

引用格式: GONG Rui, GENG Yalin, PEI Li, et al. Passive Self-similar Pulse Fiber Laser Constructed by Anomalous Dispersion Gain Fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0814001

龚睿, 耿亚林, 裴丽, 等. 反常色散增益光纤构建无源自相似脉冲光纤激光器[J]. 光子学报, 2023, 52(8):0814001

反常色散增益光纤构建无源自相似脉冲 光纤激光器

龚睿, 耿亚林, 裴丽, 魏淮

(北京交通大学 电子信息工程学院 光波技术研究所 全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要:通常自相似脉冲光纤激光器的增益光纤都为正常色散, 而利用色散补偿在反常色散增益光纤的激光器中能否取得相同的效果, 目前还缺乏相关研究。这类激光器输出和演化特性有何特点以及如何优化等都成为有待解决的问题。对色散管理型含反常色散增益光纤的锁模激光器进行研究, 通过和传统自相似激光系统的分析和对比, 指出其完全符合无源自相似激光器特征, 并可达到传统正常色散增益光纤构建的无源自相似脉冲激光器的效果。在理论上拓展了自相似脉冲激光器的可实现范围, 弥补了传统自相似脉冲激光器在该方面的欠缺。此外, 针对该类型激光器系统的色散图、净色散量和色散补偿部分的非线性等方面对输出脉冲的影响进行了详细讨论, 为中红外波段使用反常色散增益光纤的激光器产生更高质量的超短脉冲提供了新思路。

关键词: 光纤激光器; 自相似脉冲; 色散管理; 中红外波段激光器; 无源自相似

中图分类号: TN248

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20235208.0814001

0 引言

良好的光束质量, 极高的脉冲能量和峰值功率使得被动锁模超短脉冲光纤激光器具有相当广泛的应用前景^[1-3]。锁模激光器中的脉冲以广义的孤子形式存在, 从而获得稳定的脉冲输出。根据支持光孤子存在的前提, 早期出现的锁模激光器工作在反常色散区, 脉冲以孤子形态存在, 但由于易受孤子分裂(fission)等问题限制, 此类激光器的输出脉冲能量通常只能达到 0.1 nJ^[4]。为提高脉冲能量, 1995 年, 麻省理工学院(Massachusetts Institute of Technology, MIT) 研究组 HAUSE H A 等提出色散管理拉伸脉冲(stretched pulse)锁模光纤激光器^[5], 以展宽脉冲的方式降低脉冲功率从而减少非线性效应, 提高脉冲能量至 1 nJ 量级^[6]。自相似脉冲演化理论的应用为进一步提高激光器脉冲能量提供了新途径^[7], 这种脉冲具有抗光波分裂的特点, 使得高功率传输过程中不易裂变^[8-9], 且其线性啁啾特性使之便于压缩, 对于产生高功率超短脉冲具有重要意义。自相似脉冲可以在具有正常色散的增益光纤中产生, 因而在正常色散增益介质中得以应用, 2000 年, FERMAN M E 等在 1 μm 波段正常色散掺镱光纤放大器中实现了自相似脉冲^[7]。2004 年, ILDAY F O 和 WISE F W 等实现了 1 μm 波段自相似抛物线脉冲的掺镱光纤激光器, 其自相似脉冲输出能量可达 10 nJ^[10]。此后, 2006 年, WISE F W 研究组利用正常色散增益介质中的自相似脉冲演化结合啁啾脉冲频谱滤波技术提出了全正色散激光器^[11-13], 进一步提高了脉冲能量, 扩展了激光器工作范围和人们对广义孤子的认知, 将激光器内的孤子扩展到耗散孤子^[12, 14]。

随着光纤激光器的发展, 以正常色散增益光纤为增益介质的腔内净正色散的自相似脉冲激光器以至全正色散激光器逐渐成为高能脉冲锁模激光器的主流^[13-15]。中红外激光器可在宽光谱范围内提供极高的光谱

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 62221001, 62235003)

第一作者: 龚睿, 20120002@bjtu.edu.cn

通讯作者: 魏淮, hwei@bjtu.edu.cn

收稿日期: 2023-02-27; 录用日期: 2023-04-04

<http://www.photon.ac.cn>

亮度、窄谱线线宽和一致的谱线结构,因其波段包含大气中几个重要的光学透明窗口,同时能够覆盖水与氨基化合物的吸收峰,这使得中红外波段激光在生物医疗、污染监测、大气通信等领域有着不可替代的应用^[16-18]。该波段激光器的研究在近年逐渐兴起并成为领域内研究的热点,深圳大学、上海交大等都有不错的研究进展^[19-20]。在该波段构建锁模激光器时,反常色散区的传统孤子锁模技术能够承受的非线性相移有限,积累过多的非线性相移也会导致脉冲不稳定以致出现分裂。自正常色散锁模激光器诞生以来,人们多采用正常色散的增益光纤构建锁模激光器^[14]。但中红外波段光纤激光器中的光纤通常都处在反常色散区,增益光纤在掺杂稀土的同时大幅调节波导色散也会给光纤制作带来极大困难。

针对增益光纤处于反常色散区的情况,人们尝试使用色散补偿手段在该波段构建色散管理锁模激光器以期获得更好的效果。2019年,QIN Z P等报道了锗在中红外波段具有极大的正色散系数^[19],能够有效补偿该波段氟化物增益光纤大的负色散量,给该波段的色散调控带来极大的方便。此外,另有少量报道,尝试使用色散补偿让激光腔处于净正色散来提高输出脉冲能量^[21-23]。文献^[19]讨论了锗棒色散补偿器的色散管理下的呼吸孤子;文献^[21]在 $2\ \mu\text{m}$ 波段利用一段无源色散补偿光纤构建了腔内净正色散激光器,并将其称为耗散孤子激光器;而文献^[22]和^[23]采用色散补偿实现腔内色散管理并将其称为自相似激光器。然而,传统正常色散激光器系统中的超短脉冲产生皆起源于自相似演化理论,按照自相似脉冲的最初的理论^[7],增益和正常色散是产生自相似脉冲的必要条件。因此,这种色散调控后产生于反常色散增益光纤激光器的“自相似”脉冲,能否被称为自相似脉冲以及和传统的自相似脉冲有什么区别都还需研究和讨论。综上,对此类激光器的特性以及此类激光器和传统正常色散增益光纤构造的激光器能否达到相同效果都有待进一步研究。

本文主要研究了中红外 $2.8\ \mu\text{m}$ 波段增益光纤处于反常色散的色散管理激光器。为确定这种能够输出抛物线形脉冲的新型激光器的特征、归类和性能,将其和几种由“镜像”色散特性的正常色散增益光纤构建的传统自相似脉冲激光器作为参照,系统对比了输出脉冲的时域、频谱、脉冲能量、脉宽以及啁啾线性度等特性。同时分析和探讨了具体色散补偿方案对系统的影响,为使用反常色散增益光纤的中红外波段激光器实现自相似脉冲输出提供了设计依据和优化方法。

1 锁模光纤激光器分类体系和特征

随着光纤激光器的快速发展和其种类的不断增多,激光器的分类和命名愈发复杂,梳理清楚当前传统正常色散激光器的历史演变和体系,才能对新出现的激光器进行合理归类,同时有利于对新型激光器的理解和扩展现有的激光器体系。

