

文章编号:1001-5078(2021)07-0836-07

· 综述与评论 ·

被动锁模光纤激光器中实时动力学特性的研究进展

李惠杰, 沈洪斌, 张书敏

(河北师范大学物理学院 河北省光物理及应用重点实验室, 河北 石家庄 050024)

摘要:超快、非重复现象的实时测量在很多领域具有较强的挑战性,新兴的色散傅里叶变换(DFT)技术克服了传统光学仪器扫描速率的限制,使实时光谱测量成为可能。本文介绍了基于DFT技术的被动锁模光纤激光器实时动力学特性的研究进展,其将有助于研究者对激光器中孤子爆炸、脉动孤子、孤子产生和消亡、类噪声脉冲等各种动力学现象的深入理解,对其优化光纤激光器特性具有重要启示。

关键词:超快光学;色散傅里叶变换技术;被动锁模激光器;实时动力学特性

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.002

Research progress on real-time dynamics characteristics of passively mode-locked fiber lasers

LI Hui-jie, SHEN Hong-bin, ZHANG Shu-min

(Hebei Key Laboratory of Photophysics Research and Application, College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China)

Abstract: The real-time observation of ultrafast and non-repetitive phenomena is a great challenge in many fields; the emerging of dispersion Fourier transform (DFT) technology overcomes the limitation on the scanning rate of traditional instruments, and making the real-time spectroscopy measurement being possible. In this paper, the research progress on real-time dynamic characteristics of passively mode-locked fiber lasers based on DFT technology has been introduced, which will help researcher to comprehensively understand different dynamics characteristics including soliton explosion, soliton pulsation, soliton start-up and annihilation in passively mode-locked fiber lasers, and will be helpful to optimize design the laser.

Keywords: ultrafast optics; dispersion Fourier transform technology; passively mode-locked lasers; real-time dynamics characteristics

1 引言

稳定、高能量、高峰值功率、超短脉冲光源在科学研究^[1]、生物医学成像^[2]、微机械加工^[3]、光学测量^[4]等领域具有重要应用。研究者常采用被动锁模技术产生超短光脉冲。被动锁模光纤激光器因通过腔内色散与非线性之间、损耗和增益之间的共同

作用产生超短光脉冲^[5],且泵浦功率较高时,能量量子化效应及色散波的存在极易导致多脉冲形成,因而其常表现出复杂的动力学特性,即孤子爆炸、脉动孤子、类噪声脉冲等不同类型光脉冲极易在被动锁模光纤激光器形成。但常规观测光脉冲频域特性的设备—光谱分析仪因其扫描时间相对于所研究的

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 12074098);河北省自然科学基金项目(No. F2020205016)资助。

作者简介:李惠杰(1997-),男,硕士研究生,主要从事光纤激光器动力学现象研究。E-mail: lihuijie1997@126.com

通讯作者:张书敏(1965-),女,教授,博士生导师,主要从事激光物理技术、非线性光纤与线性光学方面的研究。E-mail: zhangsm@hebtu.edu.cn

收稿日期:2020-10-26

耗散现象太长,故其无法直接记录孤子的实时动力学特性。新兴的色散傅里叶变换(DFT)技术可解决这一问题。

DFT的基本结构是利用一足够大的群速度色散元件将光脉冲的光谱信息映射到时间波形上,再通过一光电探测器和实时数字示波器进行监测。其工作原理与空间远场衍射类似,即当光脉冲进入色散元件时,色散元件中大的群速度色散(GVD)将每个光脉冲的频域波形映射到时域波形上,拉伸后的脉冲与测量的光谱形状相同,因时域波形被拉伸到纳秒量级,其速度慢到足以被光电探测器和实时示波器所捕获,故可通过DFT技术进行实时光谱测量^[6]。

利用DFT技术,研究者分别观测到类噪声脉冲和怪波^[7-14]、孤子爆炸^[15-19]、孤子脉动和孤子自组织^[20-25]、多孤子锁模动力学^[26-33]、孤子产生和消亡动力学^[34-44]、耗散孤子的矢量特性^[45-48]等许多复杂的动力学现象,本文主要介绍基于DFT技术的被动锁模光纤激光器实时动力学特性的研究进展。

