

光纤激光器被动锁模技术研究进展

董自凯, 宋晏蓉*

北京工业大学理学部, 北京 100124

摘要 超快光纤激光是目前激光器研究的一个热点。非线性可饱和吸收效应是光纤激光器被动锁模技术的核心。被动锁模技术主要分为真实饱和吸收体和人造饱和吸收体, 真实可饱和吸收体包括: 半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 和纳米材料等; 人造可饱和吸收体包括: 非线性偏振旋转演化 (NPE)、非线性光环形镜 (NOLM)、非线性多模干涉 (NLMMI) 和 Mamyshev 再生器 (Mamyshev) 等。本文综述了最近各类可饱和吸收效应锁模光纤激光器的发展方向, 简要阐明工作原理、技术优势、解决所面临问题的方法以及应用领域。

关键词 激光光学; 超快光纤激光; 饱和吸收体; 可饱和吸收效应

中图分类号 TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL202148.0501006

1 引言

超快光纤激光在军事、科研、工业以及医疗等领域均具有重要应用^[1]。光纤激光器具有光束质量好、热管理效率高、结构灵活紧凑和维护成本低等优势^[2]。光纤作为柔性波导, 在赋予光纤激光器以上所述优势的同时, 也引入了色散和非线性效应^[3]。脉冲在光纤中传输时, 较小的纤芯波导容易产生较高的功率密度, 所激发的非线性效应会累积较高的非线性相移导致脉冲分裂为多个脉冲或者塌陷为类噪声脉冲, 这极大地限制了超快光纤激光输出的脉冲能量与峰值功率。为了产生超快光纤激光, 平衡或者抑制非线性效应成为关键。其中一种有效方案为增加模场面积, 抑制非线性响应。因此, 拥有较大模场面积的光子晶体光纤技术得到飞速发展。另一种方案是通过控制谐振腔内的色散来平衡非线性效应。在负色散域, 由于色散和非线性平衡而形成的脉冲称为孤子, 其峰值功率受限于孤子面积理论^[4]。为了打破负色散对脉冲功率的限制, 采用色散管理脉冲即腔内包含正色散和负色散两部分光纤, 在正色散域拉伸脉冲降低峰值功率, 在负色散域压缩脉冲提升峰值功率并输出, 可使脉冲输出功率提升一个数量级^[5]。色散管理孤子依然受到腔平均色散孤

子面积理论的约束, 致使其功率无法进一步提升。去除负色散光纤使光纤激光器工作在全正色散域, 同时腔内引入滤波器增加频域损耗可以获得耗散孤子^[6-7]。脉冲能量的典型值为 20 nJ, 脉冲宽度约为 200 fs, 进一步提升了峰值功率。另外, 自相似子也是获得大能量的方式之一, 其特点是脉冲在腔内传输过程中维持抛物线形状并且始终为线性啁啾^[8-9]。为了控制腔内自相似运转, 采用两种方式, 一种是被动的自相似子的方式即从时域控制, 在输出位置之后引入色散延迟器件; 另一种是放大的自相似子的方式即从频域控制, 在增益放大之后引入窄带滤波器件。这些方式都能在一定程度上提升脉冲能量, 但是依然受限于非线性相移和连续光干扰等因素影响无法进一步提升脉冲峰值功率。

为了进一步提升超快光纤激光的输出性能以满足光频率梳、太赫兹、生物光子学等应用的需求, 对于锁模光纤激光器来说, 深入理解并合理利用非线性效应成为关键所在。从被动锁模光纤激光器产生锁模脉冲的机理来看, 波导介质引起的群速度色散、非线性效应, 滤波器的频谱滤波效应, 以及可饱和吸收体 (SA) 引起的自振幅调制效应等物理过程之间的相互平衡是形成稳定脉冲的关键因素^[10], 本文将重点论述基于可饱和吸收效应被动锁模技术的研究

收稿日期: 2020-11-02; 修回日期: 2020-12-15; 录用日期: 2021-02-05

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0405200)、国家自然科学基金(61975003)、北京市自然科学基金(4192015)

*E-mail: yrsong@bjut.edu.cn

进展。可饱和吸收体是利用非线性效应产生超快光纤激光的被动光调制器件,其光调制作用一般是指衰减光强的能力随光强的增大而降低^[11]。可饱和吸收体的实现方式分为真实饱和吸收体和人造饱和吸收体。真实饱和吸收体包括半导体可饱和吸收镜 (SESAM)^[12]和纳米材料^[13];人造可饱和吸收体包括非线性多模干涉 (NLMMI)^[14]、非线性偏振演化 (NPE)^[15]、非线性光环形镜 (NOLM)^[16]和 Mamyshev 再生器 (Mamyshev)^[17],可饱和吸收体的不同实现方式如图 1 所示。体现可饱和吸收体性能的参数包括:响应时间、饱和功率、调制深度、线性损耗、损伤阈值等。响应时间快慢与脉冲宽度之间的关系定义了快饱和或者慢饱和吸收体,在较高功率条件下,慢饱和吸收体会因为对脉冲前后沿部分的调制不同,导致脉冲不稳定^[18]。另外,慢饱和吸收体还会限制激光器系统的工作带宽,不利于激光器的高重复频率产生。饱和功率的高低直接影响超快光纤激光器的锁模阈值,低饱和功率条件下容易自启动锁模^[19]。调制深度大有利于锁模的建立和稳定,并且可以窄化脉冲^[20]。此外还存在反饱和调制,即衰减光强的能力随光强的增大而增大并对脉冲输出类型产生影响。例如,反饱和效应会使脉冲从耗散孤子转变为耗散孤子共振^[21]。可饱和吸收体作为光调制器件,低线性损耗和高损伤阈值是获得高性能超快光纤激光的基本保障。

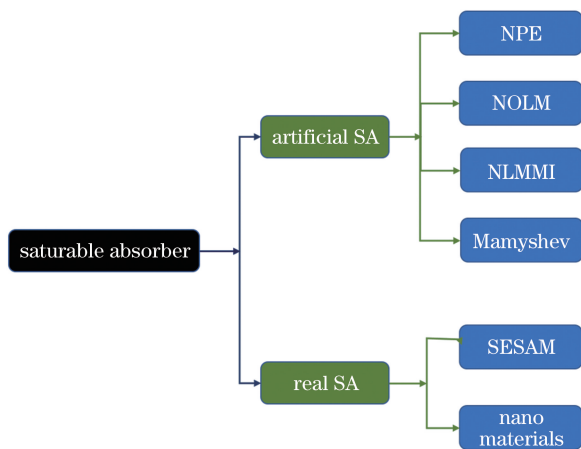


图 1 可饱和吸收体分类图

Fig. 1 Classification diagram of saturable absorbers

合理选择可饱和吸收体参数是获得具有自启动、高环境稳定性、脉冲参数可控等特点的超快光纤激光的核心技术。在被动锁模技术应用中,各种可饱和吸收体被动锁模技术产生超短光纤激光的优势以及所面临的问题不同。NPE 锁模技术具有波长可调、调制深度大、响应时间短等优点,但是工作状

态会受到环境温度、外部振动、偏振退却等因素的影响,使 NPE 等效的可饱和吸收体参数在长时间工作条件下易发生变化导致锁模状态发生变化甚至失锁^[22];NOLM 锁模技术具有环境稳定性高、响应时间短等特点,但是等效的可饱和吸收体调制深度主要受到耦合比的影响。较小的耦合比需要更长的光纤来累积非线性相移而无法获得高重复频率、窄脉冲,更容易得到耗散孤子共振 (DSR) 或者类噪声 (NLP) 等^[23],较大的分光比可以在较短的光纤内累积足够的非线性相移产生超快光纤激光但是难以自启动;Mamyshev 振荡器锁模技术可以提供较大的调制深度,获得高峰值功率的超短脉冲且可以充分地抑制连续光分量等造成的脉冲不稳定,缺点是无法从噪声中自起振^[24];SESAM 工艺成熟、稳定性较高,缺点是无法实现宽带响应、响应时间较长、特殊结构无法实现全光纤结构设计^[25];Nano-materials 可饱和吸收体优点是成本较低、易于集成、宽带响应,缺点是热损伤阈值较低、长时间工作稳定性有待提升^[19];NLMMI 优点是全光纤结构、制备成本低,缺点是特殊结构会增大腔损耗,可饱和吸收体参数的可调性、环境稳定性较差^[14]。以上所述各类可饱和吸收体的实现方式所面临的问题都亟须解决。因此,本文总结了最近各类等效可饱和吸收体被动锁模光纤激光器的发展方向,同时简要阐明工作原理、技术优势、解决问题的方法以及应用领域。

2 非线性偏振演化锁模技术

非线性偏振旋转演化锁模技术是克尔效应引起的不同偏振光产生不同非线性相移而实现可饱和吸收效应的锁模机制。NPE 形成的等效可饱和吸收体可以用图 2 中的模型来描述,由偏振器件、波片、双折射光纤组成^[26]。首先,入射脉冲通过起偏器成为线偏振光,经过波片变为椭圆偏振光;随后,椭圆偏振入射脉冲经双折射光纤累积非线性相移,累积量随光强增强而增加,因此高光强 P_1 累积的非线性相移量多于低光强 P_2 ;再依次经过波片和检偏器,光强不同,导致非线性的偏振旋转不同,通过调整波片角度实现 P_1 和 P_2 的相对透过率,再利用波片调节不同偏振态的相对透过率形成可饱和吸收体效应^[27]。NPE 锁模恢复时间约为几飞秒,属于快饱和类吸收体,实验条件下可以获得稳定的高峰值飞秒脉冲,且可以通过波片大范围调节可饱和吸收体的调制深度,进而可实现多种脉冲状态的切换^[15]。由于光纤中光的偏振旋转形成的可饱和吸

