

基于硫系玻璃/碲酸盐玻璃复合微结构光纤的 红外超连续谱输出特性研究

汪 翠 戴世勋 杨佩龙 张培晴 王训四 刘自军 陈飞飞 沈 祥 聂秋华

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

摘要 设计了一种以 As_2Se_3 硫系玻璃作纤芯碲酸盐玻璃为包层两层空气孔环绕的复合微结构光纤, 利用有限元法 (FEM) 计算了光纤的色散和损耗特性, 并采用自适应分步傅里叶算法求解广义非线性薛定谔方程 (GNLSE), 数值模拟了波长为 $2.5 \mu\text{m}$, 脉宽为 200 fs 的光脉冲在长 15 cm 光纤中的传输特性, 比较分析了不同波长、脉宽、峰值功率的超短脉冲作用下红外超连续谱输出特性。

关键词 材料; 非线性光学; 红外超连续谱; 有限元法; 复合微结构光纤; 色散

中国分类号 O437

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0816003

Infrared Supercontinuum Generation in Chalcogenide-Tellurite compound Microstructured Optical Fiber

Wang Cui Dai Shixun Yang Peilong Zhang Peiqing Wang Xunsi Liu Zijun

Chen Feifei Shen Xiang Nie Qiuhua

Laboratory of Infrared Materials and Devices, The Research Institute of Advanced Technologies,
Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract The design of a compound microstructured optical fiber whose core is fabricated with the chalcogenide glass of As_2Se_3 and cladding made of tellurite glass is presented. The cladding is distributed with two rings of air holes. The dispersion and loss properties of the fiber is studied using a finite element method (FEM). With an adaptive split-step Fourier method-based solver for the generalized nonlinear schrödinger equation (GNLSE), the transmission of a $2.5 \mu\text{m}$ pump pulse with a width of 200 fs in a 15 cm fiber is numerically simulated. The properties of the infrared supercontinuum spectrum is also studied under different peak powers, pulse widths, and pump wavelengths.

Key words materials; nonlinear optics; infrared supercontinuum; finite element method; compound microstructured optical fiber; dispersion

OCIS codes 160.2290; 060.2290; 060.2310; 060.2390

1 引 言

红外波段的超连续谱(SC谱)光源^[1]在航天、生物医学、红外传感、物种识别、污染物监测等诸多前沿的技术领域具有重要的应用前景^[2-6]。目前中红外($3\sim 5 \mu\text{m}$)乃至远红外区域($8\sim 14 \mu\text{m}$)SC谱的研究主要以非石英玻璃光纤的非线性效应为主, 主要包括氟化物^[2]、碲酸盐^[7]和硫系玻璃光纤^[8]三种, 其中硫系玻璃光纤(以下简称硫系光纤)不仅能透中红外和远红外波段, 而且非线性系数极高^[9], 理论上是产生可覆盖中红外到远红外波段的唯一非线性光纤^[10]。

收稿日期: 2015-03-05; 收到修改稿日期: 2015-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(61435009, 61377099)、宁波市新型光电功能材料及器件创新团队项目(2009B21007)和宁波大学王宽诚幸福基金

作者简介: 汪 翠(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事硫系光纤超连续谱等方面的研究。E-mail: 1072439302@qq.com

导师简介: 戴世勋(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事光功能玻璃材料及器件等方面的研究。

E-mail: daishixun@nbu.edu.cn(通信联系人)

基于硫系玻璃^[11]的微结构光纤结构设计、超短脉冲在其中的传输特性^[12-14]成为红外光纤 SC 谱研究的热点。这是因为传统阶跃型结构的硫系光纤零色散点(ZDW, Z_{0w})受材料色散影响往往位于长波区域($>4.5 \mu\text{m}$)^[15],在正常色散区抽运下光纤中的级联受激拉曼效应(SRS)和自相位调制(SPM)非线性效应受限,采用近红外激光光源抽运传统结构硫系光纤很难获得平坦且宽的 SC 谱输出。为了实现高质量的 SC 谱输出,需要设计和优化新型结构的硫系光纤,其目的在于:1) 将光纤的零色散波长 ZDW 点移到短波区域,使其在抽运源选择上更加灵活;2) 通过增大有效折射率差可以增强光的限制能力,增强光纤端面光功率密度,从而提高光纤的非线性。硫系光子晶体光纤要实现较小的零色散波长往往需要多层(层数 $N_r > 3$)空气孔环绕,这增加了光纤制备工艺难度。研究者尝试设计一种结构相对简单的复合材料微结构硫系光纤,增大纤芯材料和包层材料折射率差,增强光的限制能力,提高光纤的非线性;同时设计空气孔层数较少($N_r < 3$)的结构以便后期制备简单。

