

类噪声脉冲光纤激光器研究现状及进展

陈家旺^{1,2}, 赵鹭明^{1,3}

¹江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏省先进激光技术与新兴产业协同创新中心,

江苏省先进激光材料与器件重点实验室, 江苏 徐州 221116;

²江苏师范大学敬文书院, 江苏 徐州 221116;

³深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室, 广东 深圳 518060

摘要 类噪声脉冲(NLP)是锁模激光器在一定条件下生成的一种特殊脉冲,具有能量高、脉宽宽、相干性低等特点。近年来,由于稀土元素掺杂技术、锁模技术和光纤放大技术的不断发展以及抽运能量的不断提升,类噪声脉冲光纤激光器得到了迅速发展。基于此,描述了使用不同锁模技术、工作在不同色散区的类噪声脉冲光纤激光器。依据其脉冲产生机理、脉冲光学性质等特点进行分类叙述,综述了国内外这一领域的研究现状及进展。最后,对近年来类噪声脉冲激光器在生产实践中的具体应用进行了简要阐述。

关键词 激光器; 被动锁模技术; 类噪声脉冲; 光纤激光器; 色散管理; 全正色散

中图分类号 O437 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.110002

Noise-Like Pulsed Fiber Lasers

Chen Jiawang^{1,2}, Zhao Luming^{1,3}

¹*Jiangsu Provincial Key Laboratory of the Advanced Laser Materials and Devices, Jiangsu Collaborative Innovation Center of Advanced Laser Technology and Emerging Industry, School of*

Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

²*CW Chu College, Jiangsu Normal University, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;*

³*Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China*

Abstract Noise-like pulses (NLP) are a kind of special pulse with high energy, wide spectral bandwidth, and low coherence, which are generated from the passively mode-locked fiber lasers under certain conditions. In recent years, NLP fiber lasers have developed rapidly because of the fast development of doping technology, mode-locking technology, fiber amplification technology, and the improvement of pump energy. Based on this, NLP fiber lasers with different mode locking techniques operated in different dispersion regimes were summarized. The NLP fiber lasers were classified based on the discrepancy in its pulse generation mechanism and optical properties. Research status and progress of the fiber lasers at home and abroad was reviewed. Finally, the application of the fiber lasers in production practice was briefly depicted.

Key words lasers; passive mode-locking technology; noise-like pulses; fiber lasers; dispersion management; all normal dispersion

OCIS codes 140.3510; 320.5550; 320.6629; 190.4370

收稿日期: 2017-05-02; **收到修改稿日期:** 2017-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(11674133)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)、江苏省大学生创新创业训练计划项目(201410320103X)、深圳大学光电子器件与系统教育部/广东省重点实验室开放基金(GD201705)

作者简介: 陈家旺(1994—),男,本科生,主要从事类噪声脉冲光纤激光器方面的研究。E-mail: 2471135623@qq.com

导师简介: 赵鹭明(1976—),男,博士,教授,主要从事锁模光纤激光器、光纤放大器、光孤子动力学等方面的研究。

E-mail: zhaoluming@jsnu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

与传统的固体激光器相比,光纤激光器具有光束质量好、增益高、效率高、阈值低、可调谐、结构紧凑、运转可靠和散热性好等优点^[1]。在过去的近 30 年间,光纤激光器得到了迅猛发展,在光通信^[2]、光传感^[3]、激光医疗^[4]、工业加工^[5]、航空航天^[6]、材料科学^[7]、光谱学^[8]以及非线性光学^[9]等领域均得到了广泛应用。

使用被动锁模技术的光纤激光器除了能产生稳定的锁模超短脉冲,还能持续产生类噪声脉冲^[10]。处于此工作状态的激光器可以连续输出准稳定超短脉冲包络序列。类噪声脉冲的典型特征表现为:1) 宽的波包,波包内部具有脉冲宽度和脉冲峰值功率随机变化的飞秒脉冲结构;2) 宽而平滑的光谱(平均效果);3) 低时域相干性。从类噪声脉冲最初被发现到现在的近 20 年间,已经有许多科研团队研究报道了这种脉冲,这种脉冲的优势在于:相较于传统的锁模脉冲,具有大能量、宽脉宽等特征,类噪声脉冲在激光器中更易生成。

起初,工作在不同色散区域的脉冲激光器产生的类噪声脉冲能量从皮焦到数十纳焦不等。近年来,随着抽运功率的不断提高和光纤放大技术的不断发展,类噪声脉冲能量也不断提升,光纤激光器已经可以产生能量高达几百纳焦的类噪声脉冲^[11]。利用色散管理技术、孤子自频移(SSFS)及拉曼效应等,类噪声脉冲的光谱宽度已经超过 100 nm^[12]。随着类噪声脉冲性能的不不断提升,其应用范围更加广阔。

现阶段关于类噪声脉冲的研究主要集中在:1) 研究工作在不同波长、不同光纤色散区以及使用不同激光腔结构、不同锁模技术的光纤激光器如何产生类噪声脉冲;2) 分析不同种类的激光器产生的类噪声脉冲所具有的不同性质;3) 使用新材料、新技术等进一步拓宽类噪声脉冲的工作范围;4) 促进类噪声脉冲研究成果的技术转化,推进其在相关领域,例如低光谱相干干涉、微加工和超连续谱生成等方面的应用。

2 类噪声脉冲光纤激光器

根据不同的划分标准,类噪声脉冲光纤激光器可划分为不同的种类。按照使用的锁模技术可分为:非线性光学环形镜(NOLM)^[13-14]、非线性偏振旋转(NLP)^[15]和可饱和吸收体(SA)[包括碳纳米管(CNTs)^[16-17]、半导体可饱和吸收镜(SESAM)^[18]等]3种。按照其使用的增益光纤掺杂介质,激光器经常用到的掺杂光纤主要有掺铒光纤(EDF)^[19]、掺铥光纤(TDF)^[20]和掺镱光纤(YDF)^[1,5]等。按照光纤激光器工作的色散区域,主要可分为4种:反常色散区^[21]、色散管理区^[22]、自相似区^[23]和目前备受关注的全正色散区^[15]。

自 Horowitz 等^[10]最初在实验中发现类噪声脉冲以来,关于类噪声脉冲的研究工作不断发展,其产生及演化过程中存在的诸多疑点也逐渐被解释清楚。类噪声脉冲起初被认为是由激光器腔内存在的强双折射与非线性偏振旋转效应之间的相互作用导致的^[10]。之后的研究发现,激光器在不同工作区域内产生类噪声脉冲的机制不同。在低双折射负色散腔中产生的类噪声脉冲是由孤子的坍塌效应引起的^[19];在正色散区,类噪声脉冲的形成则被认为是由光纤正色散与使用非线性偏振旋转、半导体可饱和吸收镜等被动锁模技术引起的峰值功率钳制效应一同导致的^[15]。另外,拉曼效应对促进腔长较长、脉冲峰值功率较高的光纤激光器形成类噪声脉冲具有不可忽视的影响^[24-25]。

本文主要介绍光纤激光器使用的几种主要锁模技术、传统锁模脉冲与类噪声脉冲之间的差异与互补,以及处于两种主要色散区的类噪声脉冲光纤激光器实验及理论方面的进展,包括色散管理光纤激光器和全正色散光纤激光器。

