

硫系 As_2S_3 悬吊芯光纤制备及其光谱性能研究

祝清德¹ 王训四¹ 张培晴¹ 彭涛² 陈玮³ 聂秋华¹ 孙礼红¹ 程辞¹ 刘硕¹ 潘章豪¹
廖方兴¹ 张培全¹ 刘自军¹ 戴世勋¹ Guangming Tao⁴

¹宁波大学信息科学与工程学院高等技术研究院红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211

²浙江万里学院电子信息学院, 浙江 宁波 315100

³邵阳学院电气工程系, 湖南 邵阳 422004

⁴CREOL, The College of Optics & Photonics, University of Central Florida, Orlando, United States

摘要 硫系玻璃材料具有极高的线性和非线性光学性能,在此基础上制备的悬吊芯结构的硫系光纤较之石英玻璃光纤或普通结构硫系玻璃光纤具备非线性更高、零色散点可调和红外透过光谱宽等特性,因此在红外波段的光谱展宽及化学生物传感等方面均具有非常重要的应用潜能。根据硫系玻璃悬吊芯光纤及超连续(SC)谱的研究发展,提出一种通过挤压高纯块状硫系玻璃制备理想结构的四孔硫系玻璃悬吊芯光纤的方法。该新型机械挤压法保证了玻璃性能稳定和光纤结构可调的特性。获得了低损耗(波长为 3.8 μm 处的损耗仅为 0.17 dB/m)的硫系悬吊芯光纤,此外分别测试了玻璃和光纤的相关光学性能。进一步讨论了 As_2S_3 玻璃样品的可见及红外透过性能及光纤的传输损耗谱、传输模式,利用中红外光参量放大激光光源(OPA)抽运光纤,获得了 SC 谱的产生,其展宽光谱在红外区域最宽可达 3000 nm(1500~4500 nm),理论展宽可达 6000 nm。

关键词 光纤光学; 硫系悬吊芯光纤; 挤压法; 高非线性; 超连续谱

中图分类号 O437; O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1206004

Fabrication and Optical Properties of Chalcogenide As_2S_3 Suspended-Core Fiber

Zhu Qingde¹ Wang Xunsi¹ Zhang Peiqing¹ Peng Tao² Chen Wei³ Nie Qihua¹
Sun Lihong¹ Cheng Ci¹ Liu Shuo¹ Pan Zhanghao¹ Liao Fangxing¹
Zhang Peiquan¹ Liu Zijun¹ Dai Shixun¹ Guangming Tao⁴

¹Laboratory of Infrared Materials and Devices, Institute of Advanced Technology, College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

²College of Electronical and Information, Zhejiang Wanli University, Ningbo, Zhejiang 315100, China

³Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang, Hunan 422004, China

⁴CREOL, The College of Optical & Photonics, University of Central Florida, Orlando, United States

Abstract The chalcogenide glasses are considered as a kind of good candidate for their characteristics of higher linearity and nonlinearity. Compared to common silica fibers and step-index chalcogenide glasses fibers, chalcogenide suspended-core fibers have better qualities in wider infrared transmitting, ultra-higher nonlinearity

收稿日期: 2015-06-23; 收到修改稿日期: 2015-08-12

项目基金: 国家自然科学基金(61377099, 61177087, 61307060)、国家 973 计划(2012CB22703)、国家科技部重大国际合作(2011DFA12040)、宁波市自然科学基金(2013A610118)、教育部新世纪优秀人才(NCET-10-0976)、浙江省 151 人才第三层次、浙江省教育厅一般项目(Y201329235)、宁波大学王宽诚幸福基金资助

作者简介: 祝清德(1989—),男,硕士研究生,主要从事硫系微结构光纤制备及光学性能研究方面的研究。

E-mail: zhuqingde2012@163.com

导师简介: 王训四(1979—),男,博士,博士生导师,主要从事红外光学材料、光纤光学器件等方面的研究。

E-mail: wangxunsi@nbu.edu.cn(通信联系人)

functioning and dispersion tailoring, so that it can be used in infrared laser spectrum broaden, chemical and biologic sensing popularly. First, the reviews are given for the developments of chalcogenide glasses fiber and laser supercontinuum generation; then, a few meters of four-hole suspended-core fibers are fabricated by a novel extrusion method which need only purified bulk chalcogenide glass for preparation. Here, the glasses thermal stability and tailored fibers geometry can be protected finely thanks to the novel extrusion method. In addition, the optical properties of glasses and fibers also are measured detailedly. With the help of optical spectra analysis, the visible and infrared transmitting of As_2S_3 samples, optical loss spectrum and light transmission spot diagrams in the fibers are discussed, respectively. A low-loss (0.17 dB/m at a wavelength of 3.8 μm) chalcogenide suspended-core fiber with a core diameter of 5.6 μm is obtained, and their supercontinuum generations are achieved under the pump of infrared optical parametric amplification(OPA) laser, the widest broadened spectrum in infrared region can be achieved up to 3000 nm (from 1500 to 4500 nm), and the value can be increased up to 6000 nm in theory with a more widen spectroscopic detector.

