



## 中红外可调谐大能量飞秒脉冲激光产生

周华, 姚传飞, 贾志旭, 吴长锋, 秦冠仕, 秦伟平

引用本文:

周华, 姚传飞, 贾志旭, 等. 中红外可调谐大能量飞秒脉冲激光产生[J]. *发光学报*, 2020, 41(4): 435–441.

ZHOU Hua, YAO Chuan-fei, JIA Zhi-xu, et al. Mid-infrared Tunable High Pulse Energy Femtosecond Pulse Laser Generation[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(4): 435–441.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204104.0435>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 级联单模光纤中初始啁啾对高阶孤子脉冲压缩的影响

Effect of Initial Frequency Chirp on Pulse Compression of Higher-order Solitons in Cascaded Single-mode Fibers

发光学报. 2016, 37(11): 1360–1366 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163711.1360>

### 掺杂光子晶体光纤产生光孤子所需泵浦功率的研究

Theoretical Study of Pump Power Used to Obtain Optical Solitons in Doped Photonic Crystal Fiber

发光学报. 2014, 35(4): 496–500 <https://doi.org/10.3788/fgxb20143504.0496>

### 全固态被动调Q皮秒激光技术研究进展

Research Progress of All-solid-state Passively Q-switched Picosecond Laser Technology

发光学报. 2013, 34(7): 900–910 <https://doi.org/10.3788/fgxb20133407.0900>

### 色散平坦渐减光纤中非线性啁啾脉冲的传输及超连续谱的产生

Nonlinear Chirped-pulse Propagation and Supercontinuum Generation in Dispersion-flattened Dispersion-decreasing Fibers

发光学报. 2016, 37(4): 439–445 <https://doi.org/10.3788/fgxb20163704.0439>

### 飞秒脉冲激光辐照FRAM诱发的毁伤效应及热演化

Damage Effects and Thermal Evolution of FRAM Irradiated by Femtosecond Pulsed Laser

发光学报. 2019, 40(6): 815–825 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194006.0815>

文章编号: 1000-7032(2020)04-0435-07

## 中红外可调谐大能量飞秒脉冲激光产生

周 华<sup>1</sup>, 姚传飞<sup>2</sup>, 贾志旭<sup>1</sup>, 吴长锋<sup>3</sup>, 秦冠仕<sup>1\*</sup>, 秦伟平<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012;

2. 北京工业大学 激光工程研究院, 北京 100022 3. 南方科技大学 生物医学工程系, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 可调谐中红外飞秒光纤激光器具有非常普遍的应用, 从而引起了人们的广泛关注。目前, 非线性光纤中的拉曼孤子自频移效应是实现大范围可调谐飞秒脉冲激光的理想方法之一。然而, 非线性光纤中其他高阶非线性效应的产生通常会限制拉曼孤子脉冲的能量提升。本文提出了利用有源掺杂光纤作为非线性介质和增益介质实现可调谐大能量中红外飞秒激光脉冲的方法。在理论上研究了有源掺杂非线性光纤中高阶孤子劈裂和孤子自频移效应的产生, 以及线性增益对波长移动拉曼孤子能量、脉宽、光谱的影响。结果表明, 通过为波长红移的低能量拉曼孤子提供线性增益, 孤子脉冲的能量得到了显著提升且保持了其单脉冲特性, 脉冲宽度为 45 fs, 且孤子脉冲的波长可通过所提供的增益进行大范围调谐。因此, 利用有源掺杂光纤作为非线性介质是实现大能量可调谐中红外飞秒脉冲激光的一种有效方法。

**关键词:** 中红外飞秒脉冲; 可调谐; 孤子自频移效应; 线性增益

**中图分类号:** TN929.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20204104.0435

## Mid-infrared Tunable High Pulse Energy Femtosecond Pulse Laser Generation

ZHOU Hua<sup>1</sup>, YAO Chuan-fei<sup>2</sup>, JIA Zhi-xu<sup>1</sup>, WU Chang-feng<sup>3</sup>, QIN Guan-shi<sup>1\*</sup>, QIN Wei-ping<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China;

2. Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;

3. Department of Biomedical Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

\* Corresponding Author, E-mail: qings@jlu.edu.cn

**Abstract:** Mid-infrared tunable femtosecond fiber laser has attracted many attentions for widely applications. Recently, Raman soliton self-frequency shifting effect in nonlinear fibers was regarded as a promising approach to obtain such pulse laser. However, other higher order nonlinear effects occurred in fibers will limit the pulse energy promoting. So, to further enhance the pulse energy of Raman soliton, we proposed a novel method where the rare-earth doped nonlinear fiber was used as nonlinear medium. We numerically investigated the impacts of the optical gain on the pulse energy, pulse width and spectrum of the wavelength shifting Raman soliton. The results show that as the Raman soliton shifted into the wavelength range where the optical gain introduced, the pulse energy of the soliton pulse was enlarged by several times, and the pulse width was compressed to 45 fs. Meanwhile, the wavelength of the femtosecond Raman soliton pulse can be widely tuned by changing the optical net gain. Therefore, by using rare-earth doped fiber as the nonlinear medium and gain medium, we can achieve the generation of mid-infrared tunable high pulse energy femtosecond pulse laser.

