27247–27264.
- [63] POEYDEBAT E, SCOL F, VANVINCQ O, et al. All-fiber Mamyshev oscillator with high average power and harmonic mode-locking [J]. Optics Letters, 2020, 45(6): 1395–1398.
- [64] PIECHAL B, SZCZEPANEK J, KARDAS T M, et al. Mamyshev oscillator with a widely tunable repetition rate [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(2): 574–581.
- [65] WANG T, REN B, LI C, et al. Over 80 nJ sub-100 fs all-fiber mamyshev oscillator[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(6): 1–5.
- [66] SUI Y, JIN L, LIU Y K, et al. Harmonic mode-locking from erbium-doped fiber self-starting mamyshev oscillator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 42(5): 1–6.