早期的锁模光纤激光器工作在反常色散区,在经历了从传统孤子激光器到拉伸脉冲色散管理孤子(Dispersion-managed Soliton, DMS)激光器的改进后,自相似技术的出现使光纤激光器逐渐迈向正常色散区。正常色散激光器主要演化出了自相似(Self-similar, SS)激光器和全正常色散(All-Normal Dispersion, ANDi)激光器两大类,同时还出现了耗散孤子(Dissipative soliton, DS)的概念^[12]。从技术发展史角度看,这些仍属发展起来时间不久的技术,人们对这些激光器相关的分类,称谓和理解也还不尽统一和严谨,有些名称的使用并不和字面含义完全相符,因而对同一激光器可能会有不同的分类和命名方法,在使用时会存在一定程度的混乱。理清这些问题对避免歧义地对新出现的激光器进行分析探讨和分类是有必要的。

本文结合本领域有较高影响力的几个研究组的命名和分类方法对此进行讨论。在分类框架上主要参考2012年WISE F W研究组(该组在相关领域多次做出重要贡献)的综述^[15],以此为基础结合之后的一些重要技术和理论的发展^[13-14]进行补充和探讨,详见表1。

容易有歧义的概念主要集中在:色散管理(拉伸脉冲)、耗散孤子和自相似激光器这几个方面。

“色散管理孤子”激光器(也称为拉伸脉冲激光器)腔内同时具有色散量符号相反的组成部分,即色散图(dispersion map)。在字面上来看所有使用腔内色散调控的激光器都可以属于色散管理激光器,但这样自相似脉冲激光器也会被含于其中,造成混淆,从技术发展历程和习惯来看,人们通常用它来指第一次发明这一技术所对应的激光器类型^[5](表1),此类激光器腔内的脉冲啁啾经历正反变化(chirp reverse),脉冲经历两次拉伸和压缩^[5,10,14]。

表1 锁模光纤激光器的分类与特征比较
Table 1 Classification and features comparison of mode-locked fiber lasers

Laser types	Time	Laser features	Ref.
DMS	1995	Dispersion map Chirp reverse	[5]
Passive SS	2004	Dispersion map Positive chirped	[10],[14],[15]
ANDi (DS)	2006	All-normal dispersion Spectrum filtering	[11],[14],[15]
Active SS	2010	Dispersion map Spectrum filtering	[24],[25],[26]
DS*	2008	ANDi or Generalized solitons in all dissipative systems	[12],[27]

“自相似”在不同的应用情景下有两种含义,如前所述“自相似”脉冲最早的研究来自于不带反馈的传输系统,典型的是正常色散放大器内的自相似脉冲演化。但当用于带有反馈的激光器系统时单纯的自相似演化意味着脉宽和谱宽的不断增大,不能构成稳定的腔内激光脉冲循环。为此在激光器内可采用色散补偿和啁啾脉冲频谱滤波两类技术实现激光脉冲的腔内循环。这两种技术分别对应着自相似脉冲激光器和全正色散激光器^[14-15]。

自相似脉冲激光器又可以分为两种类型(表1):无源自相似激光器和有源自相似(放大器相似子/孤子-相似子)激光器。1)无源自相似激光器是最早实现的自相似激光器,其输出的脉冲特性自相似理论得出的脉冲特点相符,而腔内演化特性和色散管理孤子具有显著区别,此类激光器中的自相似脉冲的形成并不集中在增益光纤段,而是一种整个激光器腔内循环中有源和无源光纤整体作用的效果^[10,15]。2)和无源自相似激光器对应,另外一种自相似激光器是“有源自相似激光器”,此类自相似激光器在增益光纤段内呈现显著的自相似演化过程^[24-26]。而所实现的自相似脉冲激光器中无论是无源自相似还是有源自相似激光器,在文献中均使用的正常色散增益光纤,而使用反常色散增益光纤通过色散管理构建的激光器是否实现自相似激光器的类似功能,其输出和演化特征其与这些传统自相似激光器是否完全一致都有待进一步研究。

“耗散孤子”(表1中的DS*)也有两种不同的含义,第一种含义以WISE F W组为代表,特指全正色散激光器(他们在发明全正色散激光器的过程中在理论分析中提出了耗散孤子的概念,强调使用了啁啾脉冲频谱滤波这一明显的耗散过程)^[14-15]。第二种含义则扩展了耗散孤子的概念,将区别于支持传统光孤子存在的哈密顿系统的耗散系统可统称“耗散”系统的孤子^[27],其意义主要在于对激光器内脉冲动力学演化物理过程的理论分析方面。第二种含义若用于激光器分类则容易过于宽泛,严格来说几乎所有类型激光器都属于“耗散系统”,这使得所描述激光器的特征无法凸显。

2 反常色散增益光纤的色散管理系统

2.1 激光器的数值模型

激光器腔内光纤中的脉冲演化采用非线性薛定谔方程(Nonlinear Schrödinger Equation, NLSE)来描述光脉冲在光纤中的传输特性^[10],其方程可表示为

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = i\gamma |A(z, t)|^2 A(z, t) - i\frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} A(z, t) + \frac{g}{2} A(z, t) \quad (1)$$

式中, z 为脉冲传输距离, t 为传输时间, $A(z, t)$ 为脉冲包络的慢变幅度, β_2 为群速度色散系数, γ 为非线性系数, g 为增益光纤增益系数。增益谱的轮廓假定为一阶高斯,考虑增益光纤的饱和度,因此频域中的增益系数为

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + E_{\text{pulse}}/E_{\text{sat}}} e^{-\left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_b}\right)^2} \quad (2)$$

式中, g_0 为小信号增益系数, E_{sat} 为增益饱和能量, ω_b 是增益带宽。

数值模拟中, 由于中红外波段光纤色散量较大, 忽略了高阶色散的影响。另外需要说明的是文中没有专门考虑中红外波段的器件损耗问题, 对器件做了理想化处理, 这也是其他传统波段锁模激光器模拟中常用的处理方法^[14-15, 28]。这里采用理想化器件模型是由于本文的主要目的是为了集中考察分析激光器腔内的增益光纤的色散特性对锁模激光器脉冲演化的影响, 以便和传统自相似脉冲激光器对比, 而在实际使用中建议进一步考虑中红外波段的器件损耗等问题, 使模型更接近实际情况。

方程的数值计算采用的是在超短脉冲以及超连续谱领域常用的相互作用绘景四阶龙格-库塔法^[29]。其计算步长为自适应调节, 相对误差为 10^{-5} , 绝对误差为 10^{-12} , 时域窗口宽度设置为 100 ps, 网格点数为 2^{13} , 对应频域窗口宽度为 81.92 THz。

可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)的透射函数可表示为

$$T_{\text{SA}} = 1 - \frac{q_0}{1 + P(\omega)/P_{\text{sat}}} \quad (3)$$

式中, q_0 为 SA 的调制深度, $P(\omega)$ 为瞬时功率, P_{sat} 为 SA 的饱和功率。

2.2 激光器系统对比分析和讨论

在 $2.8 \mu\text{m}$ 中红外波段, 使用增益光纤为反常色散的掺铒氟化物光纤(Erbium-doped Fluoride Fiber, Er:ZBLAN)搭建色散管理腔激光器, 由波分复用器(Wavelength Division Multiplexer, WDM)将泵浦光耦合进激光腔, 腔内脉冲依次经过 0.5 m 反常色散增益光纤、1.5 m 反常色散单模光纤(Single Mode Fiber, SMF), 正常色散的色散补偿器(Dispersion Compensation, DC)、可饱和吸收体(Saturable Absorber, SA)、输出耦合器(Output coupler, OC)和光隔离器(Isolator)。其理想化的模型结构如图 1(后续的对比如和优化研究着重考虑色散特性对脉冲演化和输出的影响, 也均采用该理想化处理的激光器结构, 仅在局部进行调整)。仿真中光纤器件的参数选取^[19]如表 2, 输出耦合器输出端口耦合比为 10%, SA 的调制深度 $q_0=0.5$, 增益饱和能量 $E_{\text{sat}}=0.8 \text{ nJ}$ 。