2.1 类噪声脉冲光纤激光器的被动锁模技术

锁模技术分主动锁模技术和被动锁模技术两种,本文主要介绍目前已被广泛应用于类噪声脉冲光纤激光器的被动锁模技术。被动锁模技术,即利用可饱和吸收介质/效应具有的强光透过率高、弱光透过率低的性质,使脉冲宽度在光纤或介质中传播过程中变窄,从而得到比原脉冲更窄的新脉冲的技术。脉冲在激光器中不断循环变窄,最终成为超短脉冲,从而实现锁模。相较于主动锁模技术,被动锁模技术结构较简单,并且能够生成脉宽较窄的脉冲。具有简单、紧凑和集成等特点的被动锁模光纤激光器有望成为众多新技术潜在的脉冲光源^[26]。

目前,类噪声脉冲光纤激光器使用的被动锁模技术主要有可饱和吸收体、非线性光纤环形镜和非线性偏振旋转,其锁模结构如图1所示,图中VRC为可调谐调制器,PC为偏振控制器,PD-ISO为偏振相关隔离器。

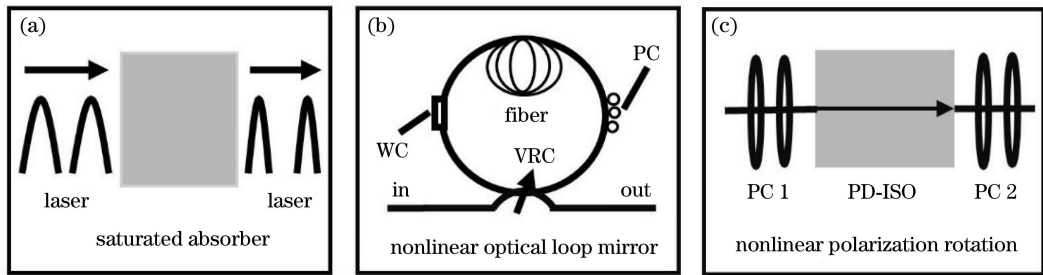


图1 几种主要的被动锁模结构。(a)可饱和吸收体^[27];(b)非线性光纤环形镜^[28];(c)非线性偏振旋转^[29]

Fig. 1 Several major passive mode-locking structures. (a) Saturable absorber^[27];

(b) nonlinear optical loop mirror^[28]; (c) nonlinear polarization rotation^[29]

1) 可饱和吸收体。可饱和吸收体是一种透过率随脉冲强度增加而增加的非线性介质。由于光脉冲固有的边缘强度小、中心强度大的特点,当脉冲通过吸收体时,边缘损耗较大,中心损耗较小,最终脉冲被窄化,从而实现锁模。半导体可饱和吸收镜是一种比较重要的可饱和吸收体,包括由半导体材料组成的布拉格结构和反射镜^[30]。半导体可饱和吸收镜可以精确控制调制深度及损耗等参数,但其工作带宽较窄,且制作技术复杂、价格昂贵,其应用范围受限。碳纳米管作为一种新型的饱和吸收体具有鲜明的特点,已经引起广泛的关注。相较于半导体可饱和吸收镜,碳纳米管的显著优点是可以不同管径之间的堆积获得宽的工作光谱,但过多的堆积明显降低光的透过率,增加损耗,从而降低脉冲输出能量。

2) 非线性光纤环形镜。使用非线性光纤环形镜技术实现锁模的光纤激光器的腔结构非常类似于“8”字形,所以也被称为“8”字形光纤激光器^[14,31]。其工作原理是:调节耦合器的耦合比例为50:50,此时入射光可被分为振幅相等、传播方向相反的两路。两路光在传输过程中积累不同的非线性相移,当两路光再次在耦合器处相遇时进行相干叠加,并产生自幅度调制,从而实现锁模。

3) 非线性偏振旋转。非线性偏振旋转锁模技术的物理机制为:脉冲通过偏振相关的隔离器后变为线偏振光,线偏振光通过第1个偏振控制器后变为椭圆偏光。脉冲在光纤中继续传播,脉冲的偏振态开始发生变化,最终光偏振的取向和椭圆率完全由光纤长度及其双折射决定。然而,若光强度较强,则必须考虑光纤的非线性克尔效应,其会引起光偏振的额外变化^[32-33]。由于额外的偏振变化与光强度成正比,整个脉冲的偏振态将不再一致。若在光纤后面放置另一个偏振器,则通过调节偏振器的取向和光纤长度,使具有较高强度的光经过偏振器时可以获得较大的透射效果,从而起到饱和吸收的作用。这种效应被称为人工可饱和吸收体效应,非线性偏振旋转技术利用这种人工可饱和吸收效应实现光纤激光器的被动锁模。从原理角度看,非线性偏振旋转与非线性光纤环形镜类似,只是非线性光纤环形镜使用反向传输的两束光,而非线性偏振旋转技术使用的是两个相互垂直的脉冲偏振分量。从实用角度看,非线性偏振旋转技术结构简单,只需一个光纤环路。在锁模之后,激光器中将形成强光脉冲并在腔中循环。如果脉冲的非线性相位调制与由腔色散引起的脉冲宽度展宽可以平衡,激光器将会获得孤子。由于非线性偏振旋转技术简单、稳定,恢复时间快,引起了极大的关注并被广泛使用。

非线性偏振旋转技术在类噪声脉冲光纤激光器中使用最广泛,使用该锁模的光纤激光器有着较为简单的结构,如图2所示,图中BS为分束器,WDM为波分复用器,SMF为单模标准光纤。

已有研究发现,类噪声脉冲的产生并不依赖于锁模技术。最早的类噪声脉冲是在使用非线性偏振旋转锁模技术的掺铒光纤激光器中发现的^[10]。2013年,Wang等^[27]使用光学沉积法制造的碳纳米管作为全光纤配置的可饱和吸收器也实现了脉冲锁模,制作出了可以在 $1.9\ \mu\text{m}$ 处产生耗散孤子脉冲和类噪声脉冲的正常色散掺铒光纤激光环形振荡器。2014年,Li等^[11]研制出了一种基于非线性光纤环形镜的全光纤被动锁模环形振荡器,在反常色散条件下输出了稳定的孤子和锁模类噪声脉冲。以上结果证明,使用非线性光纤环形镜^[13]、可饱和吸收体^[27]和非线性偏振旋转^[15]3种被动锁模技术的光纤激光器均具有产生类噪声脉冲的能力。

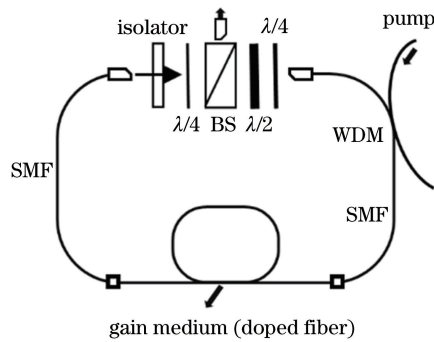


图 2 使用非线性偏振旋转技术锁模的类噪声脉冲光纤激光器结构图

Fig. 2 Structural diagram of noise-like fiber laser using nonlinear polarization rotation technique

2.2 传统锁模脉冲与类噪声脉冲

与传统的锁模皮秒、飞秒脉冲相比,类噪声脉冲本质上是由许多随机演化的超短脉冲集聚在一起形成的脉冲波包。这种脉冲波包的内部持续存在相位相干性较低的、随机的光谱波动。从脉冲的时域分布来看,在皮秒或纳秒量级的基底上,这种脉冲包含大量相位、脉宽、峰值能量随机变化的飞秒级超短脉冲,因脉冲整体轮廓形似噪声,所以被称为类噪声脉冲。