收体效应源自于整个光纤激光器的光纤以及光纤器件,任何器件偏振态的变化都可能影响激光器的稳定性。例如,外部环境温度的变化、光纤应力变化、光纤偏振退却等,这都限制了 NPR 锁模光纤激光器的实用化和商业化^[28]。

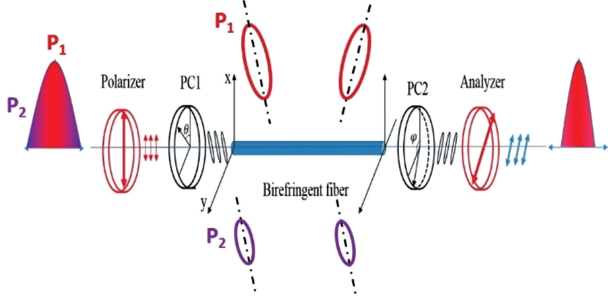


图 2 非线性偏振演化可饱和吸收体原理图^[26]

Fig. 2 Mechanism of NPE saturable absorption effect^[26]

如何规避或者抵消 NPE 锁模环境不稳定性的缺点? 近几年,全保偏光纤 NPE 锁模和智能 NPE 锁模逐渐成为解决 NPE 技术问题的两个主要方向。全保偏 NPE 锁模的核心技术是将标准单模光纤替换为保偏光纤,可以规避掉单模光纤弱双折射效应引起的调制不稳定性,进而提升激光腔的整体环境稳定性;智能 NPE 锁模的核心技术是通过智能算法与控制系统相结合的方式,自动反馈并自动调控激光腔内的偏振状态。当腔内偏振状态由于外部环境发生变化时,智能系统可以迅速甄别并自动调节偏振器件,进而抵消掉 NPE 光纤激光器对环境的敏感性。

对于全保偏 NPE 锁模光纤激光器来说,保偏光纤中光场的偏振态受外界影响较小,在传播过程中状态不易改变。保偏光纤的拍长非常短约为 2 mm,两正交偏振光会在保偏光纤中传输时发生走离从而减弱非线性调制效应,因此对于全保偏 NPE 锁模技术走离效应的补偿尤为重要。2017 年, Szczepanek 等^[29]利用多段保偏光纤角度熔接补偿走离效应,实现了全保偏光纤 NPE 锁模,实验装置如图 3 所示。该实验的核心部件是角度熔接保偏光纤形成的等效可饱和吸收体,包含三段保偏光纤和一个输出口。第一段光纤的熔接角度控制两正交偏振态脉冲的相对强度,类似于波片与检偏器。第一段与第二段光纤的熔接角度要设置为 90°,目的是替换两正交偏振态在保偏光纤的快慢轴中交替传输。第二段光纤长度应该为第一段光纤与第三段光纤长度之和,目的是抵消群速度失配问题。另外,多段保偏光纤角度熔接可以避免脉冲上升沿和下降沿

作用导致光谱和脉冲分裂等现象。输出口光纤的角度熔接设计可以对累积了不同非线性相移量的偏振成分进行偏振滤波,充当饱和吸收体的作用从而实现锁模。但是在全保偏光纤结构的腔型中,由于保偏光纤的拍长较短,在解决群速度失配问题时,对光纤长度的精确控制比较困难。2018 年,Zhou 等^[30]在腔内引入法拉第旋转镜(FM),由于法拉第旋转器(FR)为非互易性器件,激光两次通过法拉第旋转器,其光场的偏振态将旋转 90°,省去了两段对长度需严格控制的保偏光纤,获得了耗散孤子输出。目前已经报道的各类全保偏光纤 NPE 锁模激光器可以有效地降低环境温度等外界因素的影响,实现稳定锁模。

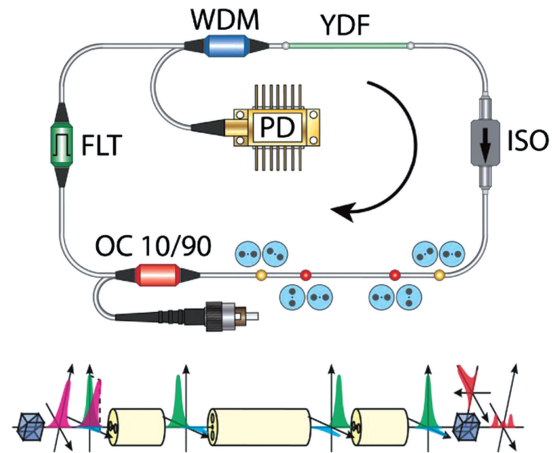


图 3 全保偏光纤 NPE 锁模激光器实验装置图以及可饱和吸收效应原理图^[24]

Fig. 3 All-polarization-maintaining fiber NPE mode-locking fiber laser setup and the mechanism of saturable absorption effect^[24]

对于智能锁模 NPE 来说,它可以克服 NPE 锁模激光器环境敏感性的缺点和提升 NPE 锁模技术的主动控制能力。智能锁模的开端是利用外部电压控制液晶可变器,建立外部电压与锁模状态的关系,从而达到通过调控外部电压值来调控激光器运转状态的目的^[31]。随后,利用演化算法(EA)的自组织、自适应、自学习特点,只需以几个实验参数为最初的“父代”,EA 算法就可以自己通过“子代”迭代的方式来寻找目标结果,即锁模状态^[32]。为了提升智能锁模的智能性,深度学习(DL)和模型预测控制(MPC)算法可以自己识别锁模脉冲域并建立物理模型定义这些脉冲域,并可以自行调节参数重现这些不同的锁模脉冲域^[33]。为了提升智能锁模的响应调控速率,类人算法(HLA)的优势在于对目标锁模状态设置目标函数,可快速识别目标域,从而极大

地提升了智能锁模的调控速率^[34]。

智能锁模利用时间拉伸色散傅里叶变换 (TSDFT) 作为光谱判别的快速分析技术, 并采用智能偏振选择算法相结合的方式。其特点是可快速响应并调控各脉冲域, 并且还可以直接观测到各脉冲域之间切换的过渡态^[35]。智能锁模光纤激光器的实验装置如图 4 所示, 带有嵌入式时间拉伸辅助实时脉冲控制器 (TSRPC)。其中 TSRPC 包含用来光谱映射的色散补偿光纤 (DCF)、光电二极管 (PD) 和基于遗传算法的智能锁模实时优化器。电偏振控制

器 (EPC) 和起偏器一起作为基于 NPE 的人造可饱和吸收体形成锁模机制。输出的功率一部分用来测量, 其余部分用于反馈。智能优化器分工为: 模数转换器 (ADC) 相当于人的眼睛用来识别脉冲; 现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 相当于人的大脑用来思考脉冲是否为所需的脉冲状态; 数模转换器 (DAC) 相当于人的手用来控制 EPC 从而实现调控脉冲输出状态的功能。这种智能 NPE 锁模技术既可以起到实时监测、稳定脉冲的作用, 又可以主动调控锁模的状态以探究脉冲动力学过程^[36]。

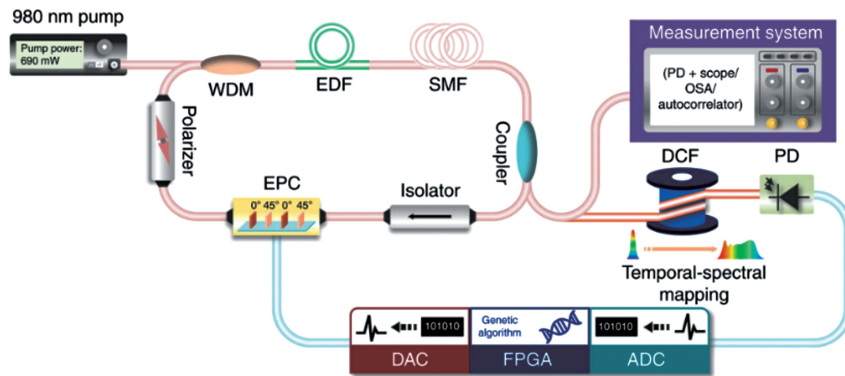


图 4 智能 NPE 锁模光纤激光器实验装置^[30]

Fig. 4 Experimental setup of intelligence NPE mode-locking fiber laser^[30]

3 非线性光环形镜锁模技术

利用 Sagnac 环产生强度相关的非线性相移差实现锁模的激光器称为 NOLM 锁模激光器, 类似于数字“8”, 也称为 8 字型腔激光器^[37]。形成的可饱和吸收效应可以用图 5 所示的 Sagnac 干涉环解释, 核心器件为一个 2×2 的耦合器, 其分光比为 $C : 1 - C$ 。入射脉冲 P_{in} 经耦合器被分成能量不同的两束 P_{cw} 和 P_{ccw} 。这两部分光经环路返回耦合器时累积了不同的非线性相移差, 可以使脉冲高光

强部分透过率大, 低光强部分透过率小, 等效为快可饱和吸收体^[38]。不同的非线性相移与脉冲光强弱有关, 可以来源于耦合器的分光比, 称为 NOLM; 可以来源于增益光纤放大, 称为非线性光放大镜 (NALM); 也可以来自于增益纤吸收, 称为非线性光吸收镜 (NAbLM)^[39]。相比于 NPR 锁模技术, NOLM 锁模机制的优点是受环境温度等因素的影响较小、锁模不受波段限制、产生的脉冲强度抖动性小。缺点是 NOLM 较难自启动, 需要偏振控制器 (PC) 调节腔内巨脉冲启动锁模状态。弱双折射单

