

doi: 10.3788/gzxb20174607.0706001

# +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

邹林儿<sup>1</sup>, 何盼盼<sup>1</sup>, 傅继武<sup>1</sup>, 陈抱雪<sup>2</sup>

(1 南昌大学 物理系, 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:** 采用改进型 Sagnac 干涉光栅写入系统, 利用 532 nm 准带隙光曝光源和带 +1/-1 衍射级的相位掩模板, 在两种不同直径的低损耗  $As_2S_3$  硫系玻璃光纤上刻写布喇格光栅, 并研究曝光期间光栅的动态特性. 实验表明,  $As_2S_3$  光纤布喇格光栅透射峰值随光纤直径的减小而增强; 在曝光过程中, 布喇格波长先是较快地向短波长方向移动, 随着曝光时间的延长, 布喇格波长缓慢地向长波长方向回复. 曝光时间为 800~1 000 s 时, 在包层直径为 140  $\mu m$  的  $As_2S_3$  光纤上获得质量良好的布喇格光栅光谱, 其透射峰值可达 -2.6 dB, 带宽为 0.37 nm. 对  $As_2S_3$  硫系光纤纤芯的光敏性分析结果表明, 折射率调制幅度和平均折射率变化随曝光时间分别可达到  $10^{-4}$  和  $10^{-3}$  数量级.

**关键词:** 集成光学; 光纤布拉格光栅; 硫系玻璃; 光敏性; 折射率

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)07-0706001-6

## Fabrication of Bragg Gratings in Low-loss $As_2S_3$ Chalcogenide Fibers Using +1/-1 Phase Mask and 532 nm Laser

ZOU Lin-er<sup>1</sup>, HE Pan-pan<sup>1</sup>, FU Ji-wu<sup>1</sup>, CHEN Bao-xue<sup>2</sup>

(1 Department of Physics, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

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

**Abstract:** Adopting modified Sagnac interference grating writing system, the fiber Bragg gratings were written in two kinds of  $As_2S_3$  chalcogenide fibers with different cladding diameter by use of a near bandgap light at 532 nm and +1/-1 diffracted orders phase mask, and the gratings dynamic characteristics during the exposure were studied. It is found that the depth of grating transmission peak in low-loss  $As_2S_3$  chalcogenide fiber increases with a decrease of the cladding diameter. During exposure, the Bragg wavelength shifts fast towards short wavelength at first, and then with increasing exposure time restores slowly towards long wavelength. At exposure time from 800 s to 1000 s, the good quality Bragg grating with about -2.6 dB bandgap and about 0.37 nm bandwidth in transmission spectra was fabricated in  $As_2S_3$  chalcogenide fiber with about 140  $\mu m$  cladding diameter. In addition, an analysis of photosensitivity in the  $As_2S_3$  chalcogenide fiber core shows that the refractive index modulation amplitude and the change of average refractive index with the exposure time can achieve to be on the order of  $10^{-4}$  and  $10^{-3}$ , respectively.

**Key words:** Integrated optics; Fiber Bragg gratings; Chalcogenide glasses; Photosensitivity; Refractive index

**OCIS Codes:** 060.3738; 130.0130; 160.5320

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 61465008, 61077042)资助

第一作者: 邹林儿(1971-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光通信器件与集成光电子技术. Email: Linerzou@ncu.edu.cn

