

激光与光电子学进展

2.8 μm 自相似锁模掺铒氟化物光纤激光器的数值研究

曾广民, 彭杰*, 唐平华**

湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105

摘要 数值研究了中红外 2.8 μm 波段基于可饱和吸收体(SA)锁模掺铒氟化物光纤激光器中自相似脉冲的产生及演化过程。结果表明:通过锗棒进行色散补偿使腔内净色散为 0.020~0.048 ps^2 时,基于 SA 锁模的掺铒氟化物光纤激光器腔内脉冲可维持自相似演化;保持腔内净色散为 0.03 ps^2 ,可以获得抛物线形状最理想的脉冲,其脉冲宽度为 19.7 ps、峰值功率为 630 W、脉冲能量为 12.4 nJ。为了进一步优化激光器的输出特性,研究了增益光纤的小信号增益、增益饱和和能量以及 SA 的调制深度、饱和功率等参数对激光器脉冲输出特性的影响,为自相似锁模掺铒氟化物光纤激光器的设计提供了一定的参考。

关键词 激光光学; 中红外; 抛物线脉冲; 氟化物光纤激光器

中图分类号 O437 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1314004

Numerical Investigation on Self-Similar Mode-Locked Er-Doped Fluoride Fiber Laser at 2.8 μm

Zeng Guangmin, Peng Jie*, Tang Pinghua**

School of Physics and Optoelectronics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China

Abstract In this paper, the generation and propagation of self-similar pulses in an Er-doped mode-locked fiber laser based on saturable absorber (SA) are numerically investigated. Research results indicate that by using a germanium rod to compensate the cavity dispersion, the intracavity pulse of an erbium-doped fluoride fiber laser based on SA mode-locking can support self-similar pulses evolution when the net dispersion of the cavity is in the range of 0.020–0.048 ps^2 . Keeping the net dispersion of the cavity with 0.03 ps^2 , ideal parabolic pulse with a pulse width of 19.7 ps, a peak power of 630 W, and a pulse energy of 12.4 nJ is obtained. To further optimize the output properties of the laser, the effects of small signal gain and gain saturated energy of the gain fiber, as well as the modulation depth and saturated power of the SA on the pulse output properties are studied in detail, which provides reference for the design of self-similar mode-locked Er-doped fluoride fiber lasers.

Key words laser optics; mid-infrared; parabolic pulses; fluoride fiber lasers

1 引言

中红外 2.8 μm 波段激光在环境监测、生物医疗、分子光谱学等领域具有重要应用价值,近年来已成为国内外的研究热点^[1-4]。与近红外激光器相比,中红外激光器的发展还非常滞后。随着氟化物光纤以及稀土离子掺杂技术的发展,中红外氟化物光纤激光器(掺铒、铽、镱等离子)以其高功率、高效率、高光束质量等优点受到了国内外相关课题组的广泛关注^[5-18]。其中,掺铒氟化物光纤激光器的综合指标表现好,且能用商用化的 976 nm 激光二极管(LD)作为泵浦源,在获得

高功率、高效率中红外激光方面最具应用前景。目前,连续波工作状态下掺铒氟化物光纤激光器的最大输出功率可达 40 W 以上^[11],最大斜率效率达 50%,远高于斯托克斯极限效率(约为 35%)^[19]。但对于大多数应用领域,在保证高输出功率、高效率以及高光束质量的同时,还要求中红外光纤激光器具有高脉冲能量、超短脉冲宽度等特性。

目前,2.8 μm 波段超快脉冲激光主要基于可饱和吸收体(SA)和非线性偏振旋转(NPR)等传统锁模技术获得。国内外学者近年来陆续报道了多种基于 SA^[7-8, 20-23]和 NPR^[14, 24-32]被动锁模的 2.8 μm 波段氟化

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2021-09-06; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61605166)、湖南省教育厅科研项目(21B0136)、湖南省自然科学基金(2018JJ3514)

通信作者: *jpeng@xtu.edu.cn; **pinghuatang@xtu.edu.cn

物光纤激光器。基于半导体可饱和吸收镜(SESAM), Tang等^[8]在掺铟氟化物光纤激光器中实现了2.8 μm波段锁模脉冲输出,锁模脉冲宽度约为25 ps,峰值功率约为1.86 kW,平均功率可达1.08 W。基于NPR锁模技术,多个课题组报道了百飞秒级的氟化物超快脉冲激光器^[13, 17, 29-30]。Huang等^[30]基于色散补偿技术在掺铟氟化物锁模光纤激光器中获得了126 fs的锁模脉冲。但传统锁模技术孤子脉冲可承受的最大非线性相移为 π ,过度非线性相移的累积会导致孤子出现不稳定甚至分裂现象,也限制了孤子的脉冲能量。通过色散管理可在一定程度上减小非线性相移的累积,但受氟化物光纤大负色散系数以及该波段色散补偿器件匮乏等因素的限制,目前对该波段色散补偿方面的研究较少。相比传统孤子锁模激光器,自相似锁模激光器可承受高达 10π 的非线性相移,在获得高能量锁模脉冲方面具有极大的应用前景^[31]。Ilday等^[32]在光纤激光器中应用了一种新型非线性脉冲演化,即自相似演化,通过数值仿真实现的自相似脉冲能量达到了15 nJ。目前,关于自相似锁模光纤激光器的研究主要集中在近红外掺铒光纤、掺铟光纤以及掺铊光纤的光纤激光器^[33-46],在中红外波段的研究较少。Chai等^[47]通过数值研究了一种基于NPR锁模的中红外2.8 μm波段掺铟氟化物自相似光纤激光器,即利用色散渐减光纤作为色散补偿光纤管理腔内净色散,以支持腔内光脉冲的自相似演化,得到了脉冲宽度约为7 ps、峰值功率约为231 W、脉冲能量约为1.7 nJ的自相似脉冲。Qin等^[13]发现锗棒具有非常大的色散系数,约为氟化物光纤的20倍,且其非线性系数非常小,这为氟化物光纤激光器腔内色散的有效补偿提供了极具吸引力的方案。