Key words fiber optics; chalcogenide suspended-core fiber; extrusion; high nonlinearity; supercontinuum

OCIS codes 060.2390;060.4005;160.4330;190.4370

1 引 言

在红外光学材料及器件研究领域,硝酸盐玻璃^[1]、氟化物玻璃^[2]以及硫系玻璃等均已被证明是红外光学通信及非通信领域的优良信号载体^[3],但其部分材料红外透过截止于 5 μm 处,因此限制了其在更广泛的中、远红外波段的应用。而硫系玻璃材料因为具有中远红外透过性能优良、折射率较高(2.0~3.5)、声子能量低(小于 350 cm^{-1})、组分可调等特性^[4],逐渐成为研制红外光纤和波导的理想基质材料^[5]。硫系悬吊芯光纤具有较低的本征损耗、宽的红外透过光谱^[6]、热化学稳定性及力学性能较好等特点,因此在生物化学传感^[7-8]、频谱检测^[9-10]、度量学^[11]等领域有着广泛的应用。另外硫系悬吊芯光纤具有高非线性、高双折射以及色散可控等光学特性,其光纤的非线性折射率是石英光纤的 1000 倍以上^[12],利用光纤高非线性产生的中红外超连续(SC)谱区域包含很多重要的有机化合物的本征振荡谱线^[13-14],因此基于硫系玻璃的光器件及系统以其优越的线性和非线性特性引起了越来越多的关注。

作为工作于红外波段的硫系玻璃材料,其透过性高、热化学稳定性好、成玻能力强,因此关于硫系玻璃材料及基于此的硫系光器件的研究成果不断被报道出来。硫系玻璃基质材料的制备与提纯方法不断被完善,以此提高了该材料的红外透过性能^[15-16]。Szpulak 等^[3]于 2009 年提出了基于简并四波混频的 As_2S_3 硫系悬吊芯光纤中红外波段波长转换方法,模拟了不同纤芯直径的悬吊芯光纤色散特性,发现设计合适的纤芯直径可以将光纤的零色散点(ZDW)减小至 2 μm 以下,以方便寻找合适的激光抽运光源。由文献[3]中图 2 可看出当纤芯直径达 1.1 μm 左右时,光纤的 ZDW 会移至 1.55 μm 处,为后续对硫系悬吊芯光纤在非线性和 SC 谱产生方面的研究奠定了一定的理论基础。之后关于低损耗、高非线性、不同几何参数的 As_2S_3 悬吊芯光纤中 SC 谱的产生不断被报道出来。Le 等^[17]研究报道了超高非线性 $\text{As}_{38}\text{S}_{62}$ 硫系悬吊芯光纤经拉锥后的四波混频效应。光纤损耗为 0.9 dB/m,纤芯直径为 1.13 μm ,克尔非线性系数达到 $46000 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$,在高速率全光网络的发展中具有巨大的潜在应用价值。接着 Savelii 等^[18]通过抽运损耗较低(在波长为 2.3 μm 损耗为 1 dB/m)、高非线性硫系悬吊芯光纤,得到了长达 2000 nm 的中红外 SC 谱输出。不同光纤长度、不同抽运波长和不同抽运功率等条件均会对悬吊芯光纤中红外 SC 谱的产生有直接的影响^[19],之后 Gao 等^[20]利用波长为 2 μm 处损耗为 1.5 dB/m、ZDW 为 2.28 μm 的 As_2S_3 硫系悬吊芯光纤,用多波长激光抽运分别获得了不同程度中红外 SC 谱展宽。基于以上文献报道,可知光纤损耗较高是因为普遍使用的机械打孔法造成光纤空气孔表面不光滑,甚至会在玻璃内部产生裂纹;此外拉丝过程中正压气氛扩大空气孔的过程稳定性差,尤其是在粘度变化显著的硫系光纤中,稳定性更难控制,制备的悬吊芯光纤结构稳定性欠佳。

本文在硫系悬吊芯光纤研究的基础上,提出了新型挤压法制备硫系悬吊芯光纤预制棒。结合前期挤压法制备多模硫系光纤的基础^[21]设计出了改进的新型挤压模具,制备了 As_2S_3 悬吊芯光纤预制棒,并配合高分子聚合物薄膜(聚醚砜树脂, PES)作为涂覆层拉制出低损耗、较高非线性硫系玻璃悬吊芯光纤。相比之下挤

压法制备硫系悬吊芯光纤预制棒,只需要将挤压模具细磨、抛光,要比玻璃磨抛简单许多,制备的光纤预制棒空气孔表面比较光滑且不会出现玻璃内部应力缺陷或裂纹,最后分别通过模拟和测试分析了该光纤的几何结构、传输损耗、多波长光信号的传输模式及SC谱的产生等。

