

532 nm 光诱导下低损耗 As₂S₃ 光纤纤芯的光敏性及其光阻断效应现象

邹林儿^{1*}, 张泽¹, 傅继武¹, 陈抱雪²

¹南昌大学物理系, 江西 南昌 330031;

²上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

摘要 实验研究了低损耗硫系玻璃 As₂S₃ 光纤的纤芯在 532 nm 近带隙光照下的光敏性。实验结果表明, 光开始照射时其纤芯的光致折射率变化朝负方向快速减小, 然后随着光照时间延长, 折射率变化朝正方向缓慢恢复增加。这两个过程经历的时间和折射率变化的大小均取决于光照功率。光照功率增大到一定阈值时, 在恢复过程中, 光致折射率变化出现正增加, 且随光照功率继续增大和曝光时间延长, 折射率变化可增加至约 3×10^{-3} 。另外, 实验初步制备了 As₂S₃ 光纤的布拉格光栅, 曝光期间其中心波长先蓝移, 后恢复并红移。同时, 实验还发现, 在近带隙光照下 As₂S₃ 光纤出现光阻断效应现象, 其截止效率约为 55%。

关键词 光纤光学; As₂S₃ 硫系玻璃光纤; 光致折射率变化; 光纤光栅; 光阻断效应

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1206003

Photosensitivity and Optical Stopping Effect of Low-Loss As₂S₃ Optical Fiber Core under 532 nm Light Irradiation

Zou Liner^{1*}, Zhang Ze¹, Fu Jiwu¹, Chen Baoxue²

¹Department of Physics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China;

²School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract The photosensitivity of a low-loss As₂S₃ chalcogenide glass fiber core under 532 nm near-bandgap light irradiation is experimentally investigated. The experimental results show that at the beginning of light irradiation, the photo-induced refractive index change of the fiber core first decreases rapidly towards the negative direction, and then recovers and increases gradually towards the positive direction with the extension of irradiation time. As for these two processes, the time duration and the refraction index change value are determined by light irradiation power. As the irradiation power increases to a certain threshold value, the photo-induced refractive index change shows a positive increment in the recovery process, and the refractive index change can be increased to about 3×10^{-3} with the further increases of irradiation power and exposure time. In addition, the As₂S₃ fiber Bragg grating is experimentally fabricated and its central wavelength occurs blue shift-recovery-red shift during exposure. At the same time, the experimental results also disclose that the optical stopping phenomenon with a cut-off efficiency of about 55% is observed in the As₂S₃ fiber under near-bandgap light irradiation.

Key words fiber optics; As₂S₃ chalcogenide glass fiber; photoinduced refractive index change; fiber gratings; optical stopping effect

OCIS codes 060.2310; 060.2290; 160.5320; 060.3738

1 引 言

硫系玻璃是基于硫族元素 S、Se、Te, 结合其他

元素如 As、Ge、Sb、Ga 等构造的玻璃体系, 具有低声子能量和宽红外透射窗口 ($1 \sim 12 \mu\text{m}$)^[1-4], 其光学非线性高出石英玻璃两个数量级以上^[1], 作为一

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-07-10; 录用日期: 2018-08-07

基金项目: 国家自然科学基金(61465008)

* E-mail: Linerzou@ncu.edu.cn

种长波长的非线性光学介质备受关注^[5-7]。目前硫系玻璃光波导或光纤可用于全光开关^[8]、波长转换器^[9]、光纤光栅^[10]、拉曼光纤激光器^[11]以及超连续谱的产生^[12]等。

