

高损伤阈值可饱和吸收体锁模脉冲光纤激光器的研究进展

崔文文 邢笑伟 肖悦嘉 刘文军

Research progress of mode-locked pulsed fiber lasers with high damage threshold saturable absorber

Cui Wen-Wen Xing Xiao-Wei Xiao Yue-Jia Liu Wen-Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 024206 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212442

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212442>

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

基于二维材料异质结可饱和吸收体的超快激光器

Ultrafast pulse lasers based on two-dimensional nanomaterial heterostructures as saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 188102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201235>

基于铋可饱和吸收体的超快激光产生

Generation of ultra-fast pulse based on bismuth saturable absorber

物理学报. 2020, 69(9): 094203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191995>

MnPS₃可饱和吸收体被动锁模掺铒光纤激光器双波长激光

Dual-wavelength self-starting mode-locking Er-doped fiber laser with MnPS₃ saturable absorber

物理学报. 2020, 69(18): 184208 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200342>

基于二维纳米材料可饱和吸收体的中红外超快光纤激光器

Two-dimensional material as a saturable absorber for mid-infrared ultrafast fiber laser

物理学报. 2020, 69(18): 188101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200472>

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>

基于单壁碳纳米管调Q锁模低阈值Tm,Ho:LiLuF₄激光器

Passively Q-switched mode-locked low threshold Tm, Ho: LLF laser with an single walled carbon nanotubes saturable absorber

物理学报. 2018, 67(1): 014201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171748>

专题: 微纳光电子与激光

高损伤阈值可饱和吸收体锁模脉冲光纤激光器的研究进展*

崔文文 邢笑伟 肖悦嘉 刘文军†

(北京邮电大学理学院, 信息光子与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

(2021年12月31日收到; 2022年1月11日收到修改稿)

光纤激光器作为推动各领域发展的基础硬件, 在轨道交通、光纤通信、新材料制造、动力电池加工、军事国防和医疗等领域都有广泛的应用价值. 光纤激光器被动锁模技术的核心器件是可饱和吸收体, 它对光纤激光器实现高能量、窄脉宽、大功率的激光输出起决定性作用. 依托传统材料和传统结构的可饱和吸收体, 由于无散热机制, 光作用到材料上的光斑大小与光纤出射直径几乎相同, 容易超过可饱和吸收体的损伤阈值而造成损坏. 因此, 调整可饱和吸收体制备工艺和结构, 对于提高可饱和吸收体的损伤阈值, 实现性能优良、稳定性高的脉冲激光具有重要意义. 本文综述了高损伤阈值可饱和吸收体国内外研究现状, 指出了高损伤阈值可饱和吸收体可能的发展方向.

关键词: 超快光纤激光器, 可饱和吸收体, 高损伤阈值**PACS:** 42.55.Wd, 42.65.Re, 42.70.Hj**DOI:** 10.7498/aps.71.20212442

1 引言

超快激光技术相比传统脉冲和连续激光技术具有高功率、窄脉宽、高精度的独特优势^[1-5]. 近年来, 超快光纤激光器在通信、军事、医疗以及工业制造等诸多领域内均获得了大规模的应用^[6,7]. 超快光纤激光器结合了超快技术与光纤激光技术的优势, 实现了脉冲光与材料之间的快速相互作用, 电子吸收与运动方式在瞬间注入作用区的高能量密度下发生改变, 快速的相互作用降低了能量转移、转化和热扩散^[8], 因此, 超快光纤激光器能够实现高能量大功率的锁模脉冲激光输出. 然而, 高能量的注入对材料的损伤阈值提出了更高的要求.

锁模技术的出现开辟了超快激光的时代. 早在1990年, 改进后的被动锁模光纤激光器实现了飞秒量级的锁模脉冲输出^[9]. 锁模技术主要分为主

动锁模技术与被动锁模技术. 主动锁模技术利用电光、声光调制器通过同步调制频率与纵模间隔频率来实现对脉冲振幅的调制, 从而达到锁模的目的, 由于其重复频率可调谐, 可与外部电脉冲信号合成, 易于获得高重频光脉冲序列, 被广泛应用于光纤通信领域. 但主动锁模器件引入了周期性的损耗, 脉宽仅能达到皮秒量级. 因此, 被动锁模成为产生飞秒激光的首选方案.

被动锁模技术一般包括两种: 基于真实材料的可饱和吸收体 (saturable absorber, SA) 与等效 SA 的结构. 利用这两种不同的 SA 实现对脉冲的窄化, 避免了光学调制器的引入, 简化了光纤激光器, 使得锁模激光状态更稳定. 然而, 由于高能量激光与材料的快速相互作用, 容易造成锁模器件的损坏. 因此, 通过对 SA 损伤机制的研究, 制备不同特性的高损伤阈值 SA 对光纤激光器被动锁模的发展具有重要意义. 对于 SA, 最常用的结构为半导体可饱和

* 国家自然科学基金 (批准号: 11875008, 12075034) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jungliu@bupt.edu.cn

吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirror, SESAM). 1990 年, Keller 等^[10]就对其可饱和吸收效应进行了研究, SESAM 目前是商业和科研领域较成熟的锁模器件, 但由于其可饱和吸收带宽窄等缺点, 研究人员不断寻找能够进行等效替代的新型材料. 以石墨烯、碳纳米管、过渡金属二卤化物^[11]、钙钛矿薄膜、拓扑材料^[12]等为代表的 SA 均取得了较好的锁模效果, 但制备的 SA 器件的低损伤阈值限制了其应用, 且它的锁模能量与等效 SA 结构相比普遍较低. 因此, 对于光纤激光器 SA 的优化方向一方面是探索高损伤阈值的 SA, 另一方面是从等效 SA 入手, 对于其脉冲偏振过程进行可控制制.

2 高损伤阈值 SA 的全光纤激光器

2.1 高损伤阈值 SA 的制备方法

目前, 高损伤阈值 SA 作为光纤激光器被动锁模技术中的核心器件, 具有损伤阈值高、能实现更高功率和更大能量的激光输出的特点. 基于材料的高损伤阈值 SA 主要利用的是材料本身与光强相关的非线性效应. 早在 20 世纪 70 年代, SA 已被用于被动锁模中, 当入射光脉冲照射到 SA 表面时, 载流子从基态跃迁到激发态, 在激发态下, 基态离子逐渐被耗尽, 激发态离子达到饱和, 此时吸收达到了饱和^[13], 随后激发态离子伴随热稳定过程回到基态, 发出相应光脉冲. 脉冲光在经过 SA 时, 由于 SA 对光强的选择透过性, 使得高强度部分的光通过而低强度的光被滤除, 实现窄化光脉冲的作用.

