

文章编号: 1000-7032(2024)03-0458-10

基于色散调控氟碲酸盐玻璃光纤的 O-U波段平坦光频梳产生

陈禹先, 张绪成, 金冠宇, 孟凡超, 贾志旭, 秦伟平, 秦冠仕*

(吉林大学 电子科学与工程学院, 集成光电子学国家重点实验室, 吉林 长春 130012)

摘要: 光学频率梳(简称光频梳)作为一种优秀的多波长光源在通信领域具有巨大的应用潜力。通过将光频梳光源与波分复用技术(WDM)、空分复用技术结合(SDM),通信系统可以具有百 Tbit/s 量级的传输速率,在 5G/6G 通信、物联网、自动驾驶等方面具有重要的应用价值。目前实现光频梳的方法主要有以下四种,分别为基于锁模激光器产生飞秒光频梳、基于光学微腔产生光频梳、基于电光调制器产生光频梳以及基于行波四波混频产生光频梳。它们各具特点,但均很难同时实现宽光谱、高信噪比、高平坦度、高的单梳齿功率以及梳齿频率间隔大范围可调,这在一定程度上影响了光频梳在光通信领域的应用。本文提出基于受激布里渊激光腔产生种子梳,采用腔外负色散光纤进行脉冲压缩,进一步利用色散调控的高非线性氟碲酸盐光纤进行扩谱,从而实现光频梳产生。数值计算结果表明,通过该系统,我们可以得到重复频率大范围可调、光谱覆盖整个 O-U 波段且在 O-U 波段梳齿强度标准差小于 5 dB 的平坦光频梳,证明了通过基于布里渊激光腔与色散调控高非线性氟碲酸盐光纤的光学系统产生可用于光通信的平坦光频梳的可行性。

关键词: 光频梳; 色散调控氟碲酸盐玻璃光纤; 脉冲压缩; 腔外扩谱; O-U 波段平坦

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230327

O-U Band Flat Optical Frequency Comb Generation Based on Dispersion-controlled Fluorotellurite Glass Fiber

CHEN Yuxian, ZHANG Xucheng, JIN Guanyu, MENG Fanchao, JIA Zhixu, QIN Weiping, QIN Guanshi*

(State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science and Engineering,

Jilin University, Changchun 130012, China)

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

Abstract: Optical frequency comb (OFC) have great potential in the field of communication as an excellent multi-wavelength light source. By combining OFC light source with wavelength-division-multiplexing (WDM) and space-division-multiplexing (SDM) technologies, the communication system can have a transmission rate in the order of a hundred Tbit/s, which is valuable in 5G/6G communications, Internet of Things, autonomous driving and many other aspects. At present, there are mainly four methods to obtain OFC, which are femtosecond OFC based on mode-locked laser, OFC based on optical microcavity, OFC based on electric-optical modulator and OFC based on traveling wave four-wave mixing. All of them have their own characteristics, but all of them are hard to satisfy wide spectrum, high signal-to-noise ratio, high flatness, high single comb power and wide range adjustable of comb spacing at the same time, which affected the application of OFC in the field of optical communication in some extent. In this paper, we put forward to get seed comb from stimulated Brillouin laser cavity, compress the pluse by negative dispersion highly nonlinear fiber, and further on, widen the spectrum with dispersion-controlled fluorotellurite glass fiber, finally get OFC. The result of numerical simulation shows that, by using this system, we can obtain flat-top OFC with

收稿日期: 2023-12-19; 修订日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(62090063, 62075082, U20A20210, 61827821, U22A2085, 62235014, 62205121)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62090063, 62075082, U20A20210, 61827821, U22A2085, 62235014, 62205121)

wide range adjustable comb spacing, spectral coverage the hole band form O-U, and the standard deviation of comb power in O-U band less than 5 dB, proved the feasibility of OFC generation based on system with stimulated Brillouin laser cavity and dispersion-controlled fluorotellurite glass fiber.

Key words: optical frequency comb; dispersion-controlled fluorotellurite glass fiber; pulse compression; spectral broadening out of cavity; O-U band flat

1 引言

光学频率梳(简称光频梳)在时域为具有固定重复频率的脉冲光,在频域为具有等频率间隔的频率成分^[1-3]。近年来,光频梳作为一种优秀的多波长光源,在光通信领域得到了广泛的研究。与传统的多波长激光器阵列相比,光频梳光源能耗低,相位复杂度低^[4],且易于实现联合数字信号处理^[5]。将光频梳光源与波分复用技术(WDM)和空分复用技术(SDM)结合,光通信系统可以实现百Tbit/s量级的高速信息传输^[6-9]。2021年,Kong等使用50 GHz重频的光频梳作为光源,多芯光纤作为传输光纤,搭建了信息传输容量达到909 Tbit/s的通信系统^[5]。2021年,Puttnam等使用覆盖S、C、L、U波段的25 GHz重频光频梳作为光源,通信信道多达561个,在54 km的传输系统中信息的传输容量达到610 Tbit/s^[9]。

对于一个结合了波分复用技术与空分复用技术的光通信系统,其传输容量取决于光源信噪比、波分复用与空分复用的频道数量以及系统的调制符号率。为了提升系统的波分复用频道数量,光频梳光源应具有宽带宽、高平坦度的光谱。同时,更多频道的空分复用对光源的信噪比与单梳齿功率提出了更高的要求^[10]。因此,为了更好地满足光通信领域的应用需求,光频梳应具有宽光谱、高信噪比、高平坦度、梳齿频率间隔大范围可调的特点。而目前主流的光频梳产生方式均无法完全满足以上要求:锁模激光器虽然可以稳定地产生光频梳^[11-12],但通常带宽有限^[13];基于集成微环谐振器的光孤子频率梳虽然具有集成性好的优点^[14-15],但由于产生光频梳的梳齿间隔由腔长度决定,梳齿间隔难以实现大范围调节;基于电光调制器的光频梳具有平坦度高的优势^[16],但受到电光材料固有的相位不稳定性及微波噪声的影响,梳齿的信噪比较差;基于行波四波混频可以得到梳齿间隔GHz~THz大范围可调的光频梳^[17],但产生的光频梳在光谱带宽、信噪比、平坦性等方面均存在

