

doi:10.3788/gzxb20184708.0816002

低零色散 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃

陈朋^{1,2}, 薛祖钢^{1,2}, 田优梅^{1,2}, 赵浙明³, 张培晴^{1,2}, 王训四^{1,2},
戴世勋^{1,2}, 王荣平^{1,2}, 徐铁峰^{1,2}

(1 宁波大学 信息学院 高等技术研究院 红外材料与器件实验室, 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)

(3 嘉兴学院 南湖学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘 要:从玻璃组分与玻璃光学折射率分布及零色散波长位置的影响机理出发,研究低色散卤化物对硫系玻璃的色散调控作用.制备了 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃,利用差示扫描量热仪、红外椭偏仪、红外光谱仪等测试了该玻璃的物化性质,分析了原料和玻璃提纯工艺、CsI 含量对玻璃形成以及透过范围的影响,并计算了该玻璃的材料色散.实验结果表明:该玻璃的透过范围可覆盖可见光至中远红外波段(0.55~18 μm);该玻璃的材料零色散点随着 CsI 含量的增加明显蓝移,摩尔百分比为 20% 和 40% 的 CsI 含量可使该玻璃材料的零色散波长蓝移至 3.5 μm 和 1.5 μm 附近,且该玻璃的热稳定性较好,有利于低色散中红外光纤的制备和应用.结合玻璃提纯技术和高温聚合物保护拉丝光纤拉丝工艺,获得了最低损耗为 8.2 dB/m 的单折射率硫卤玻璃光纤.

关键词:硫卤玻璃;材料色散;色散蓝移;低零色散点;中红外光纤

中图分类号:TN213

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0816002-6

Ge-Ga-Se-CsI Chalcogenide with Low Zero Dispersion Wavelength

CHEN Peng^{1,2}, XUE Zu-gang^{1,2}, TIAN You-mei^{1,2}, ZHAO Zhe-ming³, ZHANG Pei-qing^{1,2},
WANG Xun-si^{1,2}, DAI Shi-xun^{1,2}, WANG Rong-ping^{1,2}, XU Tie-feng^{1,2}

(1 Laboratory of Infrared Materials and Devices, Research Institute of Advanced Technology,
College of Information, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(2 Key Laboratory of Photoelectric Detection Materials and Devices of Zhejiang Province,
Ningbo, Zhejiang 315211, China)

(3 Nanhu College, Jiaxing University, Jiaxing, Zhejiang 314001, China)

Abstract: The dispersion functioning mechanism of low-dispersion halides on chalcogenide glasses is studied on the influence of glass composition optimizing, refractive index adjusting and zero-dispersion wavelength shifting, with the help of Ge-Ga-Se-CsI chalcogenide glass preparation. The physical and infrared optical properties of the glasses were tested by differential scanning calorimetry, infrared ellipsometer and infrared spectrometer. The purification process and glass composition to the glass formation and their optical properties were studied detailedly. The material dispersion curves of the two glass samples were calculated based on the measured data of refractive index. The experimental results show that the transmission range of the glasses is from visible to far infrared (0.55~18 μm); With the

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61705091,61627815,61377099),浙江省自然科学基金(No.LR18F050002),浙江省光电探测材料及器件重点实验室开放课题(No.2017004),嘉兴市科技局项目(No.2017AY13010),嘉兴学院南湖学院科研重点资助项目和宁波大学王宽诚幸福基金资助

第一作者:陈朋(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为硫系光纤.Email:823758951@qq.com

导 师:王训四(1979-),男,研究员,博士,主要研究方向为红外光学材料、光纤光学器件等.Email:wangxunsi@nbu.edu.cn

通讯作者:赵浙明(1982-),男,讲师,博士,主要研究方向为硫系玻璃光纤及超连续谱.Email:zhaozheming_27@sina.com

收稿日期:2018-02-05; **录用日期:**2018-05-15

<http://www.photon.ac.cn>

content of CsI increasing, the zero-dispersion wavelength of material decreases, in the value of 3.5 μm and 1.5 μm , corresponding to 20% CsI- and 40% CsI-chalcohalide glass, respectively. At the same time, the thermal stability of the two glasses is enough high, which is favorable for the preparation of low-dispersion mid-infrared fiber. Combined with effective glass purification method and high-temperature polymer-coating protection, a single refractive index chalcohalide glass fiber with a minimum loss of 8.2 dB/m was obtained.

