

多模光纤在超短脉冲激光领域的新应用

赵倩倩¹, 彭继迎¹, 余锦², 郑义¹

(1. 北京交通大学理学院激光研究所, 北京 100044; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

摘要:多模光纤在孤子效应、时空锁模、高能量光纤激光器、超快光纤激光器、高能量激光传输等多个领域有特殊的研究价值和应用前景, 引起了研究人员的高度关注, 成为近年来国内外的研究热点。文章总结了国内外多模光纤器件的研究进展, 重点分析了基于多模光纤的锁模激光器、新型锁模器件、非线性自净效应的发展现状及存在的问题, 并对其未来发展方向进行展望。

关键词:光纤光学; 多模光纤; 光纤激光器; 锁模; 自净效应

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.11.001

New application of multimode fiber in ultrashort pulse lasers

ZHAO Qian-qian¹, PENG Ji-ying¹, YU Jin², ZHENG Yi¹

(1. Institute of Laser, School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Academy of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Multimode fiber has attracted the interest of researchers for its special research value and application in the fields of optical solitons, spatiotemporal mode-locking, high-energy fiber laser, ultra-fast fiber laser and high-energy laser transmission, etc. This paper summarizes the research progress of multimode optical fiber devices, analyzes the current status and existing problems of mode-locking lasers, new mode-locking devices and nonlinear self-cleaning effect based on multimode fiber, and discusses also its future development direction.

Keywords: fiber optics; multimode fiber; fiber laser; mode-locking; self-cleaning

1 引言

多模光纤(MMF)的出现要早于单模光纤(SMF), 然而, 直到最近多模光纤才重新引起人们的关注。这是由于光纤中复杂的非线性效应一直是困扰研究者的难题, 通常情况下, 人们都希望将其简化, 而单模光纤的高带宽和简单的结构特性则能够为研究带来便利。但随着人们对复杂光纤光学现象研究的不断深入以及实际应用需求的不断提升, 单模光纤已经不能满足要求。例如, 受制于单模光纤较细的芯径, 光纤激光器(放大器)的能量受到限制^[1]。因此研究人员开始考虑使用多模光纤, 实现

多种时空非线性现象, 如多模孤子形成^[2-3]、多模色散^[4]、时空不稳定性^[5-7]和经典波凝聚^[8]等, 从而对未来高功率光纤器件的产生提供了新的视角。本文总结了国内外基于多模光纤的锁模激光器、新型锁模器件、非线性自净效应的研究进展以及原理, 同时也讨论了目前存在的问题及未来的发展趋势。

2 基于多模光纤增益的锁模激光器

长期以来, 光纤锁模激光器的增益光纤多采用单模光纤, 锁模是基于同一横模场中的多纵模锁定。目前在纵模的控制及纵模锁定形成超短脉冲方面取得巨大进展, 但是在纵模-横模相干叠加的研究方

基金项目:国家重点研发项目(No. 2018YFB0407400); 中央高校基本科研业务费项目(No. 2019JBM069)资助。

作者简介:赵倩倩(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: 18121610@bjtu.edu.cn

通讯作者:彭继迎(1980-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事锁模理论, 锁模技术, 光纤非线性, 光纤激光器, 拉曼激光器方面的研究。E-mail: jypeng@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-26; **修订日期:** 2020-03-04

面很少有人关注。然而近期的研究报道了以多模光纤为增益介质的锁模激光器,实现了横模和纵模的相干叠加、共同锁定,称为时-空锁模。

2017 年, Wright 等人^[9]首次实现了多模光纤激光器时空锁模。在实验中,作者结合理论模拟,首先搭建了第一种腔体(如图 1 所示),将少模增益光纤拼接到渐变折射率多模光纤上,利用非线性偏振旋转(NPR)作为超快饱和吸收体,多模场与增益光纤输入和带通干涉滤波器的重叠来进行空间滤波和光谱滤波,实现多模光纤激光锁模输出,其中少模光纤的使用消除了激光增益的相互作用。作者随后搭建了第二种腔体(如图 2 所示),并考虑了横向增益相互作用存在的情况,在第一种腔体的基础上,使用高度多模的渐变折射率光纤作为增益光纤,利用同样的方式,实现了时-空锁模脉冲。