不足。

2019年,Huang等设计并搭建了基于受激布里渊激光腔的孤子光频梳系统^[18](图1(a))。该系统使用双波长连续激光产生的腔内布里渊激光代替传统外部光源作为泵浦光,相干驱动克尔非线性光学腔产生时域光孤子和孤子频率梳。与以往的工作不同,该系统中光孤子脉冲是通过腔内泵浦方式自发形成的,因此无需对泵浦激光频率进行精确调控,产生的双波长布里渊激光在腔内循环,并通过级联四波混频效应产生孤子光频梳。此外,通过改变腔内双波长布里渊激光间的频率间隔,可以实现对所产生孤子光频梳梳齿间隔的大范围调谐。已经证实,布里渊激光具有窄线宽、低噪声的优点,基于布里渊激光腔的孤子光频梳在相位噪声和频率稳定性方面独具优势^[19-20]。2021年,Yan等在微谐振腔中使用腔内布里渊激光作为泵浦光实现了孤子光频梳产生,得益于布里渊激光窄线宽、低噪声的优点,产生的光频梳具有极低的噪声,其相位噪声在10 Hz时为-49 dBc/Hz,在10 kHz时为-130 dBc/Hz,在1 MHz偏移时为-149 dBc/Hz^[21]。2023年,Shi等以工作在1 550 nm的AlGaInAs/InP矩阵激光器作为光源,演示了一种可切换通道间距的多波长布里渊光纤激光器,所产生的光频梳频率间隔在20~100 GHz范围内可调,且超过60根梳齿具有高于10 dB的信噪比^[22]。

尽管基于布里渊激光腔的孤子光频梳已经取得一系列进展,但目前的布里渊激光腔大多为具有全负色散的光学谐振腔,产生的是具有双曲正割型光谱包络的孤子光频梳,在远离泵浦波长的频率位置,梳齿强度快速衰减,光谱不平坦。此外,受限于布里渊激光腔的色散特性,远离泵浦光区域的梳齿难以获得有效增益,因此产生孤子光频梳的光谱范围普遍较窄,这些都限制了基于布里渊激光腔的孤子光频梳的应用。

近年来,随着光纤制造技术的发展,基于结构设计的色散调控光纤受到了广泛关注^[23-24]。通过

改变该类光纤的微结构参数,可以调节其色散在设计波长范围内满足需求,从而使得输入的双波长或多波长激光发生四波混频,产生具有宽光谱带宽的光频梳。目前,通过在包层中加入小尺寸的气孔^[23]、使用多层环状结构光纤^[24]等方法,可以控制光纤色散在 1 500~1 600 nm 范围内色散平坦。基于该类光纤进行扩谱,得到的光频梳具有覆盖 1 450~1 700 nm 的平坦范围,且梳齿间隔在 25~100 GHz 范围内可调。

为了实现面向光通信应用的光频梳,本文提出了一种结合受激布里渊激光腔与色散调控高非线性氟碲酸盐光纤扩谱系统的光频梳产生方法,并通过数值模拟对其进行了可行性验证。首先,我们基于池田映射模型建立了受激布里渊激光腔的理论模型,得到了具有低噪声、窄线宽的种子光频梳,其梳齿间隔在 50~250 GHz 大范围可调。之后,使用具有负色散的高非线性光纤对放大后的种子光频梳进行脉冲压缩处理,脉冲压缩光纤长度为 9.3 m,该长度光纤可以使种子光频梳光谱充分展宽,且不会发生脉冲劈裂,压缩后脉冲峰值功率达到 80 W 以上。最后,我们设计了具有多层环状结构的高非线性氟碲酸盐光纤,并基于该光纤对压缩后的种子光频梳进行扩谱。不同于之前的相关研究,本文对扩谱过程中的相位匹配条件进行了理论分析,并基于分析结果,选用具有负色散的高非线性氟碲酸盐光纤,最终得到平坦范围覆盖 O~U 波段的宽光谱平顶光频梳,且在整个 O~U 波段梳齿强度标准差小于 5 dB。

2 设计的光频梳结构

在本工作中,我们首先利用受激布里渊激光腔得到具有低噪声、窄线宽、梳齿频率间隔大范围可调节的种子光频梳。图 1(a)为双波长布里渊激光腔产生光频梳的装置示意图。其工作原理如下:两束不同波长(频率间隔为 f)的 C 波段连续泵浦激光通过 3 dB 耦合器和偏振控制器(PC)进入掺铒光纤放大器(EDFA)中进行功率放大,而后经环形器的 1、2 端口进入环形光纤谐振腔中,谐振腔由隔离器、20 m 长的高非线性光纤(HNLF,零色散波长为 $\sim 1\ 535\text{ nm}$)、环形器的 2、3 端口和一个 10 dB 波分复用耦合器组成。其中,环形器等光学器件各具有一段由标准单模光纤(SMF,零色散波长为 $\sim 1\ 312\text{ nm}$)构成的尾纤,其总长度约为 1.73 m。双波长连续激光进入光纤腔后,在传输

至 HNLF 中会激发反向传输的布里渊激光,所产生的反向布里渊光作为腔内泵浦光,在腔中循环传输,并通过级联四波混频效应产生光学频率梳。腔内传输的光会通过 10 dB 波分复用耦合器的 10% 端口输出,并使用光纤布拉格光栅(FBG)滤除泵浦光后作为种子光频梳用于产生宽带的光学频率梳。

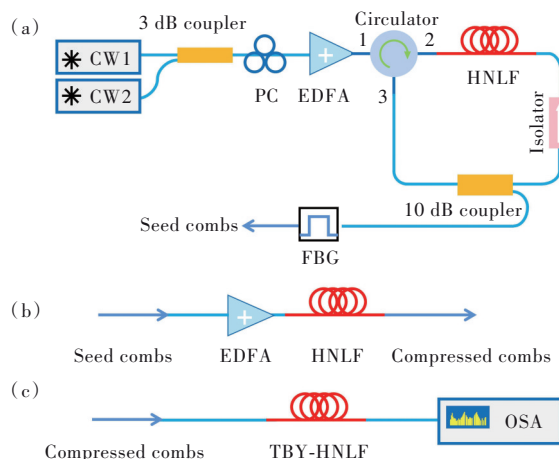


图 1 (a) 基于受激布里渊激光腔的种子光频梳产生系统;(b) 脉冲压缩系统;(c) 腔外扩谱系统

Fig.1 (a) Seed optical frequency comb generate system based on stimulated Brillouin laser cavity. (b) Pulse compression system. (c) Spectral broadening system out of cavity

受限于布里渊激光腔的色散特性,由其直接产生的孤子光频梳在光谱带宽和光谱平坦性上难以满足光通信领域的应用需求。针对该问题,以高质量的光频梳作为种子光进行腔外扩谱(图 1(c))是获得宽带平坦光频梳的常用方法,而选择和设计合适的高非线性光纤是实现腔外扩谱的关键。基于此,我们采用本课题组研制的氟碲酸盐玻璃光纤作为用于扩谱的高非线性光纤。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,是一种理想的红外玻璃材料。通过对氟碲酸盐玻璃光纤结构进行设计,调控其色散特性,从而产生光谱范围覆盖整个通信波段且平坦性良好的光学频率梳。在后续模拟计算过程中,为简单起见,我们假定所有泵浦光全部耦合进入氟碲酸盐玻璃光纤。