激光在与材料短时间相互作用的过程中, 容易出现由于 SA 损伤阈值低导致锁模器件损坏的现象, 而通过制备不同特性的高损伤阈值 SA 可解决这一问题. 以二维材料为代表的 SA 因其高损伤阈值特性进入研究者的视野. 传统二维材料制备可由层状材料剥离获得, 由于其只有单原子层厚度或少数原子层厚度, 决定了电子只能从二维平面上运动, 也因此奠定了其优异的物理性质. 随着材料层数的减少, 材料的能带结构及载流子迁移率都会发生相应的改变, 二维材料的原子结构将直接影响材料的线性和非线性光学性能.

目前获得单层或少层二维材料的方法有机械剥离法 (mechanical exfoliation, ME)^[14]、化学气相沉积法 (chemical vapor deposition, CVD)^[15]、脉

冲激光沉积 (pulsed laser deposition, PLD)^[16]、磁控溅射法 (magnetron sputtering, MS)^[17] 和分子束外沿法 (molecular beam epitaxy, MBE)^[18] 等. 迄今为止使用最广泛的方法是 ME 和 CVD. ME 的材料通常具有良好的性能, 通过 ME 得到的单层石墨烯电子迁移率较高. 然而, ME 的方法不适于调控材料的面积和厚度, 无法批量生产. 但 CVD 可以简便地大面积生产二维材料薄膜, 较多研究团队利用 CVD 方法制备了单一材料高损伤阈值的 SA, 并实现了高功率、窄脉宽的激光输出. 为了结合多种二维材料的优异光学特性, 规避材料带隙或能带结构差异巨大带来的缺点, 根据需要定制个性化器件, 较多研究团队进行了异质结材料的研究. 异质结构的提出也有利于实现高损伤阈值 SA 的可控制备. 2018 年, Liu 等^[19]采用 MS 技术制备了 MoS₂-Sb₂Te₃-MoS₂ 异质结, 实现了脉宽 286 fs 的高损伤阈值、高功率、大调制深度、具有良好稳定性的脉冲激光输出.

除了传统材料制备方法外, 有关材料制备中的溶胶-凝胶法因分子水平均匀性较好而引起关注. 2019 年, Chen 等^[20]采用溶胶-凝胶方法制备固态氧化石墨烯——SiO₂ SA, 其光学损伤阈值高达 50.69 GW/cm², 实现了脉宽 582 fs、最大输出功率 17.58 mW 的脉冲激光. 2020 年, Chen 等^[21]同样将溶胶-凝胶法用于 CNT-SiO₂ 测得其损伤阈值为 52.05 GW/cm², 并实现了 456 fs 的孤子锁模脉冲激光输出. 通过溶胶-凝胶法制备出的 SA 很明显具备高损伤阈值的特性, 也将是未来光纤激光器 SA 提高损伤阈值的方法之一.

除了溶胶-凝胶法制备高损伤阈值 SA 之外, 关于无机物衬底的选择也影响着 SA 的特性. 2021 年, Liu 等^[22]通过以氟云母 (fluormica, FM) 为衬底采用 MS 技术制备氮化硼的方法实现了高损伤阈值 SA 的制备, 利用 FM 良好散热性能和较低插入损耗的特点输出了脉宽 237 fs、平均输出功率 35.39 mW 的脉冲激光. 2015 年, Li 等^[23]通过制备硫化钨/FM SA 发现其损伤阈值高达 406 MW/cm², 是硫化钨/聚合物吸收体的 2 倍. 2020 年, Liu 等^[24]也通过制备 Mo₂C-FM SA 实现了激光脉冲脉宽和平均输出功率分别为 313 fs 和 64.74 mW 的输出, 并在近红外波段传输率达到 90%. 因此, FM 作为 SA 的衬底不仅极大地提高了 SA 的损伤阈值, 而且对激光脉冲的各项指标优化具有重要意义. 像无机物 SiO₂ 除了作为提高损伤阈值的衬底以外, 对

于光纤激光器的非线性效应也具有重要的作用, 2020年, Zhang等^[25]报道了一种具有多层放大自发辐射(ASE)吸收膜的连续波端面泵浦Nd:YV₁₄激光器, 其中的涂层采用的是SiO₂-Ti-SiO₂-Ti-Au五层结构, 实验测试显示出良好的ASE控制性能. 无论是SiO₂还是FM, 通过选取不同的耐高温无机物作为SA衬底的方法在目前看来可有效提高SA的损伤阈值, 对光纤激光器的发展起着关键基础性作用.

无机物衬底与溶胶凝胶法可以有效提高SA的损伤阈值, 这一结论在2021年得到了进一步的认证. Zhang等^[26]将无机物二氧化铪与溶胶凝胶技术进行了结合, 研究了其在高温退火情况下的激光损伤阈值表现, 如图1所示, 损伤阈值在353 K下退火后达到了31.6 J/cm², 即使573 K下退火后, 损伤阈值也可以达到21.7 J/cm². 这些数据均表明薄膜具有很强的抗激光损伤能力, 并且在高温中可保持较好的稳定性.

2.2 高损伤阈值SA的插入腔结构

不同材料作为SA材料实现被动锁模的过程中, 与材料自身物理特性相比, SA插入腔的结构

对于实现锁模具有重要意义, 不同插入腔的结构直接决定了不同SA的损伤阈值. 通常实现具有可饱和吸收特性的SA有以下方法: “三明治”透射式结构、拉锥光纤式、D型光纤式、光子晶体光纤式等. SA插入腔结构如图2所示.