Key words: Chalcohalide glass; Material dispersion; Dispersion blue shift; Low zero dispersion wavelength; Mid-infrared fiber

OCIS Codes: 160.4670; 060.2290; 060.2310

0 引言

超连续谱光源因具有较宽的频谱范围和较强的空间相干性,被广泛应用于国防、医学及科研等相关领域,尤其是其拥有超宽频谱的中红外波段,覆盖了绝大部分分子指纹吸收区^[1],可用于环境监测、气体分子检测等.传统石英光纤在 2 μm 以上区域存在强烈本征吸收而无法应用于中红外波段^[2],目前常用中红外光纤有氟化物、硫化物和碲/锗酸盐光纤等.此类光纤具有较高的非线性系数、优良的中红外透过特性,适合于中红外超连续谱(Mid-infrared Supercontinuum, MIR-SC)的产生.其中氟化物和碲酸盐玻璃具有较低的材料零色散点,但受限长波红外区的材料吸收而无法实现 5 μm 以上的超连续谱(Supercontinuum, SC)输出^[3-6].相比之下,硫系玻璃具有很高的三阶非线性系数(约为石英玻璃的 100~1 000 倍)^[7-8],其光谱范围可覆盖近、中红外甚至远红外波段,被认为是中远红外波段最理想的传输介质,其中以 S、Se、Te 元素为主的光纤低损耗传输范围分别为 0.8~7 μm 、1~10 μm 、2~12 μm ^[8].但传统硫系玻璃的材料零色散点较大,如 As-S/As-Se 约为 4.5 μm /7 μm ,往往需要采用空间型的长波红外激光泵浦源,这在一定程度上增加了泵浦激光源的选择难度,并阻碍了光纤激光器朝中红外领域的应用推广.

国际上关于硫系光纤在中红外激光器泵浦下实现超连续谱输出的研究已经达到了非常高的水平,已报道的阶跃型光纤包括 As_2Se_3 、 As_2S_3 、 GeAsSe 、 GeTe-AgI 等采用长波光参量放大(Optical Parameter Amplification, OPA)激光器脉冲泵浦,SC 谱分别可以达到 1.4~13.3 μm 、1.5~7 μm 、1.8~10 μm 、2.0~16 μm ^[9-12].但是 OPA 体积庞大,且为空间光泵浦,难以有效实现器件小型化和集成化.为适应短波长可便携商用激光器(如 2 μm 锁模光纤激光器)泵浦,研究者尝试采用微结构设计以实现硫系光纤零色散波长(Zero Dispersion Wavelength, ZDW)蓝移和色散调控,以便在泵浦光源选择上更加灵活,从而实现全光纤化的硫系红外 SC 谱光源.如 MØLLER U 等制备的纤芯直径为 4.5 μm 、ZDW 波长迁移到 3.5 μm 的 $\text{As}_{38}\text{Se}_{62}$ 悬吊芯光纤^[13],以及 LIU L 等通过管棒法制备的纤芯材料为 AsSe_2 玻璃、 As_2S_3 玻璃填充的四孔微结构光纤^[14].考虑到硫系微结构光纤实际制备难度太大,而且仅凭结构色散很难将 ZDW 波长迁移至 2.0 μm 以下,所以相关研究大多以仿真为主.