2 实时动力学特性的研究进展

2.1 类噪声脉冲和怪波

类噪声脉冲可以被认为具有复杂混乱内在结构的局域性波包,具有稳定、光滑的宽光谱特征,其自相关迹上显示为一个窄相干峰坐落在宽底座上。1997年,Horowitz等首次在非线性偏振旋转(NPR)锁模掺铒光纤激光器中观察到了具有宽光谱特征类噪声脉冲^[7]。2013年,Runge等利用DFT技术研究了类噪声脉冲实时光谱演化的相干性和波动性^[8]。2019年,Wang等利用DFT技术研究了NPR锁模掺铒光纤激光器中拉伸脉冲自启动过程中调Q脉冲簇的演化^[9]。

怪波是一种稀有事件,最初在海洋中被发现。2007年,研究人员首次在超连续谱产生过程中观察怪波^[10]。2014年,Lecaplain等利用DFT技术发现了类噪声脉冲演化过程中出现的光怪波^[11]。2016年,Wang等研究了连续波(CW)和类噪声脉冲状态之间的过渡态一类调Q状态,发现在孤子串坍塌的地方会产生脉冲宽度较窄、强度较低的拖尾结构,统计结果表明,类调Q孤子光脉冲与耗散怪波现象有关^[12]。

2016年,Liu等人利用DFT技术研究了孤子爆

炸过程,通过统计脉冲峰值强度分布,证明了怪波的存在,首次将孤子爆炸与光怪波的产生联系起来,如图1所示^[13]。2018年,Luo等利用DFT技术在随机耗散孤子建立的过程中发现了一些极高强度的脉冲,通过统计峰值强度波动,证明了光怪波的存在^[14]。

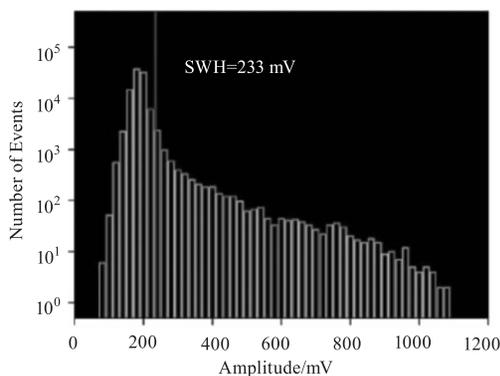


图1 孤子爆炸状态下振幅波动统计分布直方图^[13]

Fig. 1 Statistical distribution histogram of the amplitude fluctuations in soliton explosion regime^[13]

2.2 孤子爆炸

孤子爆炸是锁模激光器中的耗散动力学现象之一,在这种机制下,循环在腔内的耗散孤子的光谱会经历周期性的坍塌,但是在一定腔周期过后,它会回到爆炸前原始的状态,继续稳定演化直到下一次孤子爆炸发生。2002年,Cundiff等首次在克尔透镜锁模钛宝石固体激光器中观察到了孤子爆炸现象,但是由于当时测量仪器的限制,没有研究孤子爆炸的实时光谱演化^[15]。

2015年,Runge等首次使用DFT技术研究了孤子爆炸现象,发现孤子爆炸处于稳定锁模和类噪声脉冲之间的过渡态,在爆炸过程中会触发长波长的拉曼成分,并将孤子爆炸现象与突然的时域偏移联系起来^[16]。2016年,Liu等利用DFT技术观察到了一种持续时间很长的孤子爆炸现象,将其命名为“连续孤子爆炸”,如图2所示^[17]。发现在激光腔内加一些小的扰动,“连续孤子爆炸”状态将会切换成常规孤子爆炸或者混沌态,说明其处在传统孤子爆炸和混沌状态之间的过渡态。

孤子间可以通过辐射色散波或不稳定的连续波分量来间接的相互作用,Yu等应用DFT技术研究了多孤子体系情况下发生的孤子爆炸现象,将其观察到的现象称为“互相点燃孤子爆炸”,发现如果在

多孤子体系中孤子爆炸发生,一个孤子突然改变其峰值功率,增益光纤的瞬态增益响应将会影响每个孤子的增益水平^[18]。

正色散情况下孤子爆炸处于稳定锁模和类噪声脉冲的过渡态,由于负色散和正色散脉冲整形机制不同,如果不考虑增益和损耗,负色散情况下更容易在背景噪声下形成锁模孤子,并且更容易进入多孤子不稳定状态。2020年,Wei等利用DFT技术研究了反常色散情况下的相干孤子爆炸情况,其观察到的孤子爆炸现象处于单脉冲和孤子分子间的过渡态^[19]。