**Key words:** mid-infrared femtosecond pulse; tunable; soliton self-frequency shifting effects; optical gain

收稿日期: 2019-12-08; 修订日期: 2020-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61378004, 61527823, 61605058, 61827821)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61378004, 61527823, 61605058, 61827821)

## 1 引 言

由于在基础科学研究、环境监测、分子光谱学以及光电对抗等领域有着非常广泛的应用前景,可调谐中红外飞秒激光近年来引起了人们的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。过去几十年,人们利用光参量振荡器、光参量放大器及差频技术等均实现了可调谐中红外超短脉冲激光的输出<sup>[7-9]</sup>。然而,以上产生方式均需要复杂的相位匹配条件和空间光路结构,造成激光器系统的稳定性较差,难以满足复杂环境中的实际应用。

因此,为了克服以上问题,人们探索了大量全光纤的中红外超短脉冲激光产生技术,如可调谐波长的锁模光纤激光器、级联拉曼光纤激光器以及孤子自频移等非线性频率转换技术<sup>[10-12]</sup>。然而,由于关键中红外光纤器件研制技术尚未突破,可调谐中红外锁模光纤激光器目前仍未完全实现全光纤集成化,且锁模激光器的调谐波长受稀土离子增益带宽的限制,难以实现大范围波长调谐;利用中红外光纤中孤子自频移效应则可实现波长的大范围连续调谐,成为了实现中红外超短脉冲激光输出的理想手段。

光纤中的孤子自频移效应指的是光脉冲在反常色散光纤中传输时,脉冲经历自相位调制效应引入的正啁啾以及光纤色散提供的负啁啾,当二者达到平衡时,光脉冲将以稳定的孤子形态进行传输;当孤子的频谱范围覆盖了光纤基质的拉曼增益谱,则孤子的蓝端频率成分会作为泵浦光,使孤子的红端频率得到增益,进而使孤子的中心波长向低频波段连续移动<sup>[13]</sup>。基于孤子自频移效应,研究人员报道了大量的中红外可调谐超短脉冲激光输出。2016年,Tang采用2 μm飞秒光纤激光器作为泵浦激光,以及ZBLAN玻璃光纤作为非线性介质,实现了波长覆盖2~4.3 μm的可调谐拉曼孤子激光,脉冲最大峰值功率达75 kW<sup>[14]</sup>。2018年,Li等采用2 μm飞秒光纤激光器泵浦自制的氟磷酸盐玻璃光纤,实现了波长为2~2.8 μm的大范围可调谐拉曼孤子激光<sup>[15]</sup>。2016年,Duval采用大能量3 μm飞秒激光作为泵浦脉冲,在大芯径ZBLAN光纤中实现了瓦量级的中红外可调谐拉曼孤子激光输出<sup>[16]</sup>。

尽管许多研究人员在实验方面做出了大量的努力,并取得了一些成果。然而,实验研究通常受

限于实验条件的限制,因此,为了进一步探索提升拉曼孤子激光性能的新机理和新方法,人们纷纷在理论层面开展了大量高性能中红外可调谐飞秒激光产生的研究工作。2014年,Liu在理论上设计了一种无截止单波特性的ZBLAN光子晶体光纤,并将其作为非线性介质,理论研究了利用1.93 μm飞秒脉冲泵浦时,可以实现1.93~3.95 μm的连续可调拉曼孤子激光<sup>[17]</sup>。2019年,Han在理论上研究了基于磷酸盐光纤中孤子自频移效应的宽调谐、高转换效率的中红外拉曼孤子激光产生,研究表明,通过优化脉冲参数和光纤长度可以实现3.5~5 μm的可调谐激光,最大转换效率高达50%<sup>[18]</sup>。

以上研究结果均是通过设计非线性光纤的色散和非线性系数以及优化泵浦激光的参数来提升拉曼孤子激光的转换效率和能量,在一定程度上获得性能优异的拉曼孤子脉冲。然而,以上方法在本质上仍然无法避免拉曼孤子激光能量提升和非线性光纤中其他高阶非线性效应之间的竞争关系<sup>[19]</sup>。因此,进一步探索大幅度提升拉曼孤子激光的新方法仍然具有重要的意义。

本文提出一种实现大能量可调谐中红外拉曼孤子激光的方法,并对其进行了验证。首先,我们设计了一种掺杂 $\text{Tm}^{3+}$ 的高非线性光纤结构,光纤基模的零色散波长为1 466 nm,1 550 nm处的群速度色散值为 $-25.38 \text{ ps}^2/\text{km}$ ,光纤中 $\text{Tm}^{3+}$ 的 ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 能级跃迁的增益波段为1 620~2 050 nm;之后,我们修正了非线性薛定谔方程,引入了具有波长依赖关系的稀土离子增益和吸收;最后模拟了 $\text{Tm}^{3+}$ 的增益对高非线性光纤中产生的可调谐拉曼孤子激光性能的影响。模拟结果显示,与无源高非线性光纤中的拉曼孤子激光相比,线性增益的引入不仅能大幅度提升可调谐拉曼孤子激光的能量,同时可大范围调控拉曼孤子激光的中心波长。结果表明,利用有源掺杂光纤作为非线性介质和增益介质可实现大能量可调谐中红外飞秒脉冲激光。