目前研究者大多只从结构色散着手,较难实现光纤 ZDW 波长有效蓝移.实际上光纤色散包括材料色散和结构色散,但受传统光纤玻璃形成范围的限制,材料色散调控很少涉足.本课题小组在对前期硫系光纤玻璃组分充分调研基础上,提出材料色散调控的具体方法,即利用低色散的卤化物(CsI)组分,调控 Ge-Ga-Se 基质的硫卤(硫系和卤化物)玻璃,对比了 $(\text{GeSe}_2)_{55}-(\text{Ga}_2\text{Se}_3)_{25}-(\text{CsI})_{20}$ 和 $(\text{GeSe}_2)_{36}-(\text{Ga}_2\text{Se}_3)_{24}-(\text{CsI})_{40}$ 两种玻璃的物化性能和红外光学特性,并对 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃的制备工艺进行了研究,分析了提纯工艺对玻璃红外透过光谱的影响,然后采用塞米尔方程(Sellmeier)拟合了两种玻璃的材料色散,研究材料组分对色散调控的具体作用,最后利用聚合物的保护对两种玻璃进行光纤拉丝实验,以验证这两种硫卤玻璃的成纤性能.

1 实验

1.1 玻璃样品的制备

采用传统的熔融-淬冷法^[15]制备了高纯 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃.选用纯度为 99.999% 的 Ge, Ga, Se, CsI 原料和纯化剂 Mg,封装用的石英管和蒸馏管先用王水浸泡 8 h,然后用去离子水清洗多次干净后置入干燥箱,在 160 $^\circ\text{C}$ 下干燥 5 h.将原料按所用的化学配比精确称量共 20 g 后放入预处理过的蒸馏管内抽真空,同时采用电阻加热炉对石英管底部(放置 CsI)加热(650 $^\circ\text{C}$)和蒸馏管加热(120 $^\circ\text{C}$)以去除原料表面杂质游离水,真

空低于 10^{-3} Pa 时,用炔氧焰封断后放入管式加热炉蒸馏(850℃)5 h 以上.蒸馏完毕后封断提纯管,放入摇摆炉中高温(900℃)熔制 20 h 以上,蒸馏纯化装置如图 1 所示.熔制结束后,将装有玻璃熔体的石英管进行水冷处理后放入退火炉中保温退火(270℃)至室温,打破石英管即得所需的 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃锭.将玻璃锭切割成 2 mm 厚的玻璃薄片,双面抛光处理后进行性能测试.

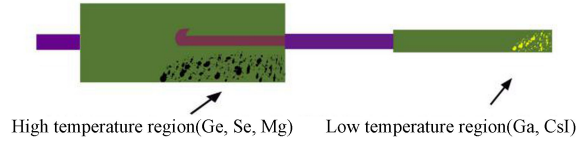


图 1 玻璃蒸馏装置示意图

Fig.1 Schematic of glass distillation device

1.2 玻璃样品的测试方法

玻璃材料的玻璃化转变温度和析晶温度由 TA Q2000 差示扫描量热仪测定,测量范围 50~500℃;玻璃样品的近红外光谱用 Perkin-Elmer Lambda 950 分光光度计测定,测量范围是 400~2 500 nm;红外透过光谱用 Nicoklet 380 傅里叶红外光谱仪测定,测量范围是 400~4 000 cm^{-1} . 玻璃样品的热学参量采用 DIL402C 型热膨胀仪测试,测试范围是 25~1 600℃. 使用红外椭偏仪(IR-VASE MARK II, J.A. Woollam Co.)测量玻璃的折射率,并利用 Sellmeier 方程拟合计算了材料色散.光纤损耗测试采用了截断法,测试仪器为 Nicoklet 5700 型红外光谱仪加碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探测器组合.