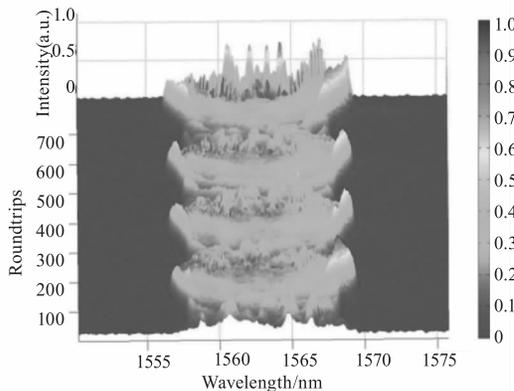


图2 “连续孤子爆炸”状态下的单发光谱^[17]

Fig. 2 Shot-to-shot spectra in “successive soliton explosions” regime^[17]

2.3 孤子脉动和孤子自组织

孤子脉动和孤子自组织是非线性耗散动力学现象之一。孤子脉动与非线性耗散系统中的周期性吸引子有关,通常被认为是介于稳定孤子和混沌之间的状态。2004年,Soto-Crespo等首次实验上观察到孤子脉动^[20]。光腔中的孤子自组织通常由不同的机制相互作用从而形成孤子分子,例如声光效应、增益损耗与恢复、色散波、光机械相互作用等。在耗散系统中传播的超短光脉冲间相互作用可能会形成孤子分子,由于孤子分子与物质分子在某些方面有类似的性质,研究腔孤子分子的演化有利于人们更好的理解物质分子的特性。

2017年,Herink等首次利用DFT技术研究了克尔棱镜Ti:蓝宝石激光器中两个孤子相互作用形成束缚态的过程,发现当腔内很多耗散孤子共存时,它们会相互作用,基于脉冲重叠的相干相互作用会导致稳定的多孤子束缚态的自组装^[21]。同年,Krupa等利用DFT技术研究了耗散孤子对分子的实时内部周期性振动,包括静止孤子对、振荡孤子对和孤子对分子。通过调节腔内参数,观察到孤子对分子内部分子从静

止状态逐渐演化成为脉动状态,如图3所示^[22]。2018年,Wang等应用DFT技术在微光纤石墨烯可饱和吸收体锁模光纤激光器中研究了孤子自组织和脉动现象,发现光机械相互作用导致大量孤子在腔内自组织形成等间距孤子簇,在单发光谱上观察到脉动过程中克尔边带的周期性出现,克尔边带对应时域上的色散波,说明负色散情况下周期性辐射的色散波与脉动同步,即色散波在孤子脉动过程中起着重要的作用^[23]。

由于光纤在2 μm 波段损耗较高,Hamdi等选用线性啁啾布拉格光纤光栅作为DFT色散元件和实时自相关技术研究了掺铒光纤激光器孤子分子中孤子的振动与振荡,观察了瞬态光孤子分子的形成^[24]。Wei等应用DFT技术观察到了具有混沌行为的脉动孤子,发现脉动过程中孤子的混沌行为表现为光谱突然坍塌,并会出现一些振幅极强的脉冲,孤子的混沌行为会破坏脉动的周期性,但孤子随后又恢复到之前的脉动状态^[25]。

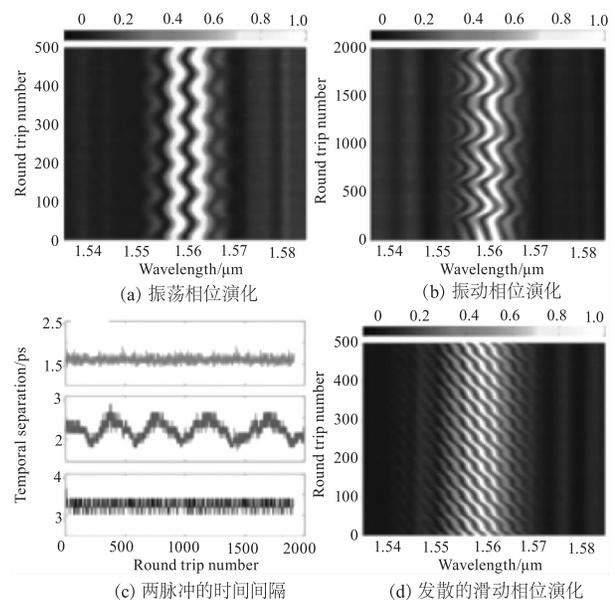


图3 孤子对分子的特征光谱演化^[22]