2 样品制备

硫系悬吊芯光纤的制备过程主要包括:硫系玻璃熔制、玻璃挤压制备硫系悬吊芯光纤预制棒、悬吊芯光纤单丝拉制和套管法再次拉丝细化。

传统熔融淬冷法制备高纯块状 As_2S_3 硫系玻璃。选用高纯的砷(纯度为 5 N)、硫(5 N)单质及质量比为 500 mg/kg 镁条置于高纯石英管中,镁条用于除残留杂质(以下简称杂质)氧。通过高温 100 °C 加热(除杂质水)、抽真空处理 6 h 左右,当真空度在 10^{-3} Pa 以下时,高温熔融密封石英管,然后将其放置于蒸馏炉中高温 400 °C 蒸馏除杂,再将装有原材料和杂质的石英管熔断使二者分离。最后按照硫系玻璃熔制曲线在摇摆炉中进行高温(最高温度 750 °C)熔制并匀速摇摆 12 h 以上,以确保硫系玻璃熔融物的均匀性。熔制结束后,将装有 As_2S_3 玻璃熔融物的石英管迅速冷风处理,然后迅速将其放入预先设置好的 Nabertherm 精密退火炉中缓慢退火。在玻璃转变温度($T_g=185$ °C)处保温 5 h,再用 20 h 降至室温^[22]。即可获得直径 26 mm 的高纯块状 As_2S_3 玻璃[如图 1(b)所示]。对已制备的 As_2S_3 块体玻璃精密尺寸线切割,获得直径 26 mm、高度 20 mm 的硫系玻璃样品,以方便后续挤压过程。

利用自主设计的硫系玻璃悬吊芯光纤预制棒挤压模具[如图 1(a)所示]在挤压机中挤压制备硫系悬吊芯光纤预制棒。模具一般为不锈钢材料,能够在 500 °C 高温条件下不产生形变。先用乙醇清洗 As_2S_3 玻璃及挤压模具表面,再将玻璃准确置入挤压模具中,将二者一起放置于挤压机炉膛内部并充入惰性气体(如高纯 N_2 、Ar 等)防止硫系玻璃被氧化。炉膛温控区域分为预热、挤压及退火 3 个区域。然后设置挤压机升温曲线缓慢匀速升温。对于 As_2S_3 玻璃的挤压,预热、挤压和退火区域可分别设置为 1 h 升至最高温度 230 °C、360 °C、150 °C,然后持续保温 6 h 以上。待升到上述挤压温度后匀速挤压若干小时,挤压压力可由挤压温度和速度来调节,控制在 5~10 kN,挤压速度由步进电机控制,一般为 0.5 mm/min。即可获得图 1(c)、(d)所示几何形状的四孔硫系悬吊芯光纤预制棒。经机械挤压过程获得的光纤预制棒结构完整,没有杂质引入和析晶现象,且光纤预制棒的侧面及空气孔内表面比较光滑,相较于钻孔-充气法制备的硫系悬吊芯光纤,本制备方法获得的高光洁度表面能极大降低硫系光纤的散射损耗。

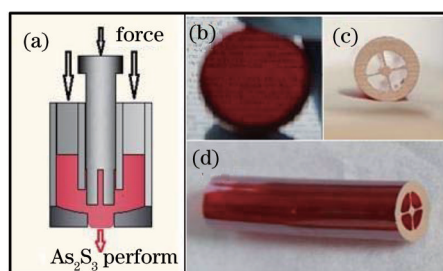


图 1 (a)挤压模具原理图; (b) As_2S_3 玻璃样品; (c)(d) 四孔悬吊芯光纤预制棒

Fig.1 (a)Diagram of extrusion; (b) As_2S_3 samples; (c)(d) four-hole suspended-core fibers preforms

由于 As_2S_3 玻璃的软化温度与聚合物 PES 相近,所以考虑用硫系玻璃悬吊芯光纤预制棒配合 PES 涂覆层光纤拉制。首先将清洗干净的 PES 薄膜均匀卷覆在悬吊芯光纤预制棒表面,并在真空干燥箱中真空高温环境下干燥缩合,形成带有涂覆保护层的硫系悬吊芯光纤预制棒。然后将其固定在拉丝机炉膛加热区高温加热,在合适的温度(T_g 附近)下匀速稳定拉丝,拉制出了长度约 50 m、直径 400~480 μm 的硫系悬吊芯光纤。拉丝过程中确保最优化的炉膛温度(330 °C 左右)、进棒速度(0.15 mm/min)、拉丝速度(0.2 mm/min)、拉丝张力及光纤直径等参数。另外考虑到挤压-拉丝工艺限制,需将悬吊芯光纤纤芯直径拉细至 10 μm 以下,所以采用套管法进一步制备硫系玻璃悬吊芯光纤预制棒,套管玻璃采用组分相同的 As_2S_3 玻璃或者转变温度 T_g 、软化温度 T_p 相近的其他硫系玻璃。经过二次拉丝,可得到纤芯直径微米数量级的高非线性硫系悬吊芯光纤(如图 2 所示)。

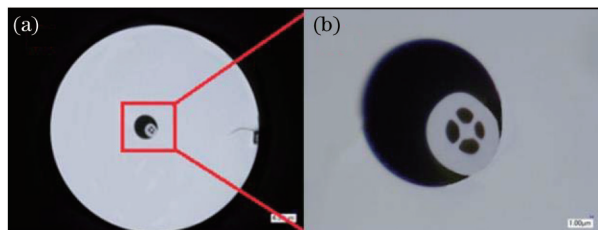


图2 超景深光学显微镜放大倍数为(a) 500×、(b) 3000×条件下的As₂S₃悬吊芯光纤端面图

Fig.2 Cross-section of suspended-core fibers in the microscope with different magnifications of (a) 500× and (b) 3000×