2 结果与讨论

2.1 玻璃的物理性质

实验玻璃样品组分及物理参量如表 1 所示.表中给出了不同原料和制备工艺条件下的 GeGaSeCsI 玻璃样品编号及其玻璃转化温度(T_g)、析晶温度(T_x)等参数.图 2 为测试所用玻璃样品.图 3 为 G1 玻璃样品差示扫描量热法(Differential Scanning Calorimetry, DSC)测得的曲线图.由图 3 可知,G1 玻璃样品的 $T_g \approx 310^\circ\text{C}$, $T_x \approx 465^\circ\text{C}$, G3 玻璃样品的 $T_g \approx 290^\circ\text{C}$, $T_x \approx 430^\circ\text{C}$.由 DSC 曲线和相关数据可以看出,G1 玻璃样品的 $\Delta T(168^\circ\text{C})(T_x - T_g)$ 和 G3 玻璃样品的 $\Delta T(140^\circ\text{C})$ 都比较高,热稳定性较好,可以进行光纤制备^[16].

表 1 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃样品的组分及物理参数

Table 1 Composition and physical parameters of Ge-Ga-Se-CsI glass samples

Glass sample	Composition	$T_g/^\circ\text{C}$	$T_x/^\circ\text{C}$	$\Delta T/^\circ\text{C}$	Thick/mm	Purified
G1	$(\text{GeSe}_2)_{55}-(\text{Ga}_2\text{Se}_3)_{25}-(\text{CsI})_{20}$	310	478	168	2	Yes
G2	$(\text{GeSe}_2)_{55}-(\text{Ga}_2\text{Se}_3)_{25}-(\text{CsI})_{20}$	310	478	168	2	No
G3	$(\text{GeSe}_2)_{24}-(\text{Ga}_2\text{Se}_3)_{36}-(\text{CsI})_{40}$	290	430	140	2	Yes

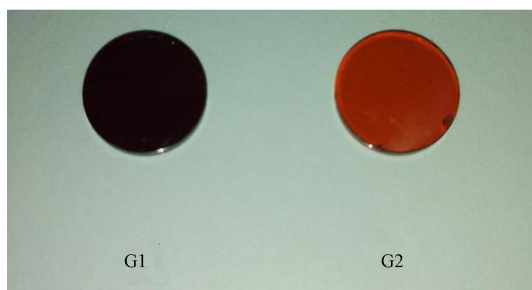


图 2 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃的样品

Fig.2 Ge-Ga-Se-CsI bulk glasses

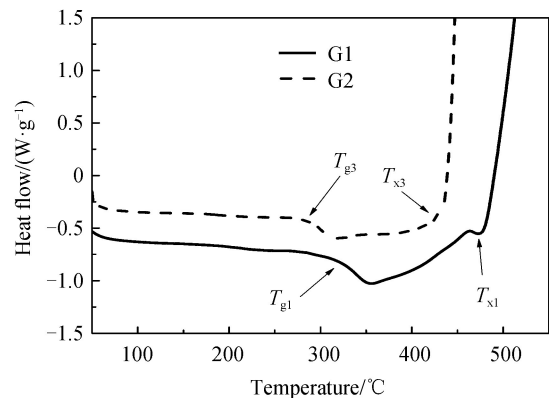


图 3 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃的 DSC 图

Fig.3 DSC pattern of Ge-Ga-Se-CsI glass samples

2.2 红外透过光谱分析

由于在玻璃中加入了卤族元素,玻璃的光学带隙扩大,导致玻璃的短波截止波长蓝移,同时还能继续保

持硫系玻璃的长波红外高透过^[17].从图4 G1、G3 玻璃的红外透过光谱中可以看到,这两种玻璃拥有极宽的透过范围:从可见光一直到远红外波段.从图4 中内插图可以看出随着 CsI 含量的增加,玻璃的带隙明显增大,表现为短波截止边发生明显的蓝移现象:从 640 nm 蓝移到了 550 nm,而且透过率也有显著的提高.但是由于 CsI 含量的增加,含 40% CsI 的玻璃(G3)在 2.9 μm 和 6.3 μm 处的 O-H 峰和 H₂O 峰急剧增大,同时在 1.95 μm 引入了新的 H₂O 峰,而且在 9 μm 和 13 μm 处的氧化物吸收峰也变得更大.