本文设计了一种基于较 As_2S_3 硫系玻璃更高折射率 1550 nm 处的折射率 $n=2.84$ 和更宽红外透过区域($0.9\sim 15 \mu\text{m}$)的 As_2Se_3 硫系玻璃作为纤芯、碲酸盐玻璃为包层基质,两层空气孔环绕的复合微结构光纤,该结构使纤芯-包层的有效折射率差增大,增强对模场的限制作用,光功率密度随之增强,从而有助于提高光纤的非线性。与此同时,通过调整孔间距 Λ 、孔直径 d 、纤芯直径 D 来优化光纤色散分布,本文数值模拟了中心波长为 $2.5 \mu\text{m}$,初始脉宽为 200 fs 的光脉冲在 15 cm 长的光纤中的传输特性,并深入分析了不同波长、脉宽、功率的超短脉冲激发下红外 SC 谱的输出特性,目前可以展宽至 $9 \mu\text{m}$ 。

2 光纤结构

所设计的硫系玻璃-碲酸盐玻璃复合微结构光纤结构如图 1 所示,以 As_2Se_3 硫系玻璃为光纤纤芯材料、碲酸盐为光纤包层材料,其组成为 $76.5\text{TeO}_2-6\text{Bi}_2\text{O}_3-11.5\text{Li}_2\text{O}-6\text{ZnO}$ (TZLB)^[16],玻璃转变温度 T_g 约为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,略高于 As_2Se_3 材料。纤芯周围环绕两层空气孔,可调节 Λ 、 d 和 D 光学结构参数对光纤色散分布优化。利用等效面积法,得到正六边形排列结构的空气填充率 $f=(\sqrt{3}\pi/6)(d/\Lambda)^2$,较高的空气填充率^[17]有助于减小基模的限制损耗,所设计的光纤结构,纤芯-包层间的有效折射率差较大 ($\Delta n > 0.8$),能有效增强纤芯对基模模场的限制作用,而基模的横向电场分布变小,光纤端面光功率密度随之增强,从而有助于提高光纤非线性;此外,所设计的光纤结构可以结合机械钻孔和管棒法制备光纤预制棒。

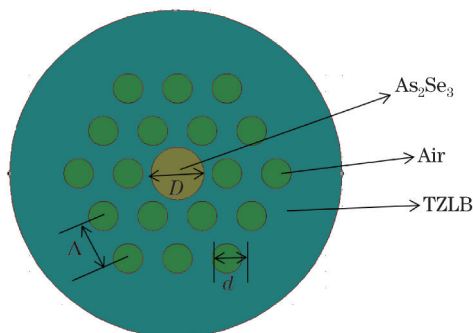


图 1 复合结构光纤截面示意图
Fig.1 Cross section picture of the compound microstructured fiber

3 理论基础

依据 Sellmeier 公式,材料的线性折射率与波长满足如下关系式:

$$n^2 = 1 + \frac{A_1 \lambda^2}{\lambda^2 - L_1^2} + \frac{A_2 \lambda^2}{\lambda^2 - L_2^2} + \frac{A_3 \lambda^2}{\lambda^2 - L_3^2}, \quad (1)$$

As_2Se_3 玻璃与 TZLB 玻璃折射率^[18]的相关系数如下表 1 所示。依据文献[19]可知, As_2Se_3 材料零色散点为 $7.225 \mu\text{m}$ 。色散是指在光纤中传输的不同频率成分的电磁波与电介质中的束缚电子相互作用,介质的响应通常与光波频率有关的特性^[20]。在超连续谱的理论模拟和实验研究中,必须要考虑到光纤的色散参量随波长的变化。通过传播常数 β 求得模式的有效折射率 $n_{\text{eff}} = \beta/k_0$,再由模式有效折射率 n_{eff} 的实部计算即可得到色散随波长的变化关系为

$$D = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \operatorname{Re}(n_{\text{eff}})}{d\lambda^2}, \quad (2)$$

式中有有效折射率 n_{eff} 利用有限元法计算得到, c 为光在真空中传播的速度, λ 为波长, $\operatorname{Re}(n_{\text{eff}})$ 为 n_{eff} 的实部。