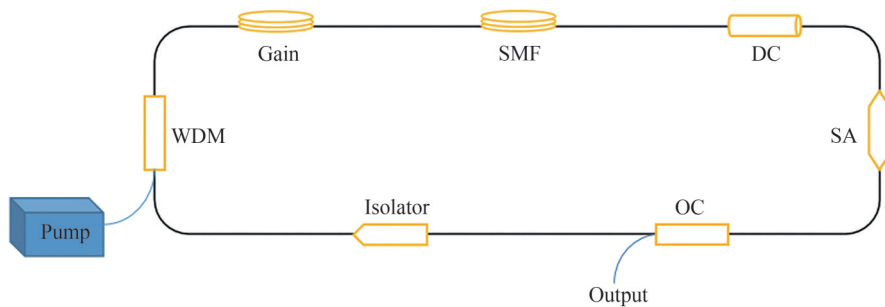


图 1 $2.8 \mu\text{m}$ 色散管理掺铒氟化物光纤激光器理想化结构示意图
Fig. 1 Idealized schematic of dispersion-managed Er-doped fluoride fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$

表 2 光纤仿真参数

Table 2 Fibers parameters in simulation

Fibers and devices	Group velocity dispersion $\beta_2/(\text{ps}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	Nonlinear coefficient $\gamma/(\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$
Er: ZBLAN fiber	-0.086	0.167
SMF	-0.353	0.083
DC: Ge rod	1.685	0

首先和传统孤子激光器进行对比。去除图 1 中的色散补偿器(锺棒)即为传统的孤子锁模激光器系统, 当掺铒氟化物光纤小信号增益系数 $g_0=6 \text{ m}^{-1}$ 时, 可以输出稳定的孤子脉冲。在加入色散补偿的色散管理系统中, 改变锺棒的长度可实现腔内净色散的变化, 调节腔内净色散量至 $\beta_2=0.1 \text{ ps}^2$, 激光器即可输出稳定的抛物线脉冲, 逐渐提高掺铒氟化物光纤小信号增益系数 $g_0=28 \text{ m}^{-1}$ 时, 仍然能够输出稳定脉冲。腔内由低功率高斯白噪声启动到形成稳定脉冲的演化过程如图 2, 在循环 200 圈之后脉冲的时域和频域基本趋于稳定。

虽然输出的色散管理自相似脉冲峰值功率低于传统孤子脉冲,但因其线性啁啾的特点和宽于传统孤子脉冲的频谱,可以有效地对输出脉冲进行压缩。

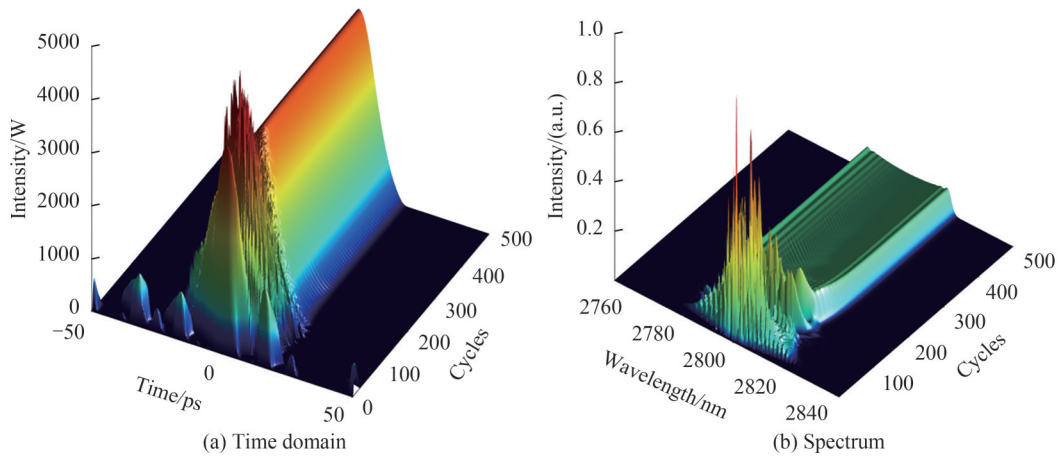


图2 输出脉冲演化
Fig. 2 Output pulse evolution

两系统的能量传输函数(用于研究锁模激光器的工作点和激光器的输出脉冲能量^[28])如图3。不难发现,色散管理系统腔内较高的泵浦功率仍能保证激光器输出稳定脉冲,脉冲的能量已经达到约54 nJ,高于传统孤子系统数倍。

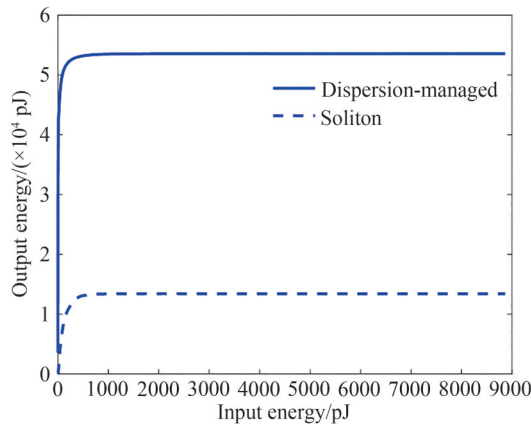


图3 色散管理系统与传统孤子系统脉冲能量传输函数
Fig. 3 Energy transmission function of dispersion-managed system and traditional soliton system

另外,这种色散调控后产自于反常色散增益光纤激光器的脉冲如要称为自相似脉冲,则需研究激光器输出脉冲和传统自相似脉冲是否存在差异,以及在激光器腔内的演化过程是否相互一致。

为了和传统自相似激光器进行对照,除了对图1激光器进行研究分析外,还同时对和图1具有相同结构但色散系数不同的“镜像”系统进行了仿真计算。图4为几个对照系统的激光器结构简图(仅给出了腔内光纤和色散补偿器的示意,系统1、2、3的结构和图1所示激光器结构相同,差别只在于光纤和色散补偿器的色散特性不同),图1对应图4(a),即系统1。

图4(b)为系统2,将图1色散管理系统中0.5 m的增益光纤的色散系数由反常色散换成相同大小的符号相反的正常色散,1.5 m的反常色散单模光纤保持不变,同调整色散补偿器的色散量以维持原来的腔内净色散(正常色散),这样就成为使用正色散增益光纤净色散也为正常色散的激光器系统。

图4(c)系统3为最常见的传统的无源自相似系统,增益光纤为正常色散,色散补偿器为反常色散,而带有正常色散的单模光纤同时带有非线性。即相对上述两种情况而言,带有非线性的无源光纤为正常色散,

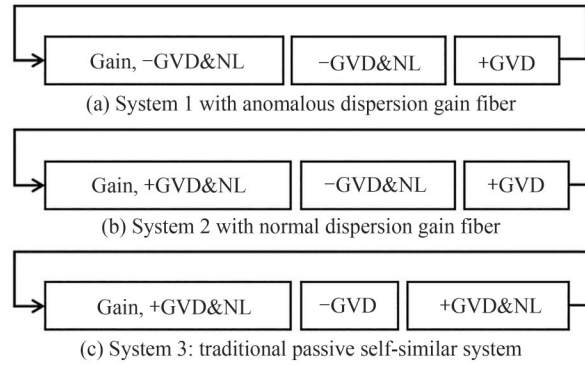


图4 对比系统示意

Fig. 4 Schematic of systems for comparison.