Fig. 3 Characteristics spectral evolution of soliton pairs of molecule^[22]

2.4 多孤子锁模动力学

很多理论被用来解释多脉冲锁模背后的物理机制,例如峰值功率钳制效应^[26]、增益带宽限制脉冲分裂^[27]、非线性腔反馈^[28]等。在负色散机制下,同一次往返中可以产生并共存几百个锁模脉冲,虽然拥挤的脉冲簇可以产生丰富的非线性现象,例如孤子雨^[29]、孤子束^[30]等。相对于基本锁模产生的高重复

频率脉冲,这类脉冲能量小、脉冲宽度更宽。但是研究多孤子间的动力学特性有利于人们进一步了解锁模激光器中发生的各种耗散现象。

2017年, Yu 等利用 DFT 技术研究了多脉冲锁模情况下单脉冲的整个建立过程,包括调 Q 波动、瞬态自相位调制展宽光谱、波长漂移和多脉冲之间的光谱干涉现象,如图 4 所示^[31]。由于色散的存在,具有不同群速度的孤子会不可避免的随时间而相互碰撞,2018年, Wei 等利用 DFT 技术研究了不同波长的孤子碰撞诱导的自重塑过程,其特征是孤子主瓣上的动态光谱条纹,以及波长漂移、克尔边带的重建^[32]。 Luo 等用 45° 倾斜光纤光栅 (TFG) 和两个偏振控制器 (PC) 组成 NPR 锁模光纤激光器,并利用 DFT 技术研究了一次往返过程中单孤子和孤子分子在腔内共存的情况下,孤子分子的内部运动^[33]。

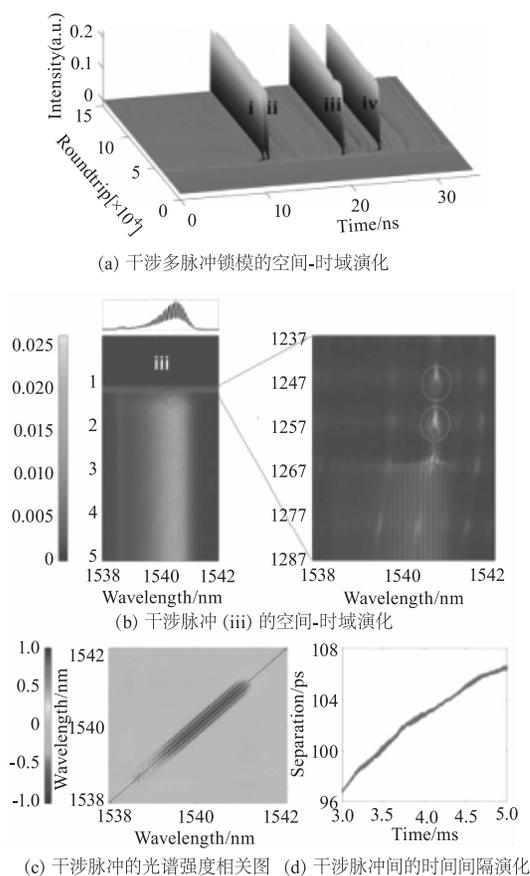


图 4 多脉冲锁模的动力学特性^[31]

Fig. 4 The dynamics of multipulse mode-locking^[31]

2.5 孤子产生和消亡动力学

调 Q 和锁模是产生超短脉冲的两种方法,人们已经能用现有的实验仪器来研究稳态情况下激光器产生的超短脉冲时域和频域特性。但是由于传统测量仪器扫描速率的限制,时域上主要靠高速示波器和

自相关仪对锁模建立的瞬态过程进行实时观察,一直以来,由于传统光谱仪扫描速率的限制,孤子启动过程中光谱如何演化一直是一个有待探究的问题。近年来随着实时测量技术不断发展, DFT 技术使实时光谱测量成为了可能,可以被用来研究锁模和孤子形成过程中的光谱演化,进一步了解激光器中出现的丰富且有趣的动力学现象。