表 1 As₂Se₃ 和 TZLB 折射率系数

Table 1 Refractive coefficient of As₂Se₃ and TZLB

Material	As ₂ Se ₃		TZLB	
	A_i	L_i^2	A_i	L_i^2
$i=1$	4.994872	0.058390	1.67189	0.0004665
$i=2$	0.120715	361	1.34862	0.0574608
$i=3$	1.712369	0.23356	0.6218	46.725427

衡量光纤非线性的物理量即非线性系数 γ 为

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{n_2(x, y)}{A_{\text{eff}}}, \quad (3)$$

式中 As₂Se₃ 的 $n_2=5.74 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, TZLB 的 $n_2=5.9 \times 10^{-19} \text{ m}^2/\text{W}$, 基模的有效面积 $A_{\text{eff}} = \frac{\left[\int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^2 dx dy \right]^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |F(x, y)|^4 dx dy}$, 其中 $F(x, y)$ 是光纤基模的模分布, 显然 A_{eff} 取决于光纤参量, 如纤芯尺寸和纤芯-包层折射率差等。本工作中所设计的光纤具有高的 Δn , 对传输的光波有很强的模场限制作用, 因此具有很高的非线性特性, 另外, 可以通过减小纤芯直径来减小 A_{eff} 从而提高非线性。在中心波长为 2.5 μm 时, 估算得到该结构的非线性系数 $\gamma=15.45 (\text{m} \cdot \text{W})^{-1}$ 。

光纤中超连续谱的产生是一个非常复杂的过程, 除色散效应外, 还涉及到许多非线性效应, 诸如自相位调制、四波混频、拉曼响应、孤子效应等, 因此需要精确的物理模型来描述光脉冲的传输情况。本文基于光脉冲在光纤中的传输方程, 即广义非线性薛定谔方程^[21](GNLSE)为

光纤中超连续谱的产生是一个非常复杂的过程, 除色散效应外, 还涉及到许多非线性效应, 诸如自相位调制、四波混频、拉曼响应、孤子效应等, 因此需要精确的物理模型来描述光脉冲的传输情况。本文基于光脉冲在光纤中的传输方程, 即广义非线性薛定谔方程^[21](GNLSE)为

$$\frac{\partial A}{\partial z} + \frac{\alpha}{2} A - \sum_{k=1}^{10} \frac{i^{k+1}}{k!} \beta_k \frac{\partial^k A}{\partial T^k} = i\gamma \left(1 + \tau_{\text{shock}} \frac{\partial}{\partial T} \right) \left[A(z, T) \int_{-\infty}^{\infty} R(T') |A(z, T - T')|^2 dT' \right], \quad (4)$$

式中 $A(z, T)$ 表示复电场的慢包络, β_k 为脉冲高阶色散项 (k 表示色散阶数), 其定义为 $\beta_k = \left(\frac{d^k \beta}{d\omega^k} \right)_{\omega=\omega_0}$, 分别反映

各阶色散参量对脉冲传输的影响, γ 为非线性系数, A_{eff} 为模场面积, $R(t)$ 是拉曼响应函数, $R(t) = (1 - f_r) \delta(t) + f_r h_r(t)$ 式中, f_r 表示拉曼响应对非线性极化 P_{NL} 的贡献 ($f_r=0.132$), $h_r(t)$ 为拉曼响应函数^[22], 其中, $h_r(t) = \frac{\tau_1^2 + \tau_2^2}{(\tau_1 \tau_2)^2} \exp(-t/\tau_2) \sin(t/\tau_1)$, 式中 $\tau_1 = 22.5 \text{ fs}$, $\tau_2 = 225 \text{ fs}$, 右边的时间导数项与自陡峭和光学冲击的形成有关。

a 为损耗数值, 考虑到目前制备工艺, 假设 $a=1.5 \text{ dB/m}$, 所模拟的光纤长度仅为 15 cm。

4 结果与讨论

4.1 色散分析

通过调整光纤结构参数 Λ 、 d 和 D , 对光纤色散分布进行优化^[23], 同时考虑光纤的限制损耗, 目的在于获得具有较好的色散特性、较小的限制损耗的高非线性复合结构光纤。图 2 为 $d=1 \mu\text{m}$, $D=1.8 \mu\text{m}$ 时, 光纤色散分布与限制损耗随 Λ 值变化关系, 从图 2(a) 中可以看出, 当 Λ 值逐步增大时, 即从 1.5 μm 变化到 2.0 μm 时, 光纤的 ZDW 点向长波迁移, 色散曲线的弯曲程度降低, 说明随着高非线性光纤限制能力的减弱, 使得色散幅度减小, 可以起到色散补偿的作用, 与此同时, 由图 2(b) 可得限制损耗随 Λ 值增大而增大。