## 2 理论模型

### 2.1 增益调控孤子自频移效应原理

为了获得大能量中红外拉曼孤子激光,我们首先研究了增益调控孤子自频移效应的机理和方法。图1为增益调控大能量中红外拉曼孤子脉冲产生原理示意图,所使用的非线性介质为掺杂

$Tm^{3+}$  的高非线性光纤, 同时  $Tm^{3+}$  的  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  能级跃迁可以提供 1 620 ~ 2 050 nm 波段的线性光增益, 从而对频移至该波段的孤子进行能量调控。理论模型中, 泵浦光源由波段位于 1 550 nm 的飞秒脉冲和连续波激光器(如 1 570 nm 或 793 nm 的半导体激光器)组成。其中 1 550 nm 飞秒脉冲光源在光纤的反常色散区泵浦, 可产生孤子自频移效应; 而连续波激光器泵浦  $Tm^{3+}$  可产生 1 620 ~ 2 050 nm 的线性增益。

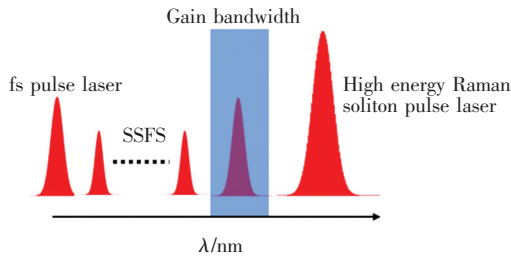


图1 增益调控大能量中红外拉曼孤子脉冲产生原理示意图

Fig.1 Schematic of high energy mid-infrared Raman soliton pulse generation manipulated by optical gain

进一步地, 为了描述有源掺杂光纤中特定波段的线性增益对非线性效应的调控作用, 我们修正了非线性薛定谔方程, 如下式:

$$\frac{\partial A(z, T)}{\partial z} - \frac{1}{2}(g - \alpha)A(z, T) - \sum_{n \geq 2} \frac{i^{n-1}}{i^n} \beta_n \frac{\partial^n A(z, T)}{\partial T^n} = i \left( \gamma + i\gamma_1 \frac{\partial}{\partial T} \right) \cdot \left[ A(z, T) \int_0^\infty R(T') |A(z, T - T')|^2 dT' \right], \quad (1)$$

其中,  $A(z, T)$  是脉冲包络的慢变振幅,  $g$  为波长依赖的光增益系数,  $\alpha$  为光纤损耗系数,  $\beta_n$  代表光纤第  $n$  阶色散系数,  $\gamma$  为频率相关的光纤非线性系数,  $\gamma_1$  为与自变陡效应有关的参数,  $R(T')$  为与拉曼效应有关的非线性效应函数。通过求解公式(1)即可对有源掺杂非线性光纤中的孤子自频移效应进行描述。

### 2.2 $Tm^{3+}$ 掺杂非线性光纤结构设计和表征

在以上模型中, 选择和设计合适的非线性光纤是实现增益调控孤子自频移效应的关键。基于此, 我们采用本课题组研制的氟碲酸盐玻璃作为非线性光纤的基质材料, 氟碲酸盐玻璃具有较大的非线性折射率、较宽的红外透过窗口以及高的稀土离子掺杂浓度, 是一种理想的中红外玻璃材料。根据理论模型中对非线性光纤色散、非线性

系数以及受限损耗的要求, 我们设计了一种阶跃型氟碲酸盐玻璃光纤, 纤芯和包层玻璃材料分别为  $70TeO_2-20BaF_2-9.5Y_2O_3-0.5Tm_2O_3$  (TBYT) 和  $90(AlF_3-YF_3-CaF_2-BaF_2-SrF_2-MgF_2)-10TeO_2$  (ABCYSMT), 玻璃的折射率和热学参数参见课题组前期工作<sup>[20]</sup>, 光纤的纤芯直径为 4  $\mu m$ ,  $LP_{01}$  模式的非线性系数为  $480.8 W^{-1} \cdot km^{-1}$ 。我们使用全矢量有限差分法计算了光纤  $LP_{01}$  模式的群速度色散, 群速度色散曲线如图 2(a) 所示, 光纤的零色散波长为 1 466 nm, 1 550 nm 的飞秒泵浦脉冲位于光纤的反常色散区。此外, 我们通过求解氟碲酸盐光纤中  $Tm^{3+}$  的速率方程和 1 570 nm 连续波泵浦光与信号光的传输方程, 得到了当 1 570 nm 激光功率为 2 W 时,  $Tm^{3+}$  在氟碲酸盐玻璃光纤中的增益谱曲线, 如图 2(b) 所示, 图中增益值大小由 1 570 nm 泵浦激光功率决定。

