

啾啾光纤光栅在硫系光纤激光器中的色散补偿

曾江辉^{1,2}, 张培晴^{1,2}, 张倩^{1,2}, 李杏^{1,2}, 许银生^{1,2}, 王训四^{1,2}, 戴世勋^{1,2}

(1. 宁波大学 高等技术研究院 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211;
2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 中红外波段包含极其重要的大气窗口和众多分子的指纹区, 基于硫系玻璃的中红外光纤激光器逐渐引起人们的重视。由于硫系玻璃具有极高的非线性色散特性, 脉冲激光在硫系光纤中的展宽成为发展中红外超短激光必须解决的重要问题。针对脉冲激光在硫系光纤中传输的展宽问题, 设计线性啾啾光纤光栅, 用于补偿高斯脉冲激光经过光纤之后的色散展宽。模拟结果表明: 光纤色散导致的脉冲展宽可以通过线性啾啾光纤光栅进行很好的补偿。进一步研究发现, 通过对设计的啾啾光纤光栅运用高斯变迹函数进行切趾优化, 可以显著改善色散补偿的效果, 以获得对脉冲激光色散展宽的完全补偿。文中的研究对于设计高质量的硫系中红外光纤激光器具有理论指导意义。

关键词: 啾啾光纤布拉格光栅; 色散补偿; 中红外; 脉冲展宽; 光纤激光器
中图分类号: TN929.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1005007

Dispersion compensation of chirped fiber grating in chalcogenide fiber laser

Zeng Jianghui^{1,2}, Zhang Peiqing^{1,2}, Zhang Qian^{1,2}, Li Xing^{1,2}, Xu Yinsheng^{1,2}, Wang Xunsi^{1,2}, Dai Shixun^{1,2}

(1. Laboratory of Infrared Material and Device, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. Key Laboratory of Photoelectric Detecting Material and Device in Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: The mid infrared region covers the extraordinarily important atmospheric windows and has a wide range of molecular fingerprints, which has made the MIR laser based on chalcogenide glass attract considerable interest. In the development of infrared ultrashort laser, the solution of laser pulse broadening in chalcogenide glass fiber is critical, due to the high nonlinearity and dispersion properties of chalcogenide glass (ChG). In the paper, in order to settle the broadening of laser pulse, the chirped fiber grating was designed to compensate dispersion stretching of Gaussian pulse lasers due to transmitting in the fiber. The study shows that the dispersion caused by pulse broadening can be well compensated by chirped fiber grating. Further investigation suggests that the chirped fiber grating are optimized by using Gaussian apodization function to improve dispersion compensation and realize complete compensation to dispersion broadening. The research is a beneficial exploration to the design of high-quality chalcogenide mid-infrared fiber lasers and of theoretical significance.

Key words: chirped fiber Bragg grating; dispersion compensation; mid-infrared; pulse broadening; fiber laser

收稿日期: 2017-02-11; 修订日期: 2017-03-14

基金项目: 浙江省自然科学基金(LY18F050003); 宁波市自然科学基金(2017A610004); 宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 曾江辉(1992-), 男, 硕士生, 主要从事硫系光纤光栅的制备及应用方面的研究。Email: 1639678812@qq.com

导师简介: 张培晴(1983-), 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事红外光学材料及器件方面的研究。Email: zhangpeiqing@nbu.edu.cn

0 引言

在通信波段范围内,不论是光纤激光器,还是用于抽运的高功率激光器都已经发展的相当成熟。如在石英玻璃光纤材料、磷酸盐玻璃光纤和碲酸盐玻璃光纤中都实现了不同功率和不同模式的光纤激光器^[1-4]。但是 2~5 μm 中红外波段是十分重要的大气窗口,可用于激光测距、激光雷达和大气通信,也是大多数军用探测器的工作波段^[5]。为了更好地利用红外大气窗口,激光源的质量是相当重要的,而中红外光纤激光器及光纤拉曼激光器因特殊的输出波长和良好的光束质量,逐渐成为了研究热点。2 μm 波段的激光对人眼是安全的,且 2 μm 波段的高功率光纤激光器也可作为中红外激光源的抽运源,从而可实现 1~5 μm 波段范围的激光输出^[6]。为了获得中红外激光源,则要求使用声子能量低、在中红外波段透过范围宽和传输损耗小的光纤。而最常用的中红外光纤为氟化物光纤和硫化物光纤,氟化物光纤受本身特性的影响,其激光的输出范围在 2~3 μm ;若需要产生高于 4 μm 的激光,只能用硫化物光纤^[7]。