图 3(a) 为结构参量 $\Lambda=1.5 \mu\text{m}$, $D=1.6 \mu\text{m}$ 时, 色散曲线随 d 的变化关系, 当 d 从 0.8 μm 逐渐增大到 1.05 μm 时, ZDW 位置蓝移, 同时随着光纤空气填充率的增大, 光纤对模场的限制能力增强, 相应的色散幅度值也随之增大, 但变化幅度不大。图 3(b) 为结构参量 $\Lambda=1.5 \mu\text{m}$, $d=1 \mu\text{m}$ 时; 色散分布随 D 的变化关系, 由图可得当 D 从 1.6 μm 增大至 1.8 μm 时, 光纤的 ZDW 波长蓝移到 2.48 μm 左右, 同时色散幅度值也明显增大。最终确定优化的光纤结构参数为 $\Lambda=1.6 \mu\text{m}$ 、 $d=1 \mu\text{m}$ 、 $D=1.8 \mu\text{m}$, 光纤 ZDW 波长为 2.5 μm , 此时, 光纤 A_{eff} 约为 1.55 μm^2 。

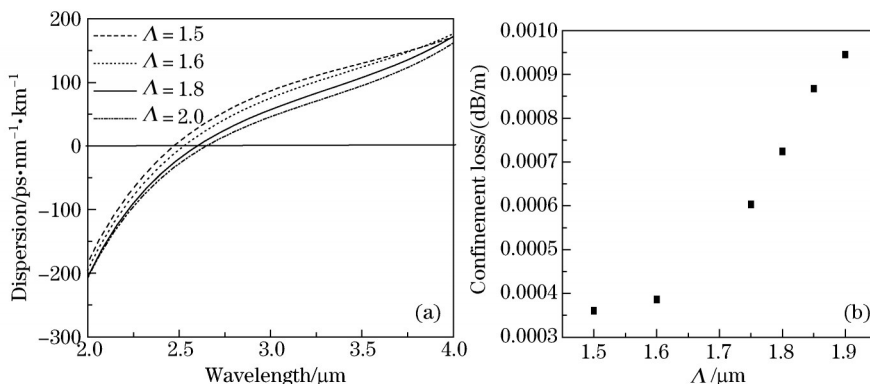


图 2 (a) 不同 Λ 对应的色散变化曲线; (b) LP_{01} 模的限制损耗随 Λ 变化曲线

Fig.2 (a) Dispersion curves under different Λ ; (b) confinement loss curves of LP_{01} mode with different Λ

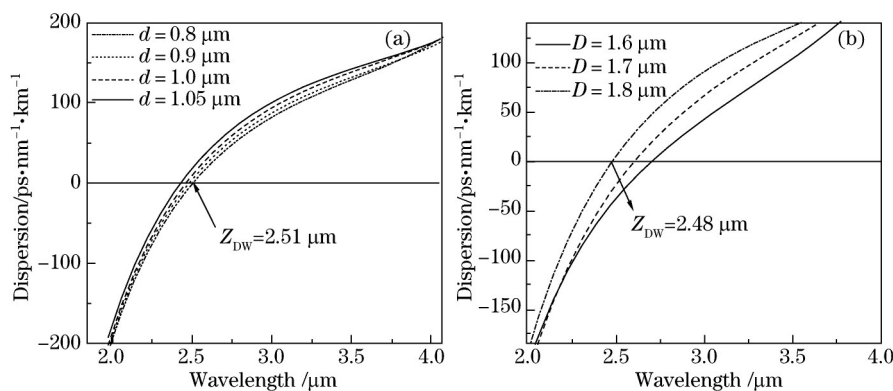


图 3 (a)不同 d 对应的色散变化曲线; (b)不同 D 对应的色散变化曲线

Fig.3 (a) Dispersion curves under different d ; (b) dispersion curves under different D

4.2 超连续谱的产生

为清楚地了解超短激光脉冲在所设计光纤中的传输特性,利用自适应分步傅里叶法求解GNLSE,考虑到模拟结果的准确性,色散值计算到第10阶(如表3所示)。在此基础上,深入研究了输入功率、脉冲宽度和输入波长对SC谱产生的影响。