收稿日期: 2017-01-03; 录用日期: 2017-03-29

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

## 0 引言

硫系玻璃是一种具有低声子能量<sup>[1]</sup>、高折射率<sup>[1-2]</sup>和高非线性<sup>[1,3-4]</sup>的材料,在中远红外域有良好的透光性<sup>[1,5-6]</sup>.采用常规光刻法可以制备条形波导<sup>[7-8]</sup>,利用照相制版平印术和干蚀刻法结合可以制备脊形波导<sup>[9]</sup>,通过棒管法、坩埚法和挤压技术等可以制备光纤<sup>[10-11]</sup>.在硫系玻璃中,As-S和As-Se玻璃体系因具有较为稳定的化学性能而被广泛研究,现在已经能够制备在1550 nm波长处低损耗0.1~0.2 dB/m的As-S光纤<sup>[12]</sup>.硫系玻璃光纤布喇格光栅是一种重要的光子器件,作为线性器件,它可应用于红外传感器;在非线性光学应用中,它可以实现全光开关、脉冲整形,还可以用于提高超连续光谱的产生和减慢光速等.硫系玻璃光纤因其纤芯和包层组份类似,两者都有光敏性,不像掺锗石英光纤,只有掺锗的纤芯才会对紫外光敏感,没有掺锗的包层不会吸收紫外光.最早的As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>光纤布喇格光栅是1996年由Asobe等用633 nm He-Ne激光为曝光源和横向全息曝光法所得<sup>[13]</sup>,但是横向全息曝光法的机械稳定性不高,光谱质量较差,且需要长时间曝光才能得到布喇格光栅.Florea等<sup>[14]</sup>和Bernier等<sup>[15]</sup>分别报道采用机械稳定性较高的相位模板技术在光纤直径较小的As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃光纤上,得到了较高反射率的布喇格光栅,但因仍旧采用633 nm He-Ne激光的写入波长,曝光时间依旧很长(40 min以上),光谱质量不理想.利用As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃材料对633 nm亚带隙光吸收率较低,大部分光能穿透光纤包层而达到纤芯产生光敏性,但因纤芯对亚带隙光的吸收少导致光敏性弱,得到的光栅透射峰值不高,且需要几十分钟甚至几小时的曝光时间,同时因光栅写入系统的复杂性和长时间的机械不稳定性,得到的光谱质量差.其它刻写方法,如声波谐振法<sup>[16]</sup>和飞秒激光点对点写法<sup>[17]</sup>,更适合用来写长周期光栅.

本文采用机械稳定性较高的带+1/-1衍射级相位掩模板的改进Sagnac干涉系统<sup>[18]</sup>,选用As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃材料准带隙光532 nm光源作为写入光波,在As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃光纤上制备布喇格光栅,并进行了实验研究.

## 1 实验装置及原理

采用商业化的As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃光纤(加拿大公司CorActive),光纤纤芯/包层直径约为7/170 μm和8/140 μm,数值孔径(Numerical Aperture, NA)约为0.24.纤芯/包层对应的成分是As<sub>39</sub>S<sub>61</sub>/As<sub>38</sub>S<sub>62</sub>,它们之间的折射率差异约为0.3%,在波长为3~5 μm的情况下光损耗约维持在0.1 dB/m.As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃光纤在约500 nm时带隙光(其电子带隙约为2.4 eV)吸收最强,沿长波长方向吸收系数呈指数下降.在考察As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃光纤纤芯的光敏性时,曝光波长太靠近材料的吸收边缘(如带隙光),所有的光都被包层吸收而不能到达纤芯;如选择远离材料的吸收边缘光波,因大部分光会透过光纤而纤芯吸收太少,折射率几乎没有任何改变,光敏性很弱.因而,要选择合适的曝光源刻写硫系玻璃光纤光栅.考虑光纤的圆柱体结构与薄膜或平板结构不同,其弯曲侧面起着柱面透镜的作用,会对光线聚焦.As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>光纤直径在120~140 μm,到达光纤纤芯处于最大吸收光强度的半峰值范围为526~562 nm<sup>[19]</sup>.实验中,选用As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>硫系玻璃材料准带隙光波段的532 nm波长作为写入光波,处于半峰值范围,能在纤芯处获得较强的光敏性.图1是改进型的Sagnac干涉写光栅系统的原理示意图,其系统置放于气垫精密隔振光学平台上.该系统用连续波(Continuous Wave, CW)倍频的Nd:YAG激光器,选用工作波长为532 nm的激光作为曝光源,其光束经过由扩束透镜组、光圈、反射镜1和快门组成的望远镜系统扩束后,又通过柱面透镜,进入相位掩模板发生+1、0、-1三级衍射(其中0级光束被挡住),+1和-1级光束经反射镜2和反射镜3两次反射后,最后聚焦(柱面透镜作用)在光纤样品上形