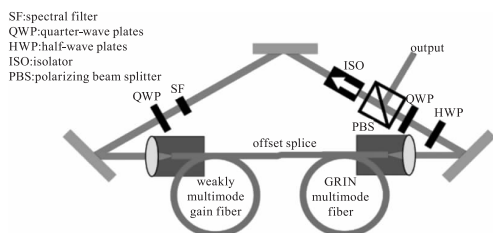


图 1 少模光纤与渐变折射率多模光纤拼接的谐振腔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the cavity based on splicing of few mode fiber and graded index multimode fiber

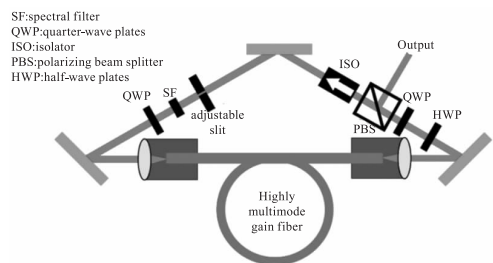


图 2 完全基于多模增益光纤的谐振腔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the cavity based entirely on a multimode gain fiber

2018 年, Wang 等人^[10]报道了使用半导体可饱和吸收镜(SESAM)作为调制器的多模铥光纤锁模激光器,输出功率受到 SESAM 损伤阈值的限制,其最大输出功率和脉冲能量分别为 10.6 W 和 551 nJ。

上述多模光纤锁模激光器的报道具有开创性意义,为光纤锁模激光器的发展开辟了新的方向,但尚未实现高功率输出和高效的时-空锁模,没有真正发挥出多模光纤锁模激光器相对于单模光纤锁模激光器的优势。

3 全光纤锁模器件

光纤激光器的锁模方式主要有主动锁模和被动锁模,通常采用被动锁模方式来获得宽度更窄的超短脉冲,而决定锁模性能的关键器件是可饱和吸收体(SAs)。目前包括半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[11]、碳纳米管^[12]、和二维纳米材料^[13]等都已广泛应用于锁模,但是它们存在损伤阈值低、材料性质不稳定等缺点。另外还有基于非线性光学效应的等效可饱和吸收体,例如非线性偏振旋转^[14]和非线性环形镜^[15],这些方式虽然提高了损伤阈值,但容易受环境影响、性能不稳定且不容易控制。

为了克服以上器件的缺点,基于多模光纤的非线性效应给锁模光纤激光器带来了新的生机,研究得出了新型全光纤锁模器件^[16-22]。

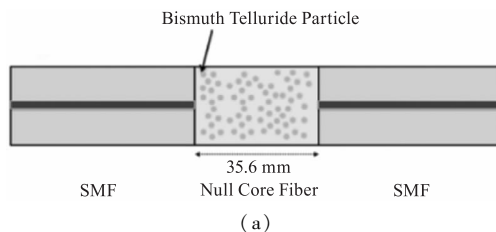
2013 年, Nazemosadat 和 Mafi 首次对非线性多模干涉进行了理论分析^[16],提出单模光纤-渐变折射率多模光纤-单模光纤(SMF-GIMF-SMF)结构的光纤器件(如图 3 所示)可作为 SA 来实现激光锁模。然而分析表明,实验中需要精确控制 SMF-GIMF-SMF 结构中 GIMF 的长度,这就导致在制备方面有一定难度。



图 3 SMF-GIMF-SMF 结构的示意图

Fig. 3 Schematic of SMF-GIMF-SMF structure

2016 年, Jung 等人^[17]用单模光纤、长度 35.6 mm 的空芯光纤(NCF)和单模光纤制备了基于多模干涉的可饱和吸收体(如图 4(a)所示)。在制备时,在空芯光纤表面沉积了碲化铋,使光纤内振荡的激光会在多模干涉带通波长下实现被动锁模。该器件的插入损耗为 3.4 dB,不仅可用为可饱和吸收体,还可作为波长固定滤波器,实现了如图 4(b)所示的锁模掺铥光纤激光器,其中心波长和 3 dB 带宽分别为 ~1958 nm 和 ~3.3 nm,脉宽 ~46 ps,重复频率 ~8.58 MHz。