本文建立了基于SA锁模的2.8 μm波段自相似掺铟氟化物光纤激光器理论模型,并通过数值仿真研究了光脉冲在腔内的演化过程。为了满足脉冲自相似演化的正色散条件,获得稳定的抛物线脉冲,用锗棒作为色散补偿器件,并通过改变锗棒的长度管理腔内净色散,以满足脉冲自相似演化的正色散条件。当腔内净色散处于0.020~0.048 ps²范围时,激光器能输出稳定的抛物线脉冲。当腔内净色散值为0.03 ps²时,自相似锁模掺铟氟化物激光器可获得脉冲宽度为19.7 ps、峰值功率为630 W、脉冲能量为12.4 nJ的脉冲。为了指导实验上设计自相似锁模光纤激光器,进一步研究了增益光纤的小信号增益、增益饱和能量以及SA的调制深度、饱和功率对激光器输出特性的影响。

2 数值模型

建立的自相似锁模掺铟氟化物光纤激光器模型如图1所示。环形腔由一段增益光纤(Er:ZBLAN光纤)、一段锗棒(Ge rod)、波分复用器(WDM)、SA、输

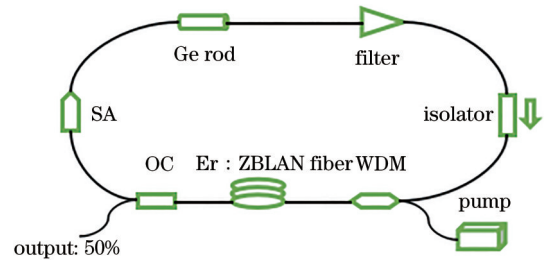


图1 2.8 μm自相似锁模掺铟氟化物光纤激光器的示意图
Fig. 1 Schematic diagram of self-similar mode-locked Er-doped fluoride fiber laser at 2.8 μm

出耦合器(OC)、窄带滤波器(Filter)以及光隔离器(Isolator)组成。在腔中插入光隔离器,以保证光脉冲在腔内单向传输。光脉冲在腔内的传输演化过程:泵浦光经过WDM耦合进入Er:ZBLAN光纤(Le Verre Fluoré公司,纤芯直径为15 μm)中,激发铟离子能级跃迁产生2.8 μm激光,且随光在Er:ZBLAN光纤中的传输逐渐放大;从Er:ZBLAN光纤射出的脉冲激光继续传输到输出耦合器上,部分脉冲激光被输出到腔外,剩余部分的脉冲激光进入SA被窄化;窄化后的脉冲激光传输到锗棒,锗棒作为色散补偿器件为脉冲的自相似演化过程提供必要的正色散条件,通过锗棒的脉冲激光继续传输到窄带滤波器,经过自相似放大的光脉冲在窄带滤波器的作用下恢复到初始状态以维持腔内平衡;最后,通过滤波器的脉冲激光再次传输到Er:ZBLAN光纤中并被放大。随着2.8 μm脉冲激光在腔内不断的循环传输,最终实现自相似锁模脉冲。

在数值模拟中,选用一个微小的高斯白噪声信号作为初始脉冲,其峰值功率为 5.54×10^{-20} W。用非线性薛定谔(NLS)方程描述光脉冲在光纤中的传输^[34],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 为增益光纤的增益系数。对于Er:ZBLAN光纤, g 可表示为

$$g = g_0 / (1 + \int_{-T/2}^{T/2} |A(z, t)|^2 dt / E_{\text{sat}}), \quad (2)$$

式中, g_0 为小信号增益系数, E_{sat} 为增益饱和能量。模型中SA的透过率函数可表示为

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

式中, q_0 为SA的调制深度, $P(\tau)$ 为瞬时功率, P_{sat} 为SA的饱和功率。滤波器的透射率函数为高斯函数,可表示为

$$T_{\text{filter}} = A_0 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中, A_0 为滤波器的透射率, λ 为波长, λ_0 为滤波器的中心波长, $\Delta\lambda$ 为滤波器带宽。在数值模拟中, $A_0 = 0.7$, $\lambda_0 = 2800 \text{ nm}$, $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$ 。腔内净色散可表示为

$$\beta_2^{\text{net}} = \beta_{2\text{Gain}} \times L_{\text{Gain}} + \beta_{2\text{Ge}} \times L_{\text{Ge}}, \quad (5)$$

式中, L_{Ge} 为锗棒的长度, L_{Gain} 为增益光纤的长度。为了方便分析, 不考虑高阶色散和非线性的影响以及 OC、WDM 等器件的滤波效应, 数值模拟时的参数如表 1 所示。