表 3 光纤的各阶色散参数 β_i

Table 3 Various orders dispersion parameter β_i of fiber

	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	β_9	β_{10}
s^n/m	-2.0598×10^{-26}	2.3998×10^{-39}	-6.0322×10^{-54}	5.9458×10^{-67}	-6.2224×10^{-80}	3.8657×10^{-92}	-5.728×10^{-105}	5.357×10^{-118}	7.0834×10^{-132}

4.2.1 输入峰值功率 P_0 对 SC 谱的影响

当 $T_{FWHM}=200$ fs, $\lambda=2.5$ μm 时,不同峰值功率(P_0)作用下对 SC 谱展宽的影响,如图 4 所示。从中可以看出,当 $P_0=1$ kW 时得到 1.5~6 μm 平坦的 SC 谱,主要原因是在 ZDW 抽运时,自相位调制效应诱导频率啁啾从而造成脉冲频谱展宽,随后在反常色散区产生高阶孤子,并在拉曼效应的作用下引发孤子分裂和平移,而在满足相位匹配的正常色散区形成非孤子辐射,当 P_0 增加到 2 kW,长波方向平坦的 SC 谱范围扩展到 7 μm ,随着 P_0 继续增加,长波方向不断展宽,在 $P_0=3$ kW 时,获得 1.5~7 μm 平坦的 SC 谱,功率继续增加时,短波方向的频谱基本保持不变,但是强度有所减小,而长波方向继续展宽,但平坦度明显降低且出现不同的孤子峰如图 4(d)

所示,造成这种现象的原因是峰值功率增加,孤子阶数 $N \left(= \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{|\beta_2|}} T_0 \right)$,其中 $L_D \left(= \frac{T_0^2}{|\beta_2|} \right)$ 和 $L_{NL} \left(= \frac{1}{\gamma P_0} \right)$

分别是光纤的色散长度和非线性长度, P_0 为输入峰值功率, β_2 为输入波长处的群速度色散系数)也随之增加,高阶孤子^[24]在反常色散区容易裂变成基阶孤子,在拉曼效应的作用下基阶孤子^[25]不断红移。随后在脉冲内拉曼散射等非线性效应与三阶色散的共同作用下,频谱进一步展宽但平坦度降低如图 4(c)和(d)所示。所

以 SC 谱的展宽受峰值功率影响较大,且峰值功率越高,频谱越宽但同时平坦度下降,因此在实际应用时,应选用恰当的峰值功率。

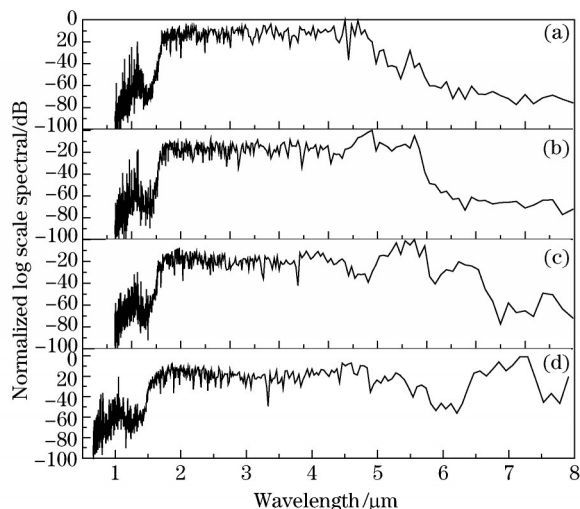


图 4 不同峰值功率条件下的输出光谱。(a) $P_0=1$ kW; (b) $P_0=2$ kW; (c) $P_0=3$ kW; (d) $P_0=4$ kW

Fig.4 Output spectra under different peak powers. (a) $P_0=1$ kW; (b) $P_0=2$ kW; (c) $P_0=3$ kW; (d) $P_0=4$ kW