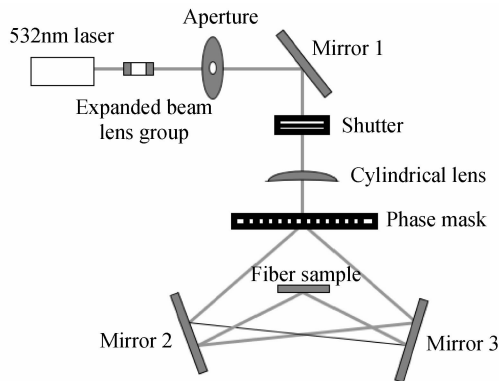


图1 改进型Sagnac干涉系统在As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>光纤写布喇格光栅的实验装置

Fig. 1 Schematic setup of a modified Sagnac interferometer for writing gratings in As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> fiber

成宽 7 mm、高 1.2 mm 带高斯轮廓强度分布的光斑,功率约为 6 mW。光纤曝光时间由快门控制;光谱监测系统中,选用带宽放大自发辐射光源(Amplified Spontaneous Emission, ASE) (1 520~1 570 nm),其光由高数值孔径单模光纤耦合进入 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系玻璃光纤,并通过另一根单模光纤耦合而出,进入光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)测试出光栅透射谱。

改进型 Sagnac 干涉写入光栅系统的原理为:布喇格波长  $\lambda_B$  通过两束光干涉图形的周期  $\Lambda$  控制,而  $\Lambda$  取决于两束光的干涉角度  $2\theta$ 。光栅公式为<sup>[20]</sup>

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (1)$$

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2\sin\theta} \quad (2)$$

式中,  $n_{\text{eff}}$  是光在光纤中传输模式的有效折射率,  $\lambda_w$  是激光的工作波长。在系统中,通过调整反射镜 2 和反射镜 3 改变干涉角度  $2\theta$ ,从而改变布喇格波长  $\lambda_B$ ,不需要更换相位掩模板。实验中制备光纤光栅时双光束的夹角  $2\theta$  约为  $110.74^\circ$ ,得到光栅周期  $\Lambda$  约为 323.27 nm,刻写的光栅长度约 7 mm。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 光纤直径对布喇格光栅透过率的影响

图 2(a)、(b)分别是在两种不同直径 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤上得到的布喇格光栅信号最强时的透射光谱。在图 2(a)中,光纤纤芯/包层直径约为 7/170  $\mu\text{m}$ ,其布喇格光栅透射峰值约为 -1 dB,带宽约为 2.72 nm。在图 2(b)中,光纤包层直径减小,光纤纤芯/包层直径约为 8/140  $\mu\text{m}$ ,其布喇格光栅透射峰值增加,约为 -2.6 dB,带宽约为 0.37 nm。实验数据表明,得到的布喇格光栅透射峰值与光纤包层直径有关,随着光纤包层直径的减少而增强;且随光纤直径减小,其光谱质量变好。这是因为光纤结构起着凸透镜会聚作用,导致包层对光的吸收减少<sup>[19]</sup>;对于小直径光纤,在入射光被包层吸收后,仍然有较大部分光能够到达纤芯,并在纤芯处产生较强的光敏性。