表 1 激光器的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the laser

Device	Group velocity dispersion $\beta_2 / (\text{ps}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	Nonlinear coefficient $\gamma / (\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1})$	Small-signal gain g_0 / m^{-1}
Er: ZBLAN fiber	$-0.086^{[24]}$	$0.167^{[25]}$	30
Ge rod	$1.685^{[13]}$	0	0

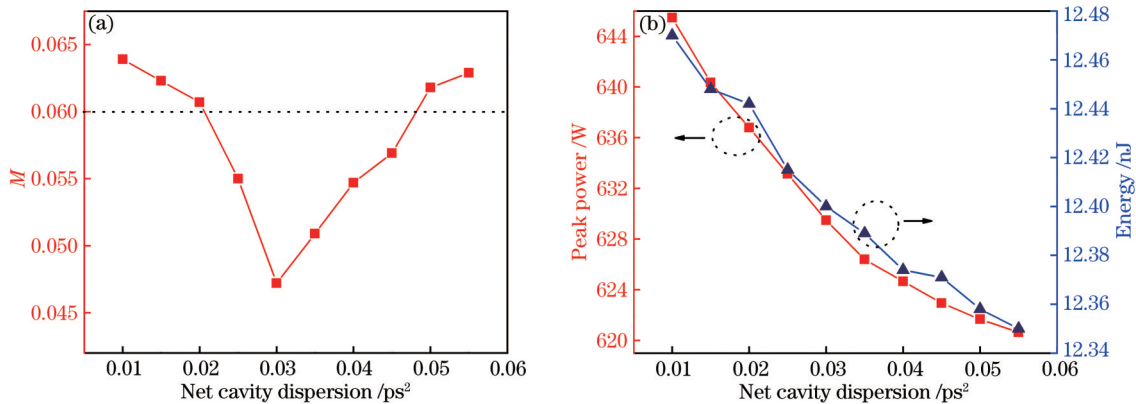
3 结果与讨论

为了分析输出脉冲是否为标准抛物线脉冲, 用失配参数 $M^{[2,48]}$ 描述仿真得到的锁模脉冲与理想抛物线

之间的关系。 M^2 可表示为

$$M^2 = \int [|U(t)|^2 - |P(t)|^2]^2 dt / \int |U(t)|^4 dt, \quad (6)$$

式中, $|U(t)|^2$ 为输出脉冲强度, $|P(t)|^2$ 为拟合的抛物线脉冲强度。在数值模拟中, 谐振腔的初始长度为 6 m, 保持 Er: ZBLAN 光纤的长度 (5.53 m) 不变, 通过改变锗棒的长度使腔内净色散从 0.01 ps^2 (锗棒长度 $L_{\text{Ge}} = 0.288 \text{ m}$) 逐渐增加至 0.055 ps^2 (锗棒长度 $L_{\text{Ge}} = 0.315 \text{ m}$), 仿真结果如图 2(a) 所示。其中, SA 的调制深度为 0.5, 饱和功率为 45 W。当 $M < 0.06$ 时, 输出脉冲为抛物线脉冲^[36]。激光器腔内净色散过大或过小都会使输出脉冲的形状偏离抛物线, 当腔内净色散在 $0.020 \sim 0.048 \text{ ps}^2$ 范围时, 激光器能输出抛物线脉冲; 当净色散为 0.03 ps^2 时, M 达到最小值, 此时输出脉冲形状最理想。图 2(b) 为腔内净色散对峰值功率和脉冲能量的影响。可以发现, 脉冲峰值功率与对应的脉冲能量都随腔内净色散的增大逐渐减小。综上所述, 腔内净色散不仅会影响激光器输出脉冲的形状, 还会影响脉冲的性能。因此, 在合适的色散范围内, 应使激光器在相对较小的腔内净色散环境下输出更高功率、更高能量的自相似锁模脉冲。

图 2 腔内净色散对输出脉冲的影响。(a)腔内净色散与 M 的关系;(b)腔内净色散对峰值功率和脉冲能量的影响Fig. 2 Effect of net cavity dispersion on output pulse. (a) Relationship between net cavity dispersion and M ; (b) effect of net cavity dispersion on peak power and pulse energy

基于表 1 中的参数, 仿真得到腔内净色散为 0.03 ps^2 时的典型抛物线脉冲及光谱演化情况如图 3 所示。可以发现, 当循环圈数大于 200 时, 输出脉冲的强度几乎不随循环圈数的增加而改变, 这表明此时的输出脉冲

已处于稳定状态。图 4(a) 和图 4(b) 为输出的单脉冲及其对应的光谱曲线, 激光器输出脉冲的半峰全宽 (FWHM) 约为 19.7 ps 、脉冲峰值功率约为 630 W 、脉冲能量约为 12.4 nJ , 相应的 3 dB 光谱宽度约为 16 nm 。