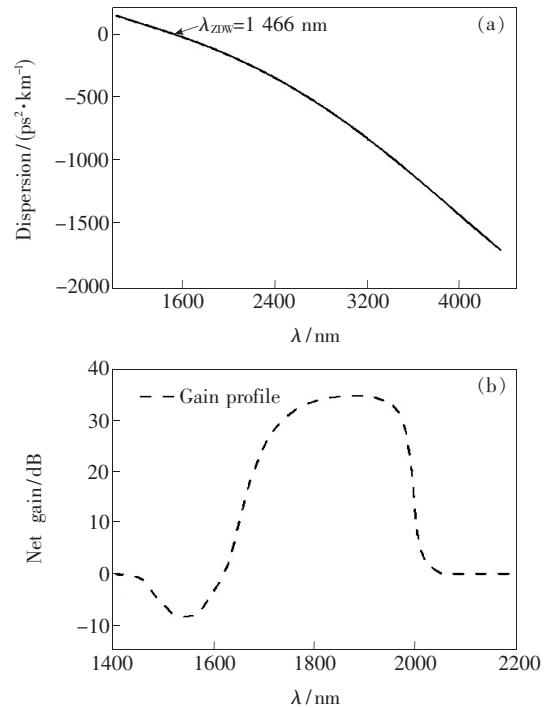


图2 (a) 高非线性光纤  $LP_{01}$  模式的群速度色散曲线; (b) 高非线性光纤中  $Tm^{3+}$  的增益曲线。

Fig.2 (a) Group velocity dispersion curve of  $LP_{01}$  mode in high nonlinear fiber. (b) Net gain profile of  $Tm^{3+}$  in high nonlinear fiber.

## 3 数值模拟与结果分析

### 3.1 氟碲酸盐光纤中孤子自频移效应

首先, 我们研究了不施加线性光增益的情况下, 20 cm 长氟碲酸盐光纤中的拉曼孤子自频移

效应。模拟中,泵浦脉冲的波长为 1 550 nm,脉冲宽度为 100 fs,峰值功率设置为 700 W,程序中采用的群速度色散曲线为图 2(a)中所描述,此时入射脉冲的孤子阶数  $N = 11$ 。图 3(a)为氟碲酸盐光纤中飞秒泵浦脉冲沿光纤长度的频谱演化图,图 3(b)为相应的时域演化图。可以看出,在初始阶段,光谱在自相位调制的作用下发生了对称展宽,入射脉冲在时域上得到压缩。当继续传输至 3 cm 时,受高阶色散的微扰,脉冲发生了高阶孤子劈裂效应,产生了基阶拉曼孤子,由于此时拉曼孤子的光谱范围覆盖了氟碲酸盐玻璃的拉曼增益谱,发生了孤子自频移效应,获得了波长可调谐的拉曼孤子激光。此时,由于拉曼孤子经历光纤的反常色散区,其时域脉冲的群速度比泵浦脉冲要慢,时域脉冲相对零时刻逐渐走离,表现为时域和

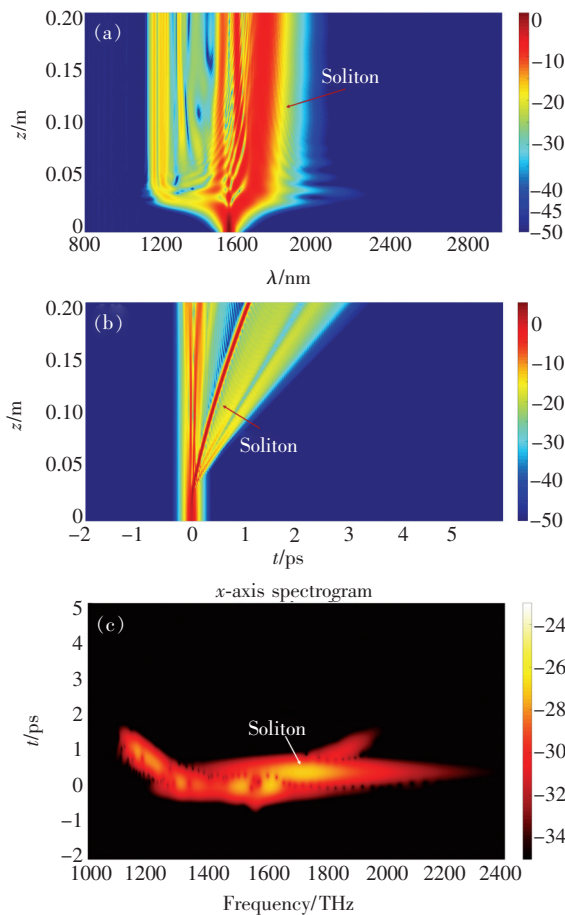


图 3 孤子自频移效应表征。(a) 频谱演化图;(b) 时域演化图;(c) 光纤输出端信号的时域分辨光谱图。

Fig. 3 Characterization of soliton self-frequency shifting effect. (a) Spectral evolution. (b) Temporal evolution. (c) The simulated spectrograms of output pulse from 20 cm nonlinear fiber.