2.3 提纯工艺对玻璃红外透过光谱的影响

图5 给出了玻璃样品提纯前后的红外光谱.未提纯的 G2 玻璃样品在红外透过光谱上存在几个较明显的杂质吸收峰:2.9 μm 和 6.3 μm 所处的短波吸收带由 OH 键振动以及各类杂质微晶颗粒引起,4.57 μm 处的吸收峰由 Se-H 键振动引起,9.3 μm 处的吸收峰由 Si-O 峰引起,13.07 μm 处的吸收峰由 Ge-O 峰引起^[18].纯化所制得的玻璃(G1)透过率明显提升,基本消除了 Si-O 和 Ge-O 两种杂质吸收峰,并且 O-H、Se-H 和 H₂O 这几种杂质峰也大大降低,获得了相对平坦、光学透过率高的硫卤玻璃.

2.4 玻璃折射率和材料色散模拟分析

图6 是含 CsI 玻璃和传统硫系玻璃的折射率对比.从图中可见,含 CsI 玻璃的折射率要明显低于传统的硫系玻璃,而且随着 CsI 含量的增加,折射率进一步下降.折射率的降低有利于降低玻璃本征瑞利散射损耗和端面反射损失,也就是说理论上该 CsI 玻璃比传统的硫系玻璃有更好的透过率.图7 是含 CsI 玻璃和传统硫系玻璃材料色散的对比,在玻璃中加入了低色散原料 CsI 之后,玻璃的材料 ZDW 发生了明显的蓝移,20%CsI 含量玻璃(G1)的 ZDW 波长蓝移到 3.5 μm 处,该值远小于传统的硫系玻璃 As₂S₃ 和 As₂Se₃ (分别为 4.5 μm 和 7 μm),而且随着 CsI 含量的增加,玻璃的 ZDW 波长可以蓝移至 2 μm 以下,如 40%CsI 含量的玻璃(G3)的 ZDW 波长为 1.48 μm .结果表明,该超低 ZDW 玻璃制备的硫卤光纤拥有近红外短波脉冲光纤激光器直接泵浦的潜力.