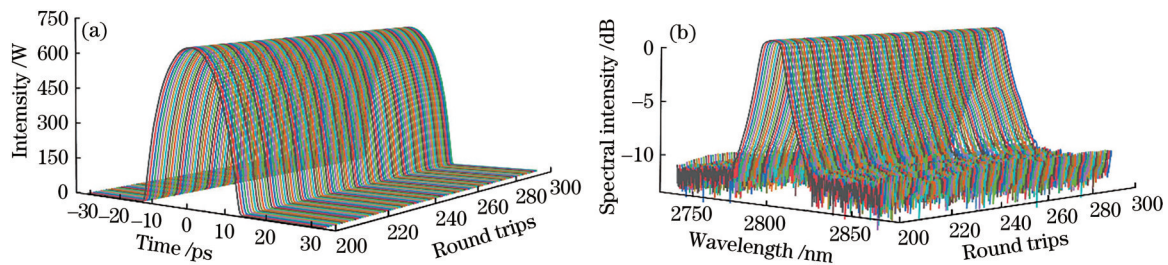


图 3 输出脉冲及光谱随循环圈数的演化图。(a)脉冲演化图;(b)光谱演化图

Fig. 3 Evolution of output pulse and spectrum with round trips. (a) Evolution of the pulse; (b) evolution of the spectrum

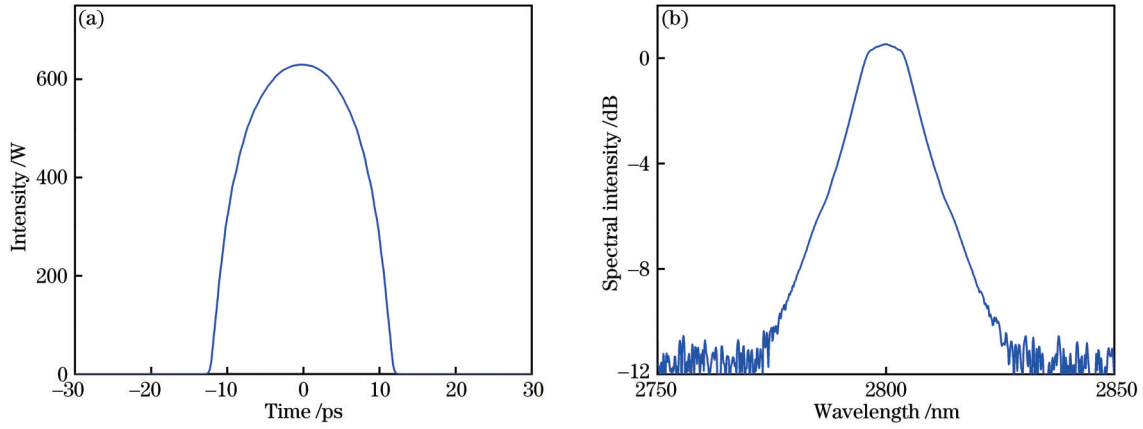


图 4 循环 300 圈时的输出脉冲。(a) 脉冲时域图；(b) 脉冲频域图

Fig. 4 Output pulses at 300 cycles. (a) Pulse time domain graph; (b) pulse frequency domain graph

图 5 为脉冲宽度和光谱宽度在腔内的演化过程。可以发现,脉冲经过 ZBLAN 增益光纤时,其脉冲宽度先逐渐增大,经历一个略微减小的跳变后继续增大。微小跳变的原因是此处的脉冲形状由高斯形向抛物线形演化(脉冲完成自相似演化)。随后脉冲经过 SA, 高强度的脉冲中心部分能通过而低强度的脉冲前后沿无法通

过,使脉冲和光谱略微变窄;窄化后的脉冲进入锗棒中,其脉冲宽度逐渐增大、光谱宽度保持不变;最后通过滤波器,脉冲在时域和频域都被压缩。

3.1 小信号增益对输出特性的影响

在数值模拟中,泵浦能量对激光器的脉冲输出有重要影响,可通过小信号增益(g_0)和饱和能量(E_{sat})描述泵浦源提供的能量^[49],因此,采用控制变量法探讨了不同泵浦条件下激光器输出特性的变化。

由失配参数确定激光器输出抛物线脉冲的最佳腔内净色散值后,将小信号增益系数 g_0 从 30 m^{-1} 线性增加到 40 m^{-1} ,以探讨不同小信号增益对脉冲输出性能的影响,仿真结果如图 6 所示。可以发现:脉冲峰值功率、脉冲宽度、对应的脉冲能量以及 3 dB 光谱宽度随小信号增益的增加而增加;当小信号增益由 30 m^{-1} 增加到 40 m^{-1} 时,自相似脉冲峰值功率从 630 W 增加到 644 W,与之对应的脉冲能量从 12.4 nJ 增加到 16.5 nJ, 3 dB 光谱宽度从 16.05 nm 展宽到 16.7 nm。这表明适当增大小信号增益有利于激光器输出高功率、高能量的自相似脉冲。