光敏性是硫系玻璃的一个特性^[13],自20世纪60年代起,研究主要集中在硫系玻璃体材料和薄膜材料,其在带隙光或亚带隙光照射下呈现多种光致效应,其中最显著的效应是光致折射率变化^[14-15]。在光诱导下,折射率随光照时间的增加而增大,并达到饱和状态^[16-18]。光黑化理论解释为:光照使异性键转变为同性键,在玻璃内部结构中形成缺陷,表现为光吸收边缘带发生红移^[19]。但对硫系玻璃光纤结构而言,其情况更为复杂。硫系玻璃光纤中纤芯和包层组分类似,两者都会对光吸收产生光敏性。为了使光能量到达纤芯,一般选择远离吸收边缘的亚带隙光来照射。文献^[20-21]中在 As_2Se_3 光纤上分别利用785 nm和633 nm亚带隙光刻写了Bragg光栅,其中心波长随着曝光时间的增加向短波长方向移动,折射率减小。而Florea等^[10]利用633 nm亚带隙光在 As_2S_3 光纤上刻写Bragg光栅,其中心波长朝长波长方向移动,折射率增大。这些数据显示,硫系玻璃光纤在亚带隙光照射下光敏性弱,折射率变化约 10^{-4} 数量级,且沿着不同方向变化,由此说明光诱导内部机制变化复杂。

采用带隙光照射(垂直照射光纤柱体表面),光基本上被包层吸收,而达不到纤芯,纤芯不能吸收光,不会产生光敏性;采用远离玻璃吸收边缘的亚带隙光照射,由于材料对光的吸收较少,光可以透过包层到达纤芯,但实际上光也透过了纤芯,纤芯也因吸收光能太少产生很弱的光敏性。理论分析表明,采用靠近材料吸收边缘的近带隙光,虽然包层对光有一定的吸收,但因圆柱体的光纤表面对光有会聚作用,还有较大部分光能量能够到达纤芯,让纤芯吸收光,从而引起纤芯产生较高的光敏性。 As_2S_3 玻璃材料的光学带隙约2.4 eV(其带隙光波长约500 nm),其吸收系数沿长波长呈指数下降^[22]。对于薄膜材料,高达 10^{-2} 的光致折射率变化发生在光吸收最强的带隙光波长处,呈现出高的光敏性。对于 As_2S_3 光纤,为了获得较高的光敏性,考虑选择近带隙光照射,这样避免了光能量因光纤包层全部吸收而达不到纤芯的问题。前期工作已初步实验观察到硫系玻璃光纤在近带隙光照射下的光致折射率变化^[23]。在此基础上,优化实验光路,使得光斑聚焦更好;提高测试系统的光耦合效率,以获得高质量

的光谱波形图,提高测量精度;考虑光持续照射积累热效应导致样品的微结构变化,同时注意到光照开始时的光敏性,采用电子快门控制光照时间和间隔。本文详细地实验研究了低损耗 As_2S_3 光纤纤芯的光致折射率变化,折射率变化存在一个折射率减小的快过程和恢复的慢过程,可达到 10^{-3} 数量级;在第一个快过程中,最大折射率负变化和该过程持续时间取决于光照功率。另外,利用其光敏性,实验初步制备了Bragg光栅,曝光期间其中心波长存在类似位移现象,即先蓝移,后恢复并红移,从另一面证实了光致折射率变化特性的存在。在实验中还发现在近带隙光照射下 As_2S_3 光纤出现光阻断效应^[24]。

2 实验装置与原理

基于法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)标准具原理测量纤芯的折射率变化,整个实验装置由光照射系统和测试系统两部分组成,如图1(a)所示。利用超声波切割刀切割 As_2S_3 光纤,使其两端面光滑且平行,构成长度约1.5 cm的FP标准具。由于光在标准具镜面间多次反射,只要光程差有微小变化,干涉波形图就会发生位移,如图1(b)所示。在这标准具干涉图形中,测量 $\Delta\lambda$,则可计算纤芯折射率变化,表达式为^[23]

$$\Delta n = n \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cdot \frac{L}{l}, \quad (1)$$

式中: n 为纤芯折射率; L 为样品光纤长度; l 为被光照的光纤长度; λ 为测量波长,其相邻峰值就是自由光谱区 $f_{\text{FSR}} = \lambda^2 / 2nL$ 。