3 光学性能测试与讨论

3.1 玻璃透过性能测试

对As₂S₃玻璃和挤压后的光纤预制棒切片、端面磨抛处理,分别获得了厚度为20.19、1.87、2.01 mm的硫系玻璃样品,如图3内插图所示。图3为分光光度计和傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测得的不同As₂S₃玻璃样品的可见及红外透过光谱,可以看出样品在红外波段0.65~9.0 μm范围内透射率均在70%左右,在13 μm处的红外透过截止是由玻璃材料的本征吸收引起的,且透射光谱相对平坦,只存在少量较小的杂质吸收峰(2.9 μm处O-H⁻离子吸收峰,4 μm处S-H键吸收峰,6.3 μm处H₂O吸收峰),整体具备良好的可见及红外透过性能。另外该材料在机械作用高温挤压前后,其透射光谱并没有发生明显变化,截止波长略有变化是因为挤压前后测试样品的厚度稍有差异(挤压前厚度为1.87 mm,挤压后厚度为2.01 mm)引起的。因此可得出结论:该硫系玻璃材料适用于机械挤压法制备As₂S₃硫系悬吊芯光纤预制棒。

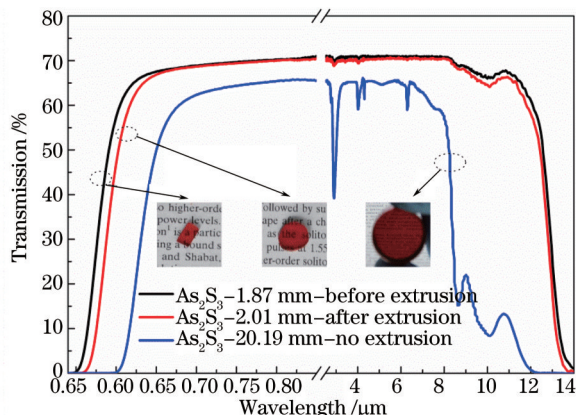


图3 不同As₂S₃玻璃样品的可见及红外透过光谱

Fig.3 Visible and infrared transmission spectra of As₂S₃ samples with different parameters

3.2 光纤性能测试

与其他非悬吊芯光纤相比,硫系玻璃悬吊芯光纤具有较大空气孔占空比,光纤包层折射率可近似为空气折射率($n=1$),因此光纤具有较大纤芯包层折射率差及较大的数值孔径,对限制光信号在纤芯中传输的能力也较强。图2为在超景深电子显微镜放大倍数分别为500×及3000×的条件下,所观察到的套管法制备的硫系悬吊芯光纤横截面图,图中黑色、灰色部分分别是空气孔、As₂S₃玻璃光纤,图2(a)光纤右侧部分缺陷为光纤切割刀切割所致,对光信号的传输没有影响。可以观察到经过套管拉丝过程后,硫系微结构光纤的四孔悬吊芯结构基本保持一致(仅有轻微变形,但对该悬吊芯光纤光学性能影响较小),整根光纤直径约450 μm(去掉PES涂覆层),纤芯直径约5.6 μm,且光纤机械性能良好,采用聚合物塑料保护后的光纤,其最小弯曲半径R可缩小到10 mm以内。利用FTIR截断法测试了该As₂S₃悬吊芯光纤的光纤损耗谱如图4所示,截断前后悬吊芯光纤的长度分别为1.04 m和0.41 m。测试数据表明该悬吊芯光纤传输损耗平均约为5 dB/m。在3.8 μm处最低,约为0.17 dB/m。

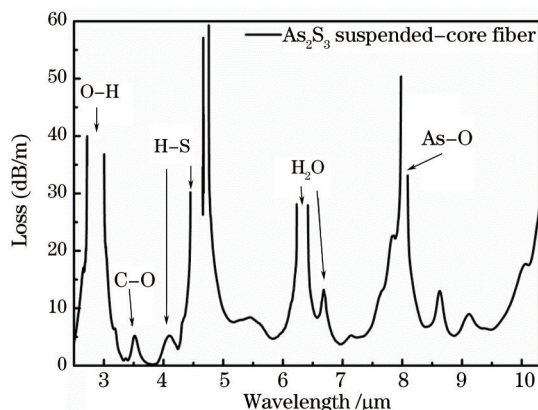


图4 截断法测试的硫系悬吊芯光纤损耗图谱

Fig.4 Loss spectrum of suspended-core fibers by cut-off method

光纤的数值孔径(NA)表征了光纤限制光信号在纤芯中传输的能力,定义式为

$$NA = n_0 \sin \theta = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中: n_1 和 n_2 分别表示悬吊芯光纤的纤芯和包层折射率。在波长 $1.55 \mu\text{m}$ 处 $n_1=2.4^{[3,23]}$,由于悬吊芯光纤纤芯周围空气孔占空比大的特殊性,包层折射率可近似为空气折射率,因此可取 $n_2 \approx 1$ 。经理论上计算可得在 $1.55 \mu\text{m}$ 处 $NA=2.18$,因此可知 As_2S_3 悬吊芯光纤具有较大的数值孔径,耦合效率较高,限制光信号能力较强。光纤的模场面积定义为^[24]

$$A_{\text{eff}} = \frac{\left[\iint_{\infty} |E(x,y)|^2 dx dy \right]^2}{\left[\iint_{\infty} |E(x,y)|^4 dx dy \right]}, \quad (2)$$