这些随机演化的超短脉冲的数量主要与激光器的抽运功率有关,增加激光器的抽运功率,小脉冲的数量将会增加,类噪声脉冲的持续时间也会变长。因此类噪声脉冲的脉冲宽度(波包宽度)一般由抽运功率决定,可以从皮秒变化至纳秒量级。脉冲随着抽运能量的增加并不会发生分裂,这与传统锁模脉冲有本质区别。也正因为如此,类噪声脉冲可以轻松获得和在正常色散区形成的具有与强啾啾超短脉冲相比拟的大脉冲能量。

由于类噪声脉冲波包内部存在大量低相干飞秒级超短脉冲,类噪声脉冲与传统锁模脉冲在时域及频域分布上均存在明显差异^[15],如图 3 所示。

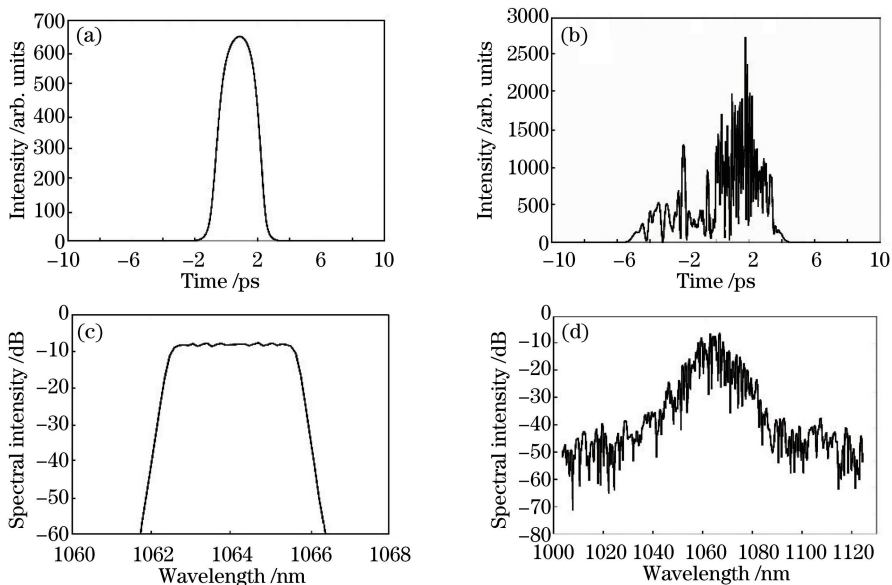


图 3 传统锁模脉冲与类噪声脉冲时域及频域对比图。(a)传统脉冲时域分布; (b)类噪声脉冲时域分布;(c)传统脉冲频域分布;(d)类噪声脉冲频域分布

Fig. 3 Comparison of pulse profiles and optical spectra of the traditional mode-locked pulse and the noise-like pulse. (a) Pulse profiles of the traditional mode-locked pulse; (b) pulse profiles of the noise-like pulse; (c) optical spectrum of the traditional mode-locked pulse; (d) optical spectrum of the noise-like pulse

从图 3 可以看出,与传统锁模脉冲相比,类噪声脉冲具有较宽的基底以及随机调制的飞秒级超短脉冲,超短脉冲的脉宽及峰值功率随机变化,从形态上类似于噪声脉冲。与传统脉冲相比,类噪声脉冲更易于获得

高的峰值能量^[11]；传统锁模脉冲的光谱带宽易被有限增益带宽等因素限制的，较窄，而类噪声脉冲可以具有更宽的光谱宽度^[12]。这些独特的性质使得类噪声脉冲具有更大的应用潜力，以及更广阔的应用前景。

类噪声脉冲产生于激光器中一种特殊的纵模锁定状态，广泛存在于使用被动锁模技术的光纤激光器中^[15,19,27]。一般认为，锁模激光器的工作状态与抽运功率之间存在直接联系。在合适的抽运功率下，激光器可以稳定地工作在相干的锁模皮秒、飞秒激光脉冲输出状态。然而，随着抽运功率的增加，激光器也可以工作在类噪声脉冲输出状态^[11,15]。通过控制激光腔内的相位延迟，激光器也可以在孤子脉冲和类噪声脉冲状态之间转换，获得锁模孤子脉冲或类噪声脉冲以满足实际需要^[19]。也有研究团队通过调整激光腔内的偏振控制器，成功产生了锁模孤子脉冲和矩形类噪声脉冲^[28]，并证明两者存在独立性。结果表明，类噪声状态是被动锁模光纤激光器的一种新的工作状态。通过控制激光器内的各种参数，如抽运功率、非线性相位延迟以及群速度色散值等来获得高度相干的锁模皮秒、飞秒激光脉冲或相干性较低但能量值较大、光谱较宽的类噪声脉冲。类噪声脉冲的存在丰富了目前使用被动锁模技术的光纤激光器中锁模脉冲的种类。

2.3 色散管理光纤激光器

传统孤子脉冲光纤激光器通过平衡光纤自身的负色散效应与自相位调制，从而输出稳定的孤子脉冲。由于激光器产生孤子脉冲的阈值较低，并且受到孤子面积理论的限制，激光器最终输出的单脉冲能量不高，激光器输出的脉冲能量一般低于 0.1 nJ。Tamura 等^[21]在激光器中同时使用正、负色散光纤，实现对激光腔的色散管理，研制出色散管理光纤激光器，通过调整传输光纤中的色散值，降低了整个光纤激光器的平均色散，最终改善了所传输孤子的性能。激光器中使用正色散光纤实现脉冲展宽放大后，色散管理腔内传输的脉冲宽度不再保持不变，而是被循环压缩和展宽，最终使腔内脉冲的平均宽度增加，峰值功率降低，累积的非线性相移减小。新型的色散管理光纤激光器可以输出数十纳焦量级的飞秒脉冲^[22]。脉冲在色散管理光纤激光器中的演化过程是动态的，激光器中不同位置的脉冲参数是不同的，合理选择激光的输出位置，可以获得理想的输出脉冲。Tang 等^[34]采用此方式在色散管理光纤激光器中获得了单脉冲能量达 2.08 nJ、持续时间短至 46.2 fs 的输出脉冲。

除了可以产生大能量啁啾脉冲之外，色散管理光纤激光器中也可以产生类噪声脉冲。观察发现，激光器产生的实际上是脉冲宽度、脉冲峰值功率和脉冲数目随机变化的脉冲波包，波包内脉冲的平均数量及波包的宽度随抽运强度的增加而增加。最初，研究人员猜测类噪声脉冲的光谱带宽对腔内净色散存在依赖性^[35]，但其后 Tang 等^[19]研究发现，类噪声脉冲的产生可以由激光器中的孤子崩塌效应引起。孤子脉冲在激光腔中传播且峰值未被限制时，会被腔内净增益放大；脉冲的孤子特性决定其峰值功率将不断增加，脉冲宽度将连续变窄，光谱带宽将连续变宽；当脉冲的光谱带宽与增益带宽相当时，会出现增益滤波效应并且将对脉冲产生损耗，脉冲最终将变得不稳定并崩塌，在脉冲崩塌的位置处会产生具有更宽脉冲宽度、更窄带宽的新脉冲；如果腔中存在足够的净增益，新的脉冲将会再次被放大并且最终再次崩塌；大部分的孤子崩塌和产生过程共存于腔中且在增益竞争下总是不同步，因此，在任何情况下，振幅和脉冲宽度随机变化的脉冲在腔中同时存在^[36]。