除了用于扩谱的高非线性氟碲酸盐光纤外,耦合进高非线性光纤的种子光频梳性能对扩谱后所产生光频梳的影响也至关重要。一般而言,进行扩谱的种子光频梳的峰值功率越高,由非线性效应产生的参量增益带宽越宽,所产生的扩谱光频梳的带宽

也越宽。因而,一般在进行腔外扩谱前,通常会对种子光频梳的脉冲峰值功率进行提升,所用的实验装置如图1(b)所示。利用掺铒光纤放大器对种子光频梳进行放大,而后通过一段具有负色散的高非线性光纤对放大后光脉冲进行时域压缩,从而提升其峰值功率。此外,需要说明的是,脉冲压缩过程会劣化种子光频梳的信噪比,掺铒光纤放大器在对种子光频梳的放大过程中会随着增益的变大引入放大自发辐射(ASE)噪声,过高的脉冲平均功率也需要更长的非线性光纤来进行脉冲压缩,从而进一步降低信噪比。因此,对种子光频梳的放大并非增益越大越好,需结合实际综合考量。

3 数值模拟结果分析

3.1 种子梳产生

为了获得用于扩谱的高质量种子梳,我们首

先计算了不同泵浦光频率间隔下双波长布里渊激光腔。本文使用的布里渊激光腔属于典型的环形光纤谐振腔,布里渊激光在腔中的传输和演化可利用带有周期性边界条件的池田映射模型很好地描述^[25-26]。需要指出的是,由于我们所用的布里渊激光腔为双波长泵浦,因而需对周期边界条件中的泵浦项进行修正。此外,由于腔中包含高非线性光纤和单模光纤两种不同的光纤,为了保证计算的准确性,模型中的相关参数具有分段特性。利用分步傅里叶法并结合四阶龙格-库塔算法可对该修正模型进行准确的数值求解^[27]。如图1(a)所示,腔中使用的高非线性光纤长度为20 m,其非线性系数 γ 为 $\sim 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,在泵浦光波长1560 nm处,其二阶色散 β_2 和三阶色散 β_3 分别为 $-0.5 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $0.04 \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ 。腔中的单模光纤长度为1.73 m,其非线性系数 γ 为 $\sim 1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,其

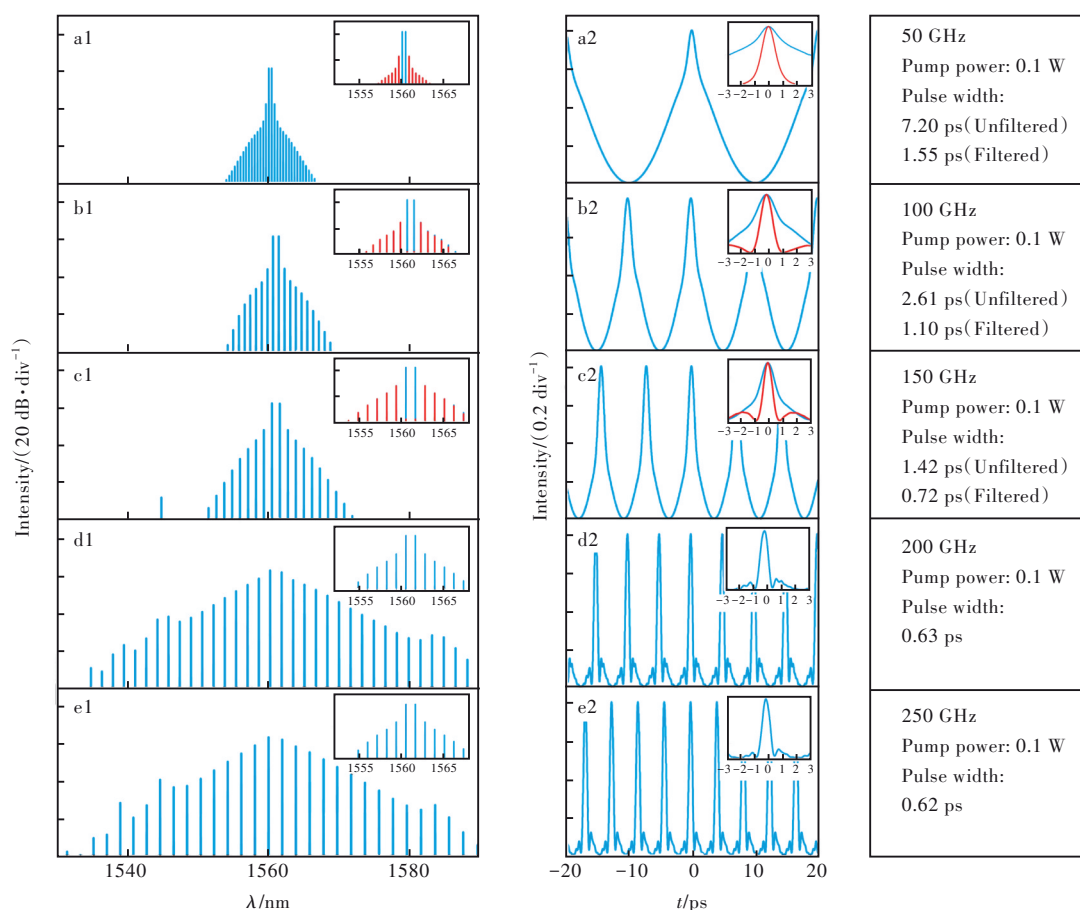


图2 不同梳齿频率间隔下布里渊激光腔输出的光谱与归一化时域脉冲,梳齿频率间隔分别为:(a1)~(a2)50 GHz,(b1)~(b2)100 GHz,(c1)~(c2)150 GHz,(d1)~(d2)200 GHz,(e1)~(e2)250 GHz。插图为局域放大图,其中红色线为滤除泵浦光后的输出结果

Fig.2 Output spectrum and normalized temporal pulse from Brillouin laser cavity with different comb frequency spacing, the comb frequency spacing is (a1)~(a2)50 GHz, (b1)~(b2)100 GHz, (c1)~(c2)150 GHz, (d1)~(d2)200 GHz, (e1)~(e2)250 GHz. Local enlarged drawing is shown in illustration, where the red line is the output after filtering the pump light