频域均独立存在的超短脉冲。图 3(c)为 20 cm 氟碲酸盐光纤后输出脉冲的时域分辨光谱,图中拉曼孤子为无啁啾的双曲正割脉冲。

接下来,我们研究了峰值功率对产生的拉曼孤子激光性能的影响。图 4(a)为峰值功率为 700,1 000,1 600,2 000,4 000,6 000 W 时,氟碲酸盐光纤中产生的拉曼孤子激光的光谱图,图 4(b)为对应的时域脉冲曲线。随着峰值功率增加,拉曼孤子的中心波长逐渐向长波移动,峰值功率为 6 000 W 时,中心波长达 2 513 nm。随着峰值功率增加,产生的拉曼孤子脉冲的峰值功率由 1 368 W 增加到 3 618 W,最大单脉冲能量为 0.16 nJ。然而,随着入射脉冲峰值功率增加,拉曼孤子激光的转换效率则由 59.4% 单调降低至 26.9%,主要原因在于较高的峰值功率将使入射脉冲发生更高阶的非线性效应,如四波混频、交叉相位调制、多级孤子劈裂等,导致最先产生的拉曼孤子转换效率逐渐降低。

因此,单纯通过提升入射脉冲的峰值功率无法大幅度提升可调谐拉曼孤子激光的转换效率和

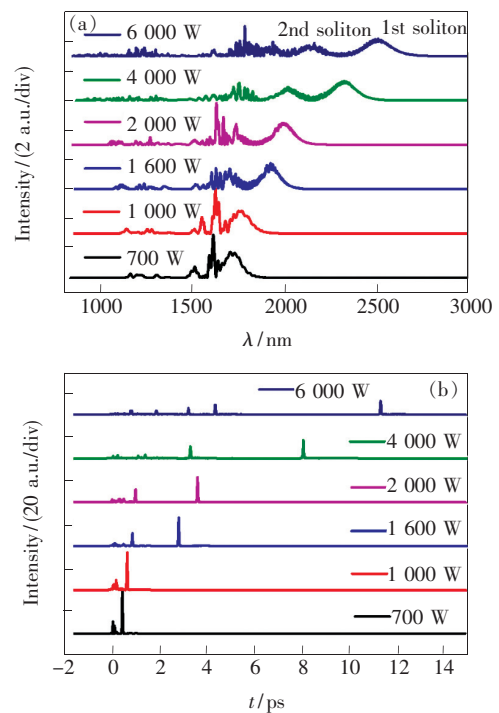


图 4 (a) 不同峰值功率时,拉曼孤子脉冲的光谱曲线;(b) 不同峰值功率时,拉曼孤子脉冲的时域脉冲曲线。

Fig. 4 (a) Spectra of Raman soliton pulse with different peak power of input femtosecond pulse. (b) Domain pulse curve of Raman soliton pulse with different peak power of input femtosecond pulse.

单脉冲能量。近年来,研究人员也通过优化脉冲宽度以及设计光纤群速度色散曲线的方式来实现大能量的拉曼孤子激光<sup>[11,21-22]</sup>,但仍然无法彻底突破高峰值功率下,高阶非线性效应引起的转换效率降低和单脉冲能量的限制。

### 3.2 增益对拉曼孤子脉冲性能的影响

我们研究了氟碲酸盐光纤中稀土离子增益对可调谐拉曼孤子激光性能的影响。在模拟中,入射脉冲的峰值功率设置为 700 W,在该峰值功率下,拉曼孤子的波长刚好落在  $Tm^{3+}$  的增益带宽内,且此时高阶非线性效应尚未发生。图 5(a)为模拟的稀土离子增益为 35 dB 时,入射脉冲光谱的演化图,而图 5(b)为相应的时域演化图。可以看出,在初始阶段,自相位调制、高阶孤子劈裂、孤子自频移等与无增益时基本一致,当劈裂出的孤子脉冲移动到  $Tm^{3+}$  的增益带宽内时,拉曼孤子感受到稀土离子的增益,能量被放大,进而拉曼孤子的红移加速度增大,拉曼孤子激光的中心波长最终移动至 2 874 nm。在模拟中,孤子红移速度增加主要是由峰值功率提高增大了非线性光纤中孤子频移量导致的。拉曼孤子频移量  $\Delta\nu_R$  沿光纤长度的表达式如下:

$$\frac{d\Delta\nu_R}{dz} = -\frac{4T_R(\gamma P_0)^2}{15\pi|\beta_2|}, \quad (2)$$