“三明治”透射式结构是指材料、法兰、光纤跳线之间形成的结构, 材料有两种形式与光纤跳线结合: 一种是将生成的材料薄膜夹在法兰中间, 另一种是利用光沉积法在光诱导下使材料溶液沉积在跳线表面. 这两种形成“三明治”透射式结构的制作方法简单、成本低、可重复性高, 但其损伤阈值低, 通过采取不同的材料制备方法可进一步提高“三明治”结构SA的损伤阈值. 2013年, Liu等^[27]采用在光纤端面周围沉积环形CNT的方法, 用于倏逝场相互作用, 这种CNT-SA将损伤阈值提高了130%, 实现了脉宽680 fs、平均功率30 mW的锁模脉冲激光输出. 2019年, Han等^[28]通过物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD)方法以In₂Se₃薄片作为SA实现了双端面泵浦高功率被动锁模激光器, PVD-In₂Se₃ SA表现出高于24 mJ/cm²的损伤阈值. 同年, Ma等^[29]采用CVD方法制备了

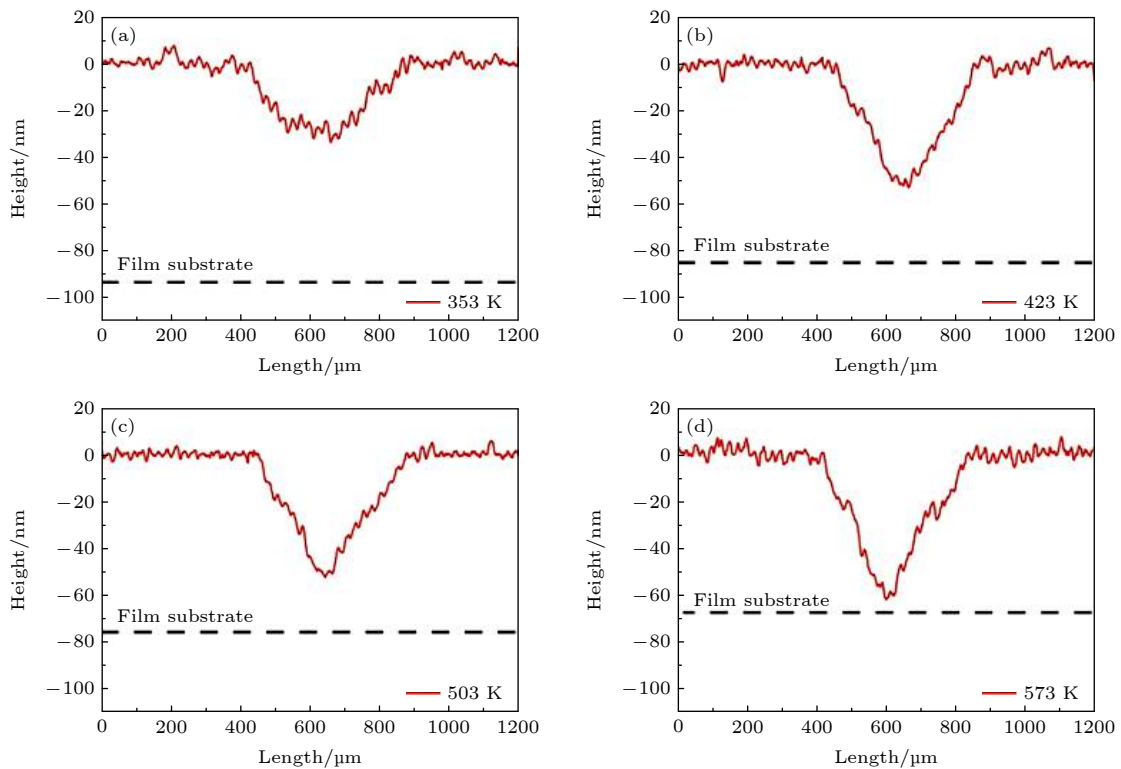


图1 HfO₂薄膜的损伤点深度图 (a) 353 K, 39.2 J/cm²; (b) 423 K, 38.6 J/cm²; (c) 503 K, 36.6 J/cm²; (d) 573 K, 31.7 J/cm²^[26]

Fig. 1. Damage spot depth map of the HfO₂ films: (a) 353 K, 39.2 J/cm²; (b) 423 K, 38.6 J/cm²; (c) 503 K, 36.6 J/cm²; (d) 573 K, 31.7 J/cm²^[26].

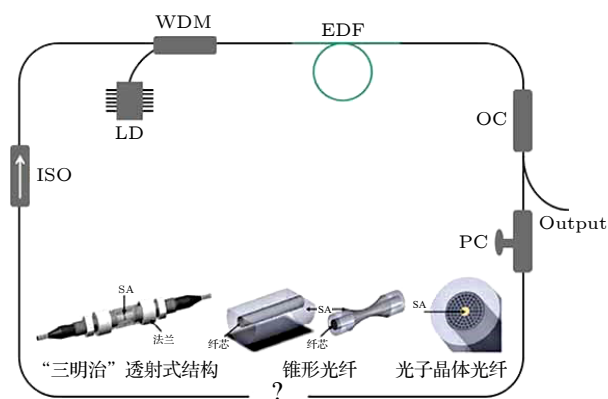


图2 不同SA插入结构的环形腔示意图

Fig. 2. Schematic diagram of annular cavity with different saturable absorber insertion structures.

玻璃-材料-玻璃“三明治”结构,制备了损伤阈值大于 26 mJ/cm^2 的 MoS_2 SA,实现了大功率、高能量锁模光纤激光器. 2021年, Wang等^[30]采用溶胶-凝胶方法,将 Ti-SiO_2 以“三明治”结构插入掺铒光纤激光器,基于溶胶-凝胶玻璃的SA比基于有机薄膜的SA在稳定性方面有了明显改进,其损伤阈值提高了近1个数量级.“三明治”结构的SA由于非线性作用区域较短并且沉积方法存在差异使激光器更易运转在调Q状态,不利于产生锁模超短脉冲.对调Q激光器而言,高损伤阈值SA的选取对于实现可调谐脉冲输出也是研究者关注的重点之一. 2021年, Salam等^[31]基于 Alq_3 在调Q光纤激光器中采用三明治结构,实现了高损伤阈值的多波长可调谐脉冲输出,其覆盖波长范围为 $1520\text{--}1563.5 \text{ nm}$,信噪比达 53 dB .