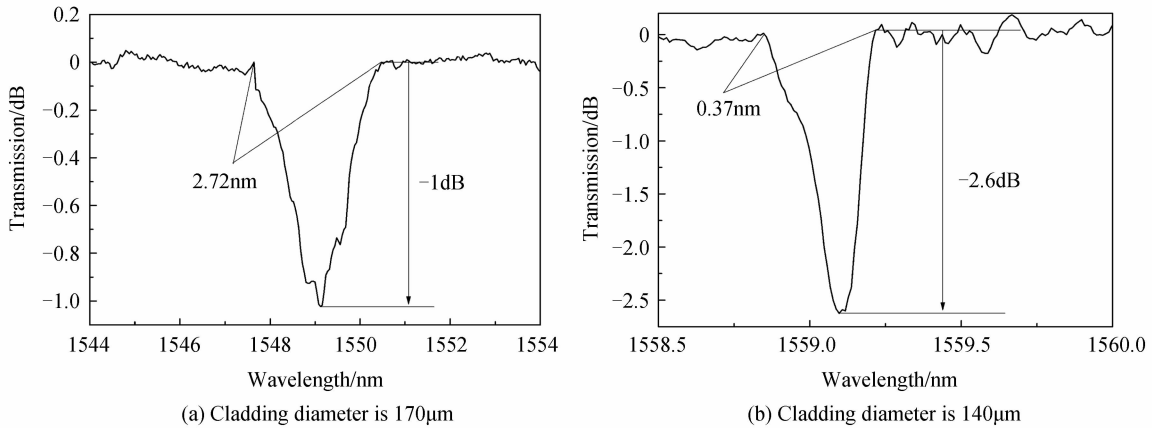


图 2 两种不同直径的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤上得到的布喇格光栅的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectra of Bragg grating in two kinds of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> fiber with different cladding diameter

### 2.2 曝光期间布喇格波长位移

选用光纤纤芯/包层直径约为 8/140  $\mu\text{m}$  的 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系玻璃光纤,实验详细地研究了曝光期间光栅的动态特性。图 3 是曝光累积时间下的布喇格光栅透射谱。曝光时间  $t < 590$  s,出现多个次峰,光谱质量差,如图 3(a)。随着曝光时间的延长,光谱质量逐渐变好,如图 3(b)和(c)。其原因是,干涉光束斜入射导致刚开始时折射率调制呈梯形分布,不同分层上折射率分布周期不同;随着曝光时间的延长,折射率变化倾向于饱和,倾角带来的周期变化逐渐消除,各分层上折射率调制周期基本一致,次峰逐渐消失,光谱质量变好。在整个曝光期间内,曝光时间  $t < 830$  s,布喇格波长发生蓝移,向短波长方向位移了约 2.37 nm (从 1 561.4 nm 移到 1 559.03 nm),如图 3(a)和(b)。随着曝光时间的延长( $t > 830$  s),布喇格波长开始回复,出现红移,向长波长方向位移了约 0.05 nm (从 1 559.03 nm 回到 1 559.08 nm),如图 3(c)。当曝光时间  $t > 980$  s 以后,光谱又开始出现次峰,变得复杂,其原因可能是光诱导光纤微结构变化又开始出现不均匀,以及系统稳定性和激

光噪音等.