在图4(b)基础上,将单模光纤非线性系数设置为0,同时给色散补偿段加入非线性并保持系统非线性总量,可完成对传统无源自相似系统的模拟。

在三种系统中,掺铒氟化物光纤小信号增益系数 $g_0=28 \text{ m}^{-1}$,均具有相同的 0.1 ps^2 净色散量和非线性总量。

图5展示了三者非常相似的腔内脉冲频域和时域的演化。可以看出增益光纤色散以及系统中带有非线性的无源光纤位置的改变几乎不影响原有的脉冲演化,腔内脉冲频谱的宽度均如无源自相似系统一般变化很小,并且啁啾特性没有改变,同一段光纤内脉冲宽度单调变化。腔内脉宽演化情况如图6,激光腔里增益光纤以外的部分主导了脉宽的演化,脉宽在正色散的色散补偿段增加,在负色散的单模光纤处减小。三种情况下的腔内脉冲脉宽演化极为接近,均符合色散管理腔实现的无源自相似,色散补偿部分承担了使脉冲返回初始脉宽的作用^[15]。

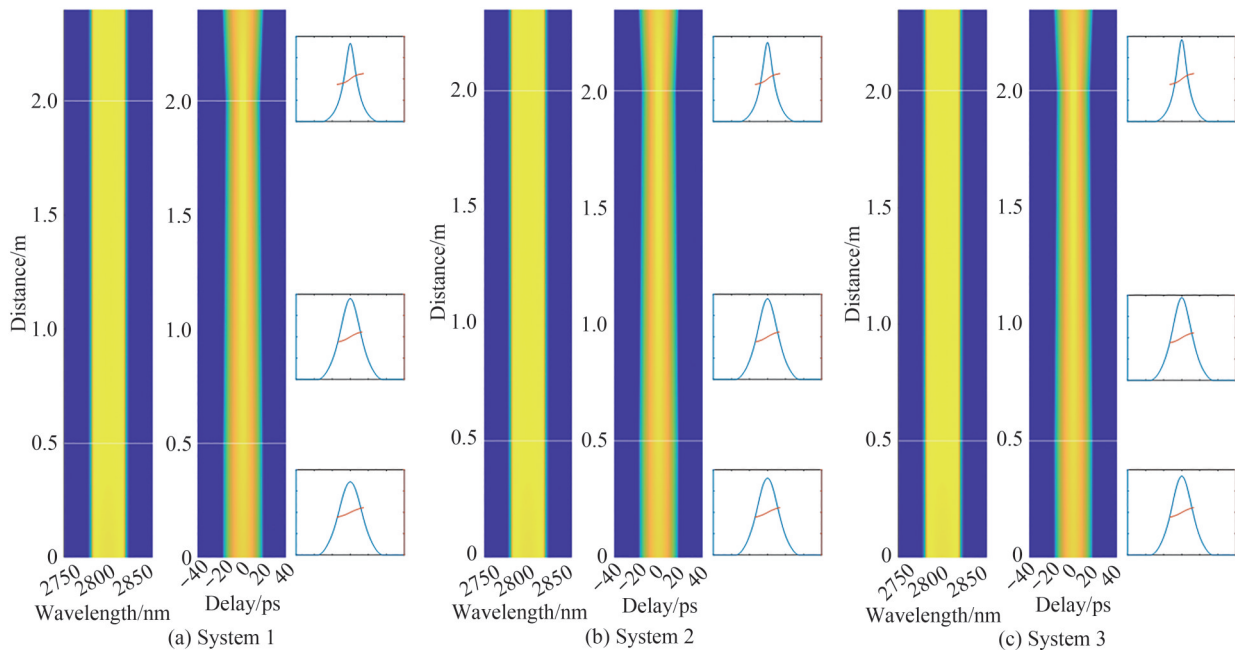


图5 镜像自相似系统腔内脉冲和啁啾演化

Fig. 5 Intracavity pulse and chirp evolution of self-similar mirror system

进而对比三个自相似系统的输出脉冲,从图7(a)中可以看出三个自相似脉冲有着几乎相同的时域波形,而频谱则接近完全重合,如图7(b)。作为自相似脉冲关键的线性啁啾特点,通过图7(c)放大后的啁啾曲线不难看出其线性度亦极为相似。对比图8中腔内脉冲的峰值功率,三个自相似系统中脉冲功率有着相同

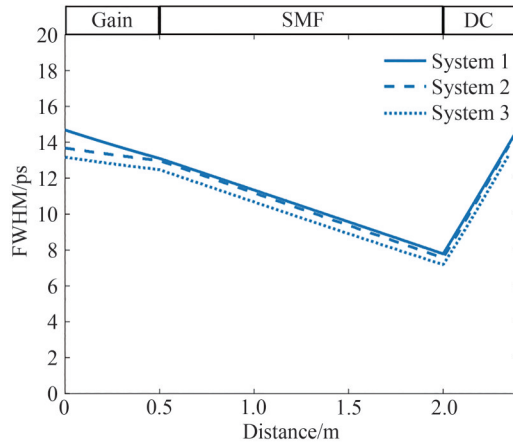


图6 系统1、系统2和系统3腔内脉宽演化

Fig. 6 Intracavity pulse duration evolution of system 1 system, and system 3

的变化,腔内脉冲功率的差异在5%以内,而腔内脉冲能量也基本一致,差距仅约为1%,如图9。因此,三个系统的输出脉冲特性相同。系统1反常色散增益光纤的色散管理系统输出的抛物线脉冲和系统3传统自相似脉冲激光器输出相同,均属于自相似脉冲。