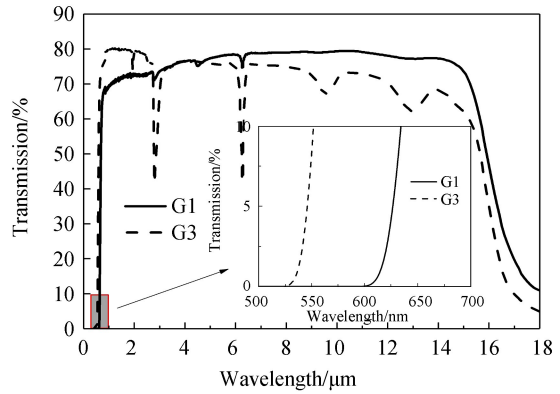


图4 Ge-Ga-Se-CsI玻璃的红外透过光谱

Fig.4 Transmissions of Ge-Ga-Se-CsI bulk glasses

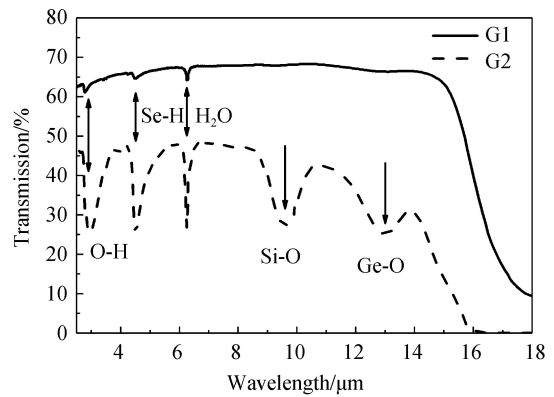


图5 提纯前后 Ge-Ga-Se-CsI 玻璃样品的红外透过光谱

Fig.5 Transmissions of purified and un-purified Ge-Ga-Se-CsI bulk glasses

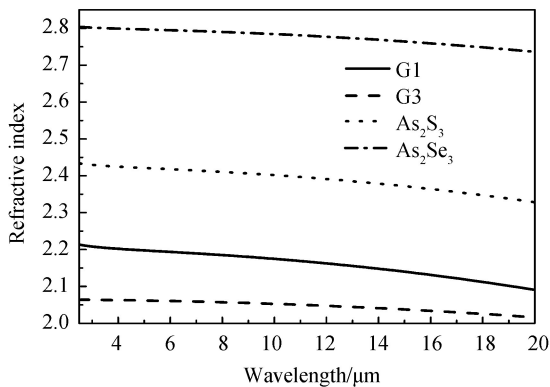


图6 Ge-Ga-Se-CsI, As₂S₃, As₂Se₃ 玻璃样品的折射率
Fig.6 Refractive indexes of Ge-Ga-Se-CsI, As₂S₃ and As₂Se₃ glasses

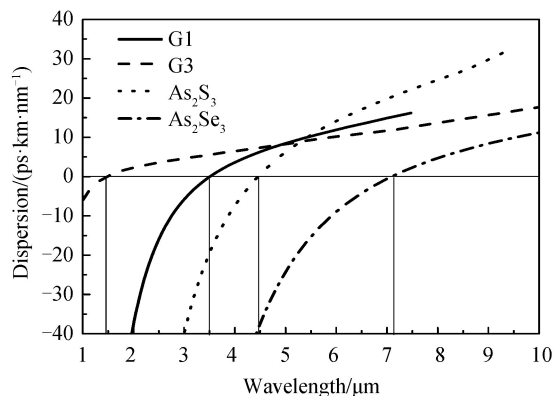


图7 Ge-Ga-Se-CsI, As₂S₃, As₂Se₃ 玻璃样品的材料色散
Fig.7 Material dispersions of Ge-Ga-Se-CsI, As₂S₃ and As₂Se₃ glasses

2.5 光纤拉丝及传输损耗

采用聚醚醚酮(PEEK)聚合物为保护层进行了缩棒并在国产拉丝机(上海优力申)进行拉丝,整个拉丝过程采用了惰性气体(N_2)保护,G1和G3的拉丝温度分别为 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $420\text{ }^\circ\text{C}$,图8为光纤在高倍显微镜下的端面图.光纤直径 $600\text{ }\mu\text{m}$,原长 1.5 m ,采用截断法分别截断两次,每次 0.5 m ,测得光纤损耗谱如图9所示,从图中可见,两种光纤的工作波段都可达 $2.5\sim 8.5\text{ }\mu\text{m}$,其中短波附近G3光纤损耗明显要低于G1光纤,但G3光纤整体损耗要高于G1光纤.另外,由于原料中的CsI存在一定的潮解性,该两类光纤在 $3\text{ }\mu\text{m}$ 处都有一定的O-H吸收峰,G3光纤由于含CsI量更大,形成了更大的吸收带,同时在 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 处的Se-H峰和 $6.3\text{ }\mu\text{m}$ 处的 H_2O 峰也变得更大.由于Ga原料无法蒸馏纯化,在高温熔制过程中可能会和石英管壁发生反应从而使得硫卤玻璃中的氧化物杂质难以被完全除去,同时受多声子振动影响,玻璃制备成光纤后红外吸收边会发生蓝移,因此在 $9\text{ }\mu\text{m}$ 后损耗谱急剧增大而造成透过谱完全截止.G1光纤的最低损耗为 $8.2\text{ dB/m}@7.2\text{ }\mu\text{m}$,G3光纤的最低损耗为 $9.6\text{ dB/m}@4.2\text{ }\mu\text{m}$.