4.2.2 脉冲宽度 T_{FWHM} 对 SC 谱的影响

光纤中的高阶色散对光脉冲传输和频谱演化的影响效果与脉冲初始宽度密切相关,因此输入激光的脉宽对光纤的 SC 谱的形成有着极其重要的影响。图 5 为 $\lambda_0=2.5 \mu\text{m}$, $P_0=3$ kW 时改变脉冲宽度(T_{FWHM})所获得的不同 SC 谱,从中不难看出,脉宽越窄,产生的 SC 谱平坦度越好,当 $T_{FWHM}=50$ fs 时,获得平坦的 SC 谱范围为 $1.5\sim 6.5 \mu\text{m}$ [如图 5(a)所示],随着脉宽逐步变宽,长波方向的 SC 谱不断展宽,当 $T_{FWHM}=300$ fs 时,频谱最大可展宽到 $9 \mu\text{m}$ 但长波方向上平坦度也随之降低[如图 5(c)所示],出现明显的振荡结构。这主要是由于脉宽增加,相应的孤子数和总能量都随之增加,在高阶色散作用下,脉冲分裂出更多的基态孤子,因此才会出现更多振荡结构,但同时色散长度也随之增加,在给定长度范围内,色散作用减小,SC 谱的振荡主要受孤子效应的影响。另外,比较 T_{FWHM} 为 50 fs 和 300 fs 频谱归一化强度可知,随着 T_{FWHM} 增加,输出频谱强度明显减弱。由此可见,为便于实验检测,在零色散点处抽运产生 SC 谱时,脉冲宽度越窄越好。

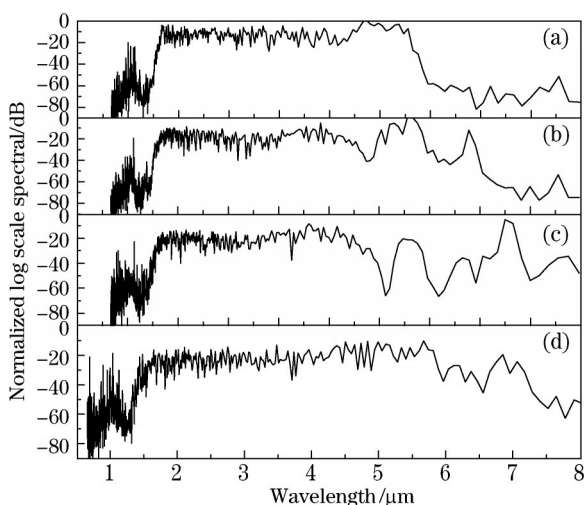


图 5 不同脉宽激光抽运下的 SC 谱。(a) $T_{FWHM}=50$ fs; (b) $T_{FWHM}=100$ fs; (c) $T_{FWHM}=200$ fs; (d) $T_{FWHM}=300$ fs

Fig.5 Output SC spectra of different pulse widths. (a) $T_{FWHM}=50$ fs; (b) $T_{FWHM}=100$ fs; (c) $T_{FWHM}=200$ fs; (d) $T_{FWHM}=300$ fs

4.2.3 输入波长 λ_0 对 SC 谱的影响

当 $P_0=5$ kW、 $T_{FWHM}=200$ fs 时,分别模拟了中心波长(λ_0)为 2.5 和 $3.5 \mu\text{m}$ 激光抽运下获得的不同 SC 谱曲线如图 6 所示,当在 ZDW 所对应的 $2.5 \mu\text{m}$ 激光抽运时,获得 $1.5\sim 6 \mu\text{m}$ 平坦的 SC 谱,而长波方向出现明显的振荡结

构,这种结构主要受高阶孤子裂变和四波混频的影响。在脉宽较宽时,孤子的阶数 N 就越大,受高阶色散的影响, N 阶孤子裂变成 N 个基阶孤子,同时每个脉冲会发出对应的蓝移和相位匹配的非孤子波,由于四波混频效应,最后由于光谱相互兼并形成超连续谱。当采用远离ZDW的 $3.5\ \mu\text{m}$ 脉冲激光抽运时,与图6(a)相比,平坦SC谱范围明显减小,长波方向出现明显的孤子峰,并且可以明显看到在 $6\ \mu\text{m}$ 左右出现一个光谱缺陷,这主要是由于抽运波长两边的正常色散和反常色散区的群速度失配引起的。当抽运波长离零色散点越远^[26],形成相位匹配的四波混频效应越弱,在红外波段的光谱带隙越明显,当脉冲波长从 $2.5\ \mu\text{m}$ 增加到 $3.5\ \mu\text{m}$ 时,二阶色散值也随之增加,于是其分裂产生的孤子宽度也随之增加,导致孤子拉曼效应减小,结果红移量也相应降低。由此可得,抽运波长远离ZDW时,SC谱宽减小,同时平坦度也降低。因此选用靠近ZDW的抽运波长较为合适。