在硫系材料中掺稀土离子是获得中红外荧光甚至激光的重要途径,国内外也一直在致力于这方面的研究,有望获得高效中红外激光介质材料^[8-9],且在稀土掺杂的光纤激光器中大部分使用光栅对或光子晶体的方式进行腔外色散控制^[10]。虽然稀土掺杂硫系玻璃一直以来被视为 3~5 μm 光源激光增益介质的理想材料,但迄今为止,还没有能够在稀土掺杂的硫系材料中实现中红外波段的激光输出。主要原因在于稀土离子在硫系玻璃中的溶解度不高、浓度猝灭效应及杂质对稀土离子中红外辐射跃迁的影响以及材料本身的性能有待提高^[11]。因此各国研究人员充分利用硫系材料非线性效应高的特点,也致力研究基于受激拉曼散射(SRS)效应的光纤拉曼激光器。硫系拉曼效应最早于 1977 年报道^[12],2006 年广泛受到关注^[13]。经过十年的研究,基于硫系材料的光纤拉曼激光器已经得到了快速的发展,激光的输出波长在不断地扩展、激光的输出功率也在不断提高。

在中红外光纤拉曼激光器的制作过程中,采用光纤布拉格光栅作为谐振腔可实现全光纤结构,并能提高激光效率,且结构小巧、便于集成。例如,2006年, Jackson 等用石英光纤激光器对 As-Se 光纤拉曼激光特性进行了实验研究,抽运源的工作波长为 2 051 nm,

最终产生了 2 062 nm 的一阶拉曼激光、2 102 nm 的二阶拉曼激光和 2 166 nm 的三阶拉曼激光^[13]。2010年,国内的电子科技大学李剑锋等人利用波长为 2 μm 泵浦光对 As-Se 光纤进行抽运,得到了 2.101 μm 的斯托斯克光^[14];并于 2011 年对相同实验参数的模型进行了理论分析与数值仿真,为实际的硫系拉曼激光器提供了理论指导和最佳参数设计^[15]。2012 年拉瓦尔大学的 COPL 研究小组利用 800 nm 的飞秒激光和相位掩膜版技术在 As_2S_3 单模光纤聚合物护套中刻写三个布拉格光纤光栅^[16],用于输入腔镜和输出腔镜,首次获得了大于 3 μm 的拉曼激光^[17]。不论是光纤激光器还是光纤拉曼激光器,在激光器的谐振腔中,随着腔内净色散增加脉冲宽度展宽,光谱变窄,峰值功率降低,尤其对于超短脉冲激光器的影响是比较大的,最终可能会使得激光器的性能恶化。但是目前有关中红外超短脉冲激光器的研究都没进行腔内色散控制,如果能在腔内进行色散控制则可以获得脉宽更窄、峰值功率更高的脉冲输出^[18]。而线性啁啾光纤光栅作为一种非均匀的光纤光栅,不但具有均匀光纤光栅的基本特点,而且因其特殊的结构具有色散补偿的功能。因此在今后光纤激光器的设计中,可以选择啁啾光纤光栅作为谐振腔的输入腔镜,既具有谐振腔的功能(对泵浦光源波长高透过,而对激光的波长高反射),也能起到色散补偿的作用,从而更高质量的超短脉冲获得是有望的。但受光纤光栅与光纤之间的熔接问题、低损耗硫系光纤的制备以及高质量中红外波段光纤光栅的稀缺等因素的限制^[19],国内外还未见有关硫系啁啾光纤光栅作为谐振腔的中红外光纤激光器或光纤拉曼激光器的报道。