在测试系统中,采用线偏振、宽带1520~1570 nm的放大自发辐射(ASE)光源,通过端面耦合实现单模光纤(SMF)与 As_2S_3 光纤之间的光束传输,再由与输出端单模光纤连接的高分辨率光谱分析仪(OSA)测试监控。在实验中,选用纤芯直径和包层直径分别约为7 μm 和140 μm 的商业化 As_2S_3 光纤,纤芯和包层对应的组分分别是 $\text{As}_{39}\text{S}_{61}$ 和 $\text{As}_{38}\text{S}_{62}$,折射率差异约0.3%(纤芯折射率约为2.415);其传输损耗低,在波长为1550 nm处约为0.1 dB/m。所有实验样品都截取于同一根光纤,同时每次实验测量都在新的、没有被光照射过的实验样品上进行,以此保证实验结果的准确性和一致性。另外,在 As_2S_3 光纤端面,光直入射时有约17%的反射率,这确保了干涉波形图有良好的对比度,图1(c)是实测的波形图及发生的位移图形。光照系统采用连续的双频Nd:YAG激光器,选用工作

波长为 532 nm 激光作为照射光源,其光束经扩束系统后,通过柱面透镜聚焦在样品表面上形成高度约 1.1 mm、宽度约 5 mm 的呈高斯强度分布的光斑,其光照时间和间隔由电子快门控制(控制范围

0.001~999.999 s),光照功率由可变衰减器改变。同时为避免长时间连续光照射时,因热效应引起材料微结构变化,每次光照射后停止光照 20 s(由电子快门控制)。

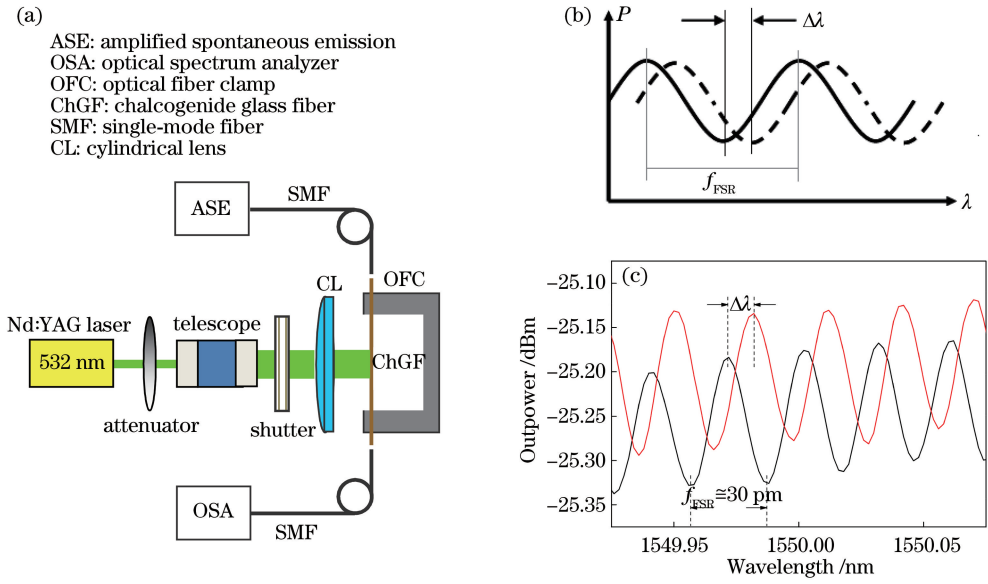


图 1 基于 FP 标准具原理测量纤芯的折射率变化。(a)实验装置示意图;

(b)微小光程差引起透射光谱波形图的位移;(c)在光照下用光谱仪实测基于 As_2S_3 光纤的图形位移

Fig. 1 Measurement of refractive index change of core based on FP principles. (a) Schematic of experimental setup; (b) shift of transmission spectrum caused by small optical path difference; (c) real measurement of image shift by spectrometer based on As_2S_3 fiber under light irradiation