2.4 全正色散光纤激光器

有关全正色散光纤激光器的研究起步较晚，与反常色散方案中形成的孤子相比，全正色散光纤激光器利于产生更大的脉冲能量，现已受到学术界的广泛关注。2006 年，Zhao 等^[37]报道了由纯正色散光纤制成的被动锁模掺铒光纤激光器。由于此类激光器激光腔内无元件工作在反常色散区，所以被称为全正色散光纤激光器。激光器通过使用非线性偏振旋转技术实现自启动锁模，获得的锁模脉冲具有大脉冲能量、强频率啁啾，以及由有效增益带宽限制的光谱宽度等特征。因为脉冲整形受有限增益带宽的限制，此类脉冲又被称为增益支配孤子。此后，Chong 等^[38]提出一种使用窄带滤波器对啁啾脉冲进行脉冲压缩和整形的全正色散掺铒光纤激光器，激光器的性能很大程度上受滤波器及其带宽的影响。

全正色散光纤激光器中形成的孤子与由反常色散和非线性效应相互作用形成的传统意义上的孤子不同，它是激光腔内部存在的且包括增益、损耗、增益饱和效应、非线性效应和滤波效应等多种因素综合作用的结果，孤子可在能量耗散的动态平衡中产生。全正色散光纤激光器的腔内净色散值通常较大，形成的啁啾脉冲不容易分裂，因而易获得具有较高能量、较大啁啾的耗散孤子脉冲。为获得稳定的锁模脉冲，通常需要在

全正色散光纤激光器的激光腔内插入具有一定带宽的滤波器来平衡脉冲展宽,滤波器及其带宽会对激光器性能产生影响。对于不加入带通滤波器并且依然能够实现锁模的全正色散光纤激光器,可将激光腔内固有的腔致双折射以及有限的增益带宽等效于窄带滤波器^[37,39]。目前研究的全正色散光纤激光器多为使用非线性偏振旋转^[15]、半导体可饱和吸收镜^[18]等锁模技术的光纤激光器。

与色散管理光纤激光器类似,全正色散光纤激光器也可以产生类噪声脉冲,但其类噪声脉冲的特征及形成原理与色散管理光纤激光器存在诸多差异。研究认为,全正色散光纤激光器中能够产生类噪声脉冲是因为激光器中存在腔致峰值功率钳位效应^[13,35,40]。

全正色散光纤激光器通过脉冲形状以及频率啾啾的自适应和自调制形成稳定的非线性脉冲。在腔中循环的脉冲具有低峰值功率,所以积累的非线性相移较低,与腔内具有负色散光纤的光纤激光器相比需要更高的锁模阈值。在提高抽运功率实现锁模之后,激光器腔内就可以持续生成以基本重复频率稳定运行的锁模脉冲。此时激光器发射的脉冲频谱具有陡峭的光谱边沿以及较窄的频谱带宽,这是在全正色散光纤激光器中获得的锁模脉冲光谱具有的典型特征^[41-43]。如果增强抽运功率,激光器就会产生具有宽光谱宽度、抛物线形轮廓、平坦光谱边缘的类噪声脉冲。而如果再次减小抽运功率,类噪声脉冲的峰值功率又会减小,总体光谱轮廓最终又会回到具有陡峭光谱边缘的状态。因此,脉冲运行状态总是与孤子峰值钳位有关。如果去除钳位或降低抽运强度,类噪声脉冲就可以返回到原来的增益支配孤子的运行状态。增益介质的增益色散属性在锁模脉冲的整形中起决定作用。

3 技术发展趋势与国内研究现状

1997年,以色列魏茨曼科学院的 Horowitz 等^[10]在使用非线性偏振旋转锁模的掺铒光纤激光器过程中发现了具有强啾啾特性、44 nm 谱宽的类噪声脉冲,之后掺铒光纤以及非线性偏振旋转被动锁模技术便成为类噪声脉冲激光器的主流配置,众多科研团队也在拓宽光谱宽度以及提高类噪声脉冲能量上做了很多工作。如图 4 所示,脉冲的光谱宽度从起初的 44 nm^[10]拓宽到 80 nm^[35]、87 nm^[44]、93 nm^[36]、98 nm^[45]、120 nm^[46]以及后来的 135 nm^[12]。但由于非线性偏振旋转技术采用偏振归一,造成的损耗较大,相较于采用非线性光纤环形镜的光纤激光器,其输出脉冲的能量水平一直不算高^[36,47-49]。另外,在 Pottiez 等^[50]证实了脉冲特性对非线性光纤环形镜开关功率具有强烈依赖性之后不久,Zheng 等^[48]在实验中获得了 135 nJ 的脉冲能量,这对类噪声脉冲的研究工作起到了巨大的推动作用。鉴于掺铒光纤工作波长的优势,其在类噪声脉冲激光器的早期研究阶段占据了主要位置。自 2009 年掺铽类噪声脉冲光纤激光器^[51]、2011 年掺镱类噪声脉冲光纤激光器^[49]相继研制成功以后,类噪声脉冲光纤激光器的研究拓展到了新的领域。类噪声脉冲的光谱宽度极大地展宽,脉冲能量迅速提升。Li 等^[11]在掺铽类噪声脉冲激光器中使用非线性光纤环形镜锁模技术,获得了 249.32 nJ 的脉冲能量,Li 等^[25]在全正色散条件下利用拉曼效应产生了带宽高达 61.4 nm 的类噪声脉冲,这是当时在所有全正色散光纤激光器中实现的最宽的类噪声脉冲。

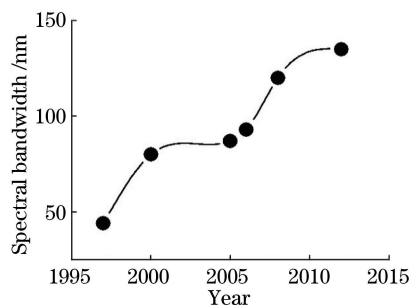


图 4 类噪声脉冲光谱宽度拓宽图

Fig. 4 Spectral bandwidth progress of the noise-like pulses

类噪声脉冲光纤激光器未来发展的主要方向是获取具有更高能量、更宽光谱的类噪声脉冲。类噪声脉冲的研究范围目前仍在不断拓展,体系也在不断完善。

3.1 主要的锁模技术发展趋势

近几年3种主要的锁模技术出现了新的发展趋势,呈现出不同的发展特点。本文具体分析目前几种主要的锁模技术的发展方向。

3.1.1 可饱和吸收体

2013年,Wang等^[27]制作出可以同时产生耗散孤子和类噪声脉冲的正常色散掺铋光纤激光器。使用由光学沉积法制造的碳纳米管作为全光纤配置的可饱和吸收器来实现锁模。激光器在650 mW抽运下自启动,产生每束能量为1.27 nJ,脉冲包络超过100 ps的类噪声脉冲。在605 mW抽运下实现耗散孤子脉冲输出,可产生4.1 nm带宽、持续47 ps的强啁啾脉冲。2016年,Cui^[52]采用新光谱滤波方案在全正色散光纤激光器中实现了带宽可调耗散孤子脉冲和类噪声脉冲输出。使用的锁模器由结合石墨烯和碳纳米管优点的混合复合材料制成。在39 mW的抽运功率下,在1565 nm处产生了刀刃状、带宽可调的耗散孤子,发现孤子的一个陡峭边缘由光谱滤波引起,另一个由啁啾光纤布拉格光栅(CFBG)切割引起。较高抽运功率下类噪声脉冲的光谱轮廓不再对称,证实了存在新型的光谱滤波组合效应,并发现机械拉伸光纤布拉格光栅可以用来调谐耗散孤子和类噪声脉冲的带宽。同年,Sobon等^[53]使用由多层石墨烯可饱和吸收体锁模的掺铋光纤激光器,产生了以1950 nm为中心,光谱带宽超过60 nm、具有23.5 MHz重复频率的类噪声脉冲。脉冲在双包层掺铋光纤放大器中被放大,该系统能够提供1.21 W的平均功率,类噪声脉冲能量为51.5 nJ。