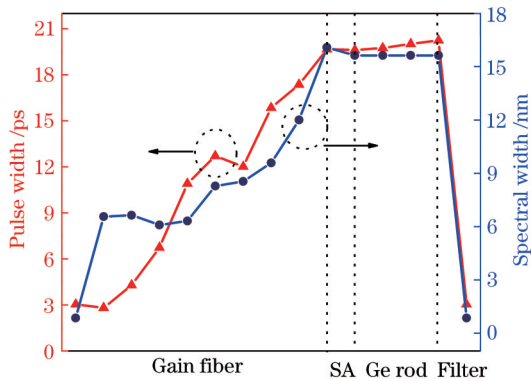


图 5 脉冲宽度以及光谱宽度在腔内的演化

Fig. 5 Evolution of pulse width and spectral width in the cavity

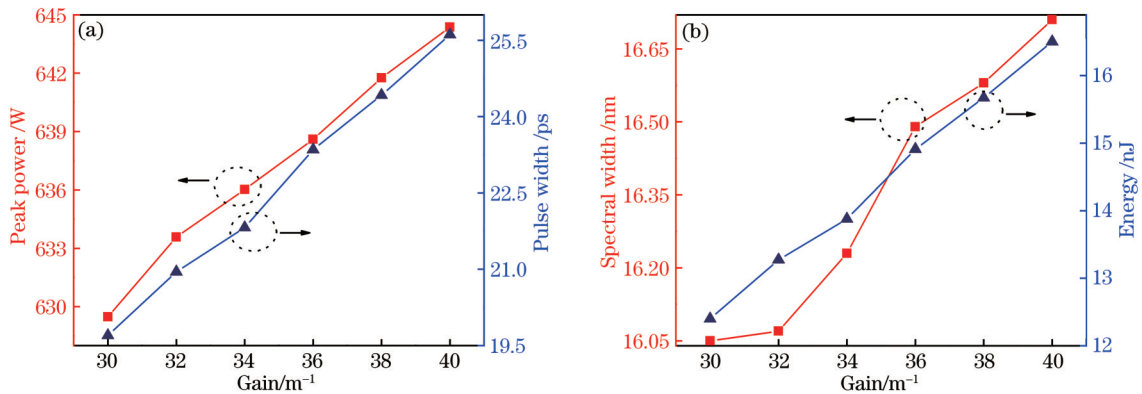


图 6 小信号增益对输出脉冲的影响。(a) 小信号增益对峰值功率和脉冲宽度的影响；(b) 小信号增益对 3 dB 光谱宽度和脉冲能量的影响

Fig. 6 Effect of small-signal gain on the output pulse. (a) Effect of small-signal gain on peak power and pulse width; (b) effect of small-signal gain on 3 dB spectral bandwidth and pulse energy

3.2 增益饱和和能量对输出特性的影响

保持小信号增益 $g_0=30\text{ m}^{-1}$ 不变,将光纤增益饱和和能量从 360 pJ 线性增加到 420 pJ,以探讨增益饱和和能量对输出脉冲性能的影响,结果如图 7 所示。可以发现,脉冲峰值功率、脉冲宽度、对应的脉冲能量以及 3 dB 光谱宽度随增益饱和能量的增加而增加。其中,脉冲

峰值功率从 630 W 增加到 637 W,脉冲宽度从 19.7 ps 展宽到 22.6 ps,脉冲能量从 12.4 nJ 增加到 14.4 nJ,3 dB 光谱宽度从 16.05 nm 展宽至 16.25 nm。这表明适当提高增益饱和能量有利于激光器输出高功率、高能量的自相似脉冲。

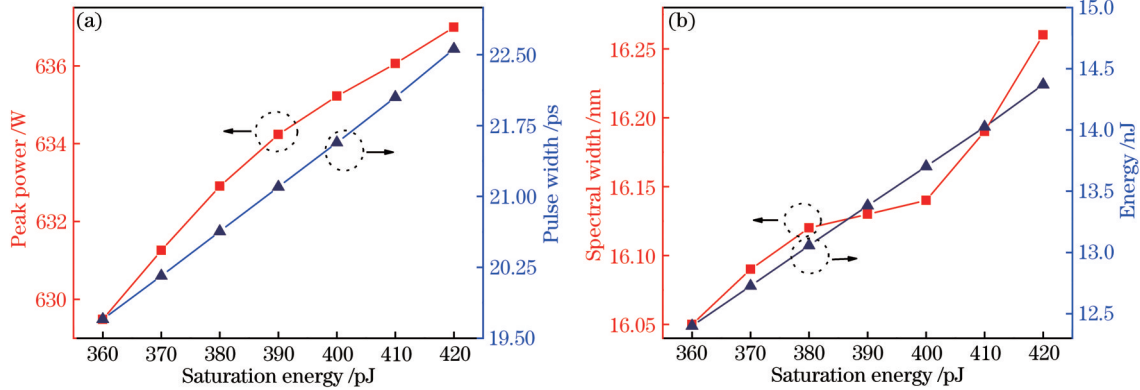


图 7 饱和和能量对输出脉冲的影响。(a)饱和能量对峰值功率和脉冲宽度的影响;(b)饱和能量对 3 dB 光谱宽度和脉冲能量的影响
Fig. 7 Effect of saturation on the output pulse. (a) Effect of saturation energy on peak power and pulse width; (b) effect of saturation energy on 3 dB spectral bandwidth and pulse energy

3.3 SA 调制深度对输出特性的影响

除泵浦能量外,SA 可饱和吸收参数同样对激光器输出特性有着重要的影响。保持小信号增益 $g_0=30\text{ m}^{-1}$ 、饱和能量 $E_{\text{sat}}=360\text{ pJ}$ 不变,通过改变 SA 调制深度 (q_0) 和 SA 饱和功率 (P_{sat}),研究了不同条件下 SA 对输出脉冲特性的影响。当 $P_{\text{sat}}=45\text{ W}$,将 SA 调制深度从 0.3 缓慢增加到 0.7 时的仿真结果如图 8 所示。