拉锥光纤和D型光纤是由于光纤制作工艺不同而形成的不同光纤结构,通过利用沉积在光纤锥区材料的光倏逝波效应,增加了光纤非线性作用面积,具有易于散热、可输出高功率激光脉冲的特点,并且少部分光与材料在倏逝场相互作用降低了锁模器件的调制深度,也存在光纤制作难度大、材料沉积不均匀等缺点,但是在很大程度上克服了SA损伤阈值低的问题,也是目前研究者提高SA损伤阈值的方法之一.以拉锥光纤为代表的可饱和吸收体技术较为成熟,2019年, Wu等^[32]通过在拉锥光纤上沉积 $\text{MXene-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 材料制备了简单紧凑的全光纤掺铒孤子和色散管理飞秒孤子激光器,在孤子振荡工作区实现了 597.8 fs ,弱正常色散腔 104 fs 的脉冲激光输出.更为新颖的D型光纤,不仅增大

了与材料间的接触面积,也表现出了很好的性能指标. 2008年, Song等^[33]利用D型光纤倏逝场与CNT结合,实现了 6.5 nJ 的皮秒脉冲输出,该锁模器件可承受 27.7 dBm 的功率. 2020年, Nizamani等^[34]采用抛光轮技术制备D型光纤,并将锡锡氧化物与D型光纤结合,实现了稳定的暗脉冲锁模激光器.为了提高SA的损伤阈值,从而获得高功率高能量脉冲输出,研究人员还将D型光纤与溶胶-凝胶法结合. 2021年, Liu等^[35]采用磁控溅射技术与溶胶-凝胶技术相结合,将 Mo_2C 埋在溶胶凝胶制备的二氧化硅与D型光纤之间,该方法有效解决了材料老化、脱落问题,提高了激光器的损伤阈值和稳定性,实现了脉宽 199 fs 、最大脉冲能量 430.47 nJ 、输出功率 54.13 mW 的锁模脉冲输出.

光子晶体光纤内镶嵌结构是指将材料注入光子晶体光纤内部,有利于增加光纤内部与材料的非线性作用面积,但因其制备工艺难度大、插入损耗大、容易在光子晶体光纤孔隙部分产生模式失真等缺点限制了光子晶体光纤的广泛应用. 2004年, Michaille等^[36]对比了 $8 \mu\text{m}$ 芯径的实芯光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 和空芯光子带隙光纤 (photonic bandgap fiber, PBG) 的激光损伤阈值,发现纤芯为 $8 \mu\text{m}$ 的PBG损伤阈值发生在脉冲能量近 1 mJ 时,其损伤阈值是 $8 \mu\text{m}$ 的PCF的4倍,因此选取合适的PBG对于进一步提高SA的损伤阈值具有重要意义,PCF在提高SA损伤阈值的研究领域内还有较大研究潜力.

目前来看,“三明治”透射式结构的损伤阈值相较于锥形光纤较低,但因制作成本低、制作流程简便的特点依然被广泛使用.“三明治”透射式结构可以通过改变材料衬底和材料的制备工艺入手提高激光器损伤阈值.锥形光纤中的D型光纤中增加了非线性相互作用面积,损伤阈值较高,但是D型光纤存在制备难度大的问题.因此,拉锥光纤是目前较为常用且方便的方法,但是对于锥区长度的精准控制也是未来要关注的方向.而光子晶体光纤因为要将材料注入光纤内部,制备困难,并不是一种非常理想的插入腔结构,但因其大接触面积的特点在其他非线性效应的研究中依然有着不可替代的作用.所以,通过插入腔结构优化SA的损伤阈值更为简便的方法应从两方面入手:一是“三明治结构”优化衬底和材料工艺,二是通过拉锥光纤探索优化方法.

3 高损伤阈值等效 SA 的光纤激光器

等效 SA 主要利用了光纤的非线性效应和光学器件之间的相互作用, 包括非线性偏振旋转^[37] (nonlinear polarization evolution, NPE)、非线性光环形镜^[38] 和非线性多模干涉^[39] 等. 由于等效 SA 自身结构特性使等效 SA 具备高损伤阈值的特点, 为了利用好这一特性并进一步提高损伤阈值, 研究人员对等效 SA 进行了广泛研究.

3.1 非线性偏振旋转

被动锁模技术中, NPE 是附加脉冲锁模 (additive pulse mode locking, APM) 技术的一种, 即两束信号光相干附加而实现锁模. NPE 利用的是光纤中的克尔效应, 通过调节波片来调节光的偏振态, 不同偏振态的激光会产生不同的非线性相移, 利用这种非线性相移差实现可饱和和吸收效应进而锁模. NPE 锁模结构如图 3 所示, 由偏振器件、波片和双折射光纤构成^[40].

在空间振荡腔中, 当入射光脉冲经过第一个偏振器后, 光脉冲的偏振态会转换为线偏振态, 再通过 1/4 波片后偏振态由线偏振态转换为椭圆偏振态. 椭圆偏振态的光脉冲在双折射光纤处累积随光强逐渐增大的非线性相移, 光脉冲中心高光强处经历非线性相移后偏振态会发生相应变化, 而光脉冲边翼处由于光强较低, 几乎没有经历非线性相移, 因此偏振态没有发生改变. 当光脉冲再次通过 1/4 波片和第二个偏振器后, 将光强相关的偏振态转换为与光强相关的透过率, 实现调整两个波片间的相对角度达到调节相对透过率的效果. NPE 锁模脉宽可达飞秒量级, 其脉冲宽度可接近增益介质带宽极限, 但存在受环境影响较大、损伤阈值有待

进一步提高的问题.

目前, 为解决 NPE 锁模环境不稳定的问题, 近几年出现了两种解决方案. 一种是采用全保偏 NPE 锁模, 另一种是自动控制 NPE 锁模. 全保偏 NPE 锁模的基本思想是采用全保偏光纤替换激光腔中的标准单模光纤, 通过交叉熔接方法补偿了保偏光纤的双折射效应, 解决了脉冲走离问题, 从而实现稳定锁模^[41]. 2017 年, Szczepanek 等^[42] 通过熔接不同角度的多段保偏光纤达到了全保偏光纤 NPE 锁模的效果. 自动控制 NPE 锁模的基本思想是通过算法与自动控制结合, 通过监测腔内偏振态的变化情况即时反馈到自动偏振控制器件, 根据相应算法进行自动调节. 近几年, 提出的自动控制锁模 NPE 受到广泛关注. 自动控制锁模 NPE 结构是通过调节外部电压, 利用电压对液晶可变器的控制作用, 实现激光器的运转^[43]. 通过演化算法^[44]、类人算法^[45]、深度学习算法^[46] 等寻找锁模状态, 实现自动控制锁模. 自动控制锁模利用色散傅里叶变换技术快速分析光谱, 并与相应算法结合直接观测脉冲切换的过渡态^[47]. 通过以上两种方案, 可以进一步解决 NPE 易受环境影响的问题.