文中基于获得中红外高质量超短脉冲光纤激光器的背景下,对光纤的色散和啁啾光纤光栅的理论进行了研究分析。通过数值仿真设计了一个谐振波长在中红外波段的线性啁啾光纤光栅,并运用其对超短脉冲在光纤传输过程中的展宽进行补偿。实现了厘米级甚至毫米级的啁啾光纤光栅就能对长距离的光纤进行色散补偿,若参数设置合理则能完全补偿色散给脉冲造成的展宽。充分体现了啁啾光纤光栅色散补偿的优越性。

1 理论分析

1.1 光纤色散及高斯脉冲在光纤中的传输特性

光纤色散是指构成光信号的各种成分在光纤具

有不同传输速度的现象。在单模光纤中,主要由光信号中不同频率成分的传输速度不同引起,包括材料折射率随频率变化和波导效应两个方面的贡献,偏振模色散也是单模光纤色散的主要部分。而多模光纤中,与单模光纤相比,由于不同模式的传输速度不同而引起模间色散。从数学意义上,光纤的色散效应是通过在脉冲频谱的中心频率 ω_0 附近将模传输常数 $\beta(\omega)$ 展开成泰勒级数。

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (1)$$

式中:

$$\beta_m = \left(\frac{d^m \beta}{d\omega^m} \right)_{\omega = \omega_0} \quad (m=0, 1, 2, \dots) \quad (2)$$

在上式中参量 β_2 表示群速度的色散,其是造成脉冲展宽的主要原因,它与色散参量 D 的关系如公式(3)所示。

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \quad (3)$$

利用仿真软件,对硫系光纤的有效折射率和色散曲线模拟仿真,其结果如图 1 所示,其中光纤的包层材料为 As_2S_3 、纤芯材料为 As_2Se_3 , 纤芯直径为 $10 \mu m$,纤包比为 1:20。

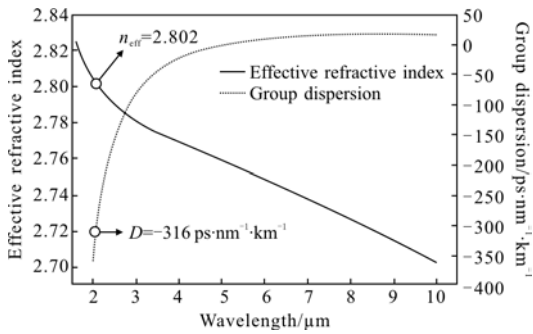


图 1 As_2Se_3 光纤的有效折射率曲线和色散曲线

Fig.1 As_2Se_3 fiber effective refractive index and dispersion curves

脉冲在光纤中传输时,色散、损耗和非线性效应是三个主要的传输特性。光纤的损耗运用 TDFA 进行中继放大达到补偿作用^[20];常用的色散补偿器件是色散补偿光纤和啁啾光纤光栅,但色散补偿光纤的补偿能力有限,且损耗和非线性大,而啁啾光纤光栅的补偿量大,仅需厘米级的长度可补偿数千米的光纤色散,且其具有插入损耗低、体积小、与光纤的兼容性好、不受光纤非线性影响及与偏振无关等优点。由非线性薛定谔(NLS)方程可知,对于高斯脉冲,其方程

可简化为:

$$i \frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{i\alpha}{2} A + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} - \gamma |A|^2 A \quad (4)$$

式中: A 为脉冲包络的慢变振幅; α 为光纤损耗; β_2 为光纤的二阶群速度色散(GVD)参量; T 是随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度。方程的右边三项分别描述了光脉冲在光纤中传输时的光纤损耗、色散效应和非线性效应。为了方便,引入如下两个参量:

$$L_D = \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \quad (5)$$

$$L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_0}$$

式中: L_D 和 L_{NL} 分别表示色散长度和非线性长度; T_0 为初始脉宽; β_2 为群速度色散参量; γ 为非线性参量; P_0 为输入的峰值功率。