式中: E 为光纤中的横向电场分量。有效模场面积与其泄露损耗、宏弯损耗、数值孔径和非线性系数等密切相关,它依赖于纤芯和包层之间的折射率差和纤芯尺寸,由于悬吊芯光纤中二者折射率差较大,从而使光纤对光信号的模场限制很强,同时也提高了光纤的非线性特性。另外也可以通过减小纤芯直径来减小 A_{eff} 从而提高非线性。采用有限元法计算得到悬吊芯结构光纤模场半径为 $2.42 \mu\text{m}$,有效模场面积 A_{eff} 约为 $18.4 \mu\text{m}^2$ 。光纤的非线性系数 γ 的定义为

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

式中: n_2 为材料的非线性折射率, λ 为抽运波长,其中 As_2S_3 玻璃的 $n_2=3.285 \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}^{[25]}$,当抽运波长为 $2 \mu\text{m}$ 时,计算得到该结构的非线性系数为 $561 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ 。因此该 As_2S_3 悬吊芯光纤具有良好的非线性性能。

利用近红外(NIR)光纤光场分析仪 Xenics测试了该硫系悬吊芯光纤的光信号传输形式,即光信号在纤芯中的光场强度分布。光信号耦合采用空间耦合法,为提高耦合效率,在光纤输入端增加了 ZnSe 聚焦透镜,测试原理如图5所示,图中SMF为单模光纤。近红外相机通过网线与电脑连接,悬吊芯光纤中的光信号传输模式及光场强度分布可以在计算机中直观地显示出来。通过不同波长的飞秒激光器激光抽运,测得了纤芯中的光场强度分布图,横坐标为测试相对长度,纵坐标为测试点的光信号平均功率。测试结果如图6所示,其中插图照片中的横线为测量光场强度结果的分布区域,横线左端点为横坐标的坐标原点。研究发现不同激光抽运条件下,光信号均能很好地限制在纤芯中传输。尤其是在波长较长的 1520 nm 和 1570 nm ,该光纤呈现了较好的单模传输特性。

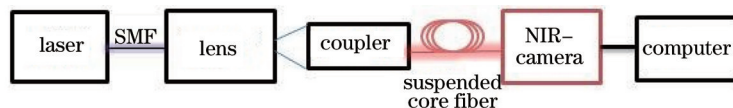


图5 光场分布测试原理图

Fig.5 Schematic diagram of optical field distribution

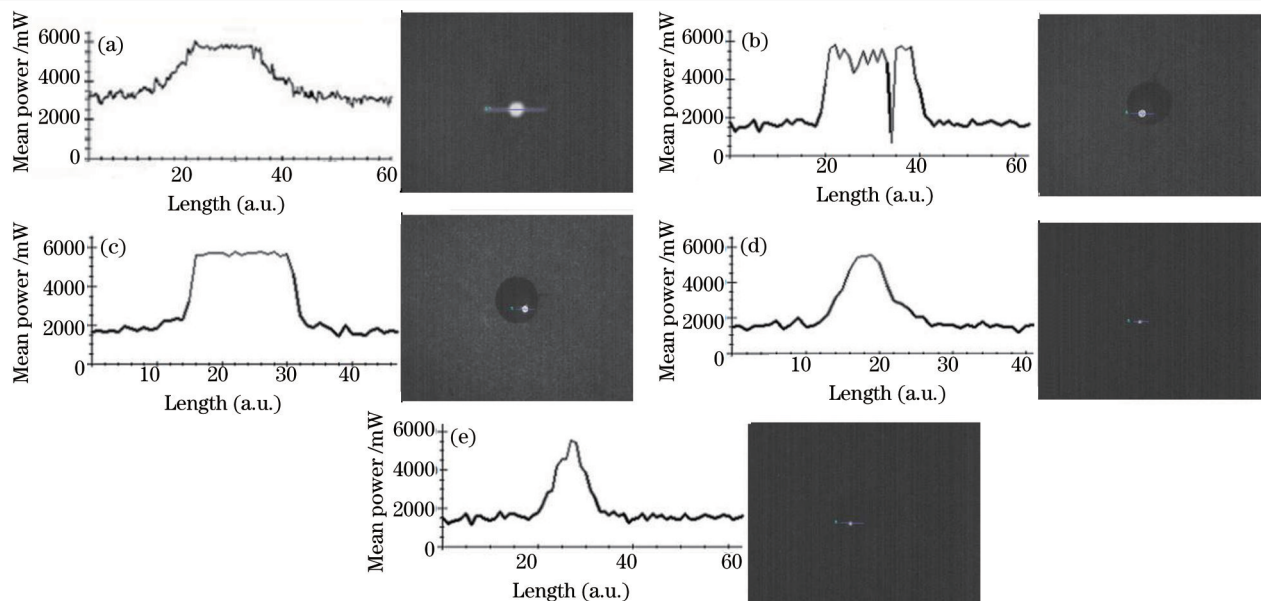


图6 不同抽运光波长条件下悬吊芯光纤信号传输光斑及光场强度分布图。(a) 800 nm; (b) 980 nm; (c) 980 nm(no focusing lens); (d) 1520 nm; (e) 1570 nm