为提高 NPE 损伤阈值, 基于 SA 发展过程中的优势和劣势提出了一种实现 SA 被动锁模的新方法——混合锁模. 基于 NPE 锁模技术的光纤激光器结构简单、输出效率较高、偏振态可控, 但也存在锁模阈值高、难以实现自锁模的缺点, 而通过选取弥补这一缺点的 SA 材料可以实现集成后 SA 损伤阈值的提高和更优的锁模激光输出. 2017 年, Liu 等^[48] 利用 WS_2 高损伤阈值的特性, 提出了将 WS_2 SA 与 NPE 结合的新型混合锁模结构, 如图 4 所示, 实现了 67 fs 的超短锁模脉冲输出, 脉冲光谱 3 dB 带宽达 114 nm.

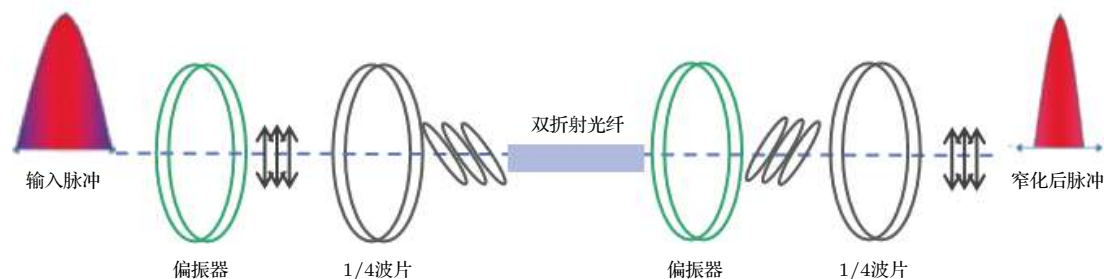


图 3 NPE 锁模偏振态示意图

Fig. 3. Schematic diagram of nonlinear polarization evolution mode-locked polarization state.

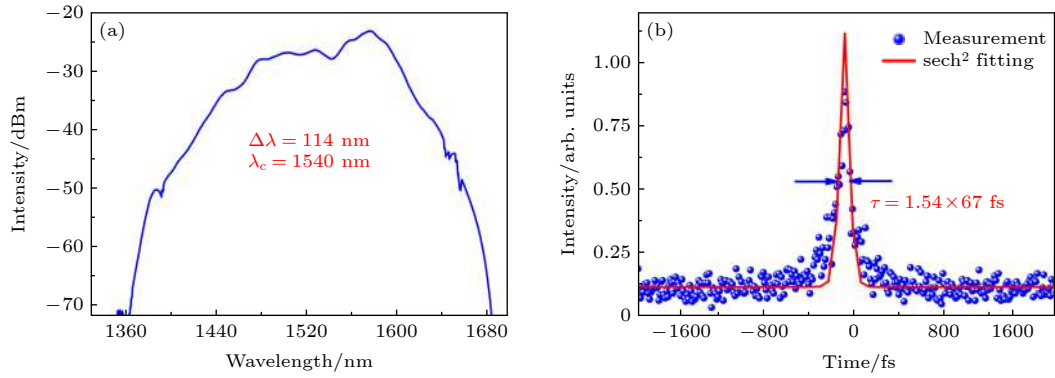


图 4 拉锥光纤 WS₂ SA 被动锁模掺铒光纤激光器的实验结果 (a) 脉冲光谱, 中心波长 1540 nm 的 3 dB 带宽为 114 nm; (b) 脉冲宽度为 67 fs^[48]

Fig. 4. Experimental results of the passively mode-locked EDF laser with the fiber-taper WS₂ SA: (a) Optical spectrum of the generated pulses. The 3 dB spectral width is 114 nm at 1540 nm. (b) Intensity autocorrelation trace with 67 fs pulse duration^[48].

混合锁模的结构原理图如图 5 所示. 利用混合锁模结构的高损伤阈值特性实现飞秒量级脉冲已经被研究人员广泛关注. 2017 年, Chernysheva 等^[49]通过双壁 CNTs 和 NPE 实现了锁模掺铒光纤激光器中多孤子复合物的产生, 利用双壁 CNTs 的高损伤阈值特性, 产生了 560 fs 双孤子束缚态孤子脉冲. 2020 年, Ma 等^[50]利用 V₂CT_x 纳米片高损伤阈值特性将其作为新型 MXene 制备 SA, 通过使用 V₂CT_x 纳米片与 NPE 实现混合被动锁模, 产生 72 fs 的脉宽、71 dB 的信噪比脉冲输出, 实现了 NPE 稳定锁模. 同年, Pang 等^[51]采用零维材料 Fe₃O₄ 纳米颗粒与 NPE 结合作为快饱和吸收体实现了掺铒光纤激光器自启动混合锁模, 产生了 361 fs 的锁模激光. 但是由于 PVA 是一种有机材料, 在高功率激光照射下很容易损坏^[52], 其损伤阈值低的特点限制了激光器的发展. 因此, 为解决 Fe₃O₄/PVA 的激光损伤阈值低的特点, 对于衬底材料的选取将是接下来的优化方向. 混合锁模结构可以充分利用等效 SA 结构高损伤阈值的特点, 结

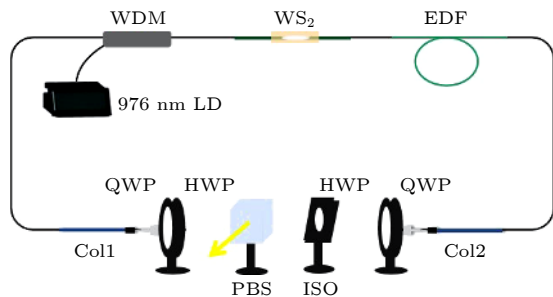


图 5 混合锁模结构示意图

Fig. 5. Schematic diagram of hybrid mode locking structure.

合具有大调制深度的材料, 从而实现综合性能优异的脉冲激光输出.