2015年, Wei 等首次利用 DFT 技术观察了传统孤子的建立过程中的光谱演化^[34]。2016年, Herink 等应用 DFT 技术研究了飞秒克尔透镜钛蓝宝石激光器中锁模的建立过程,从初始波动到飞秒脉冲的实时光谱演化,观察到孤子建立的一些瞬态现象,在锁模启动过程中观察到了拍频过程,将其称为“辅助脉冲锁模”^[35]。

Peng 等利用 DFT 技术研究了从噪声到孤子分子的建立过程,观察到三种类型孤子分子的形成:基态孤子分子、激发态孤子分子和间歇性振动孤子分子,这些孤子分子的形成经历三个非线性阶段,分别为锁模、孤子分裂和孤子相互作用^[36]。前两个阶段演化过程类似,但是在孤子相互作用阶段,基态孤子分子表现出各种各样的相互作用,如吸引、排斥、振动等,而激发态孤子分子和间歇性振动孤子分子主要表现出排斥相互作用。如图 5 所示,其中图 5(a)为 DFT 技术测量的实时光谱演化,图 5(b)为图 5(a)中单发光谱的傅里叶变换得到的场自相关,其中黑线代表能量演化,图 5(c)、(d)为图 5(b)的放大图。可以看出在 250 圈开始锁模,产生孤子,孤子持续 500 圈后爆炸形成双孤子,如调制谱所示。调制谱每圈都在改变,说明每一圈都存在着孤子相互作用。 Liu 等利用 DFT 技术观察了孤子分子建立的整个过程,发现稳定孤子分子形成之前经历五个不同的阶段:增强弛豫振荡 (RO)、拍频过程、瞬态单脉冲、瞬态束缚态和稳定束缚态。在同一 RO 阶段内发现有多脉冲演化,但只有最强的那个脉冲可以在 RO 阶段结束后存活下来,并且在同一 RO 阶段,脉冲出现在相同的时域位置,将这种现象称为“记忆特性”^[37]。

2019年, Liu 等利用 DFT 技术首次观察了孤子建立的整个过程,发现产生稳定孤子有两种演化情况,一种是经历增强 RO、准锁模阶段、拍频阶段,最后为稳定的单脉冲锁模。而另一种是在稳定单脉冲锁模态之前观察到一个额外的瞬态束缚态^[38]。

Chen 等在基于非线性多模干涉 (NL-MMI) 技术锁模光纤激光器中利用 DFT 技术分别研究了锁模前传统孤子和展宽脉冲的实时光谱演化, 在传统孤子和展宽脉冲之间观测到了光怪波^[39]。Wang 等利用 DFT 技术研究了双脉冲锁模过程中的光谱演化, 发现由于增益竞争, 双脉冲锁模有两种演化模式, 即经历增强 RO、拍频阶段后从一个脉冲分裂并同时形成, 或经历增强 RO、拍频阶段、瞬态束缚态导致脉冲间隔的变化和光谱的展宽并最终演化为双脉冲锁模^[40]。之后其课题组利用 DFT 技术研究了双脉冲锁模衰减演化过程中实时光谱和时域演化, 发现衰减过程中光谱宽度和脉冲能量变化趋势非常相似。在衰减过程中, 一个脉冲簇的两个脉冲可以同时消失, 也可以一个接一个消失^[41]。Cui 等利用 DFT 技术分别研究了负色散、近零色散、正色散情况下传统孤子、展宽脉冲和耗散孤子从产生到消亡的演化过程^[42]。

2019 年, Liu 等用 DFT 技术观察了谐波锁模的建立过程, 发现谐波锁模源于单脉冲分裂, 并在谐波锁模早期观察到了显著的光谱呼吸行为^[43]。随后, Wang 等人在利用 DFT 技术研究了短腔情况下谐波锁模的建立, 观察到瞬态多脉冲逐渐演化成谐波锁模态^[44]。