可以发现,随 SA 调制深度的增大,脉冲的峰值功率从 442 W 线性增加到 802 W,脉冲宽度从 28 ps 窄化至 14 ps,脉冲能量从 12.6 nJ 降低到 11.4 nJ。即调制深度越大,SA 的吸收效应越强,导致输出脉冲越窄,同时腔内的损耗也越大,对应的单脉冲能量降低。这表明使用高调制深度的 SA 有利于获得高功率、窄脉宽的锁模脉冲,但也容易导致损耗过大。

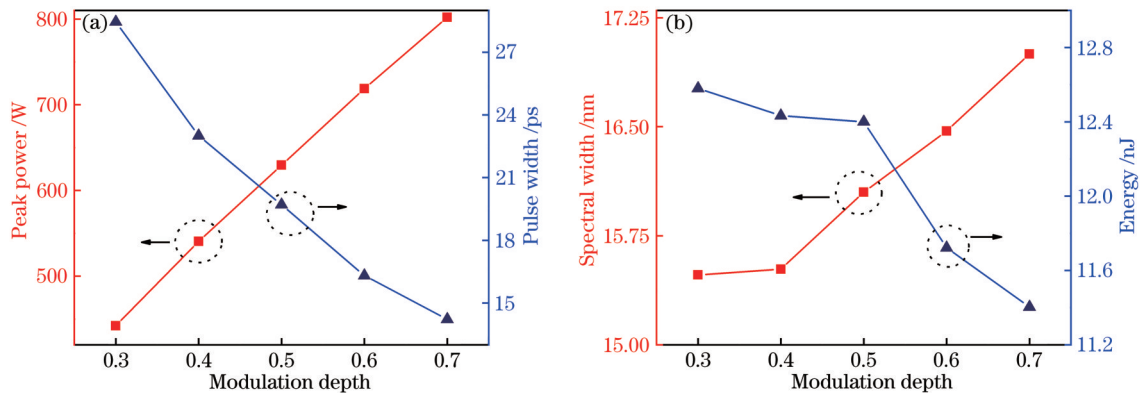


图 8 调制深度对输出脉冲的影响。(a)调制深度对峰值功率和脉冲宽度的影响;(b)调制深度对 3 dB 光谱宽度和脉冲能量的影响
Fig. 8 Effect of modulation on the output pulse. (a) Effect of modulation depth on peak power and pulse width; (b) effect of modulation depth on 3 dB spectral bandwidth and pulse energy

3.4 SA 饱和功率对输出特性的影响

保持 SA 调制深度 $q_0=0.5$ 不变,将 SA 饱和功率从 30 W 线性增加到 75 W,仿真结果如图 9 所示。可以发现,输出脉冲峰值功率从 498 W 增加到 858 W,脉冲宽度从 25 ps 窄化至 14 ps。随着饱和功率的增加,3 dB 光谱宽度逐渐从 15.8 nm 展宽至 17.1 nm。此外,SA 的饱和功率越高,SA 越难被漂白,损耗越高,脉冲

能量从 12.5 nJ 下降到 12.0 nJ。这表明用高饱和功率的 SA 有利于激光器输出高功率的锁模脉冲,但同时也面临损耗增加的问题。

综上所述,SA 的参数(调制深度和饱和功率)变化对激光器输出特性有着重要影响,SA 调制深度和 SA 饱和功率对锁模脉冲的峰值功率以及脉冲宽度的影响尤为明显。因此,选择合适的可饱和吸收体有利于在

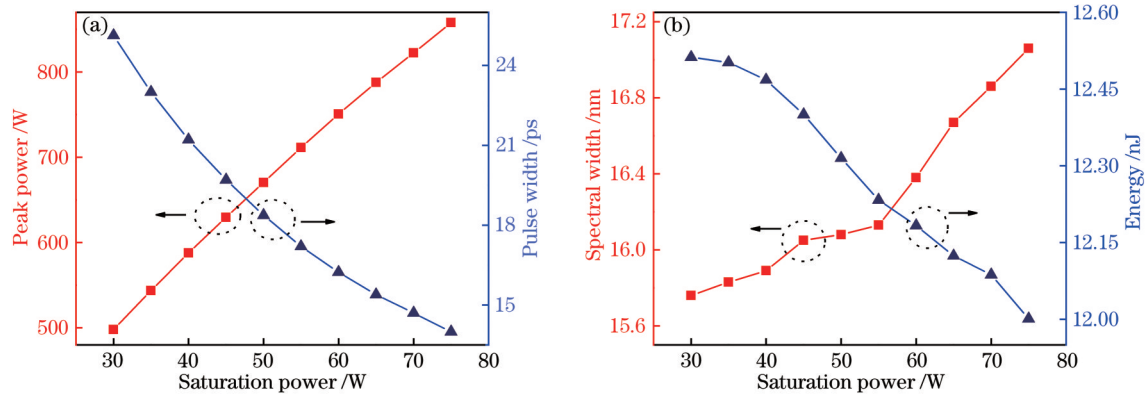


图 9 SA 饱和功率对输出脉冲的影响。(a) SA 饱和功率对峰值功率和脉冲宽度的影响；(b) SA 饱和功率对 3 dB 光谱宽度和脉冲能量的影响

Fig. 9 Effect of SA's saturation power on the output pulse. (a) Effect of SA's saturation power on peak power and pulse width; (b) effect of SA's saturation power on 3 dB spectral bandwidth and pulse energy