3.2 非线性光环形镜

非线性光环形镜 (nonlinear optical loop mirror/nonlinear amplifying loop mirror, NOLM/NALM) 是一种性能优异的等效 SA 结构, NOLM 和 NALM 具有响应时间短、损伤阈值高、可实现全保偏等优点, 是光纤激光器中具有发展潜力的锁模器件之一. NOLM 锁模激光器是通过光脉冲在 Sagnac 环中运行时产生的非线性相移差来实现锁模, 结构如图 6 所示. 当输入脉冲经过分光比为 $C : (1 - C)$ 的耦合器后被分为 Pc1 和 Pc2 两束强度不同的光脉冲, 两束光脉冲在经过环形腔汇聚到耦合器输出端时累积了不同大小的非线性相移. 此时, NOLM 结构具备了 SA 的作用, 对不同光强具有选择通过性, 耦合器对高光强的脉冲透光率更高, 低光强脉冲被滤除, 因此可等效为 SA^[53].

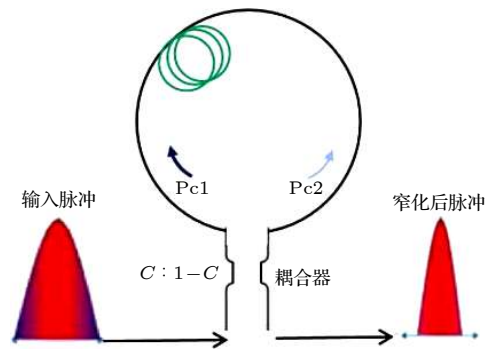


图 6 NOLM 可饱和吸收原理图

Fig. 6. Schematic diagram of nonlinear optical loop mirror saturable absorption.

耦合器不同的分光比配置会影响脉冲能量大小, 非线性环形镜的非线性相移来源于光脉冲光强大小的差异. 若非线性相移来自增益光纤的放大作用, 则称作非线性放大镜. 若非线性相移来源于增益光纤的吸收作用, 则称作非线性光吸收镜. 基于 NOLM 的锁模技术对激光脉冲的偏振态非常敏感, 但 NOLM 具有高损伤阈值的优点, 其受环境影响小、满足多波段锁模等优点被广泛研究. 2012 年, Agueraray 等^[54]对 NOLM 全保偏锁模结构进行了研究, 实现了 10 MHz 重复频率、344 fs 脉宽、0.3 nJ 单脉冲能量的锁模激光输出. 次年, 该团队通过优化腔内参数实现了 10 MHz 重复频率、120 fs 脉宽、4.2 nJ 单脉冲能量的脉冲输出, 脉冲宽度明显被窄化, 实现了单脉冲能量 14 倍的提升, 并提出了增加单模光纤长度、降低重复频率以实现高能量激光输出的方案^[55]. 2018 年, Yu 等^[56]通过优化环形腔主环路的单模光纤长度, 实现了 93 fs 脉宽、10 nJ 单脉冲能量、6 MHz 重复频率的锁模激光输出. 2020 年, Deng 等^[57]通过搭载 NALM 环, 优化泵浦参数, 实现了 191 mW 的平均输出功率、22 nJ 的单脉冲能量、195 fs 的超窄脉宽、8.7 MHz 重复频率的锁模激光输出. 2021 年, Deng 等^[58]基于 NALM 锁模全正色散激光器研究了脉冲孤子起振的非线性动力学方程, 发现并记录了脉冲孤子的建立过程.

3.3 非线性多模干涉

渐变多模光纤 (graded index multimode fiber, GIMF) 由于其本身的非线性效应、时空光孤子以及非线性多模干涉效应等引起研究人员的关注. 2013 年, Nazemosadat 和 Mafi^[59]对 GIMF 中的非线性多模干涉效应进行了研究, 并采用单模光纤-渐变多模光纤-单模光纤 (SMF-GIMF-SMF) 的结构, 指出该结构可用于非线性调制、光信号处理、激光器 SA. 其结构如图 7 所示.

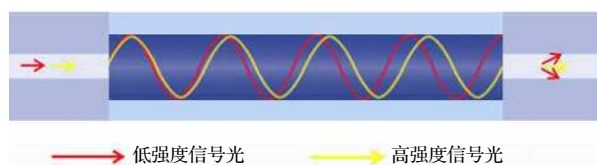


图 7 非线性多模干涉可饱和吸收原理图

Fig. 7. Schematic diagram of saturable absorption of nonlinear multimode interference.

当入射光从标准单模光纤 (single mode fiber, SMF) 传输到 GIMF 时, 因为光纤端面处发生模式耦合激发出高阶模, GIMF 中由于不同模式强度的光会受到不同的 SPM (self-phase modulation), XPM (cross-phase modulation) 调制从而发生多模干涉. 当激光通过该器件时能够发生稳定的 NL-MMI (nonlinear multimode interference), 使高强度的光进入 SMF, 并在激光腔中振荡形成脉冲输出, 而低强度的光没有发生多模干涉效应的光从 SMF 的包层中渗透出去. NL-MMI 的存在使 SMF-GIMF-SMF 结构具有可饱和吸收效应, 对光强具有选择透过性, 可以使发生 NL-MMI 的强光透过, 弱光被滤除. 到目前为止, GIMF 长度的调控限制了非线性多模干涉发展, 但通过匹配不同光纤引发非线性多模干涉效应可以观察到多种孤子分子动力学现象. 2018 年, Tegin 等^[60]采用 SMF-GIMF-SMF 的结构在全正色散光纤锁模光纤激光器中实现了经腔外压缩后脉宽 276 fs、重复频率 44.25 MHz 的锁模脉冲输出. 同年, Zhao 等^[61]通过实验观察基于非线性多模干涉的饱和吸收体束缚孤子, 利用阶跃折射率光纤 SIMF (step-index multimode fiber) 和渐变折射率光纤作为 SA 观察到同相和反相双孤子束缚态. 2021 年, Chen 等^[62]基于 NL-MMI 效应给出了金兹堡-朗道方程的激光物理模拟方法, 揭示了从暗脉冲到亮脉冲的转换以及谐波脉冲产生的基本原理, 在掺铒光纤激光器中实现了暗脉冲到单亮脉冲和谐波亮脉冲的过渡. 同年, Gan 等^[63]通过制备具有高损伤阈值的 GIMF-SIMF-GIMF SA, 将 SA 插入一个具有负色散的掺铒光纤激光腔中, 产生了脉宽 540 fs 的孤子, 并解释了连续可调的高阶孤子的产生. 通过近些年来的实验研究可以发现, 以 NL-MMI 效应为代表的等效 SA 与激光脉冲质量以及孤子动力学现象都具有密不可分的联系^[64], 从根本上提高等效 SA 的损伤阈值将有助于光纤激光相关领域的全面推进.