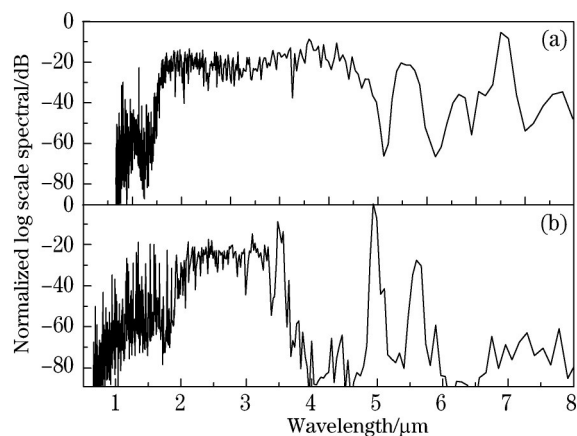


图6 不同波长抽运下SC谱输出。(a) $\lambda=2.5\ \mu\text{m}$; (b) $\lambda=3.5\ \mu\text{m}$

Fig.6 Output SC spectra of different pump wavelengths. (a) $\lambda=2.5\ \mu\text{m}$; (b) $\lambda=3.5\ \mu\text{m}$

5 结 论

设计了一种以 As_2Se_3 作纤芯、碲酸盐为包层基质两层空气孔环绕的复合微结构光纤,通过对光纤结构参数调整对其色散特性进行了优化,结果表明:当 $\Lambda=1.6\ \mu\text{m}$ 、 $d=1\ \mu\text{m}$ 、 $D=1.8\ \mu\text{m}$,光纤ZDW可调至 $2.5\ \mu\text{m}$,限制损耗小于 $0.001\ \text{dB/m}$,光纤的 A_{eff} 约为 $1.55\ \mu\text{m}^2$,估算得到非线性系数 $\gamma=15.45\ (\text{m}\cdot\text{W})^{-1}$ 。在此基础上,数值分析了不同峰值功率 P_0 、脉冲宽度 $T_{\text{HWF}}M$ 及抽运波长 λ_0 下超短脉冲对光纤SC谱输出特性的影响。当 $P_0=3\ \text{kW}$, $T_{\text{HWF}}M=200\ \text{fs}$, $\lambda_0=2.5\ \mu\text{m}$ 时,在长度为 $15\ \text{cm}$ 的光纤中可获得 $1.5\sim 8\ \mu\text{m}$ 平坦的红外SC谱。这种复合结构光纤的设计为进一步研究中红外超短脉冲传输、超宽带平坦超连续谱等提供了理论基础,但是对于制备该复合结构的光纤需要结合管棒法和打孔法,制备工艺复杂有待进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Yang Weiqiang, Zhang Bin, Xue Guanghui, *et al.*. 13W all fiber mid-infrared supercontinuum source[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305001.
杨未强,张斌,薛光辉,等. 13 W全光纤中红外超连续谱光源[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305001.
- 2 Yang W, Zhang B, Xue G, *et al.*. Thirteen watt all-fiber mid-infrared supercontinuum generation in a single mode ZBLAN fiber pumped by a $2\ \mu\text{m}$ MOPA system[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1849-1852.
- 3 Daly J G. Mid-infrared laser applications[C]. SPIE Eyesafe Lasers: Lomponents, Systems, and Applications, 1991, 1419: 94-99.
- 4 Waynant R W, Ilev I K, Gannot I. Mid-infrared laser applications in medicine and biology[J]. Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2001, 359(1780): 635-644.
- 5 Werle P, Slemr F, Maurer K, *et al.*. Near- and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2002, 37(2-3): 101-114.
- 6 Yu Y, Gai X, Wang T, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in chalcogenides[J]. Optical Materials Express, 2013, 3(8): 1075-1086.
- 7 Yang Weiqiang, Hou Jing, Zhang Bin, *et al.*. Numerical simulation of mid-infrared supercontinuum generation by laser pumped telluride[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(9): 2031-2036.