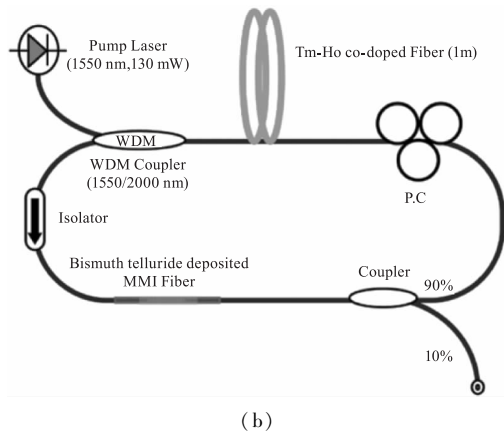


图4 SMF-NCF-SMF结构的示意图和
掺铥锁模光纤激光器的实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of SMF-NCF-SMF structure and the experimental schematic of a mode locked thulium doped fiber laser

2017~2019年中国计量大学的研究者通过引入第四段光纤和制造一个微腔的方式消除了对渐变折射率多模光纤(GIMF)长度的限制,并实现了锁模输出^[18-22],提供了基于非线性多模干涉制作可饱和吸收器更灵活的方法。

2017年,Wang等^[18]通过引入阶跃折射率多模光纤(SIMF),构成单模光纤-阶跃折射率多模光纤-渐变折射率多模光纤-单模光纤(SMF-SIMF-GIMF-SMF)结构如图5所示,该器件调制深度为3.16%和 $2.43 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的低饱和强度。通过将该结构引入光纤环形激光腔如图6所示,获得了中心波长为1560 nm、脉宽为446 fs的锁模输出脉冲,平均功率为0.15 mW,重复频率为11.73 MHz。Li等人^[19]同样设计了SMF-SIMF-GIMF-SMF结构的锁模器件如图7所示,将其应用于图8的掺铥光纤激光器中,实验中获得波长为1888 nm的稳定锁模激光脉冲输出,脉宽1.4 ps,重复频率19.82 MHz,

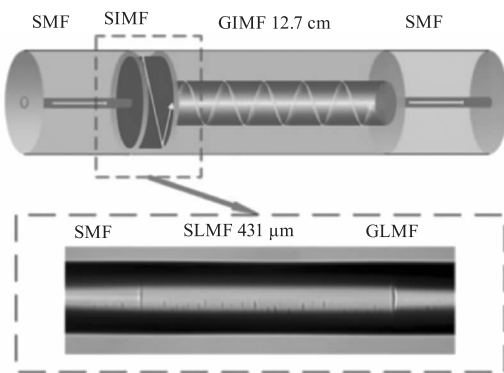


图5 SMF-SIMF-GIMF-SMF结构的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of SMF-SIMF-GIMF-SMF structure

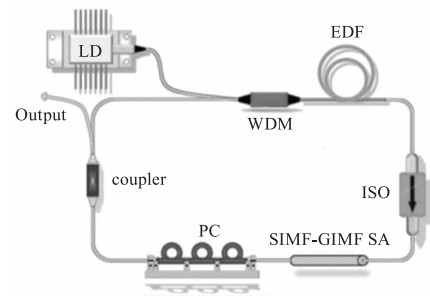


图6 基于SIMF-GIMF结构的掺铒锁模光纤激光器原理图
Fig. 6 Schematic diagram of the Er^{3+} doped fiber laser mode-locked by the SIMF-GIMF structure

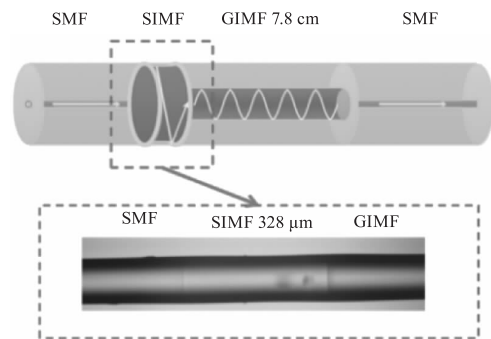


图7 SMF-SIMF-GIMF-SMF结构的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of SMF-SIMF-GIMF-SMF structure