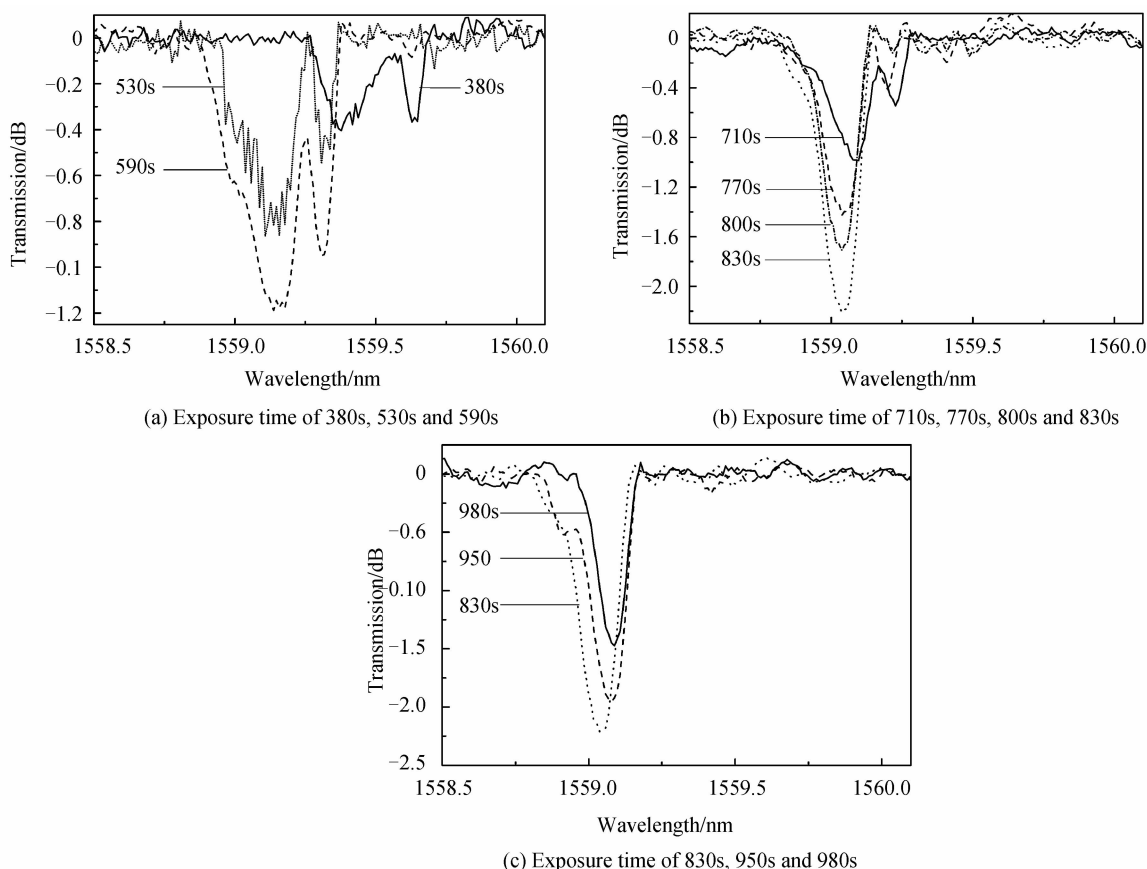


图3 曝光期间布喇格光栅透射光谱

Fig. 3 Transmission spectra of Bragg grating during exposure

### 2.3 曝光期间布喇格波长的透射峰值变化

图4显示了在纤芯/包层直径为8/140 μm 光纤上,整个曝光过程中布喇格波长的透射峰值深度与曝光时间的关系.在开始阶段,布喇格波长透射峰值随曝光时间的增加而增强,并在曝光时间  $t = 890$  s时,透射峰值深度达到最大值,为2.6 dB;随后随着曝光时间的延长,布喇格波长透射峰值开始出现回落现象,且当曝光时间增加到980 s时,布喇格波长透射峰值深度减小到1.48 dB.

### 2.4 曝光期间布喇格波长的折射率调制幅度和平均折射率变化

根据光栅带宽  $\Delta\lambda(t)$  和布喇格波长  $\lambda_B(t)$ ,可用式(3)和(4)分别计算折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}(t)$  和平均折射率变化  $\Delta n_{DC}(t)$ <sup>[21]</sup>,即

$$\Delta n_{AC}(t) = \frac{\lambda_B(t)}{L} \sqrt{\left(\frac{\Delta\lambda(t)n_0 L}{\lambda_B^2(t)}\right)^2 - 1} \quad (3)$$

$$\Delta n_{DC}(t) = \frac{\lambda_B(t) - \lambda_B(t=0)}{\lambda_B(t=0)} \quad (4)$$

式中,  $\lambda_B(t=0)$  是开始曝光时的布喇格波长,  $n_0$  是开始曝光时的平均折射率 (As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤纤芯折射率为2.415),  $\lambda_B(t)$  是曝光时间  $t$  的布喇格波长,  $L$  是光栅长度.