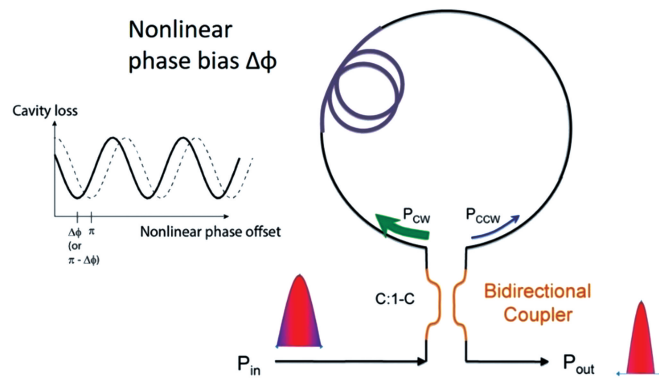


图 5 非线性光环形镜可饱和吸收效应原理图^[38]

Fig. 5 Mechanism of NOLM saturable absorption effect^[38]

模光纤的环境稳定性较差,无法形成环境稳定锁模,无法在温度变化较大的工业环境中应用;全光纤结构的 8 字型腔的腔长普遍较长,产生的脉冲重复频率通常低于 20 MHz,无法在高重复频率如频率梳等应用中使用。为了解决稳定性以及拓展非线性环锁模激光器的应用空间,研究人员设计出了运用全保偏光纤及器件改进型的高环境稳定性 8 字腔和高重复频率 9 字腔激光器。

为了提高 8 字腔光纤激光器的环境稳定性,全保偏 8 字腔锁模光纤激光器成为热点研究方向。全保偏 8 字腔提升环境稳定性的核心技术同全保偏 NPE 锁模技术类似,都是将标准单模光纤替换为保偏光纤,提升激光腔的环境稳定性。不同之处在于,8 字腔结构不存在群速度失配的问题,腔型设计相对简单。典型的全保偏 8 字腔结构如图 6 所示^[40]。2012 年,Agüergaray 等^[41]报道了第一台全保偏光纤的 8 字腔锁模光纤激光器,在 1030 nm 实现了 120 fs、4.2 nJ 的锁模脉冲输出。该结构的难点在于需通过光纤长度、器件耦合分束比来优化腔参数实现耗散孤子输出。2016 年,Zhou 等^[42]在 8 字腔内引入双增益结构,一是可以通过调节单增益产生腔内巨脉冲实现自启动;二是双增益结构增加了一个调控脉冲输出特性的维度;三是增加脉冲能量。输出脉冲的平均功率为 79 mW,重复频率为 2.47 MHz,脉冲能量为 32 nJ,经腔外压缩获得脉冲宽度为 615 fs,24 h 内功率抖动的峰峰值为 0.9%,均方根(RMS)为 0.13%。此方案利用全保偏结构可以提高 8 字腔的环境稳定性,但是缺点为结构复杂、成本增加、调谐难度较大、重复频率无法进一步降低。

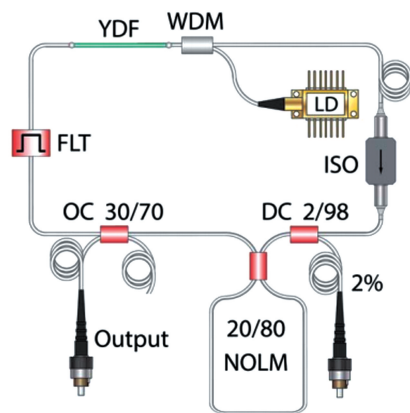


图 6 全保偏 8 字型锁模光纤激光器实验装置图^[32]

Fig. 6 Experimental setup of all-polarization-maintaining figure 8 mode-locking fiber laser^[32]

为了满足高重复频率如光频率梳等应用,获得高重复频率激光输出的最直接的技术方案为缩短激光腔长,但对于 NOLM 激光器来说,短腔无法保证积累足够的非线性相移。2016 年 Jiang 等^[43]将反射式相位偏置器置入到 9 字腔腔内实现自启动。相位偏置器是由分束器、FR、1/8 波片和反射镜组成,主要作用是使光场延迟 $\pi/2$,可饱和吸收体的透过率曲线发生平移,并手动调谐到适合建立锁模的区域。全光纤结构下输出脉冲的最高重复频率可达 159 MHz。为了进一步提升重复频率,2018 年 Liu 等^[44]通过引入空间器件,在 9 字腔内引入 FR 实现了 700 MHz 的高重复频率脉冲输出,如图 7 所示。FR 作为一种非互易性相位偏置器,可以有效解决短腔无法形成有效非线性累积问题。结构设计亮点:1)利用曲率半径为 22 mm、长度为 90 mm 高掺杂增益光纤;2)利用特殊集成的波分复用准直器件;3)空间结构相位偏置器与色散控制器。可实现 700 MHz 的自启动锁模,输出功率为 159 mW,脉冲宽度经压缩后为 215 fs,相对强度噪声(RIN)与相位噪声分别为 0.015% 和 -150 dBc/Hz。随着研究的进一步深入,基于 NOLM 锁模技术逐渐成为商用高重复频率超快光纤激光的主流锁模技术。

与其他锁模机制相比,NOLM 锁模技术对波长不敏感,腔损耗可容忍度较大。为了提高波长覆盖范围,氟化物玻璃(ZBLAN)光纤 8 字腔锁模光纤激光器成为热门研究方向^[45]。现阶段,可见光波段(380~760 nm)超快激光的产生方式主要是钛宝石激光器、光参量放大系统、近红外波段的倍频等^[46]。与近红外波段(1 μm 、1.5 μm 、2 μm 等波段)锁模光纤激光器相比,这些方式的不足之处在于成本过高、封装体积过大、光路较复杂等。可见光波段锁模光纤激光器的发展滞后于近红外波段的主要原因在于:1)传统的稀土离子在可见光波段的增益相对较小,而在可见光波段增益较大的 ZBLAN 光纤的熔点与硅基光纤的熔点相差较大,熔接较困难且损耗较大^[47];2)可见光波段器件包括波分复用器、隔离器、高能量泵浦等制备不够成熟^[48-49];3)可见光波段的色散值相对近红外波段更大,对于模式锁定会更加困难^[50];4)缺少可见光波段的饱和吸收体^[51]。以上都是限制可见光波段超快光纤激光器产生的因素。可见光波段锁模光纤激光器的发展依赖于高增益、低损耗的 ZBLAN 光纤的制备,同样也依赖于高能量蓝光半导体激光器作为激励源^[52]。另外,可见

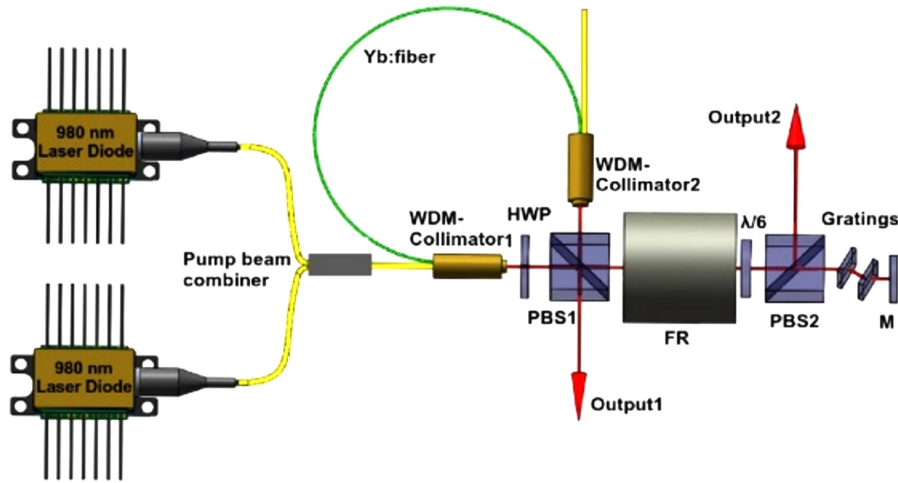


图 7 高重复频率 9 字腔锁模光纤激光器实验装置图^[34]

Fig. 7 Experimental setup of high-repetition figure 9 mode-locking fiber laser^[34]

光波段的光纤器件的成熟、宽带响应的材料类饱和吸收体的快速发展,也为可见光波段锁模光纤激光器的发展提供了动力^[53-54]。由于二维纳米材料的宽带响应特性,可利用其作为可饱和吸收体在可见光波段光纤激光器中产生调 Q 脉冲输出^[55-56]。虽然光纤激光器相比于固体激光器损耗容忍度更大,但是要获得锁模脉冲输出,需要在已获得调 Q 输出的基础上进一步优化腔型,减少激光的线性损耗,增强饱和吸收特性^[57]。

图 8 为利用 NOLM 锁模技术首次实现可见光波段光纤激光锁模输出^[58]。腔型设计难点为:1)通过理论模拟耦合输出比与色散量,计算出腔长与脉冲宽度之间的量化关系;2)设计模式适配器连接 Pr³⁺/Yb³⁺共掺 ZBLAN 光纤与 460 HP 单模光纤,减少腔内损耗;3)控制腔内偏振获得耗散孤子共振和类噪声输出。经压缩后获得 567 ps 耗散孤子输出,放大后 635 nm 锁模脉冲输出功率为 5.1 mW,单脉冲能量为 1.32 nJ。