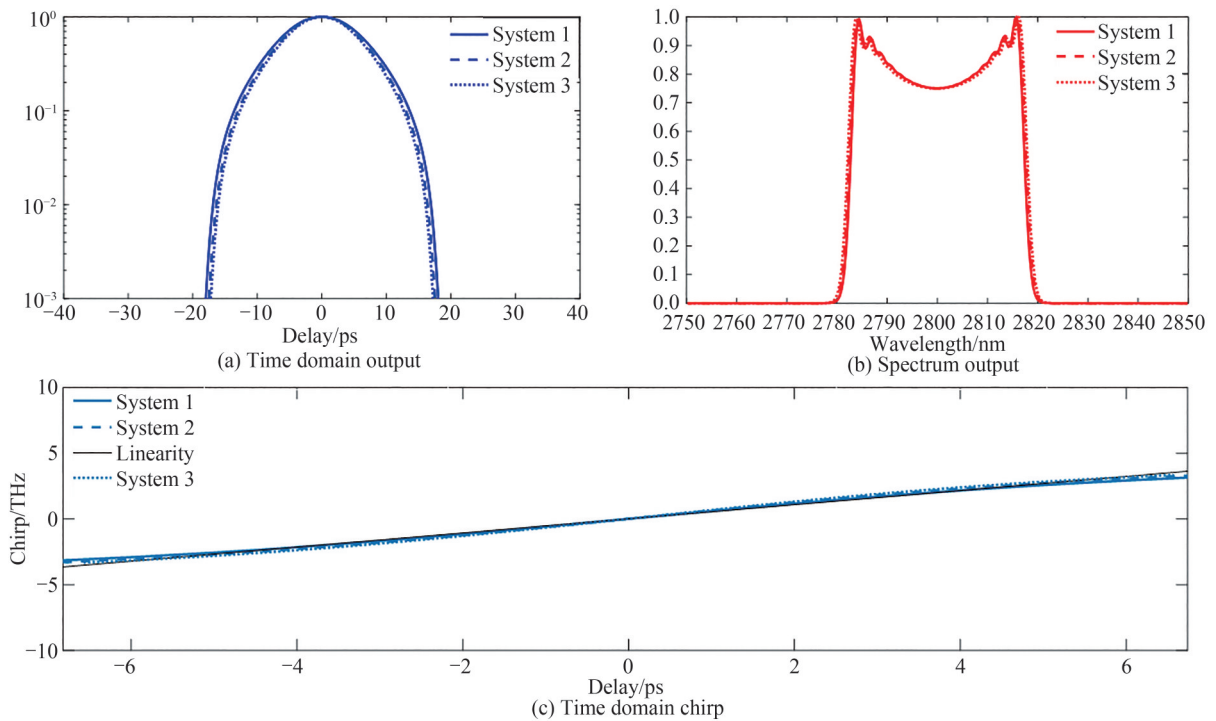


图7 三系统输出

Fig. 7 Output of three systems

综上所述,图4(a)系统1与图4(b)系统2无论在腔内脉冲演化、时频输出、线性啁啾、腔内能量功率变化均和图4(c)系统3极为接近,符合表1无源自相似激光器的特征。因此图1(即图4(a)系统1)这种反常色散增益光纤实现的色散管理自相似系统可以归属于无源自相似激光器类型。文献[10,27]指出,无源自相似主要发生在无源正常色散(带有非线性)的单模光纤中即系统3的单模光纤。在对比分析的3个激光系统中,系统2和系统1的单模光纤为反常色散,正常色散为不带非线性的色散补偿器,而增益光纤为反常色散,这表明这种通过色散管理构建的激光器中的自相似脉冲的形成是激光器腔内总路径上的平均效果。由此可知无源自相似激光器也并不局限于使用正常色散增益光纤来实现,从而拓展了自相似激光器的实现条件。

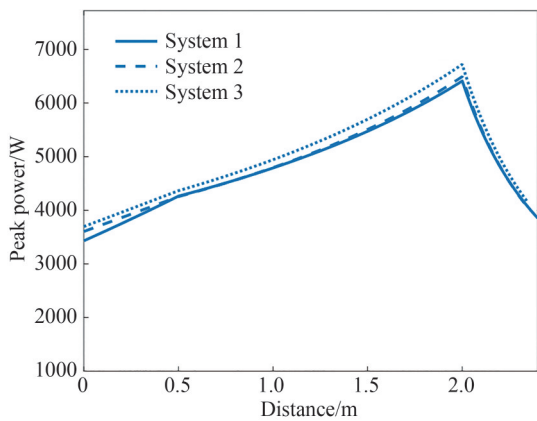


图8 三系统脉冲峰值功率演化

Fig. 8 Pulse peak power evolution of three systems

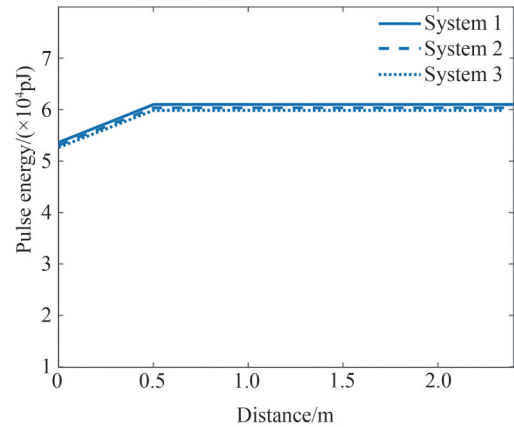


图9 三系统脉冲能量演化

Fig. 9 Pulse energy evolution of three systems

需要注意的是,由图5、图6的脉冲演化情况可以看出,这种无源自相似和有源自相似(放大器相似子)激光器中的自相似有明显区别。有源自相似要求具有正常色散的增益光纤,而不是仅需求整个腔内光程呈现净正色散。有源自相似在增益光纤中完成自相似演化,即脉冲宽度和光谱在增益光纤段上而不是无源光纤上逐渐增加(见参考文献[26]中Fig.1),同时完成脉冲形状向抛物线型转变。因此使用反常色散增益光纤的净正色散激光腔能实现无源自相似激光器,而无法实现有源自相似激光器。

2.3 色散图配置的影响

色散管理激光器通常为调节腔内净色散而同时具有正负色散分布(即色散图 Dispersion map)。调整图1激光器结构中色散补偿的色散量和单模光纤长度可实现对激光器系统色散图的改变,同时保持相同的净色散量和其他参数不变,可以一定程度上探究色散图对系统输出脉冲的影响。研究中保持系统净色散量为 0.1 ps^2 , 调节正色散量至 0.8 ps^2 、 1.0 ps^2 、 1.4 ps^2 时输出脉冲的啁啾曲线和脉冲能量如图10和图11。从图中可以得出,色散图的调整对输出脉冲的啁啾线性度影响较小,不同色散量下的啁啾曲线并无明显的变化。但色散量的增加是通过增加光纤长度实现的,因而伴随着非线性的增加,这往往会对激光器造成影响,而随着色散量增大和光纤长度增加带来的非线性加大,激光器输出脉冲能量逐渐减小,同时时域脉宽和频域带宽都有一定程度的增大,可见色散图的调整对脉冲能量的影响依然不可忽视。在此类激光器的设计中,可