其中,  $dz$  为孤子传输距离,  $T_R$  为拉曼响应函数,  $P_0$  为孤子的峰值功率,  $\beta_2$  为光纤的群速度色散。

在时域上,拉曼孤子激光的单脉冲能量达到 0.3 nJ,且由于增益的引入,孤子脉冲的走离速度也加快。在该过程中,  $Tm^{3+}$  提供的线性增益仅仅改变了波长移动拉曼孤子脉冲的性质,并未引起新的孤子劈裂和孤子自频移等效应。

之后,我们研究了不同增益对拉曼孤子激光波长、峰值功率、单脉冲能量的影响。图 6(a)为增益分别为 0,5,15,25,35 dB 时,20 cm 氟碲酸盐光纤中输出的拉曼孤子激光的频域光谱,随着模型中所提供的  $Tm^{3+}$  增益逐渐增加,非线性光纤中孤子脉冲的中心波长由 1 735 nm 红移至 2 874 nm。图 6(b)为对应的孤子激光的时域脉冲曲线,随着增益增加,孤子激光的脉冲能量得到了放大,孤子脉冲的单脉冲能量由 0.04 nJ 提高至 0.32 nJ。

图 7 为增益值设置为 5,15,25,35 dB 时,20 cm 光纤输出光的时域分辨光谱图像,所获得的拉

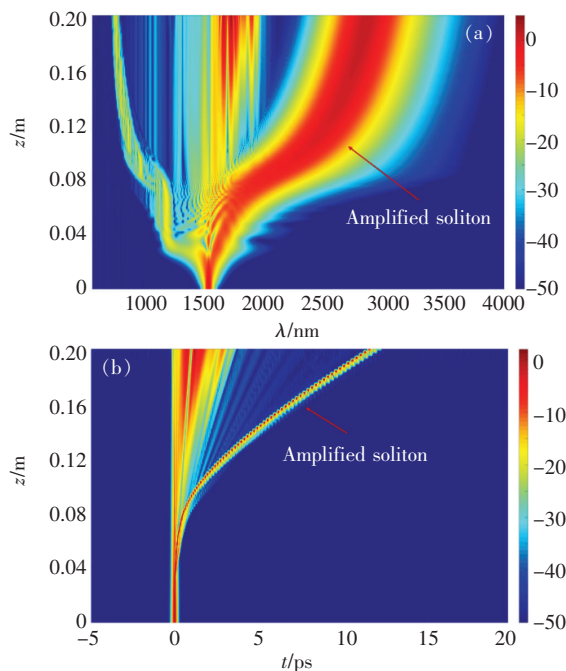


图 5 增益调控孤子自频移效应表征。(a) 频谱演化图; (b) 时域演化图。

Fig. 5 Characterization of soliton self-frequency shifting effect with 35 dB optical gain. (a) Spectral evolution. (b) Temporal evolution.

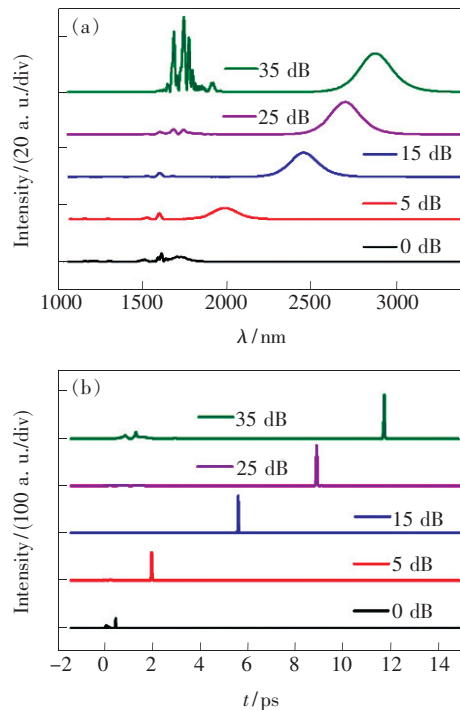


图 6 (a) 不同光增益时,拉曼孤子脉冲的光谱曲线;(b) 不同光增益时,拉曼孤子脉冲的时域脉冲曲线。

Fig. 6 (a) Spectra of Raman soliton pulse with different optical gain of  $Tm^{3+}$  doped nonlinear fiber. (b) Domain pulse curve of Raman soliton pulse with different optical gain of  $Tm^{3+}$  doped nonlinear fiber.

曼孤子相对于入射脉冲发生了逐渐走离,孤子能量逐渐得到放大。在整个过程中,拉曼孤子激光表现为一种无啁啾的超短脉冲激光状态,脉冲宽度仅为 45 fs。模拟结果表明非线性光纤中的线性增益可以实现对孤子自频移效应产生多方面调控,进而获得大能量可调谐的超短脉冲激光。

综上所述,我们建立了  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂非线性光纤中放大的孤子自频移效应产生大能量可调谐中红外拉曼孤子激光的模型,模拟中所实现的中红外

拉曼孤子脉冲可以通过继续增加线性增益值来实现更大的波长调谐范围和单脉冲能量。在模拟结果中,拉曼孤子的能量主要受所采用的非线性光纤参数的限制,未来我们将进一步设计色散曲线和非线性系数合适的非线性光纤,进而探索更大单脉冲能量拉曼孤子激光产生的潜力。此外,我们将设计和制备参数合理的高非线性光纤,并搭建实验装置,最终获得大能量、波长大范围可调谐的中红外超短脉冲激光输出。