二阶色散 β_2 和三阶色散 β_3 分别为 $-2.4 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $0.14 \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ 。

数值仿真结果如图 2 所示,为了更直观地给出不同梳齿频率间隔时所获得种子光频梳脉冲宽度的不同,我们对其时域脉冲强度进行了归一化处理。当腔内双波长布里渊激光的功率为 0.1 W ,频率间隔分别为 $50, 100, 150, 200, 250 \text{ GHz}$ 时均能产生时域稳定的孤子光频梳,梳齿间的频率间隔等于双波长布里渊激光间的频率间隔,其对应的脉冲半高宽分别为 $7.20, 2.61, 1.42, 0.63, 0.62 \text{ ps}$ 。可以看到,当腔内双波长布里渊激光的频率间隔较小时,由于泵浦光残留,产生光频梳的时域光脉冲具有较高的基座,为了去除脉冲基座,我们使用能量滤除比例为 99.99% 的光纤布拉格光栅滤除双波长泵浦光^[28]。对比滤波前后的光谱与时域脉冲(图 2 各右上角放大图蓝色线与红色线),脉冲宽度在滤波后得到了有效的压窄。

3.2 脉冲压缩

如前所述,为了使种子光频梳在扩谱过程中获得更大的增益带宽,种子光频梳在扩谱前应具有尽可能高的峰值功率,因此,需要在扩谱前对种子光频梳脉冲进行脉冲压缩处理。已经证实,在负色散高非线性光纤中,自相位调制引起正啁啾

与负色散的相互作用可以有效压缩脉冲宽度,提升光脉冲的峰值功率^[29-30],基于该方法压缩后脉冲宽度可以达到 100 fs 量级^[31]。如图 1(b),脉冲压缩系统包括掺铒光纤放大器(EDFA)与具有负色散的高非线性光纤(光纤型号为长飞公司 NL-1550-NEG),光纤非线性系数 γ 为 $\sim 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,在泵浦光波长 1560 nm 处,其二阶色散 β_2 和三阶色散 β_3 分别为 $-5.2 \text{ ps}^2 \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $0.045 \text{ ps}^3 \cdot \text{km}^{-1}$ 。

接下来,我们以梳齿频率间隔为 100 GHz 的种子光频梳为例研究放大后脉冲在脉冲压缩光纤中的演化过程。光脉冲进入光纤前经光放大器放大,平均功率达到 2 W ,对应单脉冲能量 20 pJ 。种子光频梳时域脉冲及其光谱的演化如图 3(a)所示。可以看到,伴随着光纤中的非线性过程发生,种子光频梳光谱在传输过程中逐渐展宽,并在特定长度达到最大值,而后迅速下降。且受到种子光频梳脉冲啁啾与光纤高阶色散的影响,光孤子的部分能量会转移至色散波(产生的色散波波长为 1650 nm)。相应地,随着光谱的展宽,种子光频梳脉冲宽度在演化过程中被逐渐压窄,但由于非线性效应的累积,脉冲的啁啾不断变大,并在光纤长度达到某一阈值后使脉冲变宽。为了表征光脉冲与其光谱的演化过程,并确定最佳的脉冲

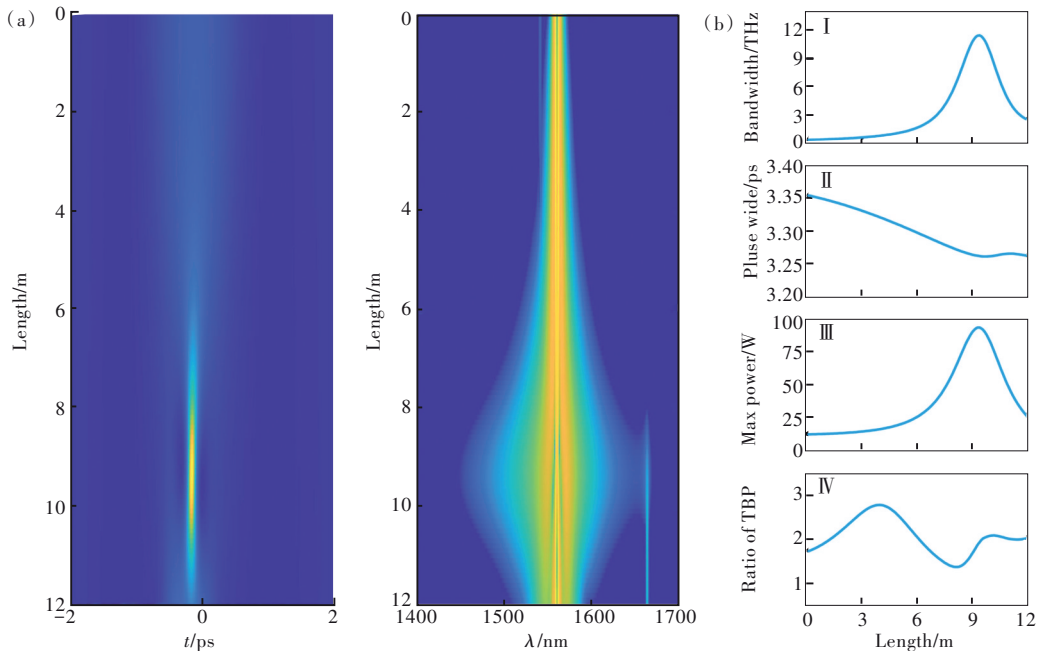


图 3 (a)梳齿频率间隔为 100 GHz 的种子梳在脉冲压缩光纤中的时域(I)与光谱(II)演化;(b)光谱宽度(I)、脉冲宽度(II)、峰值功率(III)以及时间带宽积(TBP)与无啁啾脉冲 TBP 比值(IV)随脉冲压缩光纤长度的变化关系

Fig.3 (a)Time domain(I) and spectrum(II) evolution of seed combs with a frequency interval of 100 GHz in pulsed compression fibers. (b)Evolution of spectral width(I), pulse width(II), peak power(III), and the ratio of time bandwidth product(TBP) to non-chirped pulse(IV) with the change of fiber length

压缩光纤长度,我们计算了光谱宽度(图3(b) I)、脉冲宽度(图3(b) II)和脉冲峰值功率(图3(b) III)随光纤长度的演化过程。可以看到,当光脉冲在光纤中传输时,光谱宽度的增加与脉冲峰值功率的提升规律保持一致,且在光谱宽度达到最大值时时域脉冲宽度被压缩到最小。同时,为了表征非线性效应积累带来的啁啾,我们计算了实际脉冲的时间带宽积(Time bandwidth product, TBP)与相应无啁啾脉冲的TBP比值(图3(b) IV)。由于受激布里渊激光腔内光纤均具有负色散,种子光频梳脉冲进入脉冲压缩光纤时存在负啁啾,进入脉冲压缩光纤后,脉冲压缩光纤负色散带来的负啁啾与非线性效应带来的正啁啾共同作用于脉冲。随着脉冲峰值功率在演化过程中的不断提升,非线性效应带来的正啁啾不断增加,并在光纤