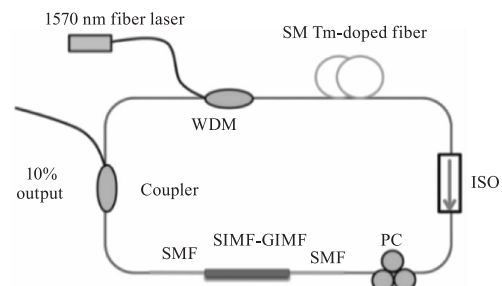


图8 基于SMF-SIMF-GIMF-SMF结构的
掺铥光纤激光锁模原理图

Fig. 8 Schematic of the Tm fiber laser mode-locked by the SMF-SIMF-GIMF-SMF structure

光谱宽度3.6 nm,信噪比为60 dB。此外还实现了调谐范围从1835 nm延伸到1886 nm的可调谐波长锁模。这是首次利用SMF-SIMF-GIMF-SMF光纤器件作为可饱和吸收体实现 $2 \mu\text{m}$ 光谱区域中的锁模激光。

2018年,Yang等^[20]基于SMF-GIMF-SMF结构,利用氢氟酸在GIMF的端面蚀刻形成一个微腔(如图9、10、11所示)。当该结构弯曲到一定状态时,调制深度为1.9%,饱和强度为 $6.81 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。同样,该结构对GIMF的长度也没有限制。基于这样的可饱和吸收体,在如图12的掺