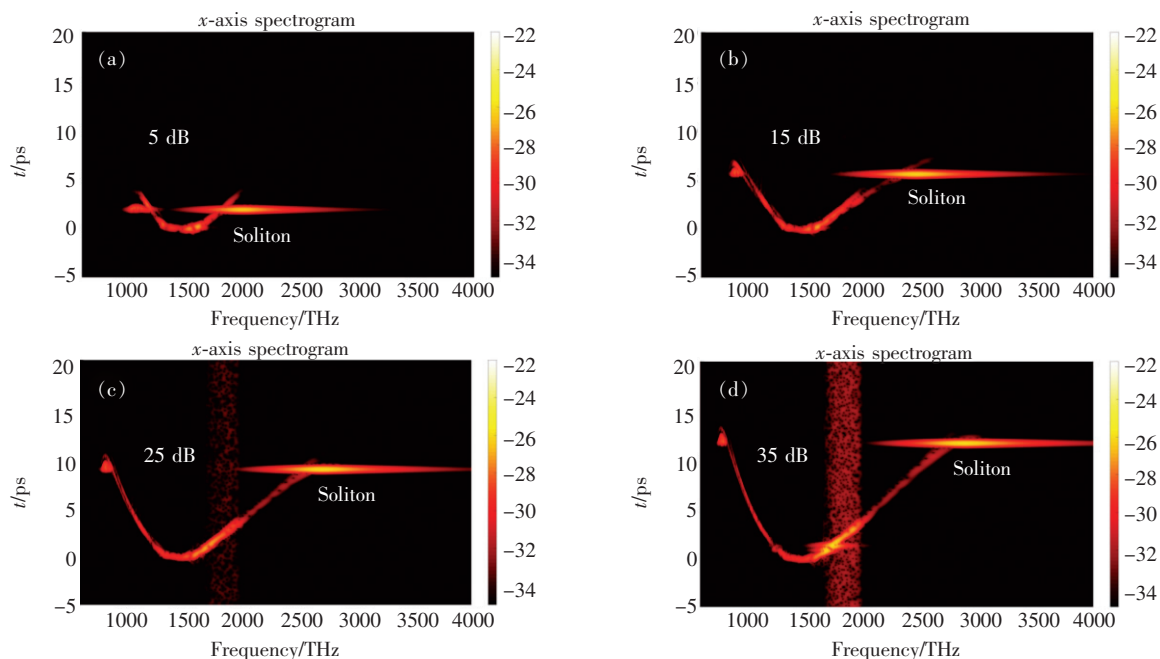


图 7 光增益分别为 5 (a), 15 (b), 25 (c), 35 (d) dB 时, 光纤输出端信号的时域分辨光谱图。

Fig. 7 Simulated spectrograms of output pulse from 20 cm nonlinear fiber when the optical gain were set as 5 (a), 15 (b), 25 (c), 35 (d) dB.

## 4 结 论

本文提出一种实现大能量可调谐中红外飞秒脉冲激光的方法,并对其进行了理论验证。我们首先设计了一种  $\text{Tm}^{3+}$  掺杂的高非线性光纤,其中  $\text{Tm}^{3+}$  的  ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  能级跃迁可提供 1 620 ~ 2 050 nm 的宽带增益,光纤  $\text{LP}_{01}$  模式的零色散波长为

1 466 nm。当使用 1 550 nm 飞秒脉冲进行泵浦时,发生了明显的孤子自频移效应。当孤子的中心波长移动至  $\text{Tm}^{3+}$  的增益带宽时,孤子的能量被放大,且中心波长可随增益值不同实现大范围调谐。模拟结果表明,通过向孤子自频移效应提供线性增益是获得大能量中红外可调谐超短脉冲激光产生的有效技术手段。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] PIRES H, BAUDISCH M, SANCHEZ D, *et al.*. Ultrashort pulse generation in the mid-IR [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2015, 43: 1-30.
- [ 2 ] SIGRIST M W. Mid-infrared laser-spectroscopic sensing of chemical species [J]. *J. Adv. Res.*, 2015, 6(3): 529-533.
- [ 3 ] 布玛丽亚·阿布力米提, 向梅. 飞秒时间分辨实验中泵浦-探测交叉相关函数的测量和时间零点的确定 [J]. *发光学报*, 2017, 38(5): 648-654.