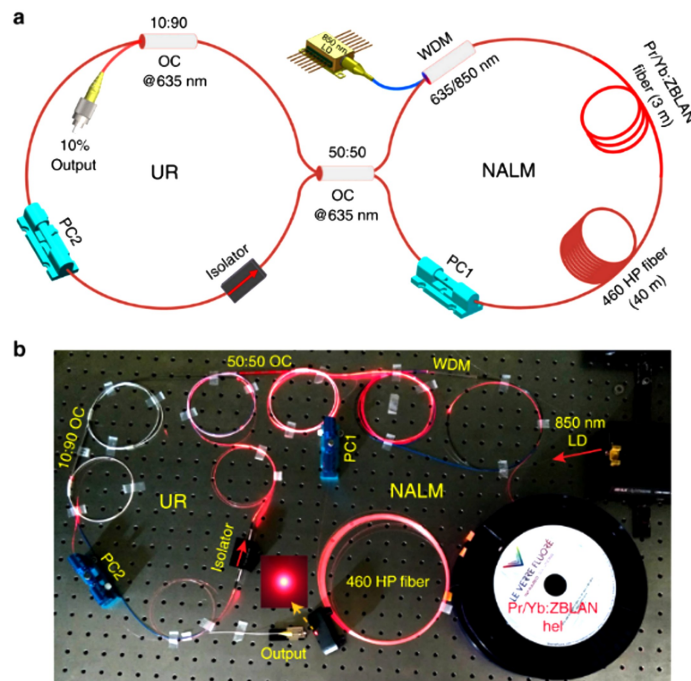


图 8 可见光波段 NOLM 锁模光纤激光器实验装置图^[58]。(a)原理图;(b) 635 nm 全光线结构 8 字型 DSR 光纤激光器照片

Fig. 8 Experimental setup of the visible-wavelength NOLM mode-locked fiber laser^[58]. (a) Schematic; (b) photograph of 635 nm all-beam structure figure 8 DSR fiber laser

4 纳米材料类饱和吸收体锁模技术

纳米材料类可饱和吸收体由于其工作波段宽、制备简单、成本低、易集成、恢复时间快等优点,得到了研究人员的广泛关注,因而超快激光也得到了迅速发展^[59]。纳米材料对光的吸收率随入射光强的增加而减少时材料具有可饱和吸收特性,其工作原理如图 9 所示^[13]。当入射脉冲与纳米材料相互作用时,材料的吸收会随光强的增加而增加。当入射脉冲功率低于饱和功率时,材料吸收光子,此时光透过率小。随着功率增加,材料的吸收会达到饱和,此时的光功率称为饱和功率。当入射脉冲功率高于饱和功率时,材料不再吸收光子,光透过率最大;脉冲高强度部分透过率与低强度部分透过率的差值定义为光调制深度。材料类可饱和吸收特性主要来源于纳米材料的泡利阻隔和热电子激发^[60]。

Saturation Absorption Induced by Pauli-blocking

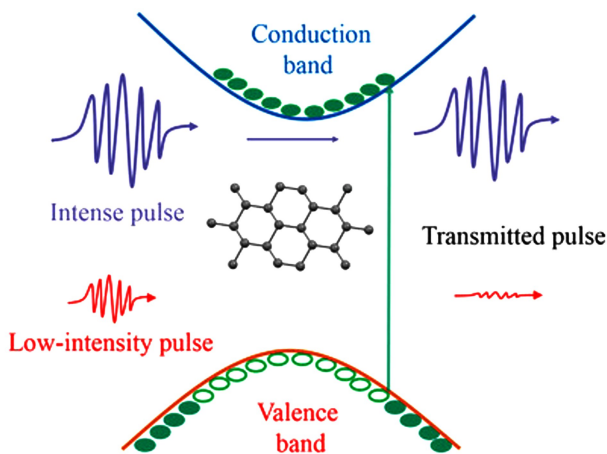


图 9 纳米材料类可饱和吸收效应原理图^[13]

Fig. 9 Schematic diagram of saturable absorption effect of nanomaterials^[13]

近几十年,SESAM 得到了迅速的发展并实现了商业化。SESAM 主要由半导体可饱和吸收体和布拉格反射镜组成,以 InGaAs 量子阱作为可饱和吸收体可以对指定波长实现有效吸收,而在衬底层上交替镀制的 GaAs 和 AlAs 层构成的布拉格反射镜决定了反射光谱。Loh 等首次提出将 SESAM 应用于被动锁模光纤激光器。其具有易于自启动、结构简单、性能稳定、锁模阈值低、响应时间短等优点。但其制造工艺复杂、成本较高以及不易于光纤集成等特点促使人们开始寻找其他新型可饱和吸收体。近几年,碳纳米管^[61]、石墨烯^[62]、拓扑绝缘体^[63]、过渡金属硫化物^[64]、黑磷^[65-66]、MXene^[67] 和钙钛矿^[68]

等新型材料相继应用于被动锁模光纤激光器,总结如图 10 所示^[69]。2004 年,Set 等^[70]首次将碳纳米管涂敷于反射镜上并在掺铒光纤激光器中实现了锁模脉冲输出。同样基于碳原子的纳米材料石墨烯作为一种新型二维材料,Bao 等^[11]于 2009 年首次将其作为可饱和吸收体应用于超短脉冲光纤激光器中。2012 年,Zhao 等首次将拓扑绝缘体(Bi_2Te_3)应用于锁模光纤激光器,此后 Bi_2Se_3 、 Sb_2Te_3 等各类拓扑绝缘体被广泛与光纤激光器相结合。为了寻找性能更好的可饱和吸收体,研究人员将目光投向了过渡金属硫化物,2013 年,Wang 等证明了同等激发条件下, MoS_2 材料具有比石墨烯更好的可饱和吸收响应。目前已被报道的过渡金属硫化物包括 MoS_2 、 WS_2 、 MoSe_2 、 WSe_2 、 MoTe_2 、 WTe_2 等。此外,2015 年,黑磷首次被应用于掺铒锁模光纤激光器,获得了脉冲能量 94.3 nJ 调 Q 激光和 946 fs 锁模脉冲输出^[71]。除了上述的一些材料类可饱和吸收体,近几年,研究人员发现了 MXene^[72]、钙钛矿^[73]、铋烯^[74-75]、铋烯^[76-77] 等新型可饱和吸收体。

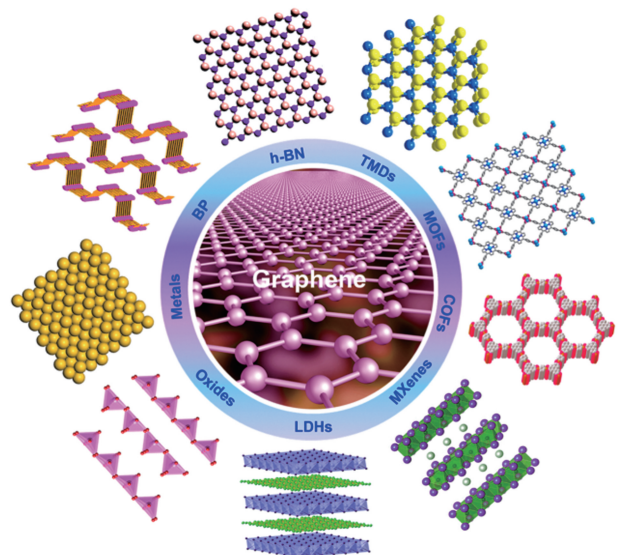


图 10 新型纳米材料类可饱和吸收体^[69]

Fig. 10 Novel nano-materials saturable absorbers^[69]

纳米材料光器件的光学特性与纳米材料的本质特性如带隙结构、非线性响应系数、载流子浓度、响应恢复时间等直接相关。二维纳米材料与光、电相互作用的机理发展为研制具有光电调控特性的光纤激光器带来了新的发展。2015 年, Lee 等^[78]首次制备了电控全光纤石墨烯器件,通过电场调控该器件,获得激光的调 Q 和锁模输出。该器件的制备过程是将石墨烯晶体场效应管浸入锂离子液体电解质中,并建立在边抛光纤之上,如图 11 所示。2017

年, Li 等^[79] 利用石墨烯制备了透射式电光调制器, 同步电场调控石墨烯的费米能级并获得调 Q 输出。特点是调 Q 脉冲的重复频率可以通过电场频率调节以及输出光谱可以通过腔内滤波器调控。2019 年, Gladush 等^[61] 利用电化学掺杂法修饰单壁碳纳米管薄膜, 并建立在边抛保偏光纤上, 利用倏逝场与

光纤中的光场相互作用。通过电场调控该器件在全保偏光纤激光器中获得了调 Q 和锁模光纤激光输出, 特点是具有很好的热稳定性和高功率稳定性。这种方案还可以应用于与离子凝胶结合的塑料光波导中, 为主动控制柔性光子器件等方向的应用提供了新途径。