4 结 论

光纤激光器在国家基础设施的各个领域都起到了重要作用, SA 作为光纤激光器核心器件, 其性能指标的优化对于激光器发展具有重大意义. 本文重点介绍了高损伤阈值 SA 国内外研究现状. 新技术的产生和原有技术的优化都对实现超快激光

起到了非常大的推动作用, 光纤激光器损伤阈值的不断优化将进一步拓宽其应用范围. 激光器更窄的脉冲宽度、更高的输出功率、更高的重复频率、脉冲形状的优化、脉冲波长范围的拓展都依赖于SA损伤阈值的提高, 未来高损伤阈值SA将是研究人员关注的重点领域. 同时, 光纤激光器的全光纤化、小型化、集成化和全国产化解决“卡脖子”难题也是未来的发展方向, 多元化的高损伤阈值SA结构将为光纤激光器的发展提供更多的技术支撑.

参考文献

- [1] Wang X Z, Wang Z H, Wang Y Y, Zhang X, Song J J, Wei Z Y 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 074202
- [2] Jiang J W, Fang S B, Zhang Z Y, Zhu J F, Han H N, Chang G Q, Wei Z Y 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 054201
- [3] Ning F J, Li Z Y, Tan R Q, Hu L M, Liu S Y 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 034203
- [4] Xing Z Q, Zhou Y J, Liu Y H, Wang F 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 027302
- [5] Ni X, Jia K P, Wang X H, et al. 2021 *Chin. Phys. Lett.* **38** 064201
- [6] Keller U 2003 *Nature* **424** 831
- [7] Wang J S, Zhang Y, Wang J L, Wei Z Y, Chang G Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 034206 (in Chinese) [王井上, 张瑶, 王军利, 魏志义, 常国庆 2021 物理学报 **70** 034206]
- [8] Lv R C, Teng H, Song J J, Kang R Z, Zhu J F, Wei Z Y 2021 *Chin. Phys. B* **30** 094206
- [9] Fermann M E, Hofer M, Haberl F, Craig-Ryan S P 1990 *Electron. Lett.* **26** 1737
- [10] Keller U, Knox W H, Roskos H 1990 *Springer Berlin Heidelberg* **53** 69
- [11] Yu Q, Guo K, Chen J, Wang T, Wang J, Shi X Y, Wu J, Zhang K, Zhou P 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184208 (in Chinese) [俞强, 郭琨, 陈捷, 王涛, 汪进, 史鑫尧, 吴坚, 张凯, 周朴 2020 物理学报 **69** 184208]
- [12] Hao Q Q, Zong M Y, Zhang Z, Huang H, Zhang F, Liu J, Liu D H, Su L B, Zhang H 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 184205 (in Chinese) [郝倩倩, 宗梦雨, 张振, 黄浩, 张峰, 刘杰, 刘丹华, 苏良碧, 张晗 2020 物理学报 **69** 184205]
- [13] Valdmanis J A, Fork R L 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 112
- [14] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, et al. 2004 *Science* **306** 666
- [15] Delhaes P 2002 *Carbon* **40** 641
- [16] Ji D X, Cai S H, Paudel T R, et al. 2019 *Nature* **570** 87
- [17] Cicily Rigi V J, Jayaraj M K, Saji K J 2020 *Appl. Surf. Sci.* **529** 147158
- [18] Arthur J R 1980 *At & T Tech. J.* **10** 157
- [19] Liu W J, Zhu Y N, Liu M L, Wen B, Fang S B, Teng H, Lei M, Liu L M, Wei Z Y 2018 *Photonics Res.* **6** 220
- [20] Chen Z, Wang H, Wang Y, Lv R, Yang X, Wang J, Li L, Ren W 2019 *Carbon* **144** 737
- [21] Chen Z, Wang Y, Lv R, Liu S, Wang Y 2020 *Opt. Fiber Technol.* **58** 102189
- [22] Liu S C, Lv R D, Wang Y G, Shang S G, Ren W, Xu Q 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 9021
- [23] Li L, Jiang S Z, Wang Y G, Wang X, Duan L N, Mao D, Li Z, Man B Y, Si J H 2015 *Opt. Express* **23** 28698
- [24] Liu S, Wang Y, Lv R, Wang J, Duan L 2020 *Nanophotonics* **9** 2523
- [25] Zhang Z F, Li S, Li Y, Kou Y, Liu K, Lin Y Y, Yuan L, Xu Y T, Peng Q J, Xu Z Y 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 064203
- [26] Zhang M, Zhu Y, Li D, Feng P, Xu C 2021 *Appl. Surf. Sci.* **554** 149615
- [27] Liu H H, Yang Y, Chow K K 2013 *Opt. Express* **21** 18975
- [28] Han X, Zhang H, Jiang S, Zhang C, Li D, Guo Q, Gao J, Man B 2019 *Nanomaterials* **9** 1216
- [29] Ma P, Lin W, Zhang H, Xu S, Yang Z 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 1
- [30] Wang Y, Song C, Zhang H, Jin L, Xu Y, Ma X, Zou Y 2022 *Opt. Laser Technol.* **145** 107542
- [31] Salam S, Nizamani B, Yasin M, Harun S W 2021 *Results Opt.* **2** 100036
- [32] Wu Q, Jin X, Chen S, Jiang X, Hu Y, Jiang Q, Wu L, Li J, Zheng Z, Zhang M, Zhang H 2019 *Opt. Express* **27** 10159
- [33] Song Y W, Yamashita S, Maruyama S 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 137
- [34] Nizamani B, Salam S, Jafry A A A, et al. 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 054202
- [35] Liu S, Shang S, Lv R, Wang Y, Wang J, Ren W, Wang Y 2021 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 19128
- [36] Michaille L F, Taylor D M, Bennett C, Shepherd T J, Jacobsen C, Hansen T P 2004 *Physica A* **5618** 30
- [37] Fermann M E, Andrejco M J, Silberberg Y, Stock M L 1993 *Opt. Lett.* **18** 894
- [38] Doran N J, Wood D 1988 *Opt. Lett.* **13** 56
- [39] Qi Y, Liu M, Luan N, Yang S, Bai Z, Yan B, Lu Z 2022 *Infrared Phys. Technol.* **121** 104017
- [40] Zhao L M, Lu C, Tam H Y, Wai P, Tang D Y 2009 *Appl. Opt.* **48** 5131
- [41] Wang Y Z, Zhang L Q, Zhuo Z, Guo S Z 2016 *Appl. Opt.* **55** 5766
- [42] Szczepanek J, Karda's T M, Radzewicz C, Stepanenko Y 2017 *Opt. Lett.* **42** 575
- [43] Wang Y, Wang C, Zhang F, Guo J, Ma C, Huang W, Song Y, Ge Y, Liu J, Zhang H 2020 *Rep. Prog. Phys.* **83** 116401
- [44] Andral U, Fodil R S, Amrani F, Billard F, Hertz E, Grellu P 2015 *Optica* **2** 275
- [45] Pu G, Yi L, Zhang L, Hu W 2019 *Optica* **6** 362
- [46] Baumeister T, Brunton S L, Kutz J N 2018 *J. Opt. Soc. Am. B* **35** 617
- [47] Pu G, Yi L, Zhang L, Luo C, Li Z, Hu W 2020 *Light Sci. Appl.* **9** 1
- [48] Liu W J, Pang L H, Han H N, Liu M L, Lei M, Fang S B, Teng H, Wei Z Y 2017 *Opt. Express* **25** 2950
- [49] Chernysheva M, Bednyakova A, Al Arai M, et al. 2017 *Sci. Rep.* **7** 1
- [50] Ma C, Huang W, Wang Y, Adams J, Wang Z, Liu J, Zhang H 2020 *Nanophotonics* **9** 2451
- [51] Pang L, Wang R, Li L, Wu R, Lv Y 2020 *Infrared Phys. Technol.* **110** 103444
- [52] Dou Z Y, Zhang B, Cai J H, Hou J 2020 *Chin. Phys. B* **29** 094201
- [53] Santiago-Hernandez H, Pottiez O, Duran-Sanchez M, et al. 2015 *Opt. Express* **23** 18840
- [54] Agueraray C, Broderick N G, Erkintalo M, Chen J S, Kruglov V 2012 *Opt. Express* **20** 10545
- [55] Agueraray C, Hawker R, Runge A F, Erkintalo M, Broderick N G 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 3550
- [56] Yu Y, Teng H, Wang H B, Wang L N, Zhu J F, Fang S B,