近年来,新材料如碳纳米管、多层石墨烯等以及具有更多完全不同性质的复合材料的应用使得饱和吸收体的种类变得更加多样化,功能也更加完善,有向体系化发展的趋势。新光谱滤波技术的应用进一步使得类噪声脉冲带宽可调,进一步提升了人们使用可饱和吸收体技术对类噪声脉冲各项参数的操控能力。

3.1.2 非线性光纤环形镜

2014年,Li等^[11]研制了一种基于非线性光纤环形镜的全光纤双包层掺铋光纤被动锁模环形振荡器,在反常色散条件下输出了稳定的孤子和锁模类噪声脉冲,实现了以2017.24 nm为中心,具有341 fs持续时间、60 dB的信噪比和高达249 nJ单脉冲能量的类噪声脉冲,其能量是当时没有经过放大的2 μm锁模光纤激光器的最高脉冲能量,其稳定性也比典型的类噪声脉冲的稳定性更高。2016年,Huang等^[28]发现,锁模“8”字形光纤激光器中可获得高阶谐波孤子和矩形类噪声脉冲。激光器产生的谐波孤子具有936.6 MHz的重复频率,矩形类噪声脉冲以腔的基本重复频率运行。实验发现,这两种类型的脉冲可以通过操纵偏振控制器而独立产生。2017年,Cai等^[54]在基于非线性光纤环形镜的全正色散锁模光纤激光器中使用非线性薛定谔方程对耗散孤子的产生过程进行数值模拟,确定类噪声脉冲的不稳定非消失区域与非线性光纤环形镜的可饱和吸收效应直接相关。其中使用的两个关键的模拟滤波器将会对此产生决定性影响,其带宽会将这些区域与稳定吸收区分开,并且通过使用最佳光学滤波器带宽将多脉冲功率阈值最大化。

3.1.3 非线性偏振旋转技术

2009年,Lei等^[45]发现,由全反常色散光纤制成的被动锁模掺铋光纤激光器可产生超宽频谱类噪声脉冲,且脉冲的超宽频谱是由双折射引起。激光器产生的脉冲的最大3 dB光谱带宽约为98 nm。2013年,Zaytsev等^[29]在掺铋光纤色散管理环形激光器中生成了具有超宽带光谱、可调谐高能量等特征的类噪声脉冲。并且发现,负色散延迟线和光谱滤波器对产生这种高功率类噪声脉冲有重要影响。激光器可以在相对较大的抽运功率(4~13 W)下维持自启动类噪声脉冲运行状态,相应的输出功率可在0.10~1.45 W波动。类噪声脉冲的最大3 dB频谱带宽约为48.2 nm,输出能量高达47 nJ,中心波长可以在12 nm间调谐,并且波包的带宽和持续时间可控。2016年,Lin等^[55]以激光腔内的光栅为色散补偿元件,研究了掺铋光纤激光器产生的类噪声脉冲的特性。研究发现,激光器内产生的类噪声脉冲具有双尺度强度自相关轨迹,其通过激光腔外部的色散延迟线,证明类噪声脉冲具有实质性时间压缩。在作为带通滤波器的光栅之间插入狭缝发现,激光器的工作状态可以通过调节抽运功率在类噪声脉冲和耗散孤子状态之间切换。并且,类噪声脉冲也可以转变到结合的孤子状态。表1列出了近年来基于非线性偏振旋转锁模技术产生类噪声脉冲的进展。

使用非线性偏振旋转技术进行锁模需选择具有合适色散值的光纤进行搭配处理。早期,绝大多数实验都在研究光纤的自身特性如何对具有较高脉冲能量的类噪声脉冲产生影响。目前,利用光纤非线性,通过优化偏振器旋转角度、激光腔长度、光纤色散搭配和抽运功率等参数来获得具有超宽光谱宽度的类噪声脉冲的

实验仍然居于主流。但值得注意的是,当前关于色散延迟线和光谱滤波器对于激光器产生高功率类噪声脉冲的具体影响以及光栅对于调节激光器工作状态方面的研究已经更加深入。

表 1 基于非线性偏振旋转锁模技术产生类噪声脉冲的进展

Table 1 Noise-like pulses generation progress based on nonlinear polarization rotary mode-locked technology

Year	Gain	Author (The first)	Journal	Feature
1997	EDF	Horowitz M ^[10]	OL	First report, 44 nm
1998	EDF	Horowitz M ^[47]	PTL	16 nJ
2000	EDF	Kang J U ^[35]	OC	80 nm
2005	EDF	Takushima Y ^[44]	EI	87 nm
2005	EDF	Tang D Y ^[19]	OE	32.1 nm
2006	EDF	Zhao L M ^[36]	APB	15 nJ, 93 nm
2007	EDF	Zhao L M ^[15]	OE	Purely positive dispersion
2008	EDF	Zhao L M ^[46]	OC	120 nm
2009	EDF	Lei D J ^[45]	JMO	98 nm
2009	YDF	Kobtsev S ^[51]	OE	First report in YDF
2012	TDF	Wang Q ^[49]	OL	First report in TDF
2013	EDF	North T ^[56]	OL	Raman-induced dual-wavelength NLPs
2013	TDF	He X ^[57]	APE	60 nm, 17 nJ
2013	YDF	Zaytsev A K ^[29]	LPL	48.2 nm 47 nJ
2013	EDF	Runge A F ^[58]	OL	Shot-to-shot spectral fluctuations
2016	YDF	Lin J H ^[55]	OL	Double-scale intensity autocorrelation

3.2 国内研究现状

2007年, Dou等^[59]在正色散掺铒光纤激光器中获得了10 nJ的类噪声脉冲输出,并通过抽运高非线性光纤获得了光谱宽度大于600 nm的超连续谱。2013年, He等^[57]研究发现,掺铒光纤激光器输出2 μm 波段脉冲能量为17 nJ的类噪声脉冲。使用非线性极化演化技术在激光器中产生了最大平均输出功率为110 mW的高能量类噪声脉冲,这为中红外波长范围的超连续谱生成和光学计量等重要应用提供了良好的脉冲源。2014年, Zheng等^[48]在掺铒“8”字形光纤激光器中得到了135 nJ高能量的矩形类噪声脉冲,最大抽运功率为350 mW,矩形类噪声脉冲持续时间76 ns。实验发现,类噪声脉冲演化与耗散孤子共振的脉冲演化非常相似,这为揭示光纤激光器中高能量矩形脉冲的形成机制提供了新依据。Li等^[11]在基于非线性光纤环形镜的自启动被动锁模掺铒光纤激光器中输出249 nJ的类噪声脉冲,这是国际上第1个基于非线性光纤环形镜的、可在两个状态下工作的2 μm 波段的锁模光纤激光器,该激光器产生的类噪声脉冲在当时具有最高能量。