中红外波段获得高峰值功率、窄脉宽的自相似锁模脉冲。

4 结 论

利用锗棒对基于 SA 锁模的掺铒氟化物光纤激光器进行色散补偿,数值研究了激光器中自相似脉冲的产生及演化过程。保持腔内净色散为 0.03 ps^2 时,光纤激光器可获得抛物线形状最理想的脉冲,其脉冲宽度为 19.7 ps 、峰值功率为 630 W 、脉冲能量为 12.4 nJ 。为进一步优化激光器输出特性,还研究了增益光纤的小信号增益系数、增益饱和能量以及 SA 的调制深度、饱和功率对激光器自相似锁模脉冲输出特性的影响。研究表明:在可获得自相似锁模脉冲的合理范围内,增益光纤的小信号增益系数越大、增益饱和能量越高,越有利于获得高峰值功率、高脉冲能量的自相似锁模脉冲;SA 的调制深度越大、饱和功率越高,越有利于获得高峰值功率、窄脉宽的自相似锁模脉冲。该研究结果为自相似锁模掺铒氟化物光纤激光器的设计提供一定的参考。

参 考 文 献

- [1] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. Nature Photonics, 2008, 2(4): 219-225.
- [2] Jackson S D. Towards high-power mid-infrared emission from a fibre laser[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 423-431.
- [3] Serebryakov V A, Boiko 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.
- [4] 樊浩泽, 梁金辉, 郑树锴, 等. $2.8 \mu\text{m}$ 中红外同步泵浦锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2021, 49(1): 0101020. Fan H Z, Li J H, Zheng S K, et al. $2.8 \mu\text{m}$ mid-infrared synchronously pumped mode-locked fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 49(1): 0101020.
- [5] Tokita S, Murakami M, Shimizu S, et al. 12 W Q-switched Er: ZBLAN fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2812-2814.
- [6] 黄园芳, 彭跃峰, 魏星斌, 等. 瓦级连续波 $2.8 \mu\text{m}$ 中红外 Er: ZBLAN 光纤激光器[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0502007. Huang Y F, Peng Y F, Wei X B, et al. Watt-level continuous-wave $2.8 \mu\text{m}$ mid-infrared Er: ZBLAN fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(5): 0502007.
- [7] Wei C, Zhu X S, Norwood R A, et al. Passively continuous-wave mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3849-3851.
- [8] Tang P H, Qin Z P, Liu J, et al. Watt-level passively mode-locked Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ [J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4855-4858.
- [9] Zhang T, Feng G Y, Zhang H, et al. $2.78 \mu\text{m}$ passively Q-switched Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser based on PLD-Fe²⁺: ZnSe film[J]. Laser Physics Letters, 2016, 13(7): 075102.
- [10] Shen Y L, Wang Y S, Chen H W, et al. Wavelength-tunable passively mode-locked mid-infrared Er³⁺-doped ZBLAN fiber laser[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14913.
- [11] Aydin Y O, Fortin V, Vallée R, et al. Towards power scaling of $2.8 \mu\text{m}$ fiber lasers[J]. Optics Letters, 2018, 43(18): 4542-4545.
- [12] Yang L Y, Zhang B, Wu T Y, et al. Watt-level mid-infrared supercontinuum generation from 2.7 to $4.25 \mu\text{m}$ in an erbium-doped ZBLAN fiber with high slope efficiency[J]. Optics Letters, 2018, 43(13): 3061-3064.
- [13] Qin Z P, Xie G Q, Gu H A, et al. Mode-locked $2.8\text{-}\mu\text{m}$ fluoride fiber laser: from soliton to breathing pulse[J]. Advanced Photonics, 2019, 1(6): 065001.
- [14] Guo C Y, Wei J C, Yan P G, et al. Mode-locked fiber laser at $2.8 \mu\text{m}$ using a chemical-vapor-deposited WSe₂ saturable absorber mirror[J]. Applied Physics Express, 2020, 13(1): 012013.
- [15] Huang J, Pang M, Jiang X, et al. Route from single-