3 As_2S_3 光纤纤芯折射率变化与光照功率的关系

利用可变衰减器,改变 532 nm 光照射在 As_2S_3 光纤上的光强,实验研究光照功率对 As_2S_3 光纤芯层折射率变化的影响。图 2(a)~(d)分别显示出在光照功率为 4.5, 8, 13.5, 18.5 mW 时光致折射率变化随光照时间关系。从图 2 可以看出, As_2S_3 光纤纤芯折射率变化大致存在两个过程:第一个过程,在光照开始阶段折射率快速减小,朝负方向变化,是个快过程;光照一定的时间后,出现第二过程,折射率变化开始发生恢复现象,随着光照时间延长,折射率缓慢地朝正方向变化。第一个快过程持续时间取决于光照功率,而且其持续时间越长,折射率朝负方向变化越大。光照功率为 4.5 mW 时,其快过程持续时间约 480 s,最大折射率负变化达到 -8.42×10^{-4} ,如图 2(a)所示。当光照功率增大到 8 mW 时,其快过程持续时间约 250 s,最大折射率负变化为 -6.17×10^{-4} ,如图 2(b)所示。随着光照功率的继续增大,如增大到 13.5 mW 和 18.5 mW 时,分别如图 2(c)和(d)所示,第一过程持续时间越来越短,

分别约为 100 s 和 30 s,同时最大折射率负变化也减小,分别为 -3.74×10^{-4} 和 -2.99×10^{-4} 。第二过程是缓慢变化的,随着光照功率增大到一定阈值,折射率出现正变化,估计这个阈值约在 5~7 mW 之间。第二过程的折射率变化也取决于光照功率,光照功率增大,折射率变化也越大,在测试时间范围内,折射率变化呈现出缓慢增长,趋向于饱和状态。光照功率为 8 mW 时,其第二恢复过程的折射率变化达到 0.729×10^{-3} (曝光时间约 3800 s);在光照功率为 13.5 mW 时,其折射率变化达到了 1.84×10^{-3} (曝光时间约 3800 s);在光照功率更高时,如 18.5 mW,其折射率变化高达 4.13×10^{-3} (曝光时间约 3800 s)。值得注意的是,在刚开始光照时间 1~2 s 内,折射率变化先呈稍微正增长后呈负增长,如图 2 中小插图所示,在这短时间量级内,这种变化可能是由光诱导下与原子弛豫有关的因素造成的。

类似光诱导下的两个过程在研究硫系玻璃薄膜光黑化现象中可观察到^[25-26],当薄膜结构达到稳定态时,折射率最终变化呈正方向增长。基于这些,Abduhalim 提出光诱导动力模型^[25,27],认为第一个快过程是源于缺陷态产生,其持续时间 t_G 与光照强