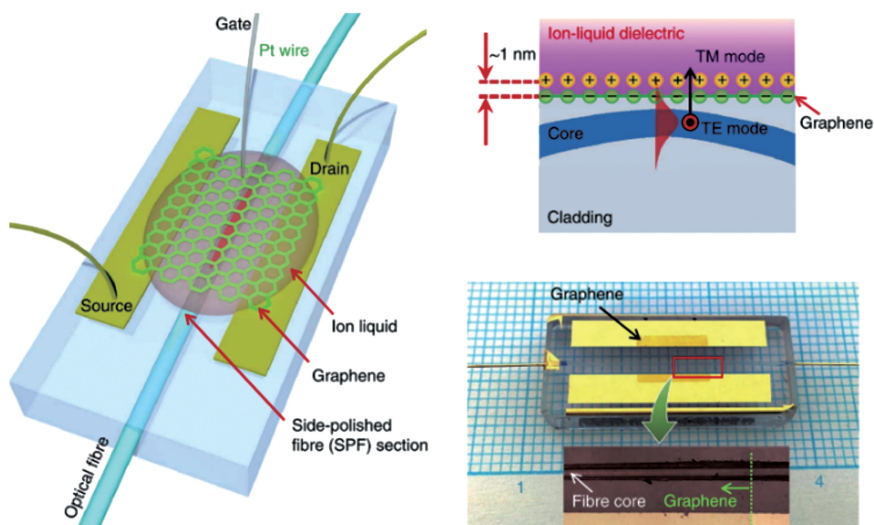


图 11 电控全光纤石墨烯器件的示意图和图片^[78]

Fig. 11 Schematic and image of gate-controlled all-fiber graphene devices^[78]

5 非线性多模干涉锁模技术

基模从单模光纤耦合入多模光纤时会激发出高阶模式, 高阶模式从多模光纤耦合回单模光纤后会产生非线性模式损耗。研究人员发现这种非线性多模干涉效应可以充当可饱和吸收体, 并具有稳定可控、易于使用和集成、适当的饱和通量、超快非线性响应等特点。非线性多模光纤可饱和吸收体的原理如图 12 所示^[80]。在非线性介质中由于受到自相位调制(SPM)、互相位调制(XPM)效应的影响, 不同光功率的折射率产生差异, 进而影响传输拍长, 通过控制光纤长度可以实现可饱和吸收效应的强弱控制。在多模光纤中, 对于低功率信号, 光束会由于芯

径失配而产生发散; 对于高功率信号, 自聚焦效应使得激光耦合进单模光纤中继续传输。2015 年, Fu 等^[81] 利用一段 4.9 cm 长的多模光纤在 Er/Yb 共掺光纤激光器中实现了调 Q 脉冲输出。2017 年, Li 等^[80] 通过单模-阶跃多模-渐变多模-单模 (SMF-SIMF-GIMF-SMF) 结构在掺 Tm 光纤激光器中实现了锁模脉冲输出, 脉冲宽度为 1.4 ps, 激光器光路装置图如图 13 所示。图 13 (a) 为可饱和吸收体结构示意图, 图 13 (b) 为其图片。其中 SIMF 长度为 328 μm , 主要作用是增加高阶模的数量, 通过弯曲 SIMF 可以改变界面的模场。弯曲半径大小可以调节耦合进 GIMF 的 LG_{0M} 模式比例, 从而影响输出参数。

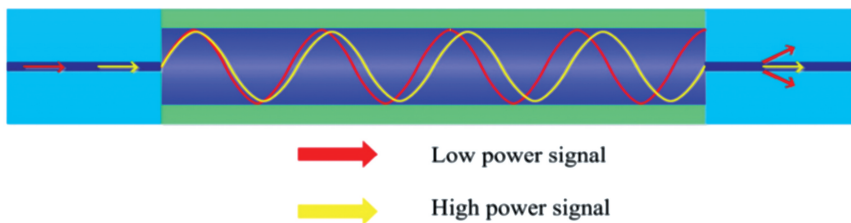


图 12 非线性多模干涉可饱和吸收体原理图^[80]

Fig. 12 Schematic diagram of NLMMI saturable absorption^[80]

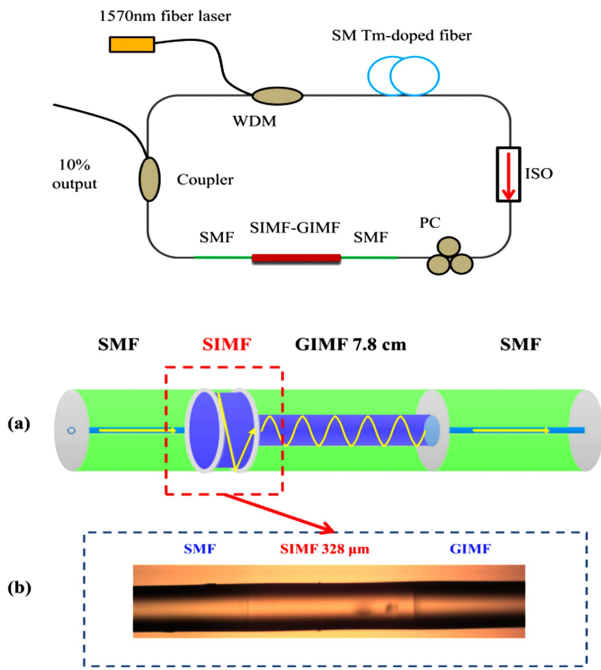


图 13 SMF-SIMF-GIMF-SMF 非线性多模干涉掺 Tm 光纤激光器^[80]

Fig. 13 SMF-SIMF-GIMF-SMF nonlinear multimode interference Tm-doped fiber laser^[80]

2019 年, Wang 等^[82] 利用一段无芯渐变多模 (NCF-GIMF) 光纤实现了耗散孤子和束缚态孤子脉冲输出, 其光路结构如图 14 所示。在 SA 两端放置了拉伸装置。NCF 的作用是在 GIMF 入口处发散光束和增加模场尺寸, 减少了泄露到包层的功率, 有利于提高 SA 的强度识别性能。通过调节 PC, 可以实现耗散孤子到束缚态孤子的切换, 当固定 PC 拉伸 SA 时, 可以得到连续可调的光谱。多模光纤结构激光器结构简单、输出稳定、脉冲输出类型多样, 但是仍然存在环境不稳定性、调控不方便等缺点, 具有深入研究的空间。

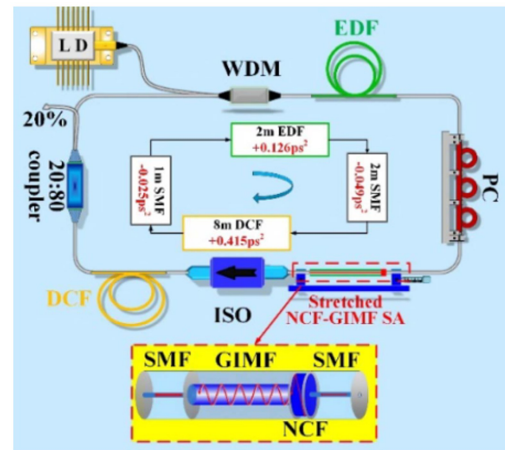


图 14 NCF-GIMF 非线性多模干涉光纤激光器^[82]

Fig. 14 NCF-GIMF NLMMI nonlinear multimode interference fiber laser^[82]

6 Mamyshev 锁模技术

为了进一步提升光纤激光器的峰值功率, 一种新型光纤振荡器即 Mamyshev 被提出^[17]。Mamyshev 光纤振荡器包含两个再生放大, 每个再生放大都有增益光纤、输出耦合器和滤波器。两个再生放大滤波器的中心波长不同是形成腔内饱和和吸收效应、获得大能量高功率的关键^[83]。Mamyshev 再生放大最早于 1998 年由 Mamyshev 提出, 随后被应用在通信领域。Mamyshev 可饱和吸收体的原理可以用图 15 来描述, 其核心部件为一个光谱滤波器和一段非线性光纤。输入脉冲信号 P_1 和噪声脉冲 P_2 , 两脉冲中心波长均为 λ_0 , 将两脉冲注入到一段非线性光纤中, 由于 P_1 脉冲峰值功率高于 P_2 脉冲, 在 SPM 效应的影响下 P_1 脉冲对应的光谱展宽范围更宽, 涵盖 $\lambda = \lambda_0 + \Delta\lambda$ 处, 而 P_2 脉冲的光谱并未达到 λ 处。此时增加一

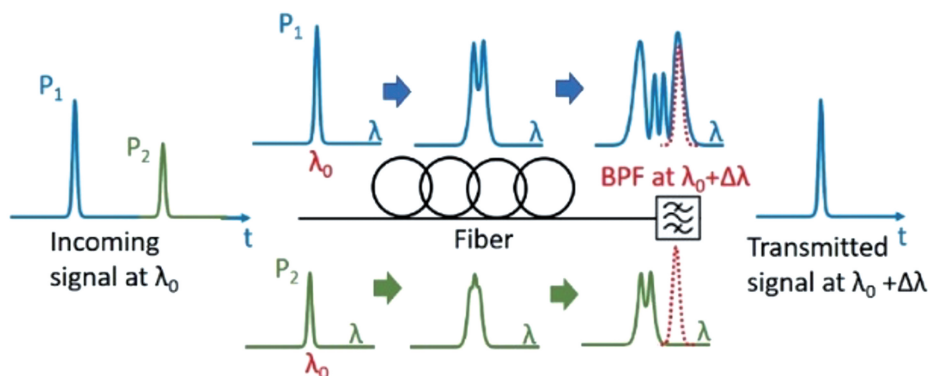


图 15 Mamyshev 再生器可饱和吸收效应原理图^[3]

Fig. 15 Schematic diagram of Mamyshev regenerator saturable absorption effect^[3]