达到某一长度后使得脉冲的总啁啾达到最小,此时脉冲的时间带宽积与相应无啁啾脉冲的时间带宽积比值最小。

综合考量以上过程,脉冲压缩光纤应确保种子光频梳的光谱得到充分展宽,峰值功率足够大,且啁啾积累不应过大,以避免脉冲宽度劣化。因此,我们选取的脉冲光纤压缩长度为9.3 m。在该长度下计算不同种子光频梳脉冲的压缩结果,输入光的单脉冲能量20 pJ。压缩后的时域光脉冲与光谱如图4所示,不同重复频率种子光频梳压缩后的脉冲半高宽分别为0.11,0.098,0.091,0.079,0.085 ps,对应的脉冲峰值功率分别为83,93,118,137,125 W。上述结果表明,当光脉冲经过压缩后,种子光频梳峰值功率可以得到有效提升,这使得后续的扩谱成为可能。

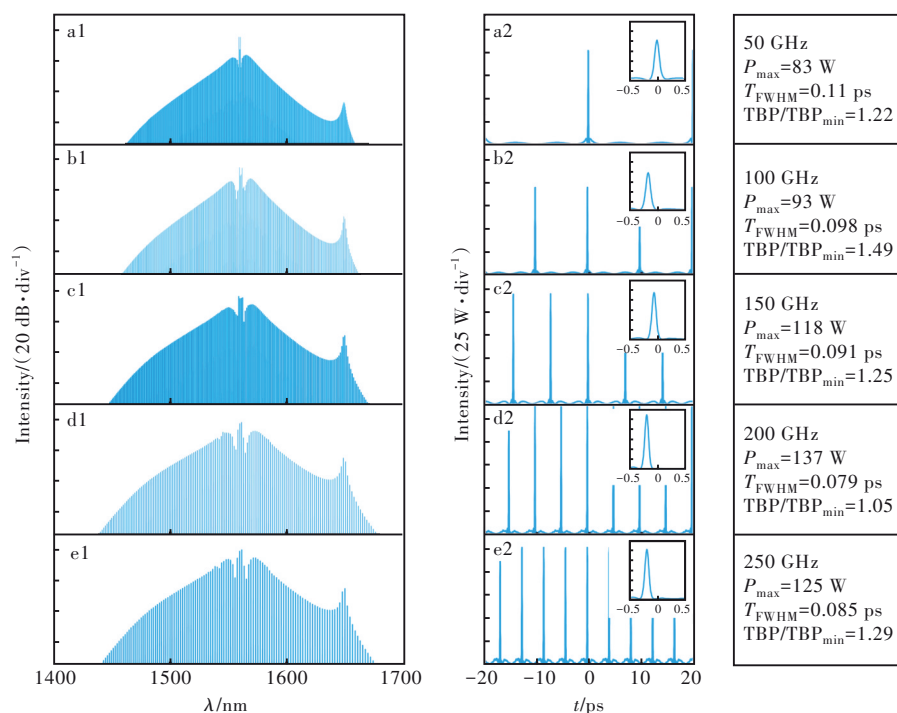


图4 脉冲压缩后梳齿间隔分别为(a1)~(a2)50 GHz、(b1)~(b2)100 GHz、(c1)~(c2)150 GHz、(d1)~(d2)200 GHz、(e1)~(e2)250 GHz的光频梳及其对应的时域脉冲。插图为局部放大结果

Fig.4 Output spectrum and temporal pulse after pulse compression which comb frequency spacing is (a1)~(a2)50 GHz, (b1)~(b2)100 GHz, (c1)~(c2)150 GHz, (d1)~(d2)200 GHz, (e1)~(e2)250 GHz. Local enlarged drawing is shown in illustration

3.3 扩谱光纤设计与扩谱结果

在完成对种子光频梳脉冲的压缩后,可以使用高非线性光纤进行扩谱。由于石英光纤的非线性系数较小,通常需要几百米长的近零平坦色散光纤才能产生宽带频率梳。受光纤制造工艺的限制,长光纤更容易发生光纤芯径的涨落,从而引起

沿光纤长度的色散变化,由于相位匹配条件随色散变化而变化,这将进一步影响所产生频率梳的性能。要缩短扩谱光纤长度,光纤应具有更高的非线性系数。目前,基于氟磷酸盐玻璃的高非线性光纤制造工艺已经趋于成熟,且基于氟磷酸盐玻璃的色散调控光纤已经得到了广泛的研究,其

非线性折射率比石英光纤大一个数量级^[23]。因此,本文使用色散调控的高非线性氟碲酸盐光纤进行扩谱。本文中的色散调控光纤基于 65TeO₂-25BaF₂-10Y₂O₃ (TBY, 光纤纤芯) 和 33AlF₃-9BaF₂-17CaF₂-12YF₃-8SrF₂-11MgF₂-10TeO₂ (ABCYSMT, 光纤包层) 两种玻璃材料。图 5(a) 给出了这两种玻璃折射率与波长的关系,二者在近红外波段有较大的折射率差异,且具有相似的热膨胀系数、转变温度和软化温度^[32]。基于二者的光纤制备工艺已经

趋于成熟,且在超连续光谱产生等方面已经得到了广泛的应用^[32]。考虑多层环状结构光纤在色散和损耗控制方面的优势^[33-34],我们设计了如图 5(b) 所示的 W 型折射率分布高非线性氟碲酸盐光纤,光纤包括 TBY 玻璃芯层、ABCYSMT 玻璃中间层、TBY 玻璃外层以及 ABCYSMT 玻璃包层。光纤的尺寸参数包括光纤外层半径 r_1 、中间层半径 r_2 、芯层半径 r_3 ($r_1 > r_2 > r_3$)。利用商用软件 Mode Solutions (Lumerical Solutions, Inc.) 计算光纤的色散与模式。