徐佳等^[60]报道了基于氧化石墨烯可饱和吸收体的类噪声脉冲拉曼光纤激光器。激光器采用由掺铒光纤和拉曼光纤谐振腔构成的双环形腔。2015年,金鑫鑫等^[61]采用自相关法研究类噪声脉冲发现,自相关曲线的基底和尖峰的宽度分别反映了类噪声脉冲波包宽度及超短脉冲的平均脉宽。2015年,刘坤等^[62]报道了一个基于类噪声脉冲抽运的高功率中红外超连续谱光源,并利用非线性光学环境锁模技术使激光器在1966 nm处成功实现最大输出功率为28.5 W、光谱范围为1.9~2.4 μm 的类噪声脉冲输出。2016年,王子薇等^[63]利用棒状光子晶体光纤(PCF)放大器,实现了峰值功率2.94 MW的脉冲激光放大输出,输出激光的脉冲宽度为30 ps。2016年, Liu等^[64]提出了一种基于非线性放大环境的被动锁模掺铒光纤激光器,脉冲具有良好的长期稳定性。该激光器具有较小的净反常色散,这是第1个基于非线性放大环形镜的2 μm 波段掺铒光纤飞秒脉冲光纤激光器。2017年, Chen等^[65]在掺铒类噪声脉冲激光器抽运的4 μm 光子晶体光纤中产生了超扁平宽带超连续谱,这种平坦度对于超连续谱的光源性能的影响十分突出。

4 类噪声脉冲实际应用

类噪声脉冲不但可以应用于基础物理研究领域,因其自身具有的许多特殊性质,在生产实践中还有重要的应用价值。类噪声脉冲易于获得、能量较大,加上光纤激光器本身光束质量较高、散热性较好、增益高、结

构紧凑,这些优势拓宽了类噪声脉冲的应用范围。

相干性较低是类噪声脉冲本身固有的特点,对于光纤光栅解调技术、光纤信息存储及再现技术等典型的低相干光谱干涉技术而言,脉冲的这一特性恰好能被应用^[66-67]。利用色散管理技术、拉曼效应、双折射效应和孤子自频移效应等,类噪声脉冲还可以获得超宽平坦光谱^[12]。近年来,随着光纤放大技术的发展以及抽运脉冲功率的不断提高,实验中可获得的类噪声脉冲能量也在不断上升,在光纤激光器中已经可以实现几百纳焦的单脉冲能量^[11]。大能量的类噪声脉冲不仅可以有效应用于机械加工(微加工)^[5,68],还可作为抽运源来产生超连续谱^[44,69]。

大多数情况下类噪声脉冲由于基底较宽、信噪比较低,不能作为理想的高能量脉冲,但在反常色散区域使用非线性光纤环形镜技术进行锁模,可以获得具有高信噪比的类噪声脉冲。这种脉冲在具有高能量的飞秒级脉冲中具有巨大的应用潜力,其应用范围可涉及激光雷达、电场与分子相互作用等领域^[50,69]。使用色散管理技术理论上还可以稳定和控制非线性光学系统的动态演化过程^[70-71]。

以下是目前类噪声脉冲已经进行实际应用的几个主要领域,以及脉冲在这几个应用领域的研究进展情况。

4.1 低光谱相干干涉

1998年,Putnam等^[66]发现以方波脉冲方式工作的长腔被动锁模掺铒光纤激光器可用于检测光纤布拉格光栅阵列,并且成功地使用具有4 W峰值功率、10 ns脉冲宽度和大于60 nm带宽的输出脉冲探测光谱带宽为光源中心波长的2%的光纤布拉格光栅。2001年,Keren等^[67]基于低相干光谱干涉测量技术提出了一种使用类噪声脉冲对光纤布拉格光栅进行实时测量的创新方法。通过分析迈克耳孙干涉仪输出端的光谱干扰,得到光栅对脉冲的响应,时间分辨率为350 fs。通过使用Gabor变换,可以直接检测光栅内的不均匀区域,并可以测量沿着光栅的谐振波长的空间依赖性。2002年,Keren等^[26]使用低相干光谱干涉测量技术在光纤中进行数据存储和重建,通过在光纤的不同位置处刻入具有不同中心波长的光纤布拉格光栅来存储信息,且只需要一个短脉冲来读取所有存储的数据。这项技术可以获得的最大理论重建速率为10 Tb/s,并且可用于识别光通信网络中的用户。

4.2 微加工

2011年,Özgören等^[68]成功制作出一个全光纤集成激光器,用于产生时间为1 ns、波长为1.03 μm、重复频率为3.1 MHz、平均功率为83 W的方形脉冲。主振荡器功率放大系统由使用非线性光纤环形镜的光纤振荡器产生不可压缩脉冲,脉冲具有随机啁啾。分别使用0.1,1.0,100 ns脉冲对钛表面进行微加工发现,持续时间较长的纳秒脉冲相较于皮秒脉冲在进行材料去除时会更有效。使用1 ns和0.1 ns脉冲的激光器进行微加工时,表面的可重复性和均匀性相似,且效果明显优于100 ns脉冲的激光器。对于烧蚀材料的量,1 ns激光器比0.1 ns的更高,但是低于100 ns激光器。全光纤集成架构提高了微加工领域激光器的稳定性,并允许激光器通过光纤直接将激光传输到样品。

4.3 生成超连续谱

2005年,Takushima等^[44]证明无源模式下掺铒光纤激光器可以在类噪声脉冲状态下工作,噪声序列产生的带宽远大于增益带宽。同时发现,使用类噪声脉冲代替超短脉冲,将脉冲输入到高非线性光纤中可以生成带宽超960 nm的超连续谱。2012年,Hernandez-Garcia等^[72]在SMF-28中使用类噪声脉冲产生超连续谱,这些脉冲由掺铒“8”字形激光器产生。用掺铒光纤放大器将脉冲放大之后将其注入0.75 km的标准光纤中,在光纤末端获得了光谱宽度约50 nm、平均功率为20.4 mW、峰值功率数千瓦、输出信号谱从1530 nm延伸到至少1750 nm(频谱分析仪的上限)的脉冲。新产生的脉冲频率频谱在可测量范围内非常均匀。2013年,Zaytsev等^[70]证明,在正常色散单模光纤中使用类噪声脉冲作为抽运源能产生具有低能量阈值(32 nJ)、波长在1040~1240 nm的平坦超连续谱。在长度为100 m的正常色散标准光纤中使用类噪声脉冲,成功生成了这种超连续谱,其在1050~1250 nm的波长范围内具有43 nJ的低能量阈值以及平坦的超宽光谱。Zaytsev等认为,使用这种方法之所以能产生超连续谱,是因为标准光纤中存在级联拉曼散射和克尔效应。拉曼效应使得较长波长区域中的光谱显著加宽;克尔效应使得由类噪声脉冲抽运的超连续谱的光谱变得平滑;类噪声脉冲的特殊性质(超连续谱范围和长距离传播的能力)则会引起低能量阈值和平坦超宽光谱。2014年,Lin等^[69]使用一个腔长约215 m的“8”字形光纤激光器获得了带宽超过200 nm、波长延伸超过

1750 nm 的超连续谱以及能量高达 300 nJ、持续时间几十纳秒、相干长度大约 1 ps 的光脉冲。脉冲具有稳定的基频锁模及 6 阶谐波锁模。当在激光输出处插入 100 m 的高非线性光纤时,带宽又可进一步拓宽到 450 nm 以上。