无初始啁啾的高斯脉冲时域表达式为:

$$U(0, T) = \exp\left(-\frac{T^2}{2T_0^2}\right) \quad (6)$$

高斯脉冲在光纤中传输距离 z 之后的振幅时域表达式变为:

$$U(z, T) = \frac{T_0}{(T_0^2 - i\beta_2 z)^{1/2}} \exp\left[-\frac{T^2}{2(T_0^2 - i\beta_2 z)}\right] \quad (7)$$

比较公式(3)和公式(4)可知,高斯脉冲在传输过程中其形状保持不变,但脉宽 T_1 随 z 增加,其表达式变为:

$$T_1(z) = T_0 [1 + (z/L_D)^2]^{1/2} \quad (8)$$

上式表明 GVD 导致高斯脉冲展宽,而其展宽程度取决于公式(5)中的色散长度 L_D 。对于一定的光纤长度,结合公式(5)和(8)可以看出,脉冲越短,则色散长度 L_D 越小,因而其展宽程度越大,图 2 所示为高斯脉冲在光纤中传输时的演变过程。

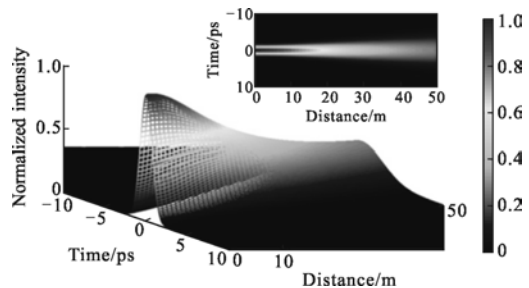


图 2 高斯脉冲在光纤传输过程中的演变,插图是脉冲归一化强度随传输距离的关系图

Fig.2 Evolution of Gaussian pulse along with optical fiber transmission, inset is the relationship between pulse normalized intensity and transmission distance

1.2 啾啾光纤光栅的理论结构

光纤光栅是一种新型的光纤器件，其形成机理是利用光纤材料的光敏性（外界入射光子和纤芯内离子相互作用引起折射率的永久性变化），在纤芯内形成空间相位光栅，其作用实质是在纤芯内形成一个窄带的（透射或反射）滤波或反射镜。而啾啾光纤光栅是一种非均匀的光纤光栅，其光栅的周期随光栅位置逐渐变化，若周期沿 Z 轴线性变化，则为线性啾啾光纤光栅，否则称为非线性啾啾光纤光栅。线性啾啾光纤光栅的周期表达式如下：

$$\Lambda' = \Lambda \left(1 - \frac{F}{L} z \right) \quad 0 < z < L \quad (9)$$

式中：L 为光栅的长度；Λ 为光栅起始端的周期；F 为啾啾系数，反映啾啾的大小，也是光栅的最大周期与最小周期的相对变化量，线性啾啾光纤光栅的结构示意图如图 3 所示。



图 3 线性啾啾光纤布拉格光栅的结构

Fig.3 Structure of linearly chirped fiber Bragg grating

当光纤光栅工作在反射状态时，由于耦合而引起谐振反射，由啾啾光纤光栅的结构可知，不同波长的脉冲在带宽内不同的位置发生发射。如果补偿的是反常色散区，则应使脉冲从啾啾光纤光栅周期大的一端入射，使得红移分量比蓝移分量经历的时延小；反之，若补偿的是正常色散区，应使脉冲从啾啾光纤光栅周期小的一端入射，使红移分量比蓝移分量经历的时延大^[21]。而啾啾光纤光栅以这种方式放置时，其色散特性刚好与常规光纤的色散特性相反，从而起到色散补偿作用。其色散补偿示意图如图 4 所示^[22]。