度 I 的关系为 $t_G \propto 1/I$; 因缺陷态处于亚稳定状态, 进入第二个慢过程使其稳定化, 这个稳定过程持续

时间 t_S 取决于产生的缺陷数量, 最终饱和态的折射率增加 Δn 正比与 $I^{2/3}$ 。

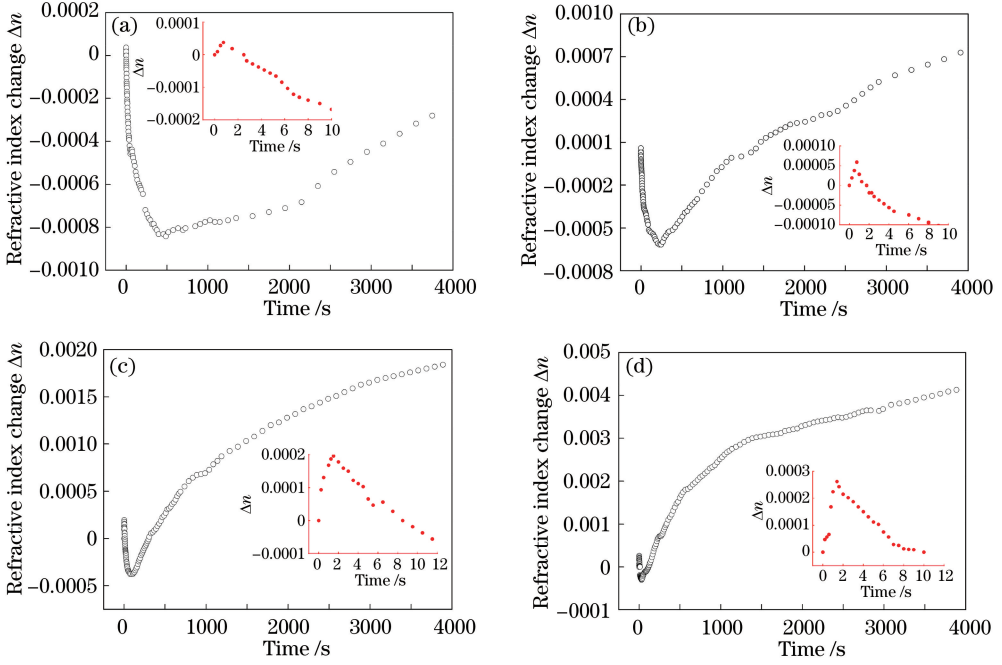


图 2 不同光照功率下 As_2S_3 光纤纤芯折射率变化与光照时间的关系。(a) 4.5 mW; (b) 8 mW; (c) 13.5 mW; (d) 18.5 mW (插图显示开始光照时间 0~10 s 的折射率变化)

Fig. 2 Refractive index change of As_2S_3 fiber core versus irradiation time for different irradiation powers. (a) 4.5 mW; (b) 8 mW; (c) 13.5 mW; (d) 18.5 mW (insets indicating refractive index changes at irradiation time of 0-10 s)

4 As_2S_3 光纤 Bragg 光栅中心波长变化与光照的关系

选用同一 Nd:YAG 激光器的 532 nm 曝光光源和带 +1/-1 衍射级的相位掩模板的 Sagnac 干涉系统, 在 As_2S_3 光纤纤芯上刻写 Bragg 光栅^[28-29]。在前期工作的基础上, 对实验光路进一步优化, 使得两高斯光斑很好地重合, 获得稳定、质量好的光斑干涉条纹, 同时测试到 +1/-1 衍射级每束光强约为 3 mW。图 3(a) 是光栅透射光谱中 Bragg 波长在曝光期间的位移情况, 可知曝光初始阶段, 其中心波长

发生蓝移, 到曝光时间约 470 s 时, 向短波方向移动约 2.65 nm; 然后, 随着曝光时间增加, 其中心波长恢复, 向长波长方向移动, 出现了红移。根据光栅公式 $\lambda_B = 2n_{\text{core}}\Lambda$ (其中, n_{core} 是光纤纤芯折射率, Λ 是光干涉形成的光栅周期), 可以计算出纤芯折射率变化 $\Delta n_{\text{core}} \propto \Delta\lambda_B$ 。图 3(a) 可以反映出其纤芯折射率变化情况与基于法布里-珀罗 (FP) 标准具技术原理得到的实验结果类似。另外, 图 3(b) 是光栅透射光谱的峰值在曝光期间的变化, 在实验中观察到曝光时间为 30 s 得到的透射谱峰值最大, 约为 1.47 dB, 光栅半峰全宽约为 0.3 nm, 如图 4 所示, 这

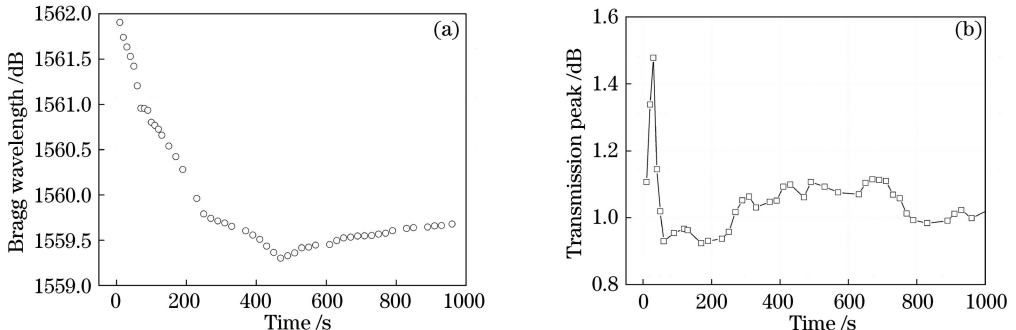


图 3 曝光期间 Bragg 光栅中心波长位移和透射峰值随时间的变化。(a) 中心波长位移; (b) 透射峰值
Fig. 3 Shift of (a) Bragg grating central wavelength and (b) its peak of transmission during exposure