Fig.6 Optical field distributions and transmit light spots in suspended-core fibers with different pump lights. (a) 800 nm; (b) 980 nm; (c)980 nm(no focusing lens); (d) 1520 nm; (e) 1570 nm

3.3 色散分析及SC谱产生

光纤中光信号群速度色散,是指在光纤中传输的不同频率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的特性有关^[26],即材料的折射率 $n(\omega)$ 和输入光波的频率相关,光纤的色散主要由模式色散、材料色散、波导色散组成。在SC谱的理论模拟和实验研究当中,必须要考虑到光纤的色散参量随波长的变化关系。通过传播常数 β 求得模式的有效折射率 $n_{eff}=\beta/k_0$,再由模式有效折射率 n_{eff} 的实部计算,即可得到光纤色散随波长的变化关系^[27]:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 \text{Re}(n_{eff})}{d\lambda^2}, \quad (4)$$

式中 β_2 表示群速度色散(GVD), n_{eff} 为模式有效折射率, c 为真空中光的传播速度, λ 为工作波长。利用有限元法配合 Matlab,模拟计算了该疏系悬吊芯光纤的纤芯有效折射率和色散分布曲线,纤芯直径 $d_{core}=5.6 \mu\text{m}$,模拟工作波长区间为 $0.6\sim 11.6 \mu\text{m}$,其有效折射率分布如图7所示,可以看出纤芯有效折射率介于 $2\sim 2.7$ 之间,并且随工作波长的红移逐渐减小。悬吊芯光纤纤芯中光信号的光场能量分布如图7内插图所示:在 $0.6\sim 5.6 \mu\text{m}$ 工作波长范围内,光信号均能很好地被限制在纤芯中传输。而在更长波长的 $6.6\sim 11.6 \mu\text{m}$ 处,光能量在悬挂臂以及外包层光纤中传输,发生了明显的能量泄露。

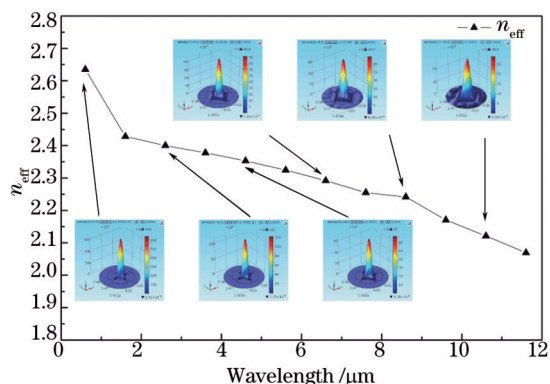


图7 疏系悬吊芯光纤中纤芯光场强度(内插图)和有效折射率分布

Fig.7 Diagram of optical field distributions and n_{eff} in fibers

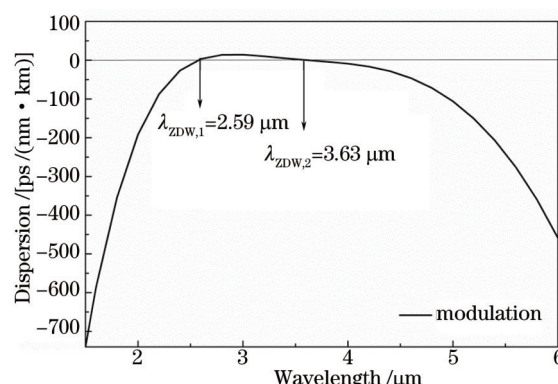


图8 As_2S_3 悬吊芯光纤模拟色散曲线图

Fig.8 Simulated dispersion of As_2S_3 suspended-core fiber

光纤色散数值模拟曲线如图8所示,色散曲线比较平坦,且色散最大值相对较小,约 $14.8 \text{ ps}/(\text{nm}\cdot\text{km})$,有利于SC谱的产生,并且该曲线具有明显的双零色散,零色散波长 λ_{zdw} 分别为 $2.59 \mu\text{m}$ 和 $3.63 \mu\text{m}$,双零色散对色散波的产生及孤子效应具有重要的作用,因此通过在反常和正常色散区抽运该光纤可实现对SC谱展宽的有效控制。