5 结 论

自 Horowitz 等^[10]发现类噪声脉冲以来,人们对于类噪声脉冲的研究已经接近 20 年,其易于生成、能量较大、脉宽较宽的特点是其发展的显著优势。理论上,光纤激光器输出的类噪声脉冲的光谱宽度可比增益带宽更宽,并且其最高能量除抽运功率外不被其他因素限制,于是脉宽更宽、能量更大的脉冲接连被报道。随着锁模技术和光纤掺杂等技术的发展,类噪声脉冲的最高能量已经上升了数十倍,光谱宽度也已经拓宽了数倍。从全负色散区到色散管理区到自相似区再到全正色散区;从掺铟光纤到掺镱光纤再到掺铊光纤,人们对于类噪声脉冲的研究不断深入,研究的范围在不断增大,相应的激光器种类也在不断增多。新材料(如石墨烯、碳纳米管以及复合材料)的应用使激光器有了新的选择,产生的激光也出现了新的特性。新材料特有的优势极大地改善了激光器产生类噪声脉冲的质量,也拓宽了类噪声脉冲人为可调控的范围。激光器产生脉冲的质量不断提升,人们对锁模技术、光纤掺杂技术、滤波技术等影响类噪声脉冲生成机制的理解进一步加深,对控制类噪声脉冲生成的能力也进一步提升。目前,利用色散管理技术、光谱滤波技术以及孤子自频移、拉曼效应^[73]等已经可以对使用不同抽运能量、不同掺杂光纤和不同激光腔长度的激光器产生的脉冲进行控制。不同种类的激光器产生不同输出功率、不同工作波长的脉冲,可以满足人们在不同条件下对类噪声脉冲的要求。

研究类噪声脉冲、控制类噪声脉冲以及不断提升类噪声脉冲的质量都是为了进一步的应用。类噪声脉冲本身作为一种天然低相干光源,可以轻松地应用于低相干光谱干涉技术领域。随着近年来抽运脉冲功率的不断增大、光纤放大技术的不断发展、脉冲能量的不断提升,大能量的类噪声脉冲已经可以作为抽运源来产生超连续谱,也可以经过简单放大应用于微加工领域。

类噪声脉冲在研究和应用方面都具有巨大价值。因此,仍需要进一步加强对于类噪声脉冲的实验研究,促进其在生产和生活中的推广与应用。

参 考 文 献

- [1] Chong C Y. Femtosecond fiber lasers and amplifiers based on the pulse propagation at normal dispersion[D]. New York: Cornell University, 2008.
- [2] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, *et al.* Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405008.
姜会林, 江伦, 宋延嵩, 等. 一点对多点同时空间激光通信光学跟瞄技术研究[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405008.
- [3] Shenoy M, Huang H. An optical fiber-based corrosion sensor based on laser light reflection[C]. SPIE, 2010, 7647: 76473O.
- [4] Barton S N, Janoff K A, Bakos G J. Medical laser fiber optic cable having improved treatment indicators for BPH surgery: EP1395192 A1[P]. 2004-03-10.
- [5] Agrež V, Petkovšek R. Gain-switched Yb-doped fiber laser for microprocessing[J]. Applied Optics, 2013, 52(13): 3066-3072.
- [6] Falconi M C, Palma G, Starecki F, *et al.* Novel pumping schemes of mid-IR photonic crystal fiber lasers for aerospace applications[C]. 2016 18th International Conference on IEEE Transparent Optical Networks (ICTON), 2016: 1-5.
- [7] Campanelli S L, Casalino G, Mortello M, *et al.* Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti₆Al₄V alloy fiber laser welds[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 428-433.
- [8] Whitenett G, Stewart G, Yu H, *et al.* Investigation of a tunable mode-locked fiber laser for application to multipoint gas spectroscopy[J]. Journal of Lightwave Technology, 2004, 22(3): 813-819.
- [9] Maiti D, Brandt-Pearce M. Modified nonlinear decision feedback equalizer for long-haul fiber-optic communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(18): 3763-3772.

- [10] Horowitz M, Barad Y, Silberberg Y. Noise-like pulses with a broadband spectrum generated from an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 799-801.
- [11] Li J, Zhang Z, Sun Z, *et al.* All-fiber passively mode-locked Tm-doped NOLM-based oscillator operating at 2- μm in both soliton and noisy-pulse regimes[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7875-7882.
- [12] Vazquez-Zuniga L A, Jeong Y. Super-broadband noise-like pulse erbium-doped fiber ring laser with a highly nonlinear fiber for Raman gain enhancement[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(17): 1549-1551.
- [13] Pottiez O, Ibarra-Escamilla B, Kuzin E A, *et al.* Multiple noise-like pulsing of a figure-eight fibre laser[J]. *Laser Physics*, 2013, 24(1): 015103.
- [14] Grudinin A B, Richardson D J, Payne D N. Energy quantisation in figure eight fibre laser[J]. *Electronics Letters*, 1992, 28(1): 67-68.
- [15] Zhao L M, Tang D Y, Wu J, *et al.* Noise-like pulse in a gain-guided soliton fiber laser[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5): 2145-2150.
- [16] Della V G, Osellame R, Galzerano G, *et al.* Passive mode locking by carbon nanotubes in a femtosecond laser written waveguide laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(23): 231115.
- [17] Sobon G, Sotor J, Abramski K M. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(16): 161109.
- [18] Keller U, Weingarten K J, Kärtner F X, *et al.* Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers[J]. *Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 435-453.
- [19] Tang D Y, Zhao L M, Zhao B. Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser[J]. *Optics Express*, 2005, 13(7): 2289-2294.
- [20] Jackson S D, King T A. High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(18): 1462-1464.
- [21] Tamura K, Ippen E P, Haus H A, *et al.* 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 1993, 18(13): 1080-1082.
- [22] Mollenauer L F, Stolen R H, Gordon J P. Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers[J]. *Physical Review Letters*, 1980, 45(13): 1095.
- [23] Ilday F Ö, Buckley J R, Wise F W. Self-similar evolution of parabolic pulses in a fiber laser[C]. *Nonlinear Guided Waves and Their Applications*, Optical Society of America, 2004: MD8.
- [24] Bednyakova A E, Babin S A, Kharenko D S, *et al.* Evolution of dissipative solitons in a fiber laser oscillator in the presence of strong Raman scattering[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 20556-20564.
- [25] Li D, Shen D, Li L, *et al.* Raman-scattering-assistant broadband noise-like pulse generation in all-normal-dispersion fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25889-25895.
- [26] Keren S, Brand E, Levi Y, *et al.* Data storage in optical fibers and reconstruction by use of low-coherence spectral interferometry[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(2): 125-127.
- [27] Wang Q Q, Chen T, Li M, *et al.* All-fiber ultrafast thulium-doped fiber ring laser with dissipative soliton and noise-like output in normal dispersion by single-wall carbon nanotubes[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(1): 011103.
- [28] Huang Y Q, Hu Z A, Cui H, *et al.* Coexistence of harmonic soliton molecules and rectangular noise-like pulses in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(17): 4056-4059.
- [29] Zaytsev A K, Lin C H, You Y J, *et al.* A controllable noise-like operation regime in a Yb-doped dispersion-mapped fiber ring laser[J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(4): 045104.
- [30] Deng Y, Koch M, Lu F, *et al.* Colliding-pulse passive harmonic mode-locking in a femtosecond Yb-doped fiber laser with a semiconductor saturable absorber[J]. *Optics Express*, 2004, 12(16): 3872.
- [31] Krzempek K. Dissipative soliton resonances in all-fiber Er-Yb double clad figure-8 laser[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 30651-30656.
- [32] Seong N H, Kim D Y. Experimental observation of stable bound solitons in a figure-eight fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1321-1323.
- [33] Tang D Y, Zhao B, Shen D Y, *et al.* Compound pulse solitons in a fiber ring laser[J]. *Physical Review A*, 2003, 68