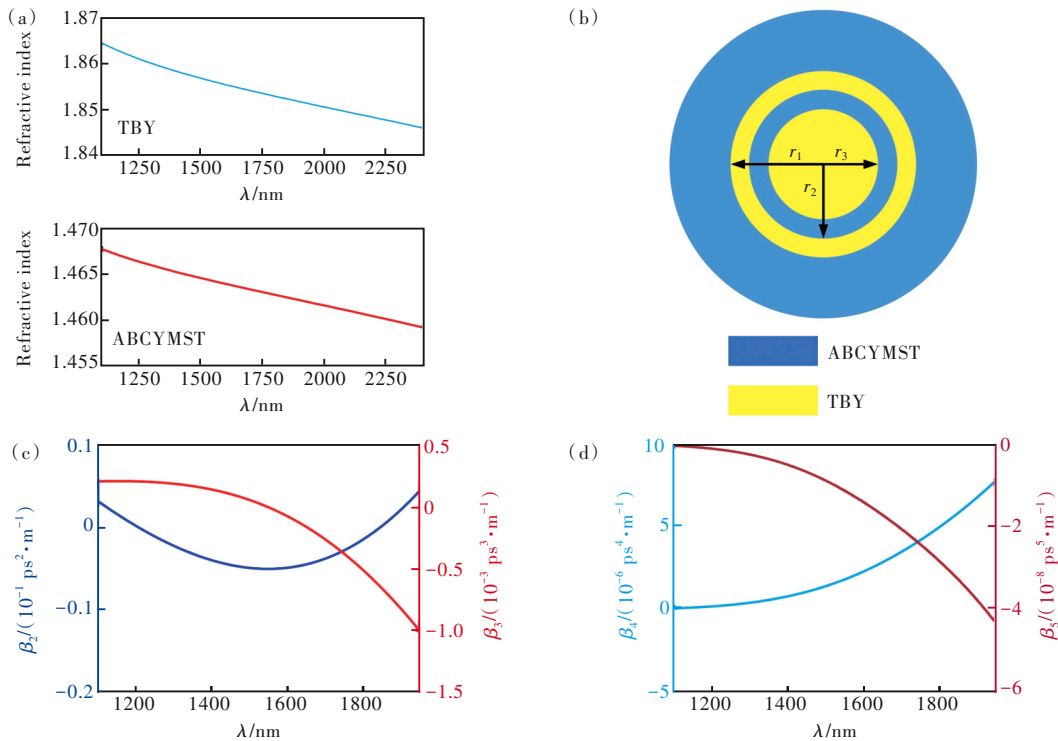


图 5 (a) 氟碲酸盐玻璃光纤的纤芯 (I) 与包层 (II) 材料折射率; W 型高非线性氟碲酸盐光纤的横截面结构示意图 (b) 及其二、三、四、五阶色散曲线 ((c) ~ (d))

Fig.5 (a) Refractive of core layer (I) and cladding (II) material of fluorotellurite glass fiber. (b) Section diagram of highly nonlinear fluorotellurite glass fiber with W structure. (c)–(d) The second order, third order, fourth order, fifth order dispersion profiles of the fiber

为了使扩谱后的光频梳具有尽可能宽的平坦光谱范围,不同波长处的参量增益应尽可能均一,且参量增益值应尽可能大。光纤中的扩谱过程基于参量增益,其增益系数表达式为:

$$g = \sqrt{(\gamma P_0 r)^2 - (\kappa/2)^2}, \quad (1)$$

其中 P_0 、 r 取决于种子光频梳, κ 为有效相位失配,其表达式如下:

$$\kappa = \Delta k + \gamma P_0, \quad (2)$$

为了使更宽光谱范围内的梳齿得到有效的参量增益, κ 的值应稳定且接近零,对应 Δk 为一稳定负值,绝对值大小与 γP_0 接近。 Δk 为相位失配项,其

表达式为:

$$\Delta k = \beta(3) + \beta(4) - \beta(1) - \beta(2), \quad (3)$$

其中 $\beta(1)$ 与 $\beta(2)$ 为泵浦光传播常数, $\beta(3)$ 与 $\beta(4)$ 为信号光与闲频光传播常数。对公式 (3) 进行泰勒展开,并忽略三阶以上项,由于四波混频过程中满足能量守恒, $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$, Δk 泰勒展开零阶项与一阶项均为零:

$$\Delta k = \beta_2(\omega_3)\omega_3^2 + \beta_2(\omega_4)\omega_4^2 - \beta_2(\omega_1)\omega_1^2 - \beta_2(\omega_2)\omega_2^2, \quad (4)$$

将二阶传播常数 $\beta_2(\omega_i)$ 改写为其在波长范围内的均值 β_{20} 与其在 ω_i 处值与均值的差值 β_{2i} 。改写后的相位失配表达式可以写为:

$$\Delta k = \beta_{20}(\omega_3^2 + \omega_4^2 - \omega_1^2 - \omega_2^2) + (\beta_{23}\omega_3^2 + \beta_{24}\omega_4^2 - \beta_{21}\omega_1^2 - \beta_{22}\omega_2^2), \quad (5)$$

其中, $\beta_{20}(\omega_{32} + \omega_{42} - \omega_{12} - \omega_{22})$ 与 $(\beta_{23}\omega_{32} + \beta_{24}\omega_{42} - \beta_{21}\omega_{12} - \beta_{22}\omega_{22})$ 分别表示光纤色散均值与色散涨落对相位失配的影响。由图4可知,压缩后种子光频梳中心梳齿强度远高于边缘梳齿,因此只考虑中心波长向边缘波长能量转移的情况,此时 $\omega_3^2 + \omega_4^2 > \omega_1^2 + \omega_2^2$ 。对于公式(5),其等号右面第一项符号由 β_{20} 决定,而对于本文设计的色散调控氟碲酸盐光纤来说,其 β_2 在长波长与短波长处更大,在种子光频梳中心波长处更小,因此 $\beta_{23} > \beta_{21}, \beta_{24} > \beta_{22}$, 等号右面第二项为正值。因此,要使相位失配项为负值, β_{20} 应为负值。

基于以上讨论,我们设计了在O~U波段具有负色散的全固态W型折射率分布高非线性氟碲酸盐光纤,并使用遗传算法对光纤结构进行了优化。优化后的光纤参数为 $r_1=1.37 \mu\text{m}$, $r_2=1.25 \mu\text{m}$, $r_3=0.83 \mu\text{m}$, 对应的有效模场面积为 1.68

μm^2 , 非线性系数为 $1399 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。光纤的色散如图5(c)、(d)所示,光纤在O~U波段二阶色散为负,三阶色散近零平坦。经计算,光纤在整个O~U波段内可以很好地满足相位匹配条件。