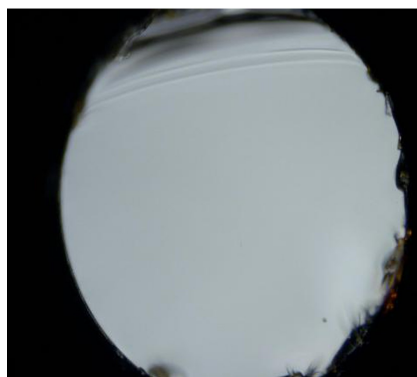


图8 Ge-Ga-Se-CsI 光纤端面
Fig.8 Cross-section of Ge-Ga-Se-CsI fiber

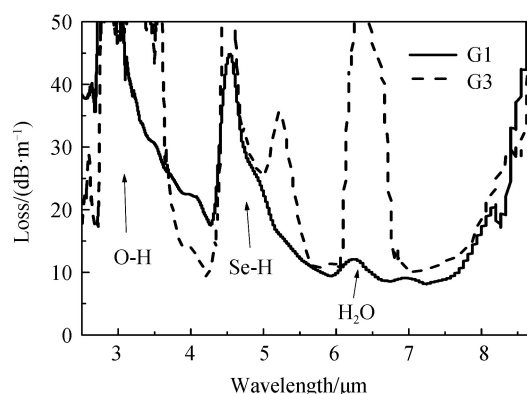


图9 Ge-Ga-Se-CsI 光纤损耗图谱
Fig.9 Attenuations of Ge-Ga-Se-CsI fibers

3 结论

通过制备不同卤化物含量及不同制备工艺的 GeGaSe-CsI 玻璃,研究了 CsI 含量与 O、H 等杂质峰的关系以及对玻璃的红外透过范围的影响,优化了高纯 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃的制备工艺,获得了较高纯度的 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃.该 Se 基硫卤玻璃体系具有宽红外透过窗口($0.55\sim 18\text{ }\mu\text{m}$)(几乎覆盖可见-近红外-中红外-远红外所有光学窗口)、高透过率(70%以上)以及较好的玻璃热稳定性和成纤维性,同时玻璃材料 ZDW 分别位于 $3.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.48\text{ }\mu\text{m}$,突破了传统硫系玻璃材料 ZDW 一直高于 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 的瓶颈,而且 $(\text{GeSe}_2)_{36}\text{-(Ga}_2\text{Se}_3)_{24}\text{-(CsI)}_{40}$ 玻璃材料的 ZDW 位于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以下,其制备的玻璃光纤可用于商用近红外短脉冲光纤激光器泵浦.通过合适的聚合物保护实现了单折射率硫卤玻璃光纤制备,证明了这种玻璃基质有很好的成纤性能和光学实用性.在后续的研究中,将基于改进的挤压技术,采用合适的玻璃保护层来制备芯包结构的硫卤光纤,并进行 SC 测试.

参考文献

- [1] SCHLIESSER A, PICQUÉ N, HÄNSCH T W, *et al.* Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7): 440-449.
- [2] REGNIER E, FLAMMER I, GIRARD S, *et al.* Low-dose radiation-induced attenuation at infrared wavelengths for P-doped, Ge-doped and pure silica-core optical fibres[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2007, **54**(4): 1115-1119
- [3] SWIDERSKI J, MICHALSKA M, MAZE G, *et al.* Mid-IR supercontinuum generation in a ZBLAN fiber pumped by a gain-switched mode-locked Tm-doped fiber laser and amplifier system[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(7): 7851-7857.
- [4] XIA C, KUMAR M, KULKARNI O P, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation to $4.5\text{ }\mu\text{m}$ in ZBLAN fluoride fibers by nanosecond diode pumping[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(17): 2553-2555.
- [5] VOGEL E M, WEBER M J, KROL D M, *et al.* Nonlinear optical phenomena in glass[J]. *Physics & Chemistry of Glasses*, 1991, **32**(6): 231-254.
- [6] FUJINO S, MORINAGA K. Material dispersion and its compositional parameter of oxide glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1997, **222**(4): 316-320.
- [7] LENZ G, ZIMMERMANN J, KATSUFUJI T, *et al.* Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses[J]. *Optics*