钇光纤激光器中获得中心波长为 1558 nm、重复频率为 14.34 MHz 且脉冲宽度为 528 fs 的锁模脉冲。

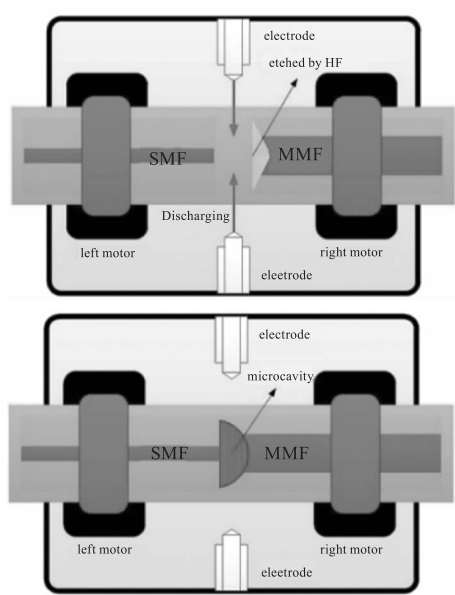


图 9 设备制作的原理图

Fig. 9 Schematic diagram of the device fabrication

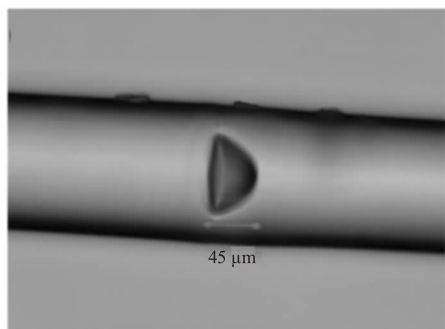


图 10 设备样本的显微镜图像

Fig. 10 The microscope images of device sample

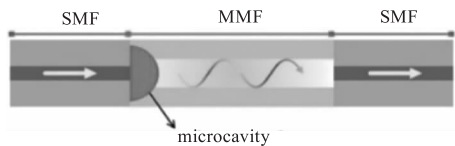


图 11 SMF-GIMF-SMF 结构示意图

Fig. 11 The schematic diagram of SMF-GIMF-SMF structure

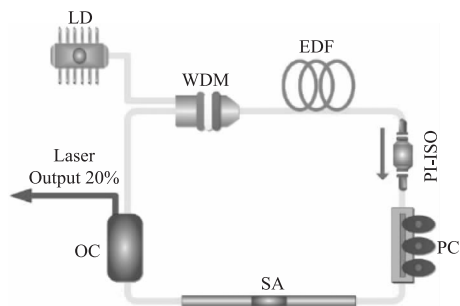
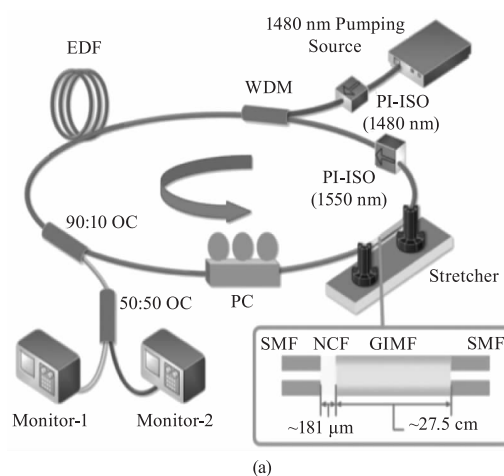


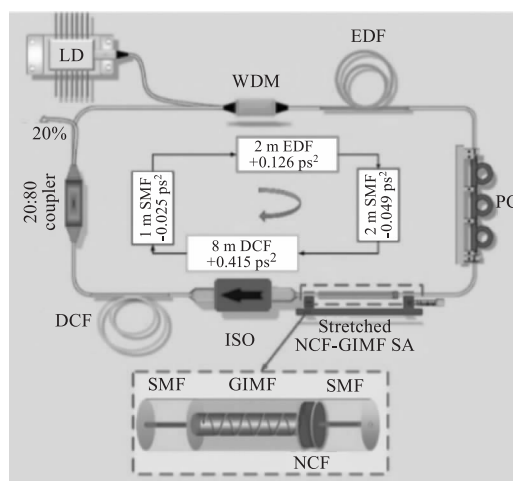
图 12 掺钇光纤激光器的实验装置

Fig. 12 Experimental device for erbium-doped fiber laser

2019 年, Zhu 等^[21] 将以前引入的 SIMF 替换为空芯光纤(NCF), 构成一种新的全光纤饱和吸收体(如图 13 所示), 其调制深度为 4.57%, 饱和强度为 $1.92 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 。与 SIMF 相比, NCF 具有扩大模场直径的优势, 且该结构对 NCF 和 GIMF 的长度都没有限制。这种饱和吸收体支持各种类型的孤子形成: 通过改变腔参数, 不仅产生了单脉冲稳定的锁模状态和紧束缚孤子, 而且通过拉伸 NCF-GIMF 结构器件实现了从 1567.48 nm 到 1576.20 nm 的可调谐孤子对。Wang 等^[22] 同样利用如图 13(b) 所示的空芯光纤和渐变折射率多模光纤的混合结构同时作为可饱和吸收体和高精度可调谐光谱滤波。基于 NCF-GIMF 的可饱和吸收体具有 4.7% 的调制深度和 $0.14 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的可饱和强度。通过拉伸 SA 器件实现对频谱滤波器带宽的直接控制, 产生的脉冲宽度从 7.7 ps 到 23 ps 不等。



(a)



(b)

图 13 掺钇光纤激光原理图

Fig. 13 Schematic diagram of the Er-doped fiber laser

与传统的锁模器件相比,基于非线性多模干涉的全光纤锁模器件具有更高的峰值功率水平和瞬时响应时间的优势,而且其成本低,结构简单,力学性能好,光学特性易于控制,特别是拉伸时可调波长和可控制调制深度,体现了全光纤锁模器件的优异性能。文献[18]~[22]对基于全光纤锁模器件的光纤激光器进行了8~24 h的稳定性测试,结果显示其具有良好的长期稳定性。

4 非线性自净效应

多模光纤激光的锁模需要实现横模和纵模的相干叠加、共同锁定,即时-空锁模。而目前研究中所使用的都是基于传统的锁模方式,其结构复杂且工作不稳定。多模光纤的非线性自净效应,或许可以

给多模光纤激光器的有效模式控制(尤其是横模控制)提供解决方案,有助于多模光纤激光时-空锁模的实现。

2016年,Liu等人^[23]报道了在正常色散情况下,将飞秒脉冲入射到渐变折射率多模光纤中的实验结果,随着脉冲能量的增加,光纤的输出端的近场光束由散斑演变为钟形,同时也证明了这种现象的出现是由于高阶模的非线性不稳定性。2017年,Krupa等人对该现象进行了研究,发现激光在多模光纤中传输时,并没有产生预期的由于线性干涉导致的激光散斑现象,而是出现了激光的光束整形、高阶模激光向基模的耦合,最终实现准单模输出^[24],这就是所谓的非线性自净效应(如图14、15所示)。