也反映出光栅光谱质量良好。随着曝光时间的延长,透射光谱峰值下降到约为 1.1 dB。

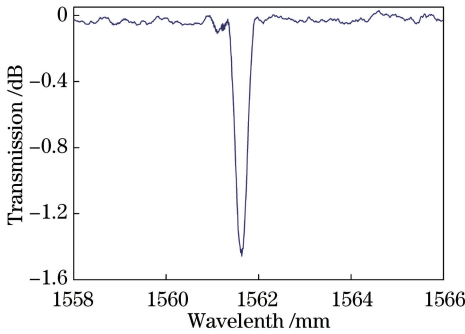


图 4 As_2S_3 光纤 Bragg 光栅透射谱(曝光时间为 30 s)
Fig. 4 Transmission spectrum of As_2S_3 fiber Bragg grating at exposure time of 30 s

5 As_2S_3 光纤的光阻断效应现象

利用图 1(a) 的光照射装置,光照功率约为 10 mW 的近带隙 532 nm 光照射在 As_2S_3 光纤上,传输光(信号光)依然采用中心波长在 1555 nm 的 ASE 光源,通过单模光纤端面耦合到约长 5cm 的 As_2S_3 光纤中,再从另一端耦合输出并通过单模光纤连接到功率计。图 5 是在 As_2S_3 光纤上观察到的光阻断效应现象。532 nm 光未照射时,测试到光纤输出的传输光强度约 -9.9 dBm。当 532 nm 光照射(on)时,光纤输出的光强度急剧衰减到 -11.5 dBm,这是个快过程,约 7 s 的时间;随着光照时间的延长(约 300 s),其光纤输出信号光强减弱到 -13.4 dBm,出现光阻断效应,其截止效率约为 55%。当切断 532 nm 光照射(off),光纤输出的信号光迅速恢复传输,其光强恢复到 -12.5 dBm,这也是个快过程,时间约 8 s。随着切断光照时间的延长,信号光传输强度逐渐恢复到约 -11 dBm,这是个慢过程。这种利用短波光(近带隙)来调控长波光(如波长 1555 nm),通过多光子吸收实现光阻断效应,在 As_2S_8 光波导中也报道过^[24]。虽然对于光阻断效应的机理尚没有定论,一般认为是隙内缺陷能级的电子抽运过程。前期实验和理论研究分析表明^[30-31],在带隙光或近带隙光照射下,硫系玻璃材料中孤对电子吸收光子能,导致能量较高的抗键态增多,同周边的正常电子组态易发生电荷转移等相互作用,从而转化为其他缺陷态,造成更多低能级态,伴有网格的局部畸变和原子弛豫,结果使网格能量进一步下降。多光子吸收传输的低光子能信号光,处于低能级态电子被激发到导带以上(出现光阻

断现象),这些受激电子经原子弛豫后,跌入导带尾定域态;当光照射被切断时,产生的低能级态密度迅速减少,对传输的低光子能信号光吸收也减少,信号光快速恢复传输。但同时由于室温退激,和已伴随网格的局部畸变(通过退火处理,这畸变可实现部分可逆),恢复过程变得缓慢。

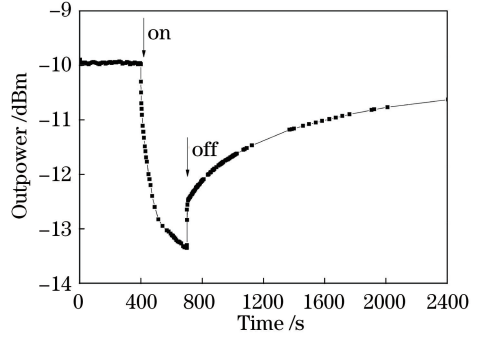


图 5 As_2S_3 光纤在近带隙光照射下光阻断效应
Fig. 5 Optical stopping effect of As_2S_3 fiber under near bandgap light irradiation