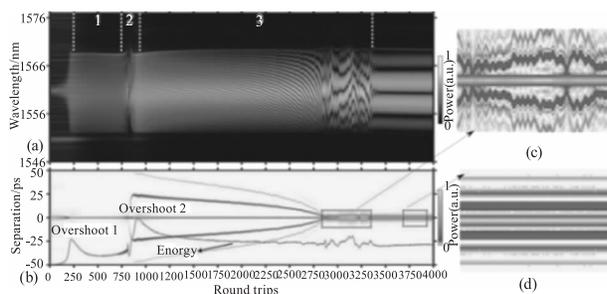


图 5 从背景噪声演化而成的基态孤子分子形成过程^[36]

Fig. 5 Ground-state soliton molecule formation from noise^[36]

2.6 耗散孤子的矢量特性

由于单模光纤制造过程中会引入的少量随机双折射和外界应力的作用, 可以支持两个正交方向的偏振模。当光脉冲在单模光纤中传输时, 它的两个偏振模通常具有不同的相速度和群速度, 两个偏振模的相速度差会导致脉冲的偏振态演化, 而群速度的差异会导致脉冲展宽甚至分裂。在理想情况下 (光纤呈圆柱形对称和无应力) 情况下, x 方向的偏振模式不会与 y 方向的偏振模式耦合。事实上, 单模光纤中纤芯形状的一些小的变化, 会导致两个偏振模式的耦合, 从而破坏两个偏振模的简并。1987

年, Menyuk 等较早的对单模光纤中传播的孤子双折射效应进行了研究^[45]。

2017 年, Liu 等研究了相干耗散孤子的矢量动力学特性, 利用 DFT 技术观察了偏振旋转矢量孤子 (PRVS) 和传统群速度锁定矢量孤子 (GVLVS) 的实时光谱演化, 首次报道了 PRVS 的动态捕获。发现传统 GVLVS 演化过程中, 两偏振态中心波长固定不变, 而对于 PRVS, 光谱域两偏振态通过周期性改变其峰值波长、强度和轮廓来一起传播, 将这种行为称为“动态孤子捕获”, 如图 6 所示^[46]。同年, Krupa 等利用 DFT 技术在半导体可饱和吸收镜 (SESAM) 锁模光纤激光器中研究了非相干耗散孤子的矢量动力学特性, 报道了观察到的偏振锁定和偏振开关矢量非相干孤子, 为了进一步探索这两种偏振态之间的过渡动力学, 微调腔内偏振控制器, 观察到孤子爆炸现象, 通过对脉冲能量进行统计分析, 将爆炸不稳定性与矢量怪波的产生联系起来^[47]。

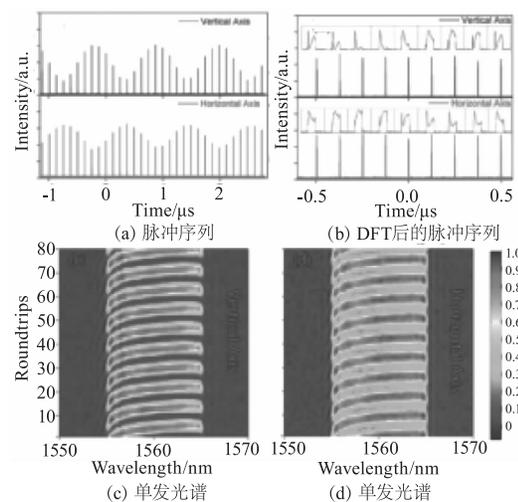


图 6 8 倍腔周期的偏振旋转矢量孤子的偏振分辨测量^[45]

Fig. 6 Polarization-resolved measurements in a polarization rotation vector soliton regime with a period of eight roundtrip times^[45]

2020 年, Luo 等利用 DFT 技术在基于 NL-MMI 锁模光纤激光器中研究了耗散孤子脉动形式和矢量特性, NL-MMI 锁模的偏振不敏感特性促进了耗散孤子自我捕获过程, 在适当的参数下观察到了静止 GVLVS 和脉动 GVLVS 的演化^[48]。

3 结语

对于激光器当中发生的各种动力学现象以往都是依靠数值模拟得到的, 但是数值模拟得到的结果在实验中获得并不容易。DFT 技术激发了人们研究光纤激光器中出现的瞬态动力学现象的热情, 被应