- Letters*, 2000, **25**(4): 254-256.
- [8] PRICE J H V, MONRO T M, EBENDORFF-HEIDEPRIEM H, *et al.* Mid-IR supercontinuum generation from nonsilica microstructured optical fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, **13**(3): 738-749.
- [9] PETERSEN C R, MØLLER U, KUBAT I, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering the 1.4~13.3 μm molecular fingerprint region using ultra-high NA chalcogenide step-index fibre[J]. *Nature Photonics*, 2014, **8**(11): 830-834.
- [10] THÉBERGE F, THIRÉ N, DAIGLE J F, *et al.* Multioctave infrared supercontinuum generation in large-core As_2S_3 fibers[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(22): 6474-6477.
- [11] YU Y, ZHANG B, GAI X, *et al.* 1.8~10 μm mid-infrared supercontinuum generated in a step-index chalcogenide fiber using low peak pump power[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(6): 1081-1084.
- [12] ZHAO Z, WU B, WANG X, *et al.* Mid-infrared supercontinuum covering 2.0~16 μm in a low-loss telluride single-mode fiber[J]. *Laser & Photonics Review*, 2017, **11**(2): 1700005.
- [13] LUTHERDAVIES B, YU Y, KUBAT I, *et al.* Multi-milliwatt mid-infrared supercontinuum generation in a suspended core chalcogenide fiber[J]. *Optics Express*, 2015, **23**(3): 3282-3291.
- [14] LIU L, CHENG T, NAGASAKA T, *et al.* Coherent mid-infrared supercontinuum generation in all-solid chalcogenide microstructured fibers with all-normal dispersion[J]. *Optics Letters*, 2016, **41**(2): 392-395.
- [15] NIE Qiu-hua, WANG Guo-xiang, WANG Xun-si, *et al.* Effect of Ga on optical properties of novel Te-based far infrared transmitting chalcogenide glasses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(11): 7949-7955.
聂秋华, 王国祥, 王训四, 等. Ga对新型远红外Te基硫系玻璃光学性能的影响[J]. *物理学报*, 2010, **59**(11): 7949-7955.
- [16] HRUBÝ A AND HOUSEROVÁ J. Glass-forming region in the Cd-Ge-As ternary system[J]. *Czechoslovak Journal of Physics B*, 1972, **22**(1): 89-92.
- [17] ZHANG Teng-yu, NIE Qiu-hua, WANG Xun-si, *et al.* Preparation and properties of novel dual halide Co-doped chalcogenide multispectral glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(10): 1016002.
张腾宇, 聂秋华, 王训四, 等. 双卤化物共掺新型硫系多光谱玻璃的制备及性能[J]. *光子学报*, 2016, **45**(10): 1016002.
- [18] SAVAGE J A, NIELSEN S. Chalcogenide glasses transmitting in the infrared between 1 and 20 μm -a state of the art review[J]. *Infrared Physics*, 1965, **5**(4): 195-204.

Foundation item: The Natural Science Foundation of China (Nos. 61705091, 61627815, 61377099), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No. LR18F050002), the Opening Project of Key Laboratory of Optoelectronic Detection Materials and Devices of Zhejiang Province, China (No.2017004), Program for Science and Technology of Jiaxing, China (No.2017AY13010), the Key Project of Nanhu College, Jiaxing University, China and the K. C. Wong Magna Fund in Ningbo University, China

引用格式: CHEN Peng, XUE Zu-gang, TIAN You-mei, *et al.* Ge-Ga-Se-CsI Chalcohalide with Low Zero Dispersion Wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0816002

陈朋, 薛祖钢, 田优梅, 等. 低零色散 Ge-Ga-Se-CsI 硫卤玻璃[J]. *光子学报*, 2018, **47**(8): 0816002