6 结 论

基于法布里-珀罗标准具技术原理,实验研究了在 532 nm 近带隙光照射下低损耗 As_2S_3 光纤的纤芯折射率的变化特性。实验结果表明:在整个光照期间, As_2S_3 光纤纤芯的光致折射率变化存在两个过程,一个是光开始照射时折射率快速朝减小方向变化的过程;随着光照时间延长,出现折射率变化恢复的第二过程。这两个过程经历的时间和折射率变化大小均取决于光照功率。同时,随着光照功率增加,在恢复过程中,折射率变化出现正增长,出现这现象的光功率阈值在 5~7 mW。随光照功率进一步增加和曝光时间延长,折射率变化可增大约 3×10^{-3} 。采用带 +1/-1 衍射级的相位掩模板的 Sagnac 干涉系统在 As_2S_3 光纤纤芯上刻写 Bragg 光栅,曝光期间其中心波长先蓝移,后恢复并红移,也表明了其纤芯折射率变化情况与基于法布里-珀罗标准(FP)具技术原理得到的实验结果类似。同时,实验还发现,在近带隙光照射下, As_2S_3 光纤出现光阻断效应现象,其截止效率约为 55%。这些实验结果对硫系玻璃光纤应用于近、中红外领域,制备高质量光栅和光诱导光子晶体结构器件有重要的参考价值。

参 考 文 献

[1] Eggleton B J, Luther-Davies B, Richardson K.

- Chalcogenide photonics[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(3): 141-148.
- [2] Théberge F, Mathieu P, Thiré N, *et al.* Mid-infrared nonlinear absorption in As_2S_3 chalcogenide glass[J]. *Optics Express*, 2016, 24(21): 24600-24610.
- [3] He Y J, Nie Q H, Sun J, *et al.* Novel Ge-Te-I far-infrared-transmitting chalcogenide glasses system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(9): 1307-1311.
何钰钜, 聂秋华, 孙杰, 等. 新型远红外 Ge-Te-I 硫系玻璃性能研究[J]. *光子学报*, 2011, 40(9): 1307-1311.
- [4] Fu X H, Jiang H Y, Zhang J, *et al.* Preparation of short and medium wave infrared anti-reflective coating based on chalcogenide glass [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0903002.
付秀华, 姜洪妍, 张静, 等. 基于硫系玻璃的短中波红外减反膜研制 [J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0903002.
- [5] Liu Q M, Zhao X J, Gan F X. Second harmonic generation in the system Ge-As-S and analysis of the poling mechanism[J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, 49(9): 1726-1730.
刘启明, 赵修建, 干福熹. Ge-As-S 体系玻璃中光学二次谐波发生及其极化机理分析 [J]. *物理学报*, 2000, 49(9): 1726-1730.
- [6] Zou L E, He P P, Chen B X, *et al.* Nonlinear optical properties of $\text{As}_{20}\text{S}_{80}$ system chalcogenide glass using Z-scan and its strip waveguide under bandgap light using the self-phase modulation[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(2): 025003.
- [7] Zhang M J, Yang Z Y, Li L, *et al.* The effects of germanium addition on properties of Ga-Sb-S chalcogenide glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2016, 452: 114-118.
- [8] Pelusi M D, Ta'eed V G, Fu L B, *et al.* Applications of highly-nonlinear chalcogenide glass devices tailored for high-speed all-optical signal processing[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2008, 14(3): 529-539.
- [9] Pelusi M D, Luan F, Madden S, *et al.* Wavelength conversion of high-speed phase and intensity modulated signals using a highly nonlinear chalcogenide glass chip [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(1): 3-5.
- [10] Florea C, Sanghera J S, Shaw B, *et al.* Fiber Bragg gratings in As_2S_3 fibers obtained using a 0/-1 phase mask[J]. *Optical Materials*, 2009, 31(6): 942-944.
- [11] Xu H, Dai S X, Zhang P Q, *et al.* Research progress in chalcogenide glass Raman fiber lasers [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 030004.
- 徐航, 戴世勋, 张培晴, 等. 硫系拉曼光纤激光器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 030004.
- [12] Gao W Q, Duan Z C, Asano K, *et al.* Mid-infrared supercontinuum generation in a four-hole As_2S_3 chalcogenide microstructured optical fiber [J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(4): 847-853.
- [13] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [14] Zou L E, Chen B X, Lin H S, *et al.* Fabrication and propagation characterization of As_2S_8 chalcogenide channel waveguide made by UV irradiation annealing [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(33): 6442-6447.
- [15] van Popta A, DeCorby R G, Haugen C J, *et al.* Photoinduced refractive index change in As_2Se_3 by 633 nm illumination [J]. *Optics Express*, 2002, 10(15): 639-644.
- [16] Tanaka K, Ohtsuka Y. Composition dependence of photo-induced refractive index changes in amorphous As S films[J]. *Thin Solid Films*, 1979, 57(1): 59-64.
- [17] Zou L E, Chen B X, Du L P, *et al.* Photo- and thermally induced changes in the refractive index and film thickness of amorphous As_2S_8 film [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(12): 123523.
- [18] Khan P, Barik A R, Vinod E M, *et al.* Coexistence of fast photodarkening and slow photobleaching in $\text{Ge}_{19}\text{As}_{21}\text{Se}_{60}$ thin films [J]. *Optics Express*, 2012, 20(11): 12416-12421.
- [19] Popescu M, Hoyer W. Structural features and mechanism of reversible photoinduced transformations in amorphous chalcogenides [J]. *Journal of Optoelectronics & Advanced Materials*, 2002, 4(4): 867-874.
- [20] Brawley G A, Ta'eed V G, Bolger J A, *et al.* Strong photoinduced Bragg gratings in arsenic selenide optical fibre using transverse holographic method [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(14): 846-847.
- [21] Ahmad R, Rochette M, Baker C. Fabrication of Bragg gratings in subwavelength diameter As_2Se_3 chalcogenide wires [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(15): 2886-2888.
- [22] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method [J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [23] Kabakova I V, Zou L E, Brawley G A, *et al.* Dynamics of photoinduced refractive index changes in As_2S_3 fibers [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(30):