在硫系玻璃悬吊芯光纤的非线性应用研究当中,对光纤中SC谱产生的研究是目前最热点的问题。在SC谱的产生过程中,光纤中的自相位调制(SPM)、交叉相位调制(XPM)、四波混频效应(FWM)、受激拉曼散射(SRS)、高阶孤子分裂等非线性效应^[28]都将产生重要的作用。利用OPA激光器在该硫系玻璃悬吊芯光纤的正常和反常色散区进行多波长的激光抽运,抽运波长范围在 $2.9\sim 5.0 \mu\text{m}$ 之间,抽运光纤长度为 19.5 cm ,测试结果如图9所示,图中实线和虚线分别表示SC谱和抽运光源光谱。研究发现光谱展宽效果在 20 dB 以上的宽度可达到 2500 nm 以上,展宽效果在 $3.5 \mu\text{m}$ 波长处最优,约为 3000 nm ($1500\sim 4500 \text{ nm}$),半峰全宽约为 2360 nm ($2100\sim 4460 \text{ nm}$)。但是由于在 $2.9 \mu\text{m}$ 和 $4.6 \mu\text{m}$ 处, As_2S_3 玻璃材料及光纤存在着较大的杂质吸收峰,所以SC谱也会受此影响,严重影响了展宽光谱的平坦性,使其展宽效果明显变差。如果能减小杂质吸收峰的影响,可知SC谱展宽效果更好,更加平坦。此外由于本实验所用中红外荧光光谱仪仅能探测 $1000\sim 4800 \text{ nm}$ 的光谱,所以实际展宽可能是所探测谱宽的2倍,即 6000 nm 。

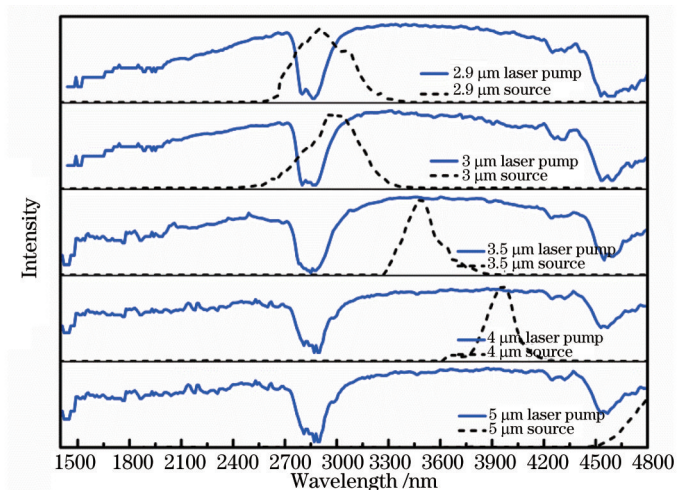


图9 硫系悬吊芯光纤在不同波长激光抽运条件下获得的SC谱

Fig.9 SC spectra generation in suspended-core fibers with different pump wavelengths

4 结 论

本实验选用成玻能力强,热、化学性能稳定且红外透射率高的 As_2S_3 玻璃制备硫系悬吊芯光纤,提出了一种硫系玻璃悬吊芯光纤的新型制备方法——挤压法,使得光纤制备工艺简单高效,同时改善了光纤的几何结构和光学性能,获得了低损耗高非线性的硫系悬吊芯光纤。实现了从硫系玻璃制备提纯、预制棒挤压到悬吊芯光纤拉制、测试等全过程,初步拉制出最低损耗为 $0.17 \text{ dB}/\text{m}$ (在波长为 $3.8 \mu\text{m}$ 处),数值孔径大,非线性系数在 $2 \mu\text{m}$ 处为 $561 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ 的 As_2S_3 硫系悬吊芯光纤,SC谱展宽最高达到了 3000 nm (理论可达 6000 nm),半峰全宽约为 2360 nm (理论可达 4720 nm)。为硫系悬吊芯光纤的研究发展以及在非线性、SC谱产生、化学生物传感方面的应用提供一定的参考价值。但是仍然与预期的目标有一定的差距,需要以后继续深入研究工作,降低光纤损耗,提高硫系悬吊芯光纤的光学性能和应用价值,尤其是光纤高非线性方面SC谱产生的应用研究。

参 考 文 献

- 1 M S Liao, C Chaudhari, G S Qin, *et al.*. Fabrication and characterization of a chalcogenide-tellurite composite microstructure fiber with high nonlinearity[J]. *Opt Express*, 2009, 17(24): 21608-21614.
- 2 G S Qin, X Yan, C Kito, *et al.*. Ultrabroadband supercontinuum generation from ultraviolet to $6.28 \mu\text{m}$ in a fluoride fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 95(16): 1103.
- 3 M Szpulak, S Février. Chalcogenide As_2S_3 suspended core fiber for mid-IR wavelength conversion based on degenerate four-wave mixing [C]. *SPIE*, 2009, 7357: 73570F.