中心波长为 λ 的光谱滤波器, 则仅有 P_1 脉冲的部分能量能够透过, 最终实现了滤除噪声 P_2 保留信号 P_1 的效果。

Mamyshev 可饱和吸收体的调制深度为 100%, 因此可以抑制噪声、连续光成分破坏脉冲输出, 缺点是不能够自启动^[17], 需要注入初始的脉冲信号, 这是由于低峰值激光无法保证足够的非线性效应展宽光谱。尽管如此, Mamyshev 振荡器在产生高功率上的巨大潜力吸引了研究人员的注意。为了解决 Mamyshev 振荡器的自启动问题, 使用电子可调旋转镜作为脉冲触发装置, 图 16 为环形 Mamyshev 振荡器示意图^[24]。激光器工作在全正色散域, 与线性振荡器相比, 环形振荡器具有更大的设计自由度来控制传播。增益光纤均为保偏光纤, 滤波器对于最大化输出脉冲质量和峰值功率非常重要, 两个滤波器的中心波长不同, 利用光栅作为空间滤波装置, 滤波器 1 的中心波长为 1045 nm, 带宽为 4 nm, 滤波器 2 的中心波长为 1025 nm, 带宽为 4 nm。隔离器能够确保激光单向运转, 偏振输出器 (PBS) 用作输出耦合器。Mamyshev 包含两个再生

放大, 臂 1 为 $6 \mu\text{m}$ 芯径的增益纤, 作为臂 2 低能量反馈部分。臂 2 为 $10 \mu\text{m}$ 芯径的增益纤, 作为主功率放大部分。Mamyshev 振荡器在稳态下运转一周的行为包括: 初放大 (增益纤 1)、光谱展宽 (增益纤 1 和随后的单模光纤)、脉冲能量调整 (隔离器)、滤波 (滤波器 2)、再放大 (增益纤 2 和随后的单模光纤)、输出 (偏振分束器)、滤波 (滤波器 1)。其中, 半波片 (HWP) 是用来调整进入保偏光纤的偏振态和耦合输出的比率。外部宽带激光激励源从滤波器 1 的光栅进入 Mamyshev 振荡器中。经过单模光纤和增益光纤后, 受到 SPM 效应而发生光谱展宽, 在腔内形成循环。若无种子源注入, 则无法积累足够的非线性效应展宽光谱。该装置最终输出脉冲峰值功率达 3 MW, 脉冲宽度为 35 fs, 单脉冲能量为 190 nJ。2020 年, Ma 等^[84] 通过两段大模场保偏掺镱增益光纤, 实现了 13 MW 峰值功率的激光脉冲输出。这已经超过了传统商用钛蓝宝石激光器的输出峰值功率, 足以证明 Mamyshev 振荡器的巨大潜力, 并有望替代传统商用钛蓝宝石激光器。

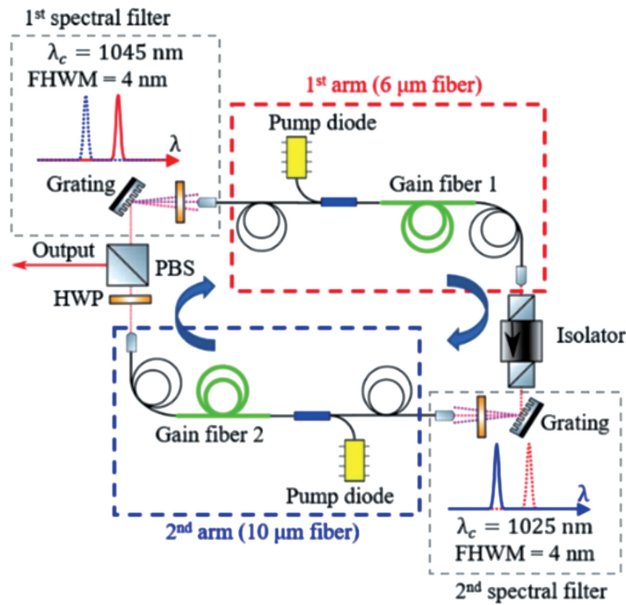


图 16 环形 Mamyshev 振荡器示意图^[24]

Fig. 16 Schematic diagram of the ring Mamyshev oscillator^[24]

图 17 为 Sidorenko 等^[24] 通过模拟仿真说明了 Mamyshev 腔内运转的动力学过程, 其中 P 为被动光纤, G 为增益光纤, F 为滤波器, 索引 1 和 2 分别对应 $6 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 臂。模拟中考虑了克尔非线性、拉曼散射效应、自陡峭效应、二阶和三阶非线性效应。随着脉冲在 Mamyshev 振荡腔内传输, 在经过增益纤 1

时光谱急剧展宽, 经过与滤波器 1 中心波长不相同的滤波器 2 时, 大部分光谱被耗散掉, 脉冲变窄, 再经过增益纤 2 后光谱又被展宽, 后经滤波器 1 光谱重新回到初始稳态条件。模拟过程可以看出, 克尔非线性效应导致的光谱展宽是连接两部分光放大的桥梁, 利用非线性效应来获得高功率超短脉冲。获得的脉

冲能量和峰值功率还可以通过使用大模场光纤或分脉冲放大等技术进一步放大,通过这些技术可以直接

从振荡器中获得微焦耳级的 100 MW 脉冲,进一步推动了光纤激光器的商业化应用。

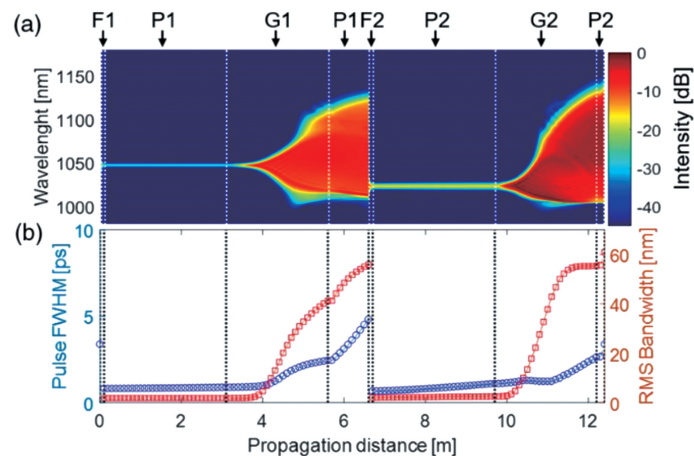


图 17 理论结果说明 190 nJ 脉冲输出^[24]。(a)腔内脉冲的光谱演化;(b)脉冲宽度演化(圆圈)和均方根带宽(方块)

Fig. 17 Numerical simulation results for 190 nJ output pulse^[24]. (a) Spectral evolution of the pulse in the cavity;

(b) evolution of the pulse duration (circles) and RMS bandwidth (squares)

7 结束语

本文梳理了近期利用各类可饱和吸收效应实现锁模的超快光纤激光器研究进展,包括利用偏振损耗锁模的 NPR;利用干涉损耗实现锁模的 NOLM;利用强度损耗实现锁模的 Nanomaterials;利用模式损耗实现锁模的 NLMMI;利用 SPM 非线性频谱损耗实现锁模的 Mamyshev。这些锁模机制充分利用了光的偏振、干涉、模式、幅值、非线性等物理特性,为超快锁模光纤激光器在更多的应用场景中应用提供了可能。

超快光纤激光具有重要的应用价值,研究人员期望超快光纤光源更加的稳定、便宜、便携,智能满足日益增加的使用场景。因此熟悉以上所综述的各种非线性可饱和吸收效应锁模机理,设计出满足不同应用需求的超快光纤激光,将有助于推动超快光纤激光器向着更加成熟的方向发展。

参 考 文 献

- [1] Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 831-838.
- [2] Fermann M E, Hartl I. Ultrafast fibre lasers [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 868-874.
- [3] Fu W, Wright L G, Sidorenko P, et al. Several new directions for ultrafast fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9432-9463.
- [4] Zhao L M, Tang D Y. Generation of 15-nJ bunched noise-like pulses with 93 nm bandwidth in an erbium-doped fiber ring laser [J]. *Applied Physics B*, 2006, 83(4): 553-557.
- [5] Han X X. Nanotube-mode-locked fiber laser delivering dispersion-managed or dissipative solitons [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(8): 1472-1476.
- [6] Chong A, Buckley J, Renninger W, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [7] Zhao L M, Tang D Y, Wu J. Gain-guided soliton in a positive group-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2006, 31(12): 1788-1790.
- [8] Chen S H, Yi L, Guo D S, et al. Self-similar evolutions of parabolic, Hermite-Gaussian, and hybrid optical pulses: universality and diversity [J]. *Physical Review E. Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, 72(1 Pt 2): 016622.
- [9] Du Y Q, Shu X W. Pulse dynamics in all-normal dispersion ultrafast fiber lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, 34(3): 553-558.
- [10] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(2): 84-92.
- [11] Bao Q L, Zhang H, Wang Y, et al. Atomic-layer graphene as a saturable absorber for ultrafast pulsed lasers [J]. *Advanced Functional Materials*, 2009, 19(19): 3077-3083.
- [12] Paschotta R, Keller U. Passive mode locking with slow saturable absorbers [J]. *Applied Physics B*, 2001, 73(7): 653-662.
- [13] Zhang B T, Liu J, Wang C, et al. Recent progress in 2D material-based saturable absorbers for all solid-