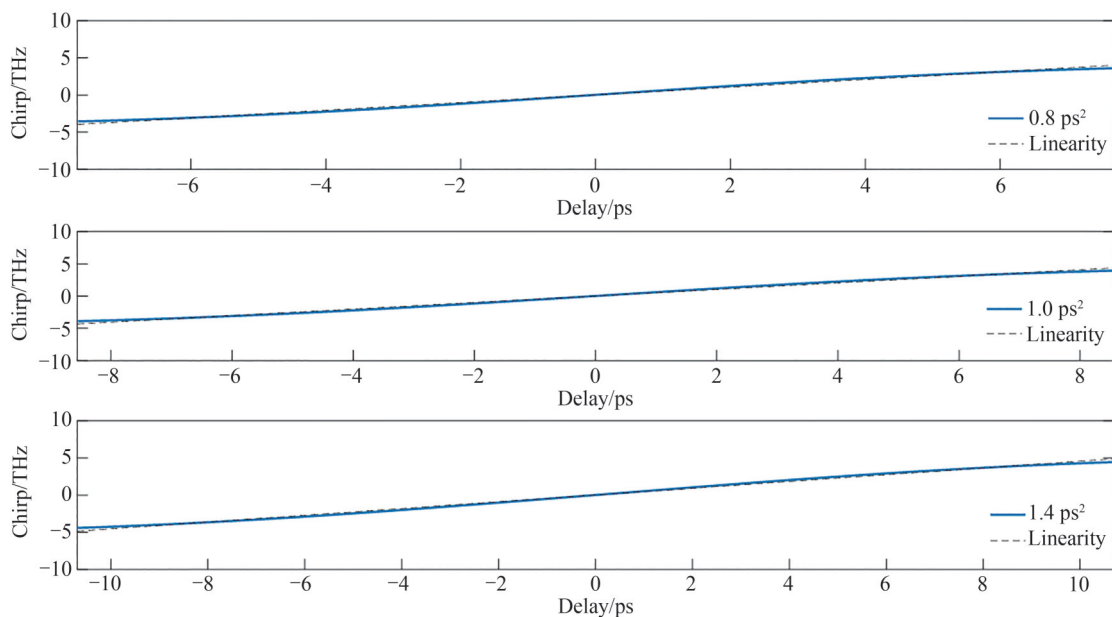


图10 不同正色散总量色散管理自相似系统时域啁啾

Fig. 10 Time-domain chirp of dispersion-managed self-similar systems with different total normal dispersion

以对系统色散图加以控制,在可接受的范围内减少正负色散的总量来提升输出脉冲的质量。

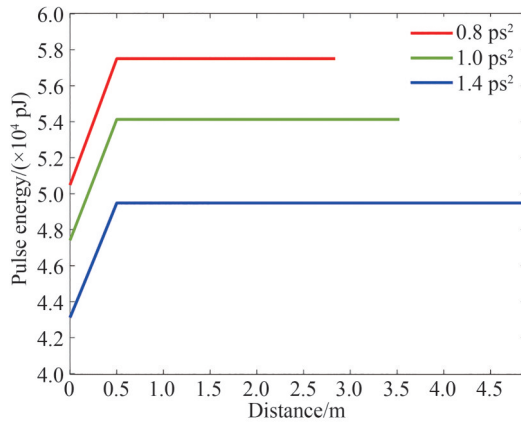


图 11 不同正色散总量色散管理自相似系统脉冲能量演化

Fig. 11 Pulse energy evolution of dispersion-managed self-similar systems with different total normal dispersion

2.4 腔内净色散量的影响

图 1 中的色散管理腔因加入的正色散的色散补偿调节腔内色散至净正色散,得以输出与传统自相似脉冲特性相似的色散管理自相似脉冲,当系统净色散在能够输出稳定自相似脉冲的范围内变化时,也会在在一定程度上对输出脉冲造成一定影响。如图 12,仅调节图 1 激光器系统的色散补偿,使得系统净色散量为 $0.1\sim 0.3\text{ ps}^2$ 时,输出脉冲的啁啾线性度有明显的变化,净色散的增大对啁啾线性度的改善有着显著作用。同时,系统净色散的变化对输出脉冲的能量也有较大影响,如图 13,脉冲能量会随净色散量的增大而有一定提升,在 0.3 ps^2 净色散量左右时达到最大值。但如果继续调节色散补偿增大系统的净色散到更大数值时,过大的净色散会使输出的自相似脉冲产生变形,虽然脉冲的啁啾曲线还能够保持较好线性度,但脉冲能量将不增反降。相反,太小的净色散量会使激光器系统无法输出稳定的脉冲。因此设计该类系统时,保证输出脉冲稳定不变形的前提下,能够适当地运用色散补偿提高净色散获得更高质量的脉冲。

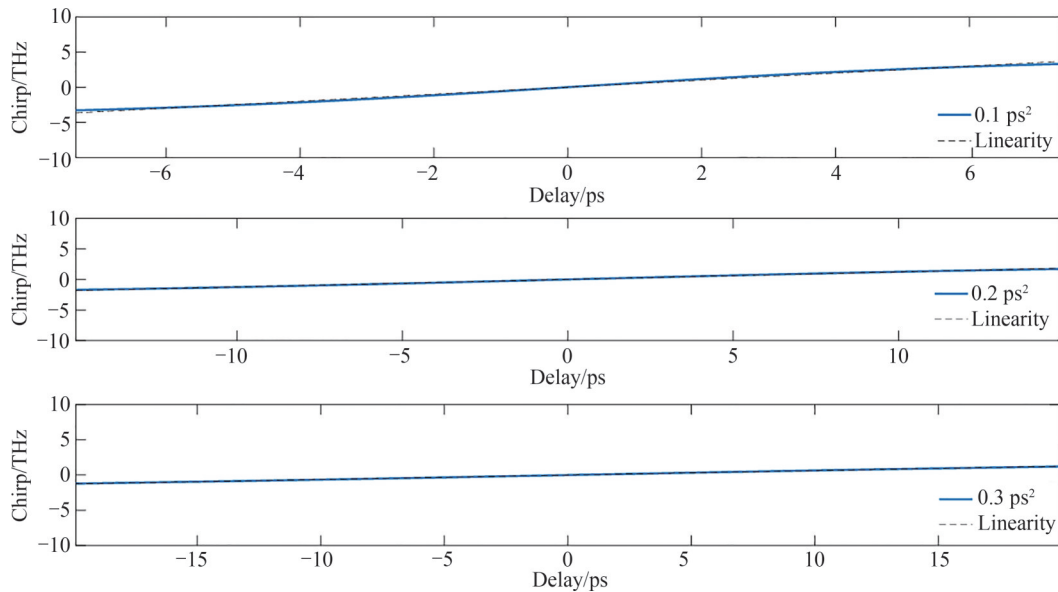


图 12 不同净色散量色散管理自相似系统时域啁啾

Fig. 12 Time-domain chirp of dispersion-managed self-similar systems with different net dispersion

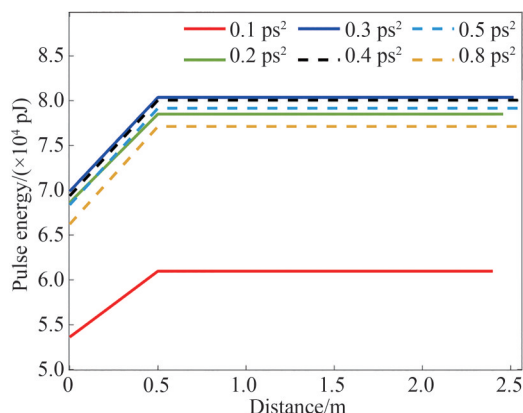


图13 不同净色散量色散管理自相似系统脉冲能量演化

Fig. 13 Pulse energy evolution of dispersion-managed self-similar systems with different net dispersion