根据式(3)和(4)计算得到在纤芯/包层直径为8/140 μm 光纤上的  $\Delta n_{AC}(t)$  和  $\Delta n_{DC}(t)$  的变化情况,如图

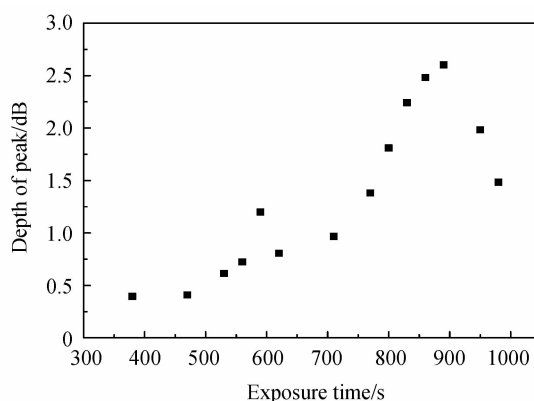


图4 布喇格波长透射峰值深度与曝光时间的关系

Fig. 4 Depth of Bragg wavelength transmission peak dependence on exposure time

5. 图 5(a)中,在曝光时间  $t \leq 620$  s,折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}$  增加到约  $4.08 \times 10^{-4}$ ;而曝光时间延长到 860 s 时,折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}$  却降低到约  $1.09 \times 10^{-4}$ ;曝光时间继续增加到 980 s 时,折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}$  又缓慢增加到约  $1.93 \times 10^{-4}$ . 在图 5(b)中,平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  在整个曝光过程中分为两个阶段:第一个阶段是从曝光开始到曝光时间增加到 830 s,平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  朝着负方向较快速变化到约  $(3.67 \times 10^{-3})$ ;第二个阶段是随着曝光时间的增加,平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  开始缓慢恢复,当曝光时间延长到 980 s,  $\Delta n_{DC}$  缓慢增加到约  $(3.59 \times 10^{-3})$ . 平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  出现的这两个阶段,与采用法布里-珀罗标准具技术观测的光诱导硫系 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤的折射率变化相一致<sup>[19]</sup>. 类似的光诱导现象发生于利用蓝绿光在掺锗石英光纤写相位光栅<sup>[22]</sup> 和硫系玻璃薄膜光黑化现象<sup>[23]</sup>,认为第一个快过程是源于缺陷态的产生,形成一个新亚稳态;随着吸收的光能量增多,进入第二个慢过程使其稳定,导致折射率增加<sup>[14,23]</sup>. 值得一提的是,因硫系玻璃材料对红光吸收低,文献<sup>[14-15]</sup>报道采用 633 nm He-Ne 激光在硫系 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤制备布喇格光栅时,其平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  向负方向变化,只存在第一阶段,而没有第二阶段的恢复过程. 说明光诱导硫系玻璃光纤折射率变化是一个复杂的过程,取决于硫系材料成份和工作波长的光子能等.