在扩谱单元中,我们使用长度为 0.1 m 、吸收系数为 $0.25/\text{m}$ 的全固态W型折射率分布高非线性氟碲酸盐光纤对种子光频梳(如图4所示)进行扩谱,得到的仿真结果如图6所示。当种子光频梳的重复频率在 $50 \sim 250 \text{ GHz}$ 范围内调节时,获得了平顶光学频率梳,其光谱平坦范围覆盖整个O~U波段,光谱起伏度小于 10 dB 。进一步,我们计算了光频梳在O~U波段的梳齿强度标准差,具体表达式为:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}, \quad (7)$$

其中, x_i 表示第 i 根梳齿的强度(dB单位), μ 为梳

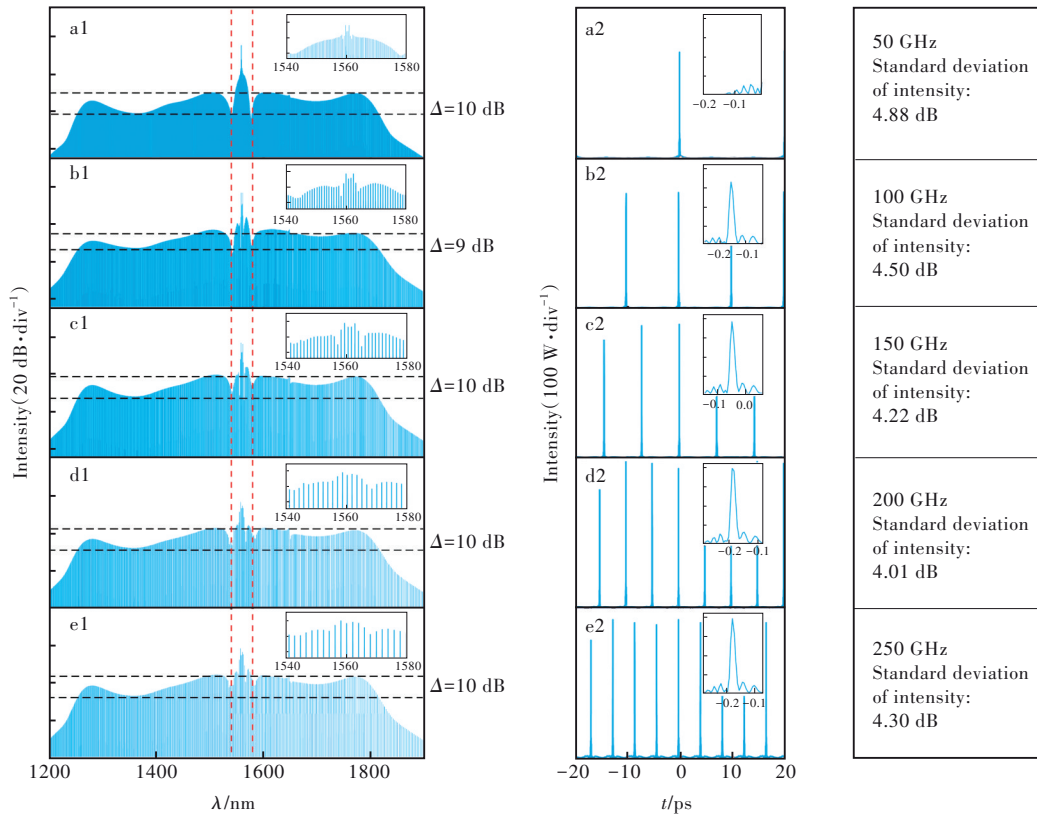


图6 扩谱后梳齿间隔分别为(a1)~(a2)50 GHz、(b1)~(b2)100 GHz、(c1)~(c2)150 GHz、(d1)~(d2)200 GHz、(e1)~(e2)250 GHz的光频梳及其对应的时域脉冲。插图为局部放大结果,光谱的局部放大图对应的光谱范围在图中用红色虚线标出

Fig.6 Spectrum and temporal pulse after spectrum widen which comb frequency spacing is (a1)~(a2)50 GHz, (b1)~(b2)100 GHz, (c1)~(c2)150 GHz, (d1)~(d2)200 GHz, (e1)~(e2) 250 GHz. Local enlarged drawing is shown in illustration, corresponding spectrum range is indicated by red line

齿强度的均值, σ 为强度标准差。当梳齿间隔为 50, 100, 150, 200, 250 GHz 时, 强度标准差分别为 4.88, 4.50, 4.22, 4.0, 4.30 dB。当氟碲酸盐玻璃光纤结构参数偏差 $<1\%$ 时, O~U 波段光频梳的最大强度标准差 <5.3 dB。在时域上, 脉冲间隔与重复频率相对应, 且脉冲未发生劈裂。结果表明, 所设计的负色散全固态氟碲酸盐光纤具有产生 O~U 波段平坦、重频大范围可调光频梳的潜力。在接下来的光频梳研制工作中, 我们将系统研究氟碲酸盐玻璃光纤长度、损耗对产生光频梳光谱带宽、平坦性及转换效率等参数的影响。

4 结 论

本文提出了一种结合双波长布里渊激光腔与色散调控高非线性氟碲酸盐光纤扩谱系统的光频梳产生系统, 并对其进行了数值模拟。我们首先利用双波长布里渊激光腔产生种子光频梳, 通过

改变腔内双波长布里渊激光的频率间隔产生了重复频率在 50~250 GHz 范围可调的孤子光频梳。将产生的孤子光频梳作为种子光经过掺铒光纤放大器和负色散高非线性光纤进行脉冲压缩, 通过仿真计算优化高非线性光纤长度为 9.3 m, 得到的脉冲宽度 (T_{FWHM}) 均为百飞秒量级。最后, 结合四波混频中相位匹配条件设计了 O~U 波段全负色散的氟碲酸盐光纤, 将时域压缩后的种子光脉冲经该光纤进行扩谱, 得到了光谱范围覆盖 O~U 波段, 且在整个 O~U 波段梳齿强度标准差小于 5 dB 的宽带平坦光学频率梳。以上结果表明, 基于布里渊激光腔与色散调控高非线性氟碲酸盐光纤的光学系统可以产生宽光谱、高平坦度、梳齿频率间隔大范围可调的光频梳。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230327>.