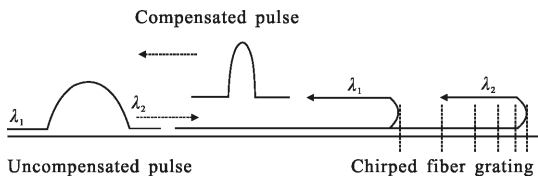


图 4 啾啾布拉格光纤光栅的色散补偿原理

Fig.4 Dispersion compensation principle of chirped Bragg fiber grating

脉冲经过啾啾光纤光栅的时延可以表示为：

$$\tau(\lambda) = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\varphi}{d\lambda} \quad (10)$$

式中：c 为光速；φ 为两相邻波长的相位差。而光纤光栅的色散表示时延随波长的变化率，即：

$$D = \frac{d\tau}{d\lambda} = \frac{2\pi}{\lambda} - \frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2\varphi}{d\lambda^2} \quad (11)$$

由图 4 可知脉冲经过光栅后的最大时延为：

$$\tau_{max} = \frac{2L}{v_g} \quad (12)$$

式中：L 为光栅的长度；v_g 为光脉冲在光纤中传输的平均群速度。

2 结果及讨论

从上面的分析可知一个无初始啾啾的光脉冲经过光纤之后，受光纤色散的影响，在传输过程中会产生啾啾从而导致脉冲展宽。作为用于色散补偿的啾啾光纤光栅，只要参数、结构设置合理，就能完全补偿脉冲在光纤中的展宽。由于非均匀周期光栅没有解析解，所以利用传输矩阵法分析啾啾光纤布拉格光栅的谱特性，且借助于 matlab 软件对其进行数值仿真计算。首先假设一个 3 ps 无初始啾啾的超短脉冲，经过一段色散曲线如图 1 所示的硫系光纤之后，而光纤长度在 10~50 m 的范围内变化，在波长 2.062 μm 处，光纤的色散参数 D=-316 ps/(nm·km)，若不考虑非线性和高阶色散的影响，其脉冲的展宽情况如图 5 所示。由图 5 可以看出：对于超短脉冲来说，虽然光

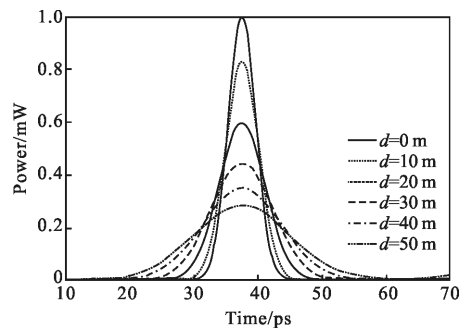


图 5 脉冲在不同长度的硫系光纤中传输时的展宽曲线

Fig.5 Broadening curves of pulse in the chalcogenide fiber with different lengths

纤的长度不是很长，但光纤的色散对脉冲展宽是很明显的，因此对超短脉冲进行色散补偿是很有必要的。若取光纤长度为 40 m，结合公式(3)、(5)、(8)可知，脉冲经过光纤之后脉宽展宽到 9.97 ps，展宽后的

脉宽相当于初始脉宽的 3 倍多, 而且脉冲的幅度也会大幅下降。

因此针对上述高斯脉冲的实际展宽情况, 且依据硫系光纤的基本参数、脉冲的基本情况设置啁啾光纤光栅的参数。在 matlab 软件中, 利用传输矩阵法, 模拟了一段 As_2Se_3 啁啾光纤光栅, 其中模拟仿真的参数如下: 啁啾光纤光栅的谐振中心波长 λ_{Bragg} 为 $2.062 \mu m$, 光栅长度 L 为 $8 mm$, 啁啾系数 F 为 0.004 , 光纤光栅的周期 Λ 为 $433 nm$ 、调制深度 Δn 为 0.002 、有效折射率 n_{eff} 为 2.8 。最后得到的反射谱和时延曲线如图 6 所示。