2.5 色散补偿器件非线性的影响

中红外波段运用色散管理腔实现输出的自相似脉冲也会受到色散补偿器件的非线性的影响。承担调节腔内色散作用的通常有色散补偿器和色散补偿光纤,这两种器件最大区别在于其非线性特性。对于色散补偿器(如锗棒或光栅)非线性系数可以忽略,而色散补偿光纤一般具有较高的非线性系数,因此对于不同非线性系数的色散补偿方案,需要进行对比以获得更好的效果。研究在保持原有其他参数不变的基础上,给图1激光器系统中的色散补偿段加上适当的非线性系数来模拟采用带有非线性的光纤来调节腔内色散的情况。对色散补偿模块的非线性系数分别为 $0 \text{ W}^{-1}/\text{m}$ 、 $0.0005 \text{ W}^{-1}/\text{m}$ 和 $0.001 \text{ W}^{-1}/\text{m}$ 的情况进行模拟,对比计算结果发现,色散补偿模块的非线性增加除了使脉冲时域和频域宽度变大,对输出脉冲的啁啾线性度有较为明显的影响,啁啾曲线在增大非线性系数后线性度变差,如图14。如图15,不同的色散补偿非线性系数下腔内脉冲能量也有较大差异,输出脉冲能量随非线性系数的增大而下降明显。因此,色散管理系统中色散补偿的非线性系数的数值大小对系统输出脉冲有着显著的影响,色散补偿所使用器件的选取关系到该波段输出自相似脉冲的质量。

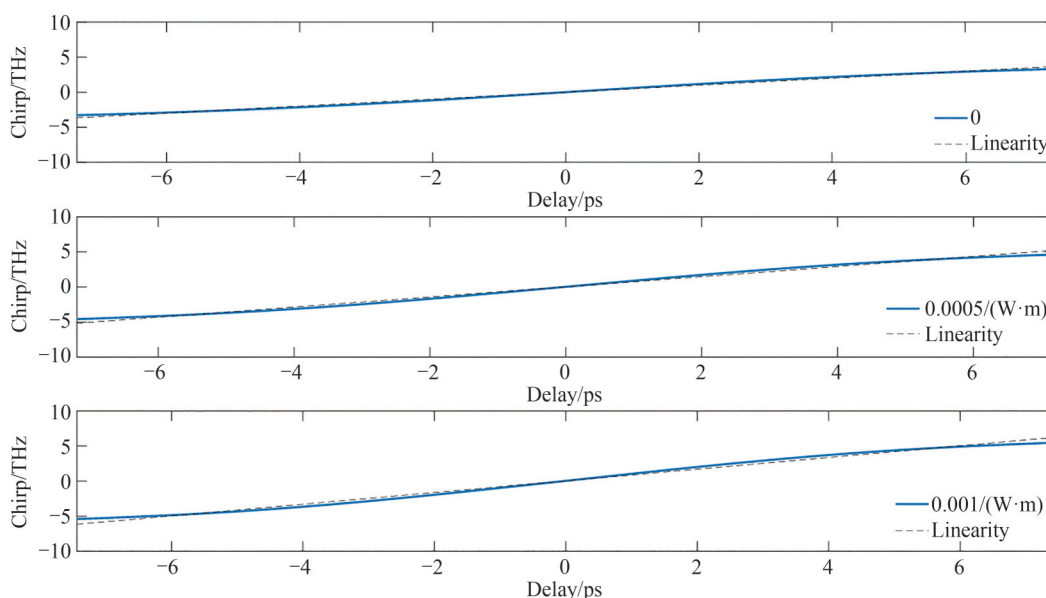


图14 不同非线性的色散补偿下色散管理自相似系统时域啁啾

Fig. 14 Time-domain chirp of dispersion-managed self-similar systems with different dispersion compensation nonlinearity

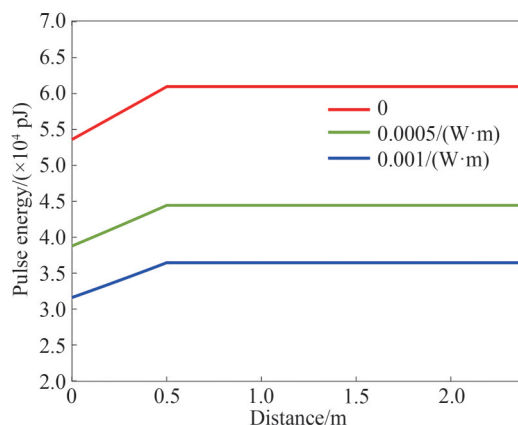


图 15 带有不同非线性参数的色散补偿下脉冲能量演化

Fig. 15 Pulse energy evolution of dispersion-managed self-similar systems with different dispersion compensation nonlinearity

3 结论

本文对增益光纤处于反常色散区的 $2.8 \mu\text{m}$ 波段色散管理锁模激光器理想化模型开展研究,获得了高能量的自相似脉冲。通过与参考激光器系统进行对比发现,这种使用反常色散增益光纤的色散管理激光器完全可以达到传统正常色散增益光纤构建的无源自相似脉冲激光器的效果,不仅可以输出自相似脉冲,且与传统无源自相似脉冲有着近乎相同的时域和频域波形,以及输出脉冲的脉冲能量和峰值功率;其腔内脉冲的演化情况和正常色散增益光纤构建的传统无源自相似脉冲激光器系统的脉冲演化表现出良好的一致性,符合色散管理腔内无源自相似的特性。因此,反常色散增益光纤的色散管理激光器系统亦可构建无源自相似激光器。在理论方面弥补了自相似脉冲在增益光纤为反常色散的情况,完善了自相似脉冲激光器的理论体系,拓宽了实现自相似脉冲激光器的实现条件。在实际应用方面,为中红外波段实现自相似脉冲输出提供了理论依据。在此类光纤激光器的优化方面,激光器设计时应尽量缩短无源反常色散单模光纤的长度,同时可以适当提高腔内净色散量,或尽可能选取无非线性的色散补偿器来调节色散以实现更高质量的输出脉冲。需要指出的是由于制造工艺等方面的因素,中红外波段器件往往具有较高损耗,有些器件尚没有实现全光纤化,因此在实用中还需进一步与实际情况相结合,考虑器件的损耗等因素。

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] WEI H, LI B, SHI W, et al. General description and understanding of the nonlinear dynamics of mode-locked fiber lasers [J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-12.
- [3] SHAH L, FERMAN M E, DAWSON J W, et al. Micromachining with a 50 W, 50 μs , sub-picosecond fiber laser system[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12546-12551.
- [4] MOLLENAUER L F, STOLEN R H. The soliton laser[J]. Optics Letters, 1984, 9(1): 13-15.
- [5] HAUSE H A, TAMURA K. Stretched-pulse additive pulse mode-locking in fiber ring lasers: theory and experiment[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics: A Publication of the IEEE Quantum Electronics and Applications Society, 1995, 31 (3): 591-598.
- [6] LENZ G, TAMURA K, HAUSE H A, et al. All-solid-state femtosecond source at 1.55 microm [J]. Optics Letters, 1995, 20(11): 1289-1291.
- [7] FERMAN M E, KRUGLOV V I, THOMSEN B C, et al. Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(26): 6010-6013.
- [8] ANDERSON D, DESAIX M, KARLSON M, et al. Wave-breaking-free pulses in nonlinear-optical fibers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 1993, 10(7): 1185-1190.
- [9] TAMURA K, NAKAZAWA M. Pulse compression by nonlinear pulse evolution with reduced optical wave breaking in erbium-doped fiber amplifiers[J]. Optics Letters, 1996, 21(1): 68-70.
- [10] ILDAY F O, BUCKLEY J R, CLARK W G, et al. Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(21): 213902.
- [11] CHONG A, BUCKLEY J R, RENNINGER W H, et al. All-normal-dispersion femtosecond fiber laser [J]. Optics