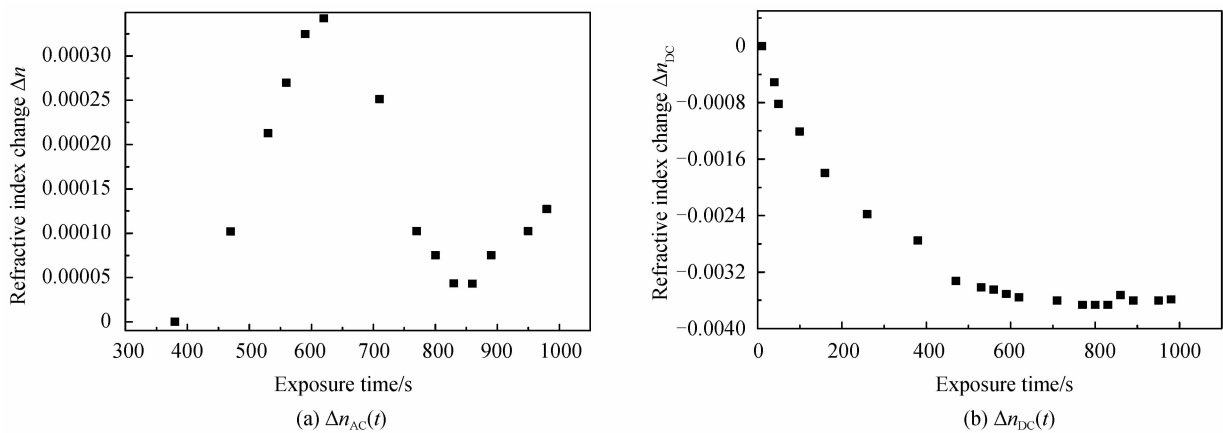


图 5 曝光期间 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 光纤布喇格光栅的折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}(t)$  和平均折射率变化  $\Delta n_{DC}(t)$  的情况

Fig. 5 Refractive index modulation amplitude  $\Delta n_{AC}(t)$  and change of average refractive index  $\Delta n_{DC}(t)$  of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> fiber Bragg gratings during exposure

### 3 结论

本文使用带+1/-1 衍射级相位掩模板的改进型 Sagnac 干涉系统和 532 nm 准带隙光曝光源在低损耗 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 硫系玻璃光纤上刻写布喇格光栅,并分析其在曝光期间的动态特性. 实验数据表明,布喇格光栅透射峰值随着光纤直径的减小而增强;且随着光纤直径的减小,透射谱质量变好. 在包层直径为 140  $\mu\text{m}$  的光纤上,曝光时间为 890 s 时,有最好的透射峰值约为 -2.6 dB,带宽约为 0.37 nm. 在整个曝光过程中,布喇格波长先较快地移向短波长,发生蓝移,随着曝光时间延长又缓慢向长波长方向回复,发生红移;期间其纤芯的折射率调制幅度  $\Delta n_{AC}$  和平均折射率变化  $\Delta n_{DC}$  可分别达到  $10^{-4}$  和  $10^{-3}$  数量级. 研究工作梳理了硫系玻璃光纤纤芯的光敏性,可为制备诸如布喇格硫系光纤光栅的光子器件用于近中红外波段集成光学提供新思路.