- pulse to multi-pulse states in a mid-infrared soliton fiber laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 26392-26404.
- [16] Li J F, Luo H Y, Wang L L, et al. Mid-infrared passively switched pulsed dual wavelength Ho³⁺-doped fluoride fiber laser at 3 μm and 2 μm [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10770.
- [17] Wang Y C, Jobin F, Duval S, et al. Ultrafast Dy³⁺: fluoride fiber laser beyond 3 μm [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(2): 395-398.
- [18] 罗鸿禹, 李剑峰. 中红外锁模氟化物光纤激光器研究进展[J]. *中国激光*, 2021, 49(1): 0101003.
Luo H Y, Li J F. Progress on mid-infrared mode-locked fluoride fiber lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 49(1): 0101003.
- [19] Aydın Y O, Fortin V, Maes F, et al. Diode-pumped mid-infrared fiber laser with 50% slope efficiency[J]. *Optica*, 2017, 4(2): 235-238.
- [20] Haboucha A, Fortin V, Bernier M, et al. Fiber Bragg grating stabilization of a passively mode-locked 2.8 μm Er³⁺: fluoride glass fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3294-3297.
- [21] Hu T, Hudson D D, Jackson S D. Stable, self-starting, passively mode-locked fiber ring laser of the 3 μm class [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(7): 2133-2136.
- [22] Yin K, Jiang T, Zheng X, et al. Mid-infrared ultra-short mode-locked fiber laser utilizing topological insulator Bi₂Te₃ nano-sheets as the saturable absorber[EB/OL]. (2015-05-23)[2021-02-04]. <https://arxiv.org/abs/1505.06322>.
- [23] Zhu G W, Zhu X S, Wang F Q, et al. Graphene mode-locked fiber laser at 2.8 μm [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(1): 7-10.
- [24] Duval S, Bernier M, Fortin V, et al. Femtosecond fiber lasers reach the mid-infrared[J]. *Optica*, 2015, 2(7): 623-626.
- [25] Hu T, Jackson S D, Hudson D D. Ultrafast pulses from a mid-infrared fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(18): 4226-4228.
- [26] Antipov S, Hudson D D, Fuerbach A, et al. High-power mid-infrared femtosecond fiber laser in the water vapor transmission window[J]. *Optica*, 2016, 3(12): 1373-1376.
- [27] Woodward R I, Hudson D D, Fuerbach A, et al. Generation of 70-fs pulses at 2.86 μm from a mid-infrared fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(23): 4893-4896.
- [28] Qin Z P, Xie G Q, Zhao C J, et al. Mid-infrared mode-locked pulse generation with multilayer black phosphorus as saturable absorber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(1): 56-59.
- [29] Gu H A, Qin Z P, Xie G Q, et al. Generation of 131 fs mode-locked pulses from 2.8 μm Er: ZBLAN fiber laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(3): 031402.
- [30] Huang J, Pang M, Jiang X, et al. Sub-two-cycle octave-spanning mid-infrared fiber laser[J]. *Optica*, 2020, 7(6): 574-579.
- [31] 杨昌盛, 岑旭, 徐善辉, 等. 单频光纤激光器研究进展 [J]. *光学学报*, 2021, 41(1): 0114002.
Yang C S, Cen X, Xu S H, et al. Research progress of single-frequency fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(1): 0114002.
- [32] 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.
- [33] 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(1/2): 58-73.
- [34] Agueraray C, Méchin D, Kruglov V, et al. Experimental realization of a mode-locked parabolic Raman fiber oscillator[J]. *Optics Express*, 2010, 18(8): 8680-8687.
- [35] Chong A, Liu H, Nie B, et al. Pulse generation without gain-bandwidth limitation in a laser with self-similar evolution[J]. *Optics Express*, 2012, 20(13): 14213-14220.
- [36] Feng J, Xu W C, Liu W C, et al. Analytical self-similar solutions of the Ginzburg-Landau equation with three-order dispersion effect[J]. *Chinese Optics Letters*, 2010, 8(1): 89-92.
- [37] Deng Y X, Tu C H, Lü F Y, et al. Study of self-similar pulse nonlinear polarization rotation mode-locked fiber laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(5): 3173-3178.
- [38] Renninger W H, Chong A, Wise F W. Self-similar pulse evolution in an all-normal-dispersion laser[J]. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2010, 82(2): 021805.
- [39] Wu G, Tian X J, Gao B, et al. Characteristics of soliton evolution in the wave-breaking-free regime in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(9): 094202.
- [40] Wang D S, Wu G, Gao B, et al. Interaction of a parabolic-shaped pulse pair in a passively mode-locked Yb-doped fiber laser[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(1): 014207.
- [41] Liu H, Liu Z W, Lamb E S, et al. Self-similar erbium-doped fiber laser with large normal dispersion[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1019-1021.
- [42] 石郑楠, 延凤平, 韩文国, 等. 高功率掺 Tm³⁺ 自相似脉冲激光器的仿真优化设计[J]. *发光学报*, 2020, 41(6): 719-728.
Shi Z N, Yan F P, Han W G, et al. Optimal design and simulation of high power Tm³⁺ self-similar pulse laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(6): 719-728.
- [43] Ma C Y, Khanolkar A, Chong A. High-performance tunable, self-similar fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1234-1236.
- [44] Limpert J, Schreiber T, Clausnitzer T, et al. High-power femtosecond Yb-doped fiber amplifier[J]. *Optics Express*, 2002, 10(14): 628-638.
- [45] Tang Y X, Chong A, Wise F W. Generation of 8 nJ pulses from a normal-dispersion thulium fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(10): 2361-2364.
- [46] Liu L S, Li X L, Zhang S M, et al. Optimal design of high energy similariton thulium-doped fiber lasers[C]// 2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conference, September 3-6, 2019, Shenzhen, China. New York:

- IEEE Press, 2019: 19-22.
- [47] Chai T, Li X H, Guo P L. Investigation of mid-infrared parabolic pulse evolution in a mode-locked Er-doped fiber laser based on the nonlinear polarization rotation technique[J]. Journal of Optics, 2019, 21(2): 025501.
- [48] Li X L, Zhang S M, Yang Z J. Optimal design of similariton fiber lasers without gain-bandwidth limitation [J]. Optics Express, 2017, 25(15): 18410-18420.
- [49] Wang P, Yao S Y, Grellu P, et al. Pattern formation in 2- μm Tm Mamyshv oscillators associated with the dissipative Faraday instability[J]. Photonics Research, 2019, 7(11): 1287-1295.