- Express, 2006, 14(21):10095-10100.
- [12] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Dissipative solitons in normal-dispersion fiber lasers[J]. Physical Review A, 2008, 77(2): 681-700.
- [13] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Self-similar pulse evolution in an all-normal-dispersion laser[J]. Physical Review A, 2010, 82(2): 19438-19443.
- [14] WISE F W, CHONG A, RENNINGER W H. High-energy femtosecond fiber lasers based on pulse propagation at normal dispersion[J]. Laser & Photonics Review, 2008, 2: 58-73.
- [15] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Pulse shaping and evolution in normal-dispersion mode-locked fiber lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics: a Publication of the IEEE Lasers and Electro-optics Society, 2012, 18(1): 389-398.
- [16] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [17] HAO Q, ZHU G S, YANG S, et al. Mid-infrared transmitter and receiver modules for free-space optical communication [J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2260-2264.
- [18] SEREBRYAKOV V A, BOJKO É V, PETRISHCHEV N N, et al. Medical applications of mid-IR lasers. Problems and prospects[J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(1): 6-17.
- [19] QIN Z P, XIE G Q, GU H A, et al. Mode-locked 2.8- μm fluoride fiber laser: from soliton to breathing pulse [J]. Advanced Photonics, 2019, 1(6): 065001.
- [20] FAN Haoze, LIANG Jinhui, ZHENG Shukai, et al. 2.8 μm mid-infrared synchronously pumped mode-locked fiber laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(1): 222-230.
樊浩泽, 梁金辉, 郑树楷, 等. 2.8 μm 中红外同步泵浦锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2022, 49(1): 222-230.
- [21] HUANG C, WANG C, SHANG W, et al. Developing high energy dissipative soliton fiber lasers at 2 micron [J]. Scientific Reports, 2015, 5(1): 13680.
- [22] ZENG Guangmin, PENG Jie, TANG Pinhua. Numerical investigation on self-similar mode-locked Er-doped fluoride fiber laser at 2.8 μm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1314004.
曾广民, 彭杰, 唐平华. 2.8 μm 自相似锁模掺铒氟化物光纤激光器的数值研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1314004.
- [23] SHI Zhengnan, YAN Fengping, HAN Wenguo, et al. Theoretical analysis of self-similar pulse generation in 2 μm thulium-doped fiber laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(9): 109-114.
石郑楠, 延凤平, 韩文国, 等. 2 μm 掺铥光纤激光器中自相似脉冲产生的理论研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(9): 109-114.
- [24] RENNINGER W H, CHONG A, WISE F W. Amplifier similaritons in a dispersion-mapped fiber laser [J]. Optics Express, 2011, 19(23): 22496-22501.
- [25] MENG F, LAPRE C, BILLET C, et al. Instabilities in a dissipative soliton-similariton laser using a scalar iterative map [J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1232-1235.
- [26] OKTEM B, ÜLGÜDÜR C, ILDAY F O. Soliton-similariton fibre laser[J]. Nature Photonics, 2010, 4(5): 307-311.
- [27] GRELU P, AKHMEDIEV N. Dissipative solitons for mode-locked lasers[J]. Nature Photonics, 2012, 6(2): 84-92.
- [28] LI Ronghua, MA Zehang, TANG Chengtian, et al. Synchronous spectrum overlapping multi-wavelength pulsed fiber laser with Mamyshev cavity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(8): 0801002.
李荣华, 马泽航, 唐城田, 等. Mamyshev 同步光谱可重叠多波长脉冲光纤激光器[J]. 中国激光, 2020, 47(8): 0801002.
- [29] DUDLEY J M, TAYLOR J R. Supercontinuum generation in optical fibers[M]. New York: Cambridge University Press, 2010.

Passive Self-similar Pulse Fiber Laser Constructed by Anomalous Dispersion Gain Fiber

GONG Rui, GENG Yalin, PEI Li, WEI Huai

(Key Laboratory of All-optical Network and Modern Communication Network Ministry of Education, Institute of Light Wave Technology, College of Electronic Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Self-similarity is a relatively common natural phenomenon, which is also found in pulses transmitted in optical fibers. Self-similar pulses are parabolic pulses. In fiber amplifier, pulses can evolve into such parabolic pulses under the combined influence of gain, normal dispersion and nonlinearity. This is

the definition of self-similar pulses in early research. When a pulse is transmitted under this condition, not only does the shape gradually evolve into a parabolic shape, but the shape of the pulse can be maintained, and the pulse width and power are amplified at the same time. The evolved self-similar pulse has a linear chirp curve, which can achieve long distance relative transmission without pulse splitting in the case of high power. Therefore, self-similar pulses are also applied to the mode-locked fiber laser. Although the fiber laser cavity is different from the fiber amplifier, the self-similar pulse in the cavity still has the characteristic of anti-splitting, which improves the output pulse energy of the mode-locked fiber laser. The gain fiber of the self-similar fiber laser also basically meets the generation requirements of the initial self-similar pulse, but these requirements are difficult to achieve for current mid-infrared fiber lasers. In the mid-infrared band, the fiber is usually in the anomalous dispersion region. If the wave guide dispersion and doped rare earth of the gain fibre are adjusted substantially, it will bring extreme difficulties to fiber fabrication. Self-similar pulse fiber lasers are mainly divided into passive self-similar fiber lasers and active self-similar fiber lasers. Active self-similar fiber lasers usually require spectral filtering, where the pulses in the cavity evolve into self-similar pulses in the gain fiber part. Therefore, the gain fiber of the active self-similar lasers must be normal dispersion, which is difficult to adapt to the gain fiber with anomalous dispersion in the mid-infrared band. In the passive self-similar fiber laser, the self-similar evolution is in the passive fiber with normal dispersion. Even if there is a passive fiber with anomalous dispersion in the laser cavity, the self-similar pulses can still be output as long as the net dispersion of the laser system is positive. Dispersion-managed fiber laser, usually specifically a dispersion-managed soliton fiber laser, is a laser with dispersion map structure, and also generally refers to all fiber lasers that control dispersion in the cavity. Whether the dispersion-managed cavity with anomalous dispersion gain fiber can become a passive self-similar fiber laser and output self-similar pulses with comparable quality should be further researched. For the sake of comparison, this paper, first systematically summarizes the historical evolution, classification system and respective characteristics of mode-locked fiber lasers with normal dispersion. Then, the dispersion-managed mode-locked fiber laser with anomalous dispersion gain fiber is studied by numerical simulation. Through the analysis of time domain shape, spectrum, pulse energy, pulse width and chirp curve linearity and comparison with several traditional self-similar pulse fiber lasers constructed by normal dispersion gain fibers with mirror dispersion characteristics, it is pointed out that the laser system completely conforms to the features of passive self-similar fiber laser, and can achieve the effect of traditional passive self-similar fiber laser constructed by normal dispersion gain fiber. The realizable range of self-similar pulse fiber lasers is expanded theoretically, which makes up for the theory deficiency of traditional self-similar pulse fiber lasers in this aspect. In addition, the influence of dispersion map, net dispersion in the cavity and dispersion compensation nonlinearity on the output pulse of the laser system is discussed in detail, which provides a new idea for generating higher quality ultrashort pulses in the mid-infrared band using anomalous dispersion gain fiber.

Key words: Fiber laser; Self-similar pulses; Dispersion-managed; Mid-infrared band laser; Passive self-similar

OCIS Codes: 140.3430; 140.3510; 140.4050