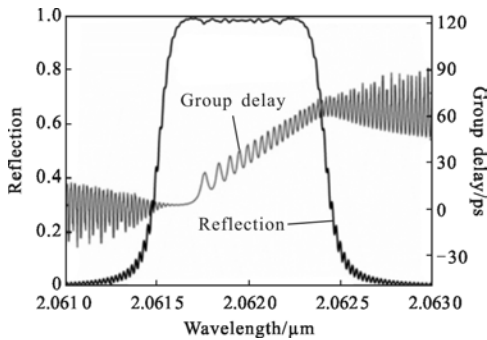


图 6 线性啁啾光纤光栅的反射谱和时延曲线
Fig.6 Calculated reflectivity spectrum and group delay curve for linearly chirped fiber grating

由图 6 可以观察到, 在反射谱的带宽内, 光栅反射谱的顶端出现不平滑的特性, 同时时延曲线在带宽内有强烈的抖动现象。而这种现象产生的原因主要是因为耦合系数为常数, 导致光栅两端的折射率突变引起了法布里-珀罗效应。当然这种现象对于色散补偿是非常不利的。

为了更好地补偿展宽的脉冲, 必须把线性啁啾光纤光栅时延曲线的抖动消除掉。因此可采取切趾操作对光栅的结构优化, 文中采取高斯函数进行高斯变迹仿真, 使原来的常耦合系数变成高斯型的耦合系数, 即

$$\kappa(z) = \kappa_0 e^{-G\left(\frac{z}{L}\right)^2} \quad (13)$$

在取 $G=32$, 其余参数不变的条件下, 切趾后的反射谱和时延曲线如图 7 所示, 对比图 6 和图 7 可以看出, 优化后的啁啾光纤光栅旁瓣减小, 且带宽内时延曲线的抖动现象基本上消除。但是切趾优化后的反射峰值有所下降, 时延变小, 但只要这两个参数

在合理的范围内变动, 对啁啾光纤光栅的性能是没有太大影响的。而在带宽内的时延变小, 会导致啁啾光纤光栅的补偿能力有所下降, 因此在选取 G 的值时, 并不是越大越好, 而是需要结合实际补偿量、时延曲线的线性度等方面综合考虑, 最终确定一个最佳的 G 值。

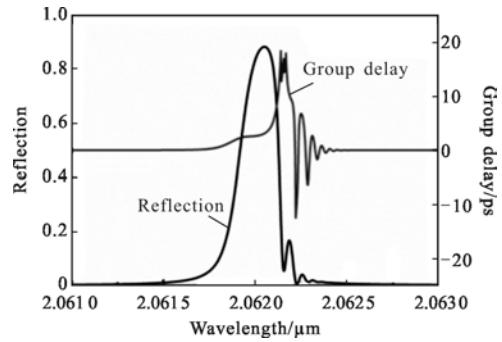


图 7 切趾后的啁啾光纤光栅反射谱和时延曲线
Fig.7 Calculated reflectivity spectrum and group delay curve for an apodized chirped fiber grating

由图 6 可以计算出一段 $8 mm$ 长的啁啾光纤光栅, 其色散值为 $39.5 ps/nm$, 而高斯变迹后, 由图 7 计算可知其色散值为 $15 ps/nm$ 。为了能够利用所设计的切趾啁啾光纤光栅对展宽后的超短高斯脉冲进行色散补偿, 利用上述相同的仿真参数, 在 OptiSystem 仿真软件中, 搭建虚拟的实验平台, 以便进行脉冲补偿研究。为了能够更加清晰的看到超短脉冲经过啁啾光纤光栅之后的补偿情况, 在脉冲经过硫系光纤后, 可以利用掺 Tm 光纤放大器 (TDFA) 对脉冲进行中继放大, 使得补偿后的脉冲强度与初始脉冲的强度相当^[23]。最终得到图 8 所示的结果, 由上述一系列