- 杨未强, 侯 静, 张 斌, 等. 激光抽运碲化物产生中红外超连续谱数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(9): 2031-2036.
- 8 Sanghera J, Florea C, Shaw L, *et al.*. Non-linear properties of chalcogenide glasses and fibers[J]. Journal of NonCrystalline Solids, 2008, 354(2-9): 462-467.
- 9 Dai Shixun, Yu Xingyan, Zhang Wei, *et al.*. Reasearch program of chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 090602.
- 戴世勋, 於杏燕, 张 巍, 等. 硫系玻璃光子晶体光纤研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 090602.
- 10 Wang Cui, Dai Shixun, Zhang Peiqing, *et al.*. Research progress of infrared supercontinuum generation in chalcogenide glass fibers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 030001.
- 汪 翠, 戴世勋, 张培晴, 等. 基于硫系玻璃光纤的红外超连续谱的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 030001.
- 11 Cheng Ci, Wang Xunsi, Xu Tiefeng, *et al.*. Research on preparation and optical properties of far infrared Ge-Te-I chalcogenide glasses with high halogen[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(2): 0216002.
- 程 辞, 王训四, 徐铁峰, 等. 远红外 Ge-Te- I 高卤硫系玻璃的制备及其光学性能的研究[J]. 光子学报, 2015, 44(2): 0216002.
- 12 Møller U, Yu Y, Petersen C R, *et al.*. High average power mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber[C]. Advanced Photonics, 2014.
- 13 Savellii I, Mouawad O, Fatome J, *et al.*. Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured sulfide and tellurite optical fibers[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27083-27093.
- 14 Gao W, Duan Z, Asano K, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a four-hole As₂S₃ chalcogenide microstructured optical fiber[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2014, 116(4): 847-853.
- 15 Amraoui M E, Gadret G, Jules J, *et al.*. Microstructured chalcogenide optical fibers from As₂S₃ glass: Towards new IR broadband sources[J]. Optics express, 2010, 18(25): 26655-26665.
- 16 Chaudhari C, Liao M, Suzuki T, *et al.*. Chalcogenide core tellurite cladding composite microstructured fiber for nonlinear applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(13): 2069-2076.
- 17 Yang Peilong, Dai Shixun, Yi Changshen, *et al.*. Design and performance study of mid-IR dispersion in photonic crystal fiber prepared from a flattened chalcogenide glass[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(1): 014210.
- 杨佩龙, 戴世勋, 易昌申, 等. 中红外色散平坦硫系光子晶体光纤设计及性能研究[J]. 物理学报, 2014, 63(1): 014210.
- 18 Kohoutek T, Duan Z, Kawashima H, *et al.*. Tailoring chromatic dispersion in chalcogenide-tellurite microstructured optical fiber[J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(4): 409-413.
- 19 Yuan W. 2-10 μm mid-infrared supercontinuum generation in As₂Se₃ photonic crystal fiber[J]. Laser Physics Letters, 2013, 10(9): 095107.
- 20 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu. Dispersion property in highly nonlinear photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 539-542.
- 吴 铭, 刘海荣, 黄德修. 高非线性光子晶体光纤色散特性的研究[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 539-542.
- 21 Li Xiaoqing, Zhang Shumin, Li Dan, *et al.*. Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. Acta Photonica Sinica, 2008, 37(9): 1805-1809.
- 李晓青, 张书敏, 李 丹, 等. 光子晶体光纤中超连续谱产生的理论与实验研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1805-1809.
- 22 Duhant M, Renard W, Canat G, *et al.*. Fourth-order cascaded Raman shift in AsSe chalcogenide suspended-core fiber pumped at 2 μm [J]. Optics Letters, 2011, 36(15): 2859-2861.
- 23 Li Xuyou, Xu Zhenlong, Ling Weiwei, *et al.*. Numerical simulation and anysis of photonic crystal fibers with high nonlinearity and flattened chromatic dispersion[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0505003.
- 李绪友, 许振龙, 凌卫伟, 等. 高非线性色散平坦光子晶体光纤的数值模拟与分析[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0505003.
- 24 Cheng Chunfu, Wang Xiaofang, Lu Bo. Nonlinear propagation and supercontinuum generation of a femtosecond pulse in photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(6): 1826-1830.
- 成纯富, 王晓方, 鲁 波. 飞秒光脉冲在光子晶体光纤中的非线性传输和超连续谱产生[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1826-1830.
- 25 Ji Lingling, Chen Wei, Cao Yingchun, *et al.*. Supercontinuum generation based on fission of higher-order soliton in bi-brief photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2009, 58(8): 5462-5466.
- 季玲玲, 陈 伟, 曹迎春, 等. 双折射光子晶体光纤中基于孤子分裂的超连续光谱产生[J]. 物理学报, 2009, 58(8): 5462-5466.
- 26 Lehtonen M, Genty G, Ludvigsen H, *et al.*. Supercontinuum generation in a highly birefringent microstructured fiber[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(14): 2197-2199.