#### 参考文献

- [1] EGGLETON B J, LUTHER-DAVIES B, RICHARDSON K. Chalcogenide photonics[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5** (3): 141-148.
- [2] 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<sub>2</sub>S<sub>8</sub> film[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **103**(12): 123523.
- [3] ZOU Lin-er, YAO Song-chao, CHEN Bao-xue, *et al.* Sub-micron chalcogenide glass ridge waveguides with anomalous dispersion and its application to optical phase conjugation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(3): 0323002.  
邹林儿,姚松超,陈抱雪,等. 反常色散亚微米硫系玻璃脊形波导及其在光学相位共轭中的应用[J]. *光子学报*, 2015, **44**(3): 0323002.
- [4] ZOU L E, HE P P, CHEN B X, *et al.* Nonlinear optical properties of As<sub>20</sub>S<sub>80</sub> system chalcogenide glass using Z-scan and its strip waveguide under bandgap light using the self-phase modulation[J]. *AIP Advances*, 2017, **7**: 025003.
- [5] HE Yu-ju, NIE Qiu-hua, SUN Jie, *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.
- [6] LIU Yong-xing, ZHANG Pei-qing, XU Yin-sheng, *et al.* Dispersion properties of  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  chalcogenide glass photonic crystal fiber for Mid-IR region[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 516-521.  
刘永兴, 张培晴, 许银生, 等.  $\text{Ge}_{20}\text{Sb}_{15}\text{Se}_{65}$  硫系玻璃光子晶体光纤的中红外色散特性研究[J]. 光子学报, 2012, **41**(5): 516-521.
- [7] LIN ER ZOU, BAO XUE CHEN, HE SAN LIN, *et al.* Fabrication and propagation characterization of  $\text{As}_2\text{S}_8$  chalcogenide channel waveguide made by UV irradiation annealing[J]. *Applied Optics*, 2009, **48**(33): 6442-6447.
- [8] ZOU Lin-er, CHEN Bao-xue, CHEN Lin, *et al.* Study on  $\text{As}_2\text{S}_8$  glass stripe waveguide fabrication using illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1043-1047.  
邹林儿, 陈抱雪, 陈林, 等.  $\text{As}_2\text{S}_8$  玻璃条形波导的光激励法制备技术研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(7): 1043-1047.
- [9] RUAN Y, LI W, JARVIS R, *et al.* Fabrication and characterization of low loss rib chalcogenide waveguides made by dry etching[J]. *Optics Express*, 2004, **12**: 5140-5145.
- [10] HEWAK D W, MOORE R C, SCHWEIZER T, *et al.* Gallium lanthanum sulphide optical fibre for active and passive applications[J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(4): 384-385.
- [11] LIAO Fang-xing, WANG Xun-si, NIE Qiu-hua, *et al.* Preparation and properties of low-loss core-cladding structure Ge-Te-Se fiber based on the extrusion technology[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(10): 1006003.  
廖方兴, 王训四, 聂秋华, 等. 基于挤压技术的 Ge-Te-Se 低损耗芯-包结构光纤的制备及其性能[J]. 光子学报, 2015, **44**(10): 1006003.
- [12] SANGHERA J S, BRANDON SHAW L, AGGARWAL I D. Chalcogenide glass-fiber-based Mid-IR sources and applications[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, **15**(1): 114-119.
- [13] ASOBE M, OHARA T, YOKOHAMA I, *et al.* Fabrication of Bragg grating in chalcogenide glass fiber using the transverse holographic method[J]. *Electronics Letters*, 1996, **32**(17): 1611-1613.
- [14] FLOREA C, SANGHERA J S, SHAW B, *et al.* Fiber Bragg gratings in  $\text{As}_2\text{S}_3$  fibers obtained using a 0/-1 phase mask[J]. *Optical Materials*, 2009, **31**(6): 942-944.
- [15] BERNIER M, ASATRYAN K E, GALSTIAN T M, *et al.* Second-order Bragg gratings in single-mode chalcogenide fibres[J]. *Quantum Electronics*, 2011, **41**(5): 465-468.
- [16] LITTLER I C M, FU L B, MAGI E C, *et al.* Widely tunable, acousto-optic resonances in chalcogenide  $\text{As}_2\text{S}_3$  fiber [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(18): 8088-8095.
- [17] FLOREA C, SANGHERA J S, AGGARWAL I D. Direct-write gratings in chalcogenide bulk glasses and fibers using a femtosecond laser[J]. *Optical Materials*, 2008, **30**: 1603-1606.
- [18] SHOKOOH-SAREMI M, TA'EEED V G, BAKER N J, *et al.* High-performance Bragg gratings in chalcogenide rib waveguides written with a modified Sagnac interferometer[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2006, **23**(7): 1323-1331.
- [19] KABAKOVA I V, ZOU L, BRAWLEY G A, *et al.* Dynamics of photoinduced refractive index changes in  $\text{As}_2\text{S}_3$  fibers [J]. *Applied Optics*, 2012, **51**(30): 7333-7338.
- [20] AHMAD R, ROCHETTE M, BAKER C. Fabrication of Bragg gratings in subwavelength diameter  $\text{As}_2\text{Se}_3$  chalcogenide wires[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(15): 2886-2888.
- [21] TURAN E. Fiber grating spectra[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1468-1488.
- [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] ABDULHALIM I, GELBAOR M, KLEBANOV M, *et al.* Photoinduced phenomena in nano-dimensional glassy  $\text{As}_2\text{S}_3$  films[J]. *Optical Materials Express*, 2011, **1**(7): 1192-1201.