- state pulsed bulk lasers [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14(2): 1900240.
- [14] Zhao W, Chen G W, Li W L, et al. All-fiber saturable absorbers for ultrafast fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-19.
- [15] Chédot C, Lecaplain C, Idlahcen S, et al. Mode-locked ytterbium-doped fiber lasers: new perspectives [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2008, 27(5): 341-354.
- [16] Zhou J Q, Pan W W, Zhang L, et al. Research advances in mode-locked fiber lasers based on nonlinear loop mirror[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(5): 0508013.
周佳琦, 潘伟巍, 张磊, 等. 非线性环路反射镜锁模光纤激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2019, 46(5): 0508013.
- [17] Liu Z W, Ziegler Z M, Wright L G, et al. Megawatt peak power from a Mamyshev oscillator[J]. *Optica*, 2017, 4(6): 649-654.
- [18] Kurtner F X, der Au J A, Keller U. Mode-locking with slow and fast saturable absorbers-what's the difference?[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1998, 4(2): 159-168.
- [19] Liu X, Guo Q, Qiu D J. Emerging low-dimensional materials for nonlinear optics and ultrafast photonics [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(14): 1605886.
- [20] Xu H Y, Wan X J, Ruan Q J, et al. Effects of nanomaterial saturable absorption on passively mode-locked fiber lasers in an anomalous dispersion regime: simulations and experiments [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(3): 1-9.
- [21] Li D J, Tang D Y, Zhao L M, et al. Mechanism of dissipative-soliton-resonance generation in passively mode-locked all-normal-dispersion fiber lasers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(18): 3781-3787.
- [22] Cheng Z C, Li H H, Wang P. Simulation of generation of dissipative soliton, dissipative soliton resonance and noise-like pulse in Yb-doped mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 5972-5981.
- [23] Luo A P, Luo Z C, Liu H, et al. Noise-like pulse trapping in a figure-eight fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10421-10427.
- [24] Sidorenko P, Fu W, Wright L G, et al. Self-seeded, multi-megawatt, Mamyshev oscillator [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(11): 2672-2675.
- [25] Wang G Z, Baker-Murray A A, Blau W J. Saturable absorption in 2D nanomaterials and related photonic devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2019, 13(7): 1800282.
- [26] Zhao L M, Lu C, Tam H Y, et al. Gain dispersion for dissipative soliton generation in all-normal-dispersion fiber lasers[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(27): 5131-5137.
- [27] Zhao H, Chai L, Ouyang C M, et al. A long-cavity all-normal-dispersion mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(12): 2958-2963.
赵慧, 柴路, 欧阳春梅, 等. 长腔全正色散锁模掺镱光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(12): 2958-2963.
- [28] Luo J L, Ge Y Q, Tang D Y, et al. Mechanism of spectrum moving, narrowing, broadening, and wavelength switching of dissipative solitons in all-normal-dispersion Yb-fiber lasers [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(1): 1-8.
- [29] Szczepanek J, Kardaś T M, Radzewicz C, et al. Ultrafast laser mode-locked using nonlinear polarization evolution in polarization maintaining fibers[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(3): 575-578.
- [30] Zhou J Q, Pan W W, Gu X J, et al. Dissipative-soliton generation with nonlinear-polarization-evolution in a polarization maintaining fiber [J]. *Optics Express*, 2018, 26(4): 4166-4171.
- [31] Radnatarov D, Khripunov S, Kobtsev S, et al. Automatic electronic-controlled mode locking self-start in fibre lasers with non-linear polarisation evolution[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20626-20631.
- [32] Andral U, Si Fodil R, Amrani F, et al. Fiber laser mode locked through an evolutionary algorithm[J]. *Optica*, 2015, 2(4): 275.
- [33] Baumeister T, Brunton S L, Nathan Kutz J. Deep learning and model predictive control for self-tuning mode-locked lasers[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(3): 617-626.
- [34] Pu G Q, Yi L L, Zhang L, et al. Intelligent programmable mode-locked fiber laser with a human-like algorithm[J]. *Optica*, 2019, 6(3): 362-369.
- [35] Pu G, Yi L, Zhang L, et al. Intelligent control of mode-locked femtosecond pulses by time-stretch-assisted real-time spectral analysis[J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 13.
- [36] Wei Z W, Liu M, Cui H, et al. Recent progress of soliton transient dynamics in ultrafast fiber lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(7): 070006.
魏志伟, 刘萌, 崔虎, 等. 超快光纤激光器中孤子瞬态动力学特性研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(7): 070006.

- [37] Jeong Y, Vazquez-Zuniga L A, Lee S, et al. On the formation of noise-like pulses in fiber ring cavity configurations[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, 20(6): 575-592.
- [38] Santiago-Hernandez H, Pottiez O, Duran-Sanchez M, et al. Dynamics of noise-like pulsing at sub-ns scale in a passively mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 18840-18849.
- [39] Zhao J Q, Zhou J, Jiang Y Y, et al. Nonlinear absorbing-loop mirror in a holmium-doped fiber laser [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(21): 6069-6075.
- [40] Szczepanek J, Kardaś T M, Michalska M, et al. Simple all-PM-fiber laser mode-locked with a nonlinear loop mirror [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3500-3503.
- [41] Aguegaray C, Broderick N G R, Erkintalo M, et al. Mode-locked femtosecond all-normal all-PM Yb-doped fiber laser using a nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Express*, 2012, 20(10): 10545-10551.
- [42] Zhou J Q, Gu X J. 32 nJ 615 fs stable dissipative soliton ring cavity fiber laser with Raman scattering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(4): 453-456.
- [43] Jiang T X, Cui Y F, 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.
- [44] Liu G Y, Jiang X H, Wang A M, et al. Robust 700 MHz mode-locked Yb: fiber laser with a biased nonlinear amplifying loop mirror [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26003-26008.
- [45] Kojou J, Watanabe Y, Agrawal P, et al. Wavelength tunable Q-switch laser in visible region with Pr³⁺-doped fluoride-glass fiber pumped by GaN diode laser [J]. *Optics Communications*, 2013, 290: 136-140.
- [46] Nikkinen J, Härkönen A, Leino I, et al. Generation of sub-100 ps pulses at 532, 355, and 266 nm using a SESAM Q-switched microchip laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(21): 1816-1819.
- [47] Huang T, He Q, She X, et al. Study on thermal splicing of ZBLAN fiber to silica fiber [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(10): 106119.
- [48] Luo Z Q, Ruan Q J, Zhong M, et al. Compact self-Q-switched green upconversion Er: ZBLAN all-fiber laser operating at 543.4 nm [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(10): 2258-2261.
- [49] Luo Z Q, Wu D D, Xu B, et al. Two-dimensional material-based saturable absorbers: towards compact visible-wavelength all-fiber pulsed lasers [J]. *Nanoscale*, 2016, 8(2): 1066-1072.
- [50] Li W S, Du T J, Lan J L, et al. 716 nm deep-red passively Q-switched Pr: ZBLAN all-fiber laser using a carbon-nanotube saturable absorber [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(4): 671-674.
- [51] Gaponenko M, Metz P W, Härkönen A, et al. SESAM mode-locked red praseodymium laser [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(24): 6939-6941.
- [52] Alessi A, Girard S, Morana A, et al. Structured blue emission in Bismuth doped fibers [J]. *Optical Materials*, 2018, 84: 663-667.
- [53] Wu D D, Cai Z P, Zhong Y L, et al. Compact passive Q-switching Pr³⁺-doped ZBLAN fiber laser with black phosphorus-based saturable absorber [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(1): 7-12.
- [54] Luo S Y, Yan X G, Xu B, et al. Few-layer Bi₂Se₃-based passively Q-switched Pr: YLF visible lasers [J]. *Optics Communications*, 2018, 406: 61-65.
- [55] Li W, Wu J, Guan X, et al. Efficient continuous-wave and short-pulse Ho³⁺-doped fluorozirconate glass all-fiber lasers operating in the visible spectral range [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(11): 5272-5279.
- [56] Li W S, Zhu C H, Rong X F, et al. Bidirectional red-light passively Q-switched all-fiber ring lasers with carbon nanotube saturable absorber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(13): 2694-2701.
- [57] Zhang Y X, Lu D Z, Yu H H, et al. Low-dimensional saturable absorbers in the visible spectral region [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(1): 1800886.
- [58] Zou J, Dong C, Wang H, et al. Towards visible-wavelength passively mode-locked lasers in all-fibre format [J]. *Light, Science & Applications*, 2020, 9: 61.
- [59] He J, Tao L, Zhang H, et al. Emerging 2D materials beyond graphene for ultrashort pulse generation in fiber lasers [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(6): 2577-2593.
- [60] Gong C H, Hu K, Wang X P, et al. 2D nanomaterial arrays for electronics and optoelectronics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(16): 1706559.
- [61] Gladush Y, Mkrtchyan A A, Kopylova D S, et al. Ionic liquid gated carbon nanotube saturable absorber for switchable pulse generation [J]. *Nano Letters*, 2019, 19(9): 5836-5843.
- [62] Wang Y R, Zhang B T, Yang H, et al. Passively mode-locked solid-state laser with absorption tunable graphene saturable absorber mirror [J]. *Journal of*