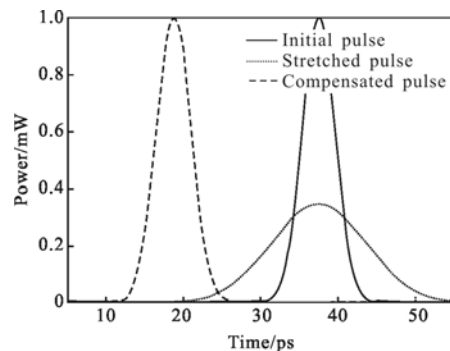


图 8 高斯脉冲经过线性啁啾光纤光栅后的补偿结果
Fig.8 Compensation result for Gaussian pulse transmission of a linear chirped fiber grating

的仿真分析可知,啁啾光纤光栅作为补偿光纤色散的器件,因其色散补偿量大,可降低色散补偿中的成本,且对于提高中红外超短脉冲激光器的激光质量很有价值。

3 结 论

在未来科技、军事以及民生生活中,为了更好地应用中红外波段,需要高质量的中红外激光源。虽然目前国内外很多科研单位报道了以光纤光栅作为谐振腔的中红外光纤激光器,但是当脉冲在增益介质中来回振荡形成激光的过程中,其脉冲宽带会受光纤的色散影响而展宽。若选择一种既可作谐振腔,又能对脉冲整形压缩的啁啾布拉格光纤光栅作为光纤激光器的谐振腔,那么输出的激光质量会更进一步提高。基于该背景,文中从光纤光栅、光纤色散、脉冲的传输理论出发,设计了一种谐振中心波长在中红外波段的硫系啁啾光纤光栅,并对其进行了结构优化和色散补偿能力的数值仿真。在一根 8 mm 长的线性啁啾光纤光栅切趾模型下,模拟结果表明,其具有很强的色散补偿能力,能够用于中红外光纤激光器的谐振腔,有望获得更高质量的中红外激光。因此该研究对今后中红外光纤激光器的优化设计和广泛应用具有一定的理论指导意义。

参考文献:

- [1] Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, et al. All-fiber mid-infrared supercontinuum source from 1.9 μm to 4.3 μm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(11): 1102013. (in Chinese)
张斌, 杨未强, 侯静, 等. 1.9~4.3 μm 全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 1102013.
- [2] Xu S H, Yang Z M, Zhang W N, et al. 400 mW ultrashort cavity low-noise single-frequency Yb^{3+} -doped phosphate fiber laser[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(18): 3708–3710.
- [3] Yu Feng, Sun Chang, Gao Jing, et al. All-fiber ultra-short super-continuum generation and characters [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(11): 3555–3558. (in Chinese)
于峰, 孙畅, 高静, 等. 全光纤结构超短脉冲超连续谱的产生极其特性研究 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(11): 3555–3558.
- [4] Xu S H, Yang Z M, Xu W C, et al. Laser characteristics of cladding-pumped short $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ codoped single mode phosphate glass fibre [J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26(1): 014203.
- [5] Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 501–512. (in Chinese)
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.
- [6] Zhang Mingjie, Yang Anping, Zhang Bin, et al. 3–5 μm luminescence of Dy^{3+} -doped Ga–Sb–S chalcogenide glasses [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0806001. (in Chinese)
张鸣杰, 杨安平, 张斌, 等. Dy^{3+} 掺杂 Ga–Sb–S 玻璃的 3~5 μm 发光研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0806001.
- [7] Xu Yantao, Guo Haitao, Lu Min, et al. Preparation and properties of low-loss core-cladding structural Ge–Sb–Se chalcogenide glass fibers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 182–187. (in Chinese)
许彦涛, 郭海涛, 陆敏, 等. 低损耗芯包结构 Ge–Sb–Se 硫系玻璃光纤的制备与性能研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 182–187.
- [8] Aggarwal I D, Sanghera J S. Development and applications of chalcogenide glass optical fibers at NRL [J]. *J Optoelectron Adv Mater*, 2002, 4(3): 665–678.
- [9] Moizan V, Nazabal V, Troles J, et al. Er^{3+} -doped GeGaSbS glasses for mid-IR fibre laser application: synthesis and rare earth spectroscopy[J]. *Optical Materials*, 2008, 31(1): 39–46.
- [10] Wang Junli, Lv Zhiguo, Bo Xiangbao. Recent progress on rare earth doped femtosecond fiber lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(10): 48–57. (in Chinese)
王军利, 吕志国, 卜祥宝. 稀土离子掺杂飞秒光纤激光器最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 48–57.
- [11] Calvez L, Ma H L, Lucas J, et al. Selenium-based glasses and glass ceramics transmitting light from the visible to the far-IR[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(1): 129–132.
- [12] Nemanich R J. Low-frequency inelastic light scattering from chalcogenide glasses and alloys[J]. *Physical Review B*, 1977, 16(4): 1655–1674.
- [13] Jackson S D, Anzueto-Sánchez G. Chalcogenide glass Raman fiber laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(22): 1486.
- [14] Li Jianfeng, Chen Ming, Chen Yu, et al. Theoretical analysis and optimization of mid-infrared chalcogenide fiber Raman laser pumped at 2 μm [J]. *The Journal of Light Scattering*, 2010, 22(3): 220–226. (in Chinese)
李剑峰, 陈明, 陈玉, 等. 2 μm 泵浦中红外硫化玻璃光纤拉曼激光器的理论分析与优化[J]. 光散射学报, 2010, 22(3):