- Chang G Q, Wang J L, Wei Z Y 2018 *Opt. Express* **26** 10428
- [57] Deng D, Zhang H, Gong Q, He L, Li D, Gong M 2020 *Opt. Laser Technol.* **125** 106010
- [58] Deng D, Zhang H, Zu J, Chen J 2021 *Opt. Lett.* **46** 1612
- [59] Nazemosadat E, Mafi A 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 1357
- [60] Te'gin U, Orta c B 2018 *Opt. Lett.* **43** 1611
- [61] Zhao F Y, Wang H S, Hu X H, Wang Y S, Zhang W, Zhang T, Sun C D, Yan Z J 2018 *Laser Phys. Lett.* **15** 115106
- [62] Chen G W, Wang H G, Zhu J, Li H Y, Zhu L Q 2021 *Infrared Phys. Technol.* **112** 103607
- [63] Gan Y P, Wu Q C, Yao Y, Liu C Y, Fu Y P, Yang Y F, Tian J J, Xu K 2021 *Opt. Commun.* **479** 126441
- [64] Huang L, Zhang Y S, Cui Y D 2021 *Chin. Phys. B* **30** 114203

SPECIAL TOPIC—Micro-nano photoelectron and laser

Research progress of mode-locked pulsed fiber lasers with high damage threshold saturable absorber*

Cui Wen-Wen Xing Xiao-Wei Xiao Yue-Jia Liu Wen-Jun[†]

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 31 December 2021; revised manuscript received 11 January 2022)

Abstract

As the basic hardware to promote the development of various fields, fiber laser has great development potential in rail transit, optical communication, new material manufacturing, power battery processing, military defense, medical treatment, and other fields. As the core device of passively mode-locked fiber laser, a high damage threshold saturable absorber plays a decisive role in achieving high power, ultrashort pulse duration, and high energy laser output for a fiber laser. For saturable absorbers of traditional materials and structures, the spot size of light acting on the material is almost the same as the exit diameter of the optical fiber, which is easy to exceed the damage threshold of the saturable absorber and lead to damage. To improve the damage threshold of saturable absorbers, the structure of saturable absorbers based on both real materials and traditional saturable absorbers can be optimized. On the one hand, the preparation technology of the saturable absorber is adjusted, such as using the sol-gel method, which has a good effect on improving the damage threshold of the saturable absorber. Moreover, different materials are selected and used as substrates, such as the use of inorganic materials as material substrates and the selection of a variety of insertion cavity structures, such as “sandwich” transmission structures, tapered fibers, and photonic crystal fibers. These methods are of great significance in improving the damage threshold of the real material saturable absorber and realizing pulsed laser with excellent performance and high stability. On the other hand, the equivalent saturable absorber structure is used to improve the damage threshold and optimize the laser performance, such as hybrid mode-locked structure and nonlinear multimode interference. The continuous optimization of the fiber laser damage threshold will further expand its application range. Therefore, it is important to adjust the preparation process and insert the cavity structure of saturable absorbers for improving the damage threshold of the saturable absorber and achieving high performance and stability of the pulsed laser. This paper reviews the research status of high damage threshold saturable absorbers at home and abroad, summarizes the latest methods to improve material damage threshold and the latest research progress of equivalent saturable absorbers, and also points out the future development direction of high damage threshold saturable absorbers.

Keywords: ultrafast fiber laser, saturable absorber, high damage threshold

PACS: 42.55.Wd, 42.65.Re, 42.70.Hj

DOI: 10.7498/aps.71.20212442

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11875008, 12075034).

† Corresponding author. E-mail: jungliu@bupt.edu.cn