用于类噪声脉冲、光怪波、孤子爆炸、孤子脉动、孤子的矢量特性等研究当中。

目前被动锁模光纤激光器中观察到的实时动力学现象还有待完善,孤子的矢量动力学特性方面具有很大的研究潜力,有待于人们去进一步的研究。另外,多孤子相互作用情况也值得研究,目前有很多关于脉冲强度相互作用的研究报道,但是脉冲相位之间是否有相互作用和相互作用力如何导致多孤子间相对相位的演化也有待研究,多孤子情况下研究其孤子之间的相互作用力可以丰富锁模激光器中的动力学现象,从而优化锁模激光器的性能。皮秒和飞秒脉冲的动力学现象可以用 DFT 技术测量,但亚飞秒甚至阿秒脉冲的锁模自启动和消亡过程有待人们利用 DFT 技术做进一步的研究。在色散管理机制情况下是否可以观察到孤子爆炸现象和孤子分子形成过程中频域上观察到拍频过程中的时域演化有待用时间透镜技术去研究,从而更好的理解和认识激光腔内发生的丰富的孤子动力学特性。

参考文献:

- [1] Nelson L E, Jones D J, Tamura K, et al. Ultrashort-pulse fiber ring lasers [J]. *Applied physics B, Lasers and Optics*, 1997, 65(2): 277 – 294.
- [2] Downes A, Elfick A. Raman spectroscopy and related techniques in biomedicine [J]. *Sensors*, 2010, 10(3): 1871 – 1889.
- [3] Öktem B, Pavlov I, Ilday S, et al. Nonlinear laser lithography for indefinitely large-area nanostructuring with femto-second pulses [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(11): 897 – 901.
- [4] Goda K, Tsia K K, Jalali B. Amplified dispersive fourier-transform imaging for ultrafast displacement sensing and barcode reading [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(13): 131109.
- [5] Grelu P, Akhmediev N. Dissipative solitons for mode-locked lasers [J]. *Nature photonics*, 2012, 6(2): 84 – 92.
- [6] Goda K, Jalali B. Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(2): 102 – 112.
- [7] Horowitz M, Barad Y, Silberberg Y. Noiselike pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 799 – 801.
- [8] Runge A F J, Agugaray C, Broderick N G R, et al. Coherence and shot-to-shot spectral fluctuations in noise-like ultrafast fiber lasers [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(21): 4327 – 4330.
- [9] Wang X, Ren X, Peng J, et al. On the Q-switching bunch dynamics in the build-up of stretched-pulse mode-locking [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2747 – 2753.
- [10] Solli D R, Ropers C, Koonath P, Jalali B. Optical rogue waves [J]. *Nature*, 2007, 450(7172): 1054 – 1057.
- [11] Lecaplain C, Grelu P. Rogue waves among noiselike-pulse laser emission; an experimental investigation [J]. *Physical Review A*, 2014, 90(1): 013805.
- [12] Wang Z, Wang Z, Liu Y, et al. Q-switched-like soliton bunches and noise-like pulses generation in a partially mode-locked fiber laser [J]. *Optics Express*, 2016, 24(13): 14709 – 14716.
- [13] Liu M, Luo A P, Xu W C, et al. Dissipative rogue waves induced by soliton explosions in an ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 3912 – 3915.
- [14] Luo Z C, Kang J Q, Liu M, et al. Optical rogue waves by random dissipative soliton buildup in a fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(20): 1803 – 1806.
- [15] Cundiff ST, Soto-Crespo J M, Akhmediev N. Experimental evidence for soliton explosions [J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(7): 073903.
- [16] Runge A F J, Broderick N G R, Erkintalo M. Observation of soliton explosions in a passively mode-locked fiber laser [J]. *Optica*, 2015, 2(1): 36 – 39.
- [17] Liu M, Luo A P, Yan Y R, et al. Successive soliton explosions in an ultrafast fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1181 – 1184.
- [18] Yu Y, Luo Z C, Kang J, et al. Mutually ignited soliton explosions in a fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4132 – 4135.
- [19] Wei Z W, Liu M, Ming S X, et al. Exploding soliton in an anomalous-dispersion fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(2): 531 – 534.
- [20] Soto-Crespo J M, Grapinet M, Grelu P, et al. Bifurcations and multiple-period soliton pulsations in a passively mode-locked fiber laser [J]. *Physical Review E*, 2004, 70(6): 066612.
- [21] Herink G, Kurtz F, Jalali B, et al. Real-time spectral interferometry probes the internal dynamics of femtosecond soliton molecules [J]. *Science*, 2017, 356(6333): 50 – 54.
- [22] Krupa K, Nithyanandan K, Andral U, et al. Real-time observation of internal motion within ultrafast dissipative optical soliton molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2017, 118(24): 243901.