参 考 文 献:

- [1] CHEMBO Y K. Kerr optical frequency combs: theory, applications and perspectives [J]. *Nanophotonics*, 2016, 5(2): 214-230.
- [2] FORTIER T, BAUMANN E. 20 years of developments in optical frequency comb technology and applications [J]. *Commun. Phys.*, 2019, 2(1): 153.
- [3] SCHLIESSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W. Mid-infrared frequency combs [J]. *Nat. Photonics*, 2012, 6(7): 440-449.
- [4] LUNDBERG L, MAZUR M, MIRANI A, *et al.* Phase-coherent lightwave communications with frequency combs [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 201.
- [5] TORRES-COMPANY V, SCHRÖDER J, FÜLÖP A, *et al.* Laser frequency combs for coherent optical communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2019, 37(7): 1663-1670.
- [6] KHAN M Z M, ALKHAZRAJI E A, RAGHEB A M, *et al.* Injection-locked quantum-dash laser in far L-band 192 Gbit/s DWDM transmission [J]. *IEEE Photonics J.*, 2020, 12(5): 1504211.
- [7] KONG D M, SILVA E P D A, SASAKI Y, *et al.* 909.5 Tbit/s dense SDM and WDM transmission based on a single source optical frequency comb and Kramers-Kronig detection [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2021, 27(2): 2100108.
- [8] WANG R, BIDKAR S, NEJABATI R, *et al.* Load and nonlinearity aware resource allocation in elastic optical networks [C]. *The Optical Fiber Communications Conference and Exhibition, Los Angeles*, 2017: 1-3.
- [9] PUTTNAM B J, LUÍS R S, RADEMACHER G, *et al.* 0.61 Pb/s S, C, and L-band transmission in a 125 μm diameter 4-core fiber using a single wideband comb source [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021, 39(4): 1027-1032.
- [10] HU H, OXENLØWE L K. Chip-based optical frequency combs for high-capacity optical communications [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(5): 1367-1385.
- [11] KUIZENGA D, SIEGMAN A. FM and AM mode locking of the homogeneous laser-part I: theory [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1970, 6(11): 694-708.
- [12] KIM J, SONG Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: principles, status, and applications [J]. *Adv. Opt. Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [13] KEMAL J N, MARIN-PALOMO P, MERGHEM K, *et al.* 32QAM WDM transmission at 12 Tbit/s using a quantum-dash mode-locked laser diode (QD-MLLD) with external-cavity feedback [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(16): 23594-23608.

- [14] KIPPENBERG T J, HOLZWARTH R, DIDDAMS S A. Microresonator-based optical frequency combs [J]. *Science*, 2011, 332(6029): 555-559.
- [15] MARIN-PALOMO P, KEMAL J N, KARPOV M, *et al.* Microresonator-based solitons for massively parallel coherent optical communications [J]. *Nature*, 2017, 546(7657): 274-279.
- [16] TORRES-COMPANY V, WEINER A M. Optical frequency comb technology for ultra-broadband radio-frequency photonics [J]. *Laser Photonics Rev.*, 2014, 8(3): 368-393.
- [17] SEFLER G A, KITAYAMA K I. Frequency comb generation by four-wave mixing and the role of fiber dispersion [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1998, 16(9): 1596-1605.
- [18] HUANG Y L, LI Q, HAN J Y, *et al.* Temporal soliton and optical frequency comb generation in a Brillouin laser cavity [J]. *Optica*, 2019, 6(12): 1491-1497.
- [19] PRAYOONYONG C, BOES A, XU X Y, *et al.* Frequency comb distillation for optical superchannel transmission [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2021, 39(23): 7383-7392.
- [20] ROWLEY M, HANZARD P H, CUTRONA A, *et al.* Self-emergence of robust solitons in a microcavity [J]. *Nature*, 2022, 608(7922): 303-309.
- [21] BAI Y, ZHANG M H, SHI Q, *et al.* Brillouin-Kerr soliton frequency combs in an optical microresonator [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2021, 126(6): 063901.
- [22] SHI Y, WANG T, HAO Y Z, *et al.* Wideband multiwavelength Brillouin fiber laser with switchable channel spacing [J]. *Appl. Opt.*, 2023, 62(8): 2130-2136.
- [23] LI Q, HUANG Y L, JIA Z X, *et al.* Design of fluorotellurite microstructured fibers with near-zero-flattened dispersion profiles for optical-frequency comb generation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2018, 36(11): 2211-2215.
- [24] MA T S, ZHOU N N, HUANG Y L, *et al.* Design of all-solid fluorotellurite fibers with near-zero-flattened dispersion profiles for mid-infrared optical frequency comb generation [J]. *Laser Phys.*, 2021, 31(7): 075102.
- [25] CONFORTI M, COPIE F, MUSSOT A, *et al.* Parametric instabilities in modulated fiber ring cavities [J]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(21): 5027-5030.
- [26] WANG P, HE J Y, XIAO X S, *et al.* Sub-terahertz-repetition-rate frequency comb generated by filter-induced instabilities in passive driven fiber resonators [J]. *Photonics Res.*, 2022, 10(2): 465-474.
- [27] ZHANG X C, JIA Z X, HUANG Y L, *et al.* Flat-top soliton frequency comb generation through intra-cavity dispersion engineering in a Brillouin laser cavity [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2023, 41(6): 1820-1833.
- [28] ATAIE V, MYSLIVETS E, KUO B P P, *et al.* Spectrally equalized frequency comb generation in multistage parametric mixer with nonlinear pulse shaping [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2014, 32(4): 840-846.
- [29] SUN Y B, WU S T. Influence of the rubbing angle on reflective in-plane-switching liquid crystal displays [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, 42(4B): L423-L425.
- [30] TSE M L V, HORAK P, PRICE J H V, *et al.* Pulse compression at 1.06 μm in dispersion-decreasing holey fibers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(23): 3504-3506.
- [31] JOHNSON A R, MAYER A S, KLENNER A, *et al.* Octave-spanning coherent supercontinuum generation in a silicon nitride waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(21): 5117-5120.
- [32] LI Z R, YAO C F, JIA Z X, *et al.* Broadband supercontinuum generation from 600 to 5 400 nm in a tapered fluorotellurite fiber pumped by a 2 010 nm femtosecond fiber laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(9): 091103.
- [33] BORUAH J, SAINI T S, KALRA Y, *et al.* Temperature-dependent bending loss characteristics of W-type photonic crystal fibres: design and analysis [J]. *J. Mod. Opt.*, 2017, 64(8): 855-860.
- [34] SAINI T S, HOA N P T, XING L, *et al.* Chalcogenide W-type co-axial optical fiber for broadband highly coherent mid-IR supercontinuum generation [J]. *J. Appl. Phys.*, 2018, 124(21): 213101.



陈禹先(1999-),男,辽宁辽阳人,硕士研究生,2021年于吉林大学获得学士学位,主要从事通信波段光频梳方面的研究。

E-mail: 1554228547@qq.com



秦冠仕(1976-),男,河南濮阳人,博士,教授,博士生导师,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