BUMALIYA · ABULIMITI B, XIANG M. Determine the pump-probe cross correlation function and the zero of time of the

- pump and probe laser in femtosecond time-resolved studies [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(5):648-654. (in Chinese)
- [4] PANAGIOTOPOULOS P, WHALEN P, KOLESIK M, *et al.*. Super high power mid-infrared femtosecond light bullet [J]. *Nat. Photonics*, 2015, 9(8):543-548.
- [5] CHAN M C, LIEN C H, LU J Y, *et al.*. High power NIR fiber-optic femtosecond Cherenkov radiation and its application on nonlinear light microscopy [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(8):9498-9507.
- [6] 张扬, 钱静, 李鹏飞, 等. 飞秒激光诱导的  $Mn^{2+}$  掺杂铈酸盐玻璃上转换发光 [J]. *发光学报*, 2015, 36(7):738-743. ZHANG Y, QIAN J, LI P F, *et al.*. Upconversion luminescence of  $Mn^{2+}$  doped-germanate glass induced by femtosecond laser pulses [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(7):738-743. (in Chinese)
- [7] 谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(4):501-512. TAN G J, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. Recent progress in mid-infrared laser technology [J]. *Chin. Opt.*, 2013, 6(4):501-512. (in Chinese)
- [8] KUMAR S C, ESTEBAN-MARTIN A, IDEGUCHI T, *et al.*. Few-cycle, broadband, mid-infrared optical parametric oscillator pumped by a 20-fs Ti:sapphire laser [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2014, 8(5):L86-L91.
- [9] 潘其坤. 中红外固体激光器研究进展 [J]. *中国光学*, 2015, 8(4):557-566. PAN Q K. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chin. Opt.*, 2015, 8(4):557-566. (in Chinese).
- [10] ZHU X S, ZHU G W, WEI C, *et al.*. Pulsed fluoride fiber lasers at 3  $\mu m$  [Invited] [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2017, 34(3):A15-A28.
- [11] ANASHKINA E A, ANDRIANOV A V, KOPTEV M Y, *et al.*. Generating tunable optical pulses over the ultrabroad range of 1.6–2.5  $\mu m$  in  $GeO_2$ -doped silica fibers with an Er: fiber laser source [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(24):27102-27107.
- [12] ANASHKINA E A, ANDRIANOV A V, KOPTEV M Y, *et al.*. Generating femtosecond optical pulses tunable from 2 to 3  $\mu m$  with a silica-based all-fiber laser system [J]. *Opt. Lett.*, 2014, 39(10):2963-2966.
- [13] 高雪健, 王善德, 刘来, 等. 基于碲酸盐微结构光纤的超连续光源 [J]. *发光学报*, 2014, 35(11):1376-1381. GAO X J, WANG S D, LIU L, *et al.*. Supercontinuum light source based on tellurite microstructure fibers [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(11):1376-1381. (in Chinese)
- [14] TANG Y X, WRIGHT L G, CHARAN K, *et al.*. Generation of intense 100 fs solitons tunable from 2 to 4.3  $\mu m$  in fluoride fiber [J]. *Optica*, 2016, 3(9):948-951.
- [15] LI Z R, LI N, YAO C F, *et al.*. Tunable mid-infrared Raman soliton generation from 1.96 to 2.82  $\mu m$  in an all-solid fluorotellurite fiber [J]. *AIP Adv.*, 2018, 8(11):115001-1-6.
- [16] DUVAL S, GAUTHIER J C, ROBICHAUD L R, *et al.*. Watt-level fiber-based femtosecond laser source tunable from 2.8 to 3.6  $\mu m$  [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(22):5294-5297.
- [17] LIU L, QIN G S, TIAN Q J, *et al.*. Numerical investigation of mid-infrared Raman soliton source generation in endless single mode fluoride fibers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 115(16):163102-1-4.
- [18] HAN J, WEI C, CHI H, *et al.*. Theoretical simulations of the soliton self-frequency shift of mid-infrared femtosecond pulses in step-index tellurite optical fibers: broadband tunability and high efficiency [J]. *OSA Continuum*, 2019, 2(6):1851-1862.
- [19] HERRMANN J, GRIEBNER U, ZHAVORONKOV N, *et al.*. Experimental evidence for supercontinuum generation by fission of higher-order solitons in photonic fibers [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2002, 88(17):173901-1-4.
- [20] YAO C F, JIA Z X, LI Z R, *et al.*. High-power mid-infrared supercontinuum laser source using fluorotellurite fiber [J]. *Optica*, 2018, 5(10):1264-1270.
- [21] LI Y H, DU T J, XU B, *et al.*. Compact all-fiber 2.1–2.7  $\mu m$  tunable Raman soliton source based on germania-core fiber [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(20):28544-28550.
- [22] KONG D F, JIA D F, FENG D J, *et al.*. Numerical simulation and experimental studies on soliton self-frequency shift in single-mode optical fiber [C]. *Proceedings of SPIE 10825, Quantum and Nonlinear Optics V, Beijing, China*, 2018:1082511.



周华(1994–),女,山东潍坊人,硕士研究生,2016年于吉林大学获得学士学位,主要从事中红外超短脉冲光源及其生物医学方面应用的研究。

E-mail: zhouhua16@mails.jlu.edu.cn



秦冠仕(1976–),男,河南濮阳人,博士,教授,博士研究生导师,2004年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事特种光纤及其光子学器件方面的研究。

E-mail: qings@jlu.edu.cn