- 4 Dai Shixun, Yü Xingyan, Zhang Wei, *et al.*. Research progress 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.
- 5 Yi Changshen, Dai Shixun, Zhang Peiqing, *et al.*. Design of a novel single-mode large mode area infrared chalcogenide glass photonic crystal fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(8): 84206.
易昌申, 戴世勋, 张培晴, 等. 新型单模大模场红外硫系玻璃光子晶体光纤设计研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(8): 84206.
- 6 M Duhant, W Renard, G Canat, *et al.*. Fourth-order cascaded Raman shift in AsSe chalcogenide suspended-core fiber pumped at 2 μm [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(15): 2859–2861.
- 7 T M Monro, S Warren-Smith, E P Schartner, *et al.*. Sensing with suspended-core optical fibers[J]. *Opt Fiber Technol*, 2010, 16(6): 343–356.
- 8 Liu Jiang, Liu Kun, Shi Hongxing, *et al.*. High-power all-fiber mid-infrared supercontinuum laser sources[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0902004.
刘 江, 刘 昆, 师红星, 等. 高功率全光纤中红外超连续谱激光光源[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0902004.
- 9 I Hartl, X D Li, C Chudoba, *et al.*. Ultrahigh-resolution optical coherence tomography using continuum generation in an air-silica microstructure optical fiber[J]. *Opt Lett*, 2001, 26(9): 608–610.
- 10 J C Ren, R L Zhou, S L Lou, *et al.*. Supercontinuum generation in a standard single-mode fiber by a Q-switched Tm, Ho: YVO₄ laser[J]. *Chin Opt Lett*, 2014, 12(9): 24–28.
- 11 Zhang Bin, Yang Weiqiang, Hou Jing, *et al.*. All-fiber mid-infrared supercontinuum sources from 1.9 μm to 4.3 μm [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1102013.
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.
- 12 K Ogusu, J Yamasaki, S Maeda, *et al.*. Linear and nonlinear optical properties of Ag-As-Se chalcogenide glasses for all-optical switching [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(3): 265–267.
- 13 L Brilland, F Charpentier, J Troles, *et al.*. Microstructured chalcogenide fibers for biological and chemical detection: case study: A CO₂ sensor[C]. *SPIE*, 2009, 7503: 750358.
- 14 F Charpentier, V Nazabal, J Troles, *et al.*. Infrared optical sensor for CO₂ detection[C]. *SPIE*, 2009, 7356: 735610.
- 15 R Frerichs. New optical glasses with good transparency in the infrared[J]. *J Opt Soc Am*, 1953, 43(12): 1153–1157.
- 16 G Snopatin, M Yu Matveeva, M Churbanov, *et al.*. Compositional changes in As-S glass-forming melts during vacuum distillation[J]. *Inorga Mater*, 2005, 41(2): 196–198.
- 17 S D Le, D M Nguyen, M Thual, *et al.*. Efficient four-wave mixing in an ultra-highly nonlinear suspended-core chalcogenide As₃₈Se₆₂ fiber [J]. *Opt Express*, 2011, 19 (26): B653–B660.
- 18 I Savellii, O Mouawad, J Fatome, *et al.*. Mid-infrared 2000-nm bandwidth supercontinuum generation in suspended-core microstructured sulfide and tellurite optical fibers[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 27083–27093.
- 19 W Q Gao, M El Amraoui, M S Liao, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core As₂S₃ chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9573–9583.
- 20 W Q Gao, Z C Duan, K Asano, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a four-hole As₂S₃ chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Appl Phys B*, 2014, 116(4): 847–853.
- 21 Xu Huijuan, Wang Xunsi, Nie Qihua, *et al.*. Fabrication and properties of chalcogenide fiber based on a novel extrusion method[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(6): 1109–1114.
徐会娟, 王训四, 聂秋华, 等. 新型挤压法制备硫系玻璃光纤及其性能研究[J]. *光电子·激光*, 2014, 25(6): 1109–1114.
- 22 Zhu Mingming, Wang Xunsi, Xu Huijuan, *et al.*. Novel Ge-Ga-Te-KBr far-infrared-transmitting chalcogenide glasses system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 53–57.
朱敏鸣, 王训四, 徐会娟, 等. 新型远红外 Ge-Ga-Te-KBr 硫系玻璃性能研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(6): 53–57.
- 23 P Toupin, L Brilland, G Renversez, *et al.*. All-solid all-chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(12): 14643–14648.
- 24 S Haxha, H Ademgil. Novel design of photonic crystal fibres with low confinement losses, nearly zero ultra-flatted chromatic dispersion, negative chromatic dispersion and improved effective mode area[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(2): 278–286.
- 25 R T White, T M Monro. Cascaded Raman shifting of high-peak-power nanosecond pulses in As₂S₃ and As₂Se₃ optical fibers[J]. *Opt Lett*, 2011, 36(12): 2351–2353.
- 26 Wu Ming, Liu Hairong, Huang Dexiu, *et al.*. 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, 等. 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.
- 27 J Limpert, A Liem, M Reich, *et al.*. Low-nonlinearity single-transverse-mode ytterbium-doped photonic crystal fiber amplifier[J]. *Opt Express*, 2004, 12(7): 1313–1319.
- 28 Li Min, Huo Li, Wang Dong, *et al.*. Supercontinuum generation based on dual-wavelength coherent ultrashort pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0406001.
李 旻, 霍 力, 王 东, 等. 基于双波长相干超短脉冲光源的超连续谱产生[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0406001.