- [23] Wang Z, Wang Z, Liu Y, et al. Self-organized compound pattern and pulsation of dissipative solitons in a passively mode-locked fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(3): 478–481.
- [24] Hamdi S, Coillet A, Grelu P. Real-time characterization of optical soliton molecule dynamics in an ultrafast thulium fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 4965–4968.
- [25] Wei Z W, Liu M, Ming S X, et al. Pulsating soliton with chaotic behavior in a fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5965–5968.
- [26] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B, et al. Mechanism of multi-soliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2005, 72(4): 043816.
- [27] Kärtner F X, Au J A d, Keller U, et al. 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.
- [28] Komarov A, Leblond H, Sanchez F, et al. Multistability and hysteresis phenomena in passively mode-locked fiber lasers[J]. *Physical Review A*, 2005, 71(5): 053809.
- [29] Chouli S, Grelu P. Soliton rains in a fiber laser: an experimental study [J]. *Physical Review A*, 2010, 81(6): 063829.
- [30] Meng Y, Zhang S, Li X, et al. Multiple-soliton dynamic patterns in a graphene mode-locked fiber laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(6): 6685–6692.
- [31] Yu Y, Li B, Wei X, et al. Spectral-temporal dynamics of multipulse mode-locking [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(20): 201107.
- [32] Wei Y, Li B, Wei X, et al. Ultrafast spectral dynamics of dual-color-soliton intracavity collision in a mode-locked fiber laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(8): 081104.
- [33] Luo Y, Xiang Y, Liu T, et al. Real-time access to the coexistence of soliton singlets and molecules in an all-fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(17): 4263–4266.
- [34] Wei X, Zhang C, Li B, et al. Observing the spectral dynamics of a mode-locked laser with ultrafast parametric spectro-temporal analyzer[C]. // *CLEO: Science and Innovations*. Optical Society of America, 2015: STh3L.4.
- [35] Herink G, Jalali B., Ropers C, et al. Resolving the buildup of femtosecond mode-locking with single-shot spectroscopy at 90 MHz frame rate [J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(5): 321–326.
- [36] Peng J, Zeng H. Build-Up of dissipative optical soliton molecules via diverse soliton interactions [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2018, 12(8): 1800009.
- [37] Liu X, Yao X, Cui Y. Real-time observation of the buildup of soliton molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(2): 023905.
- [38] Liu X, Cui Y, et al. Revealing the behavior of soliton buildup in a mode-locked laser [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(1): 016003.
- [39] Chen G, Li W, Wang G, et al. Generation of coexisting high-energy pulses in a mode-locked all-fiber laser with a nonlinear multimodal interference technique [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(2): 187–192.
- [40] Wang G, Chen G, Li W, et al. Real-time evolution dynamics of double-pulse mode-locking [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(4): 1–4.
- [41] Wang G, Chen G, Li W, et al. Decaying evolution dynamics of double-pulse mode-locking [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(8): 825–829.
- [42] Cui Y, Liu X, et al. Revelation of the birth and extinction dynamics of solitons in SWNT-mode-locked fiber lasers [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(4): 423–430.
- [43] Liu X, Pang M. Revealing the buildup dynamics of harmonic mode-locking states in ultrafast lasers [J]. *Laser and Photonics Reviews*, 2019, 13(9): 1800333.
- [44] Wang X, Peng J, Huang K, et al. Experimental study on buildup dynamics of a harmonic mode-locking soliton fiber laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 28808–28815.
- [45] Menyuk C R. Stability of solitons in birefringent optical fibers. I: equal propagation amplitudes [J]. *Optics Letters*, 1987, 12(8): 614–616.
- [46] Liu M, Luo A P, Luo Z C, et al. Dynamic trapping of a polarization rotation vector soliton in a fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(2): 330–333.
- [47] Krupa K, Nithyanandan K, Grelu P. Vector dynamics of incoherent dissipative optical solitons [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1239–1244.
- [48] 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.