- (1): 013816.
- [34] Tang D Y, Zhao L M. Generation of 47-fs pulses directly from an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(1): 41-43.
- [35] Kang J U. Broadband quasi-stationary pulses in mode-locked fiber ring laser[J]. *Optics Communications*, 2000, 182(4): 433-436.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] Chong A, Buckley J, Renninger W, *et al.* All-normal-dispersion femtosecond fiber laser[J]. *Optics Express*, 2006, 14(21): 10095-10100.
- [39] Zhang Z, Dai G. All-normal-dispersion dissipative soliton ytterbium fiber laser without dispersion compensation and additional filter[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3(6): 1023-1029.
- [40] Pottiez O, Ibarraescamilla B, Kuzin E A, *et al.* Two regimes of widely tunable noise-like pulses from a figure-eight fiber laser[J]. *Laser Physics*, 2014, 24(10): 105104.
- [41] Buckley J R, Wise F W, Ilday F Ö, *et al.* Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(14): 1888-1890.
- [42] Kalashnikov V L, Podivilov E, Chernykh A, *et al.* Approaching the microjoule frontier with femtosecond laser oscillators: Theory and comparison with experiment[J]. *New Journal of Physics*, 2005, 7(1): 217.
- [43] Firth W J, Paulau P V. Soliton lasers stabilized by coupling to a resonant linear system[J]. *The European Physical Journal D*, 2010, 59(1): 13-21.
- [44] Takushima Y, Yasunaka K, Ozeki Y, *et al.* 87-nm bandwidth noise-like pulse generation from erbium-doped fiber laser[J]. *Electronics Letters*, 2005, 41(7): 399-400.
- [45] Lei D J, Yang H, Dong H, *et al.* Effect of birefringence on the bandwidth of noise-like pulse in an erbium-doped fiber laser[J]. *Journal of Modern Optics*, 2009, 56(4): 572-576.
- [46] Zhao L M, Tang D Y, Cheng T H, *et al.* 120 nm bandwidth noise-like pulse generation in an erbium-doped fiber laser[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(1): 157-161.
- [47] Horowitz M, Silberberg Y. Control of noise-like pulse generation in erbium-doped fiber lasers [J]. *Photonics Technology Letters*, 1998, 10(10): 1389-1391.
- [48] Zheng X W, Luo Z C, Liu H, *et al.* High-energy noise-like rectangular pulse in a passively mode-locked figure-eight fiber laser[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(4): 042701.
- [49] Wang Q, Chen T, Zhang B, *et al.* All-fiber passively mode-locked thulium-doped fiber ring oscillator operated at solitary and noise-like modes[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(19): 3750-3752.
- [50] Pottiez O, Grajalescoutiño R, Ibarraescamilla B, *et al.* Adjustable noise-like pulses from a figure-eight fiber laser[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(25): E24-E31.
- [51] Kobtsev S, Kukarin S, Smirnov S, *et al.* Generation of double-scale femto/pico-second optical lumps in mode-locked fiber lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(23): 20707-20713.
- [52] Cui Y. Bandwidth-tunable dissipative soliton and noise-like pulse in a normal dispersion fiber laser with a dual-scale saturable absorber[J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 105503.
- [53] Sobon G, Sotor J, Przewolka A, *et al.* Amplification of noise-like pulses generated from a graphene-based Tm-doped all-fiber laser[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20359-20364.
- [54] Cai J H, Chen H, Chen S P, *et al.* State distributions in two-dimensional parameter spaces of a nonlinear optical loop mirror-based, mode-locked, all-normal-dispersion fiber laser[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 4414-4428.
- [55] Lin J H, Chen C L, Chan C W, *et al.* Investigation of noise-like pulses from a net normal Yb-doped fiber laser based on a nonlinear polarization rotation mechanism[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5310-5313.
- [56] North T, Rochette M. Raman-induced noise-like pulses in a highly nonlinear and dispersive all-fiber ring laser[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(6): 890-892.
- [57] He X, Luo A, Yang Q, *et al.* 60 nm bandwidth, 17 nJ noise-like pulse generation from a thulium-doped fiber ring laser

- [J]. Applied Physics Express, 2013, 6(11): 112702.
- [58] Runge A F, Aguergaray C, Broderick N G, *et al.* Coherence and shot-to-shot spectral fluctuations in noise-like ultrafast fiber lasers[J]. Optics Letters, 2013, 38(21): 4327-4330.
- [59] Dou L, Gao Y, Xu A, *et al.* Super-continuum generation using noise-like pulses from a large normal dispersion passively mode locking fiber laser[C]. International Nano-Optoelectronics Workshop, 2007: 9798724.
- [60] Xu Jia, Wu Sida, Liu Jiang, *et al.* Noise-like pulsed Raman fiber lasers using graphene oxide saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0302006.
徐佳, 吴思达, 刘江, 等. 基于氧化石墨烯的类噪声脉冲拉曼光纤激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0302006.
- [61] Jin Xinxin, Li Lei, Luo Jiaolin, *et al.* Numerical study on autocorrelation of noise-like pulse in fiber lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(12): 121902.
金鑫鑫, 李雷, 罗娇林, 等. 光纤激光器中类噪声脉冲自相关的数值研究[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(12): 121902.
- [62] Liu Kun, Shi Hongxing, Liu Jiang, *et al.* High-power all-fiber mid-infrared super-continuum generation pumped by noise-like pulses[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0902003.
刘昆, 师红星, 刘江, 等. 基于类噪声脉冲抽运的高功率全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0902003.
- [63] Wang Ziwei, Wang Zhaokun, Zou Feng, *et al.* High-peak-power rod-type photonic crystal fiber amplifier for picosecond pulses[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(10): 1001001.
王子薇, 王兆坤, 邹峰, 等. 高峰值功率皮秒脉冲棒状光子晶体光纤放大器[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1001001.
- [64] Liu S, Yan F P, Zhang L N, *et al.* Noise-like femtosecond pulse in passively mode-locked Tm-doped NALM-based oscillator with small net anomalous dispersion[J]. Journal of Optics, 2016, 18(1): 015508.
- [65] Chen Y, Ruan S, Wu X, *et al.* Ultra-flat and ultra-broadband supercontinuum generation in photonic crystal fiber pumped by noise-like pulses[C]. 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics. International Society for Optics and Photonics, 2017: 103280D.
- [66] Putnam M A, Dennis M L, Duling Iii I N, *et al.* Broadband square-pulse operation of a passively mode-locked fiber laser for fiber Bragg grating interrogation[J]. Optics Letters, 1998, 23(2): 138-140.
- [67] Keren S, Horowitz M. Interrogation of fiber gratings by use of low-coherence spectral interferometry of noise-like pulses[J]. Optics Letters, 2001, 26(6): 328-330.
- [68] Özgören K, Öktem B, Yilmaz S, *et al.* 83 W, 3.1 MHz, square-shaped, 1 ns-pulsed all-fiber-integrated laser for micromachining[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17647-17652.
- [69] Lin S S, Hwang S K, Liu J M. Supercontinuum generation in highly nonlinear fibers using amplified noise-like optical pulses[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 4152-4160.
- [70] Zaytsev A, Lin C H, You Y J, *et al.* Supercontinuum generation by noise-like pulses transmitted through normally dispersive standard single-mode fibers[J]. Optics Express, 2013, 21(13): 16056-16062.
- [71] Bale B G, Okhitnikov O G, Turitsyn S K. Modeling and technologies of ultrafast fiber lasers[M]. Wiley-VCH: Fiber Lasers, 2012: 135-175.
- [72] Hernandez-Garcia J C, Pottiez O, Estudillo-Ayala J M. Supercontinuum generation in a standard fiber pumped by noise-like pulses from a figure-eight fiber laser[J]. Laser Physics, 2012, 22(1): 221-226.
- [73] Nose K, Ozeki Y, Kishi T, *et al.* Sensitivity enhancement of fiber-laser-based stimulated Raman scattering microscopy by collinear balanced detection technique[J]. Optics Express, 2012, 20(13): 13958-13965.