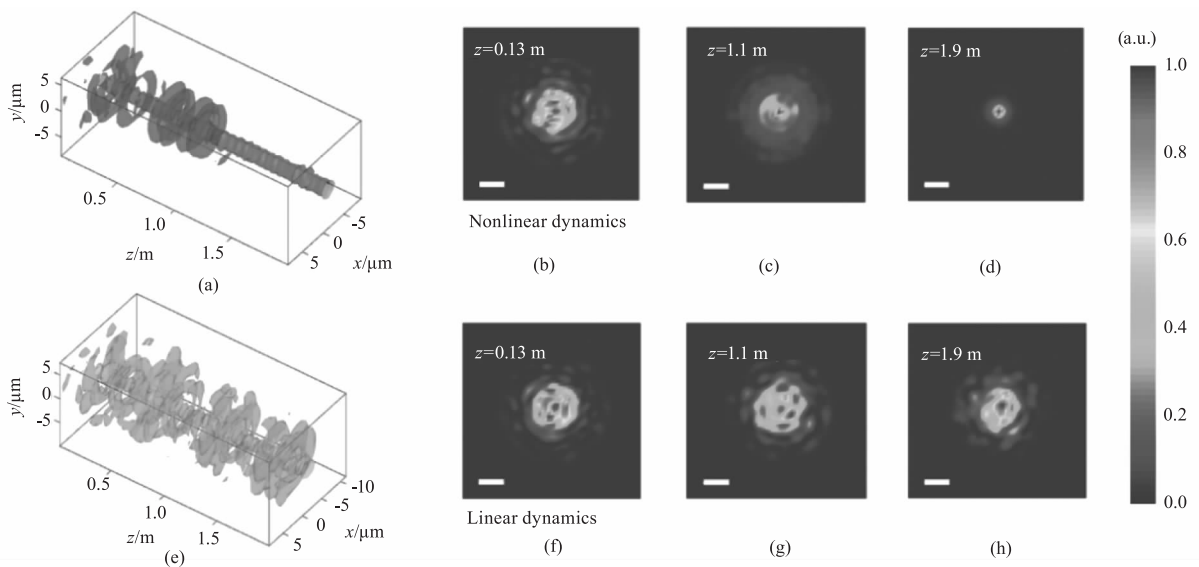


图14 多模光纤的线性效应和非线性效应对比图

Fig. 14 Comparison diagram of linear effect and nonlinear effect of multimode fiber