- Lightwave Technology, 2019, 37(13): 2927-2931.
- [63] Liu W, Pang L, Han H, et al. 70 fs mode-locked erbium-doped fiber laser with topological insulator [J]. Scientific Reports, 2016, 6: 19997.
- [64] Zhang J, Ouyang H, Zheng X, et al. Ultrafast saturable absorption of MoS₂ nanosheets under different pulse-width excitation conditions [J]. Optics Letters, 2018, 43(2): 243-246.
- [65] Chen R Z, Zheng X, Jiang T. Broadband ultrafast nonlinear absorption and ultra-long exciton relaxation time of black phosphorus quantum dots [J]. Optics Express, 2017, 25(7): 7507-7519.
- [66] Zhang M, Wu Q, Zhang F, et al. 2D black phosphorus saturable absorbers for ultrafast photonics [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(1): 1800224.
- [67] Tian Q Y, Yin P, Zhang T, et al. MXene Ti₃C₂T_x saturable absorber for passively Q-switched mid-infrared laser operation of femtosecond-laser-inscribed Er: Y₂O₃ ceramic channel waveguide [J]. Nanophotonics, 2020, 9(8): 2495-2503.
- [68] Grinblat G, Abdelwahab I, Nielsen M P, et al. Ultrafast all-optical modulation in 2D hybrid perovskites [J]. ACS Nano, 2019, 13(8): 9504-9510.
- [70] 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.
- [71] Chen Y, Jiang G B, Chen S Q, et al. Mechanically exfoliated black phosphorus as a new saturable absorber for both Q-switching and Mode-locking laser operation [J]. Optics Express, 2015, 23(10): 12823-12833.
- [72] Jhon Y I, Koo J, Anasori B, et al. 2D materials: metallic MXene saturable absorber for femtosecond mode-locked lasers [J]. Advanced Materials, 2017, 29(40): 2496.
- [73] Li P F, Chen Y, Yang T S, et al. Two-dimensional CH₃NH₃PbI₃ perovskite nanosheets for ultrafast pulsed fiber lasers [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(14): 12759-12765.
- [74] Chai T, Li X H, Feng T C, et al. Few-layer bismuthene for ultrashort pulse generation in a dissipative system based on an evanescent field [J]. Nanoscale, 2018, 10(37): 17617-17622.
- [75] Xu N N, Ma P F, Fu S G, et al. Tellurene-based saturable absorber to demonstrate large-energy dissipative soliton and noise-like pulse generations [J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 2783-2795.
- [76] Lu L, Liang Z M, Wu L M, et al. Few-layer bismuthene: sonochemical exfoliation, nonlinear optics and applications for ultrafast photonics with enhanced stability [J]. Laser & Photonics Reviews, 2018, 12(1): 1870012.
- [77] Wang K, Zheng J, Huang H, et al. All-optical signal processing in few-layer bismuthene coated microfiber: towards applications in optical fiber systems [J]. Optics Express, 2019, 27(12): 16798-16811.
- [78] Lee E J, Choi S Y, Jeong H, et al. Active control of all-fibre graphene devices with electrical gating [J]. Nature Communications, 2015, 6: 6851.
- [79] Li D, Xue H, Qi M, et al. Graphene actively Q-switched lasers [J]. 2D Materials, 2017, 4(2): 025095.
- [80] Li H H, Wang Z K, Li C, et al. Mode-locked Tm fiber laser using SMF-SIMF-GIMF-SMF fiber structure as a saturable absorber [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 26546-26553.
- [81] Fu S J, Sheng Q, Zhu X S, 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.
- [82] Wang Z K, Li L J, Wang D N, et al. Generation of pulse-width controllable dissipative solitons and bound solitons by using an all fiber saturable absorber [J]. Optics Letters, 2019, 44(3): 570-573.
- [83] Yu X, Luo J Q, Xiao X S, et al. Research progress of high-power ultrafast fiber lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(5): 0508007. 余霞, 罗佳琪, 肖晓晟, 等. 高功率超快光纤激光器研究进展 [J]. 中国激光, 2019, 46(5): 0508007.
- [84] Ma C Y, Khanolkar A, Zang Y M, et al. Ultrabroadband, few-cycle pulses directly from a Mamyshev fiber oscillator [J]. Photonics Research, 2020, 8(1): 65-69.

Research Progress of Mode-Locked Fiber Lasers Based on Saturable Absorbers

Dong Zikai, Song Yanrong*

Faculty of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China

Abstract

Signature For the past two decades, ultrafast fiber lasers have become fundamental building blocks in many applications, such as optical communications, biomedical imaging, and industrial processing. Passive mode-locking techniques have been investigated. The nonlinear saturable absorption (SA) effect is the core of the passive mode-locking technology of fiber lasers. Passive mode-locking techniques can be categorized into real and artificial saturable absorbers. The real saturable absorbers consist of semiconductor saturable absorption mirrors (SESAM) and nanomaterials. The artificial saturable absorbers consist of the nonlinear polarization rotation evolution (NPE), nonlinear optical loop mirror (NOLM), nonlinear multimode interference (NLMMI), and Mamyshev regenerator (Mamyshev). The abovementioned passive mode-locking technologies have their advantages and disadvantages. In this study, we briefly illustrate their pros and cons and review their recent development in various types of saturable absorption effects in the application of ultrafast pulse generation.

For real saturable absorbers, rising from the extraordinary physical, optical, and electronic properties of graphene in 2004, layered-dependent nanomaterials have attracted significant attention because of their advantages of cost-effectiveness, broadband optical response, high nonlinear, fast relaxation, and flexible compatibility with other photonics structures. The optical modulation effect of nanomaterials provides a pulse shaping mechanism (i. e., reduced absorption with increasing optical intensity); thus, it can support stable pulse generation and operation in a laser system. Most optical modulators are based on the third-order nonlinear optical response of nanomaterials, such as saturable absorption and optical Kerr effects. SA is a process originating from valence band depletion, conduction band filling, and ultrafast intra-band carrier relaxation exhibited by the input power-dependent optical absorption. Various nanomaterial-based SAs have been demonstrated for pulse generation in fiber lasers operating from the visible to mid-infrared regions. For the artificial saturable absorbers, these passive mode-locking technologies including NPE, NOLM, NLMMI, and Mamyshev could generate ultrashort, high repetition ratio, and high peak power pulses with demand. The optical modulation effect of artificial saturable absorbers originates from the operating optical properties: NPE technique using the optical properties of polarization, NOLM technique using optical nonlinear interference, NLMMI technique utilizing nonlinear multimode interference, and Mamyshev mode-locking technique using nonlinear self-phase modulation. These artificial SAs could largely tune optical modulation depths and enable some types of pulse generation.

The above-mentioned passive mode-locking techniques have progressed considerably. NOLM mode-locking fiber laser has been used in frequency comb applications due to its high repetition ratio feature. Mamyshev mode-locking fiber laser-generated ultra-high peak power pulses could be compared to commercial Ti: Sapphire lasers. NPE mode-locking fiber lasers could largely tune operating pulse states, acting as an ideal seed source for laser amplifier systems. Mode-locking fiber lasers made of nanomaterials have wide application prospects due to their flexible features. With increasing demand for fiber lasers, the above-mentioned traditional passive mode-locking techniques need to improve their performances. Thus, we review the recent advancement of these techniques to illustrate how they overcome their disadvantages.

Progress There are two solutions to improve the stability of the NPE passive mode-locking technique. The first one is to replace traditional fiber with polarization maintaining (PM) fiber (Fig. 3), and the second one is to use an external intelligent algorithm to stabilize laser performance (Fig. 4). All-PM fiber laser cavity construction is not easy since the orthogonal polarization states will induce a walkaway effect when propagating. Szczepanek et al. used the PM fiber segments cross-fused method to solve the intracavity orthogonal polarization walkaway effect. They obtain ultrashort pulses under the condition of all-PM fiber construction. An external intelligent algorithm is a method to actively control fiber laser performance and successfully realize an intelligently controlled fiber laser system. Its advantages include not only stabilizing the laser performance but also switching the pulsed laser operation states. A

major advantage of the NOLM mode-locking technique is phase stability. Therefore, a high repetition ratio fiber laser for frequency comb application always employs the NOLM technique (Fig. 7). Besides, NOLM can tolerate larger cavity loss than other mode-locking techniques due to its nonlinear interference mode-locking mechanism. Thus, the NOLM mode-locking technique was the first reported visible waveband mode-locking fiber laser where the cavity loss is very large (Fig. 8). The nanomaterial-based saturable absorption (SA) mode-locking technique has a flexible feature that could extend its application region. However, its mode-locking mechanism is laser intensity-dependent absorption rising from nanomaterials. The mode-locking laser performance mainly depends on the optical properties of nanomaterials. The optical properties of integrated nanomaterials SA cannot be operated. To solve this issue, an external gate-controlled fiber laser can be used to tune the optical properties of nanomaterials, thereby controlling the mode-locking performance (Fig. 11). NLMMI is a novel mode-locking technique inspired by the Kerr effect mode-locking mechanism of a solid-state mode-locking laser. Its advantages are its ultrafast response time and all-fiber structure (Fig. 14). Mamyshev regenerator with self-phase modulation mechanism can generate ultra-high peak power. However, it has certain disadvantages such as the Mamyshev regenerator requires an external laser to excite Mamyshev regenerator operation (Fig. 16). With the above mode-locking techniques, ultrafast fiber lasers can satisfy end-users.

Conclusions and Prospects As the mechanism of saturable absorber effects for mode-locked fiber lasers are clear, researchers will be able to choose appropriate mode-locking mechanisms to satisfy the specific demands of end-users. Finally, the recent progress of ultrafast fiber lasers poses a new challenge; thus, more investigation is required.

Key words laser optics; ultrafast fiber laser; saturable absorber; saturable absorption effects

OCIS codes 140.3380; 320.7090; 190.4370