- 220–226.
- [15] Li J, Chen Y, Chen M, et al. Theoretical analysis and heat dissipation of mid-infrared chalcogenide fiber Raman laser [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(5): 1278–1283.
- [16] Bernier M, El-Amraoui M, Couillard J, et al. Writing of Bragg gratings through the polymer jacket of low-loss As_2S_3 fibers using femtosecond pulses at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(18): 3900–3902.
- [17] Bernier M, Fortin V, Caron N, et al. Mid-infrared chalcogenide glass Raman fiber laser [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(2): 127–129.
- [18] Wang Shaoqi, Deng Ying, Zhang Yongliang, et al. Theoretical study on generating mid-infrared ultrashort pulse in mode-locked Er^{3+} : ZBLAN fiber laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(4): 044206. (in Chinese)
王少奇, 邓颖, 张永亮, 等. 掺 Er^{3+} 氟化物光纤振荡器中红外超短脉冲的产生 [J]. *物理学报*, 2016, 65(4): 044206.
- [19] Liu Cong, Wei Chen, Luo Hongyu, et al. Progress of mid-infrared Raman fiber lasers [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(10): 7–12. (in Chinese)
刘聪, 韦晨, 罗鸿禹, 等. 中红外光纤拉曼激光器的研究进展 [J]. *激光杂志*, 2015, 36(10): 7–12.
- [20] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition & Application of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Transl. 2nd edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010: 26–36, 479–488. (in Chinese)
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用 [M]. 贾东方, 余震虹. 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 26–36, 479–488.
- [21] Zhang Yan, Pei Li, Wang Yiqun, et al. Optimization of optical triangular pulses generator based on chirped fiber Bragg grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1306–1310. (in Chinese)
张岩, 裴丽, 王一群, 等. 基于啁啾 FBG 的三角形光脉冲发生器的优化设计 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1306–1310.
- [22] Zhang Xin, Yang Zhi, Li Qianglong, et al. Research on temperature tuning properties of chirped fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0505002. (in Chinese)
张新, 杨直, 李强龙, 等. 啁啾光纤光栅的温度调谐特性研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0505002.
- [23] Liu Jiang, Wang Pu. Thulium-doped all-fiber broadband superfluorescent source at 2 μm wavelength [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(2): 0202006. (in Chinese)
刘江, 王璞. 掺铥全光纤结构 2 μm 波段宽带超荧光光源 [J]. *中国激光*, 2013, 40(2): 0202006.