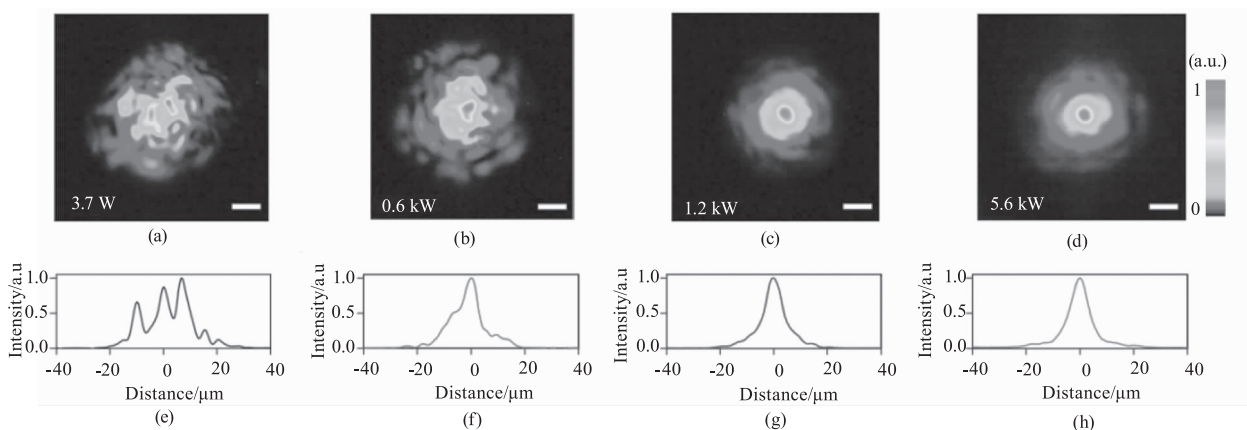


图15 自净效应的演变过程

Fig. 15 Evolution of self-purification effect

这种特殊的效应不同于基于拉曼散射和布里渊散射的光束净化,因为在这个过程中激光功率低于拉曼效应产生的阈值,没有产生光谱的非线性频移;发生在正常色散区,而且以往的光束整形都需要改变输入条件(光纤弯曲、入射角度等),而基于自净

效应的光束整形不用改变输入条件,依然可以产生。能量向基模的集中,并非是多模干涉增强的后果,而是能量向基模的非互易性耦合,更为重要的是不仅仅是能量集中,相干性也没有减弱,保持了很高的光子简并度(如图16所示)。

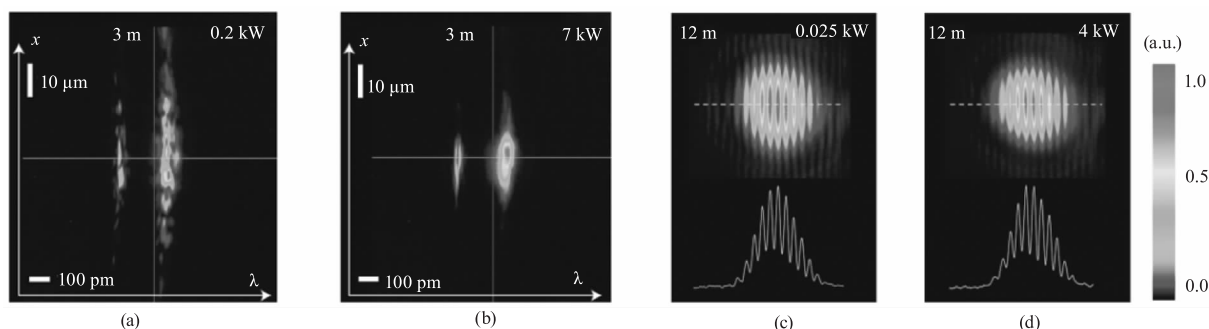


图16 自净效应后的光束相干性

Fig. 16 Beam coherence after self-cleaning effect

2019年,Krupa等人^[25]研究了非线性渐变折射率多模光纤中光束自清洁区域的非线性偏振动力学。文中通过实验证明,导致克尔诱导光束自净的复杂非线性模式混合伴随着非线性复极化效应。当光束在光纤中线性传输时,测量表示线性极化的输入泵浦光束几乎去极化,在接近阈值的功率下部分地再极化实现自净。此外,作者还观察到了自净光束非线性偏振旋转的现象。这种效应可用于实现基于锁模激光器的超快饱和吸收。

非线性自净效应的独特性质,决定了其在超短脉冲的传输、脉冲整形、脉宽压缩等方面有着重要的潜在应用。

5 总结与展望

多模光纤的非线性特性正在逐步被探索,成为多个领域的研究热点。本文介绍了基于多模光纤的锁模激光器、全光纤锁模器件和非线性自净效应。但其中也存在一些有待解决的问题,例如目前的多模光纤锁模激光器结构复杂、锁模脉冲不稳定、输出功率低,还需探索新的锁模方式才能真正体现出多模光纤激光器的优势;全光纤锁模器件的研究只针对单模增益光纤的激光器;多模非线性自净效应的机理还没有得到验证。而且,目前对于这三者的研究相互独立,因此如何将其有机结合、并用于实现大功率多模光纤锁模激光器,是值得人们进一步研究的课题。

参考文献:

- [1] Fu W, Wright L G, Sidorenko P, et al. Several new directions for ultrafast fiber lasers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9432–9463.
- [2] Wright L G, Renninger W H, Christodoulides D N, et al. Spatiotemporal dynamics of multimode optical solitons [J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3492–3506.
- [3] Buch S, Agrawal G P. Soliton stability and trapping in multimode fibers [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(2): 225–228.
- [4] Wright L G, Wabnitz S, Christodoulides D N, et al. Ultra-broadband dispersive radiation by spatiotemporal oscillation of multimode waves [J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115(22): 223902.
- [5] Wright L G, Liu Z, Nolan D A, et al. Self-organized instability in graded-index multimode fibres [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(12): 771.
- [6] Krupa K, Tonello A, Barthélémy A, et al. Observation of geometric parametric instability induced by the periodic spatial self-imaging of multimode waves [J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(18): 183901.
- [7] Dupiol R, Bendahmane A, Krupa K, et al. Intermodal modulational instability in graded-index multimode optical fibers [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(17): 3419–3422.
- [8] Aschieri P, Garnier J, Michel C, et al. Condensation and thermalization of classical optical waves in a waveguide [J]. *Physical Review A*, 2011, 83(3): 033838.
- [9] Wright L G, Christodoulides D N, Wise F W. Spatiotem-

- poral mode-locking in multimode fiber lasers [J]. Science, 2017, 358(6359): 94–97.
- [10] Wang Y, Tang Y, Yan S, et al. High-power mode-locked 2 μm multimode fiber laser [J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(8): 085101.
- [11] Wang Xiongfei, Li Yao, Zhu Chen, et al. All fiber passively mode-locked Yb-doped fiber laser with SESAM [J]. Laser & Infrared, 2015, 45(11): 1320–1324. (in Chinese)
王雄飞, 李尧, 朱辰, 等. 基于 SESAM 的全光纤被动锁模光纤激光器 [J]. 激光与红外, 2015, 45(11): 1320–1324.
- [12] Yu Yongqin, Zheng Jiarong, Du Chenlin, et al. Research and progress of carbon nanotubes passively mode-locked fiber laser [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 954–960. (in Chinese)
于永芹, 郑家容, 杜晨林, 等. 碳纳米管被动锁模光纤激光器的研究进展 [J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 954–960.
- [13] Hu Ping, Liu Fangfang, Huang Yan, et al. Research developments in short-pulse fiber lasers based on two-dimensional materials [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(7): 795–800. (in Chinese)
胡平, 刘芳芳, 黄燕, 等. 基于二维材料的短脉冲光纤激光器研究进展 [J]. 激光与红外, 2019, 49(7): 795–800.
- [14] Yan Z, Li X, Tang Y, et al. Tunable and switchable dual-wavelength Tm-doped mode-locked fiber laser by nonlinear polarization evolution [J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4369–4376.
- [15] Rudy C W, Urbanek K E, Digonnet M J, et al. Amplified 2- μm thulium-doped all-fiber mode-locked figure-eight laser [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(11): 1809–1812.
- [16] Nazemosadat E, Mafi A. Nonlinear multimodal interference and saturable absorption using a short graded-index multimode optical fiber [J]. JOSA B, 2013, 30(5): 1357–1367.
- [17] Jung M, Lee J, Song W, et al. A passively mode locked thulium doped fiber laser using bismuth telluride deposited multimode interference [J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(5): 055103.
- [18] Wang Z, Wang D, 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.
- [19] Li H, Wang Z, 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.
- [20] Yang F, Wang D, Wang Z, 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.
- [21] Zhu T, Wang Z, Wang D, et al. Observation of controllable tightly and loosely bound solitons with an all-fiber saturable absorber [J]. Photonics Research, 2019, 7(1): 61–68.
- [22] Wang Z, Li L, Wang D, 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.
- [23] Liu Z, Wright L G, Christodoulides D N, et al. Kerr self-cleaning of femtosecond-pulsed beams in graded-index multimode fiber [J]. Optics Letters, 2016, 41(16): 3675–3678.
- [24] Krupa K, Tonello A, Shalaby B M, et al. Spatial beam self-cleaning in multimode fibres [J]. Nature Photonics, 2017, 11(4): 237.
- [25] Krupa K, Castañeda G G, Tonello A, et al. Nonlinear polarization dynamics of Kerr beam self-cleaning in a graded-index multimode optical fiber [J]. Optics Letters, 2019, 44(1): 171–174.