- 7333-7338.
- [24] Zou L E, Chen B X, Chen L, *et al.* Fabrication of an As_2S_3 stripe waveguide with an optical stopping effect by exposure to ultraviolet irradiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 153510.
- [25] Abdulhalim I, Gelbaor M, Klebanov M, *et al.* Photoinduced phenomena in nano-dimensional glassy As_2S_3 films [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(7): 1192-1201.
- [26] Lyubin V M, Klebanov M L. Photo-Induced Anisotropy in Chalcogenide Glassy Semiconductors [M]. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2007: 91-108.
- [27] Abdulhalim I. Model for photoinduced defects and photorefractivity in optical fibers [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 66(24): 3248-3250.
- [28] Zou L E, Kabakova I V, Mägi E C, *et al.* Efficient inscription of Bragg gratings in As_2S_3 fibers using near bandgap light [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(19): 3850-3853.
- [29] Zou L E, He P P, Fu J W, *et al.* Fabrication of Bragg gratings in low-loss As_2S_3 chalcogenide fibers using $+1/-1$ phase mask and 532 nm laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(7): 0706001.
邹林儿, 何盼盼, 傅继武, 等. $+1/-1$ 相位掩模板和 532 nm 激光下低损耗 As_2S_3 硫系光纤布喇格光栅的制备 [J]. *光子学报*, 2017, 46(7): 0706001.
- [30] Wang G D, Chen B X, Wang P, *et al.* Mechanism of optical stopping effect of arsenic sulfide amorphous waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074224.
王关德, 陈抱雪, 王平, 等. 硫化砷非晶态波导光阻断效应的机理研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074224.
- [31] Du L P, Chen B X, Sun B, *et al.* Optical stopping effect of impurity-doping As_2S_3 glass waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(6): 3593-3599.
杜丽萍, 陈抱雪, 孙蓓, 等. 掺杂 As_2S_3 非晶态薄膜波导的光阻断效应 [J]. *物理学报*, 2008, 57(6): 3593-3599.