

# 硫系玻璃光波导研究进展

陈昱<sup>1</sup> 沈祥<sup>1</sup> 徐铁峰<sup>1</sup> 张巍<sup>1</sup> 陈芬<sup>1</sup> 李军<sup>1</sup> 宋宝安<sup>1</sup>  
戴世勋<sup>1</sup> 聂秋华<sup>1</sup> 王占山<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211)

<sup>2</sup> 同济大学物理系, 上海 200092

**摘要** 硫系玻璃具有超高的非线性折射率、超快的非线性响应、超低的双光子吸收和独特的光敏特性等品质, 成为一种新型全光信号处理的理想材料。简介了硫系玻璃材料的基本特性, 回顾了硫系玻璃光波导研究历程及其在非线性的应用, 并对其发展前景进行了展望。

**关键词** 集成光学; 光波导; 硫系玻璃; 超快非线性光学

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP48.111301

## Research Progress of Chalcogenide Glass Waveguide

Chen Yu<sup>1</sup> Shen Xiang<sup>1</sup> Xu Tiefeng<sup>1</sup> Zhang Wei<sup>1</sup> Chen Fen<sup>1</sup> Li Jun<sup>1</sup>  
Song Bao'an<sup>1</sup> Dai Shixun<sup>1</sup> Nie Qiu-hua<sup>1</sup> Wang Zhanshan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

<sup>2</sup> Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract** Large nonlinear refraction indices, ultrafast response of nonlinearities, moderate to low two-photon absorption and unique photoinducing properties make chalcogenide glasses attractive candidates for all-optical signal processing. We review the basic properties of these materials, outline the progress of chalcogenide glass waveguide, introduce its nonlinear application and discuss its prospect.

**Key words** integrated optics; waveguide; chalcogenide glass; ultrafast nonlinear optics

**OCIS codes** 130.2755; 190.4390; 190.7110; 230.7390

## 1 引言

光子代替电子作为信息的载体是历史发展的必然趋势, 但现阶段光信息处理的核心仍然依赖于微电子技术。光电信号转换能力的滞后和电子线路速度的限制已成为信息传输容量的瓶颈。因此, 当务之急是要开发新型光器件以推动光信息处理进入全光时代。平面光波导器件由于具有易集成化、规模化等优势, 成为无源光通信器件的发展方向<sup>[1~5]</sup>。由于平面光波导所用膜层材料的不同, 其功能及特性差异很大。目前用于制作平面集成波导器件的材料体系中, 硅基和石英基光波导由于在制作工艺上和光电子集成电路兼容, 并能够与 ITU-T 标准单模光纤很好地实现模式匹配, 有着较低的耦合损耗, 因此得到广泛应用。但是, 受材料本身的非线性特性所限<sup>[6,7]</sup>, 难以成为未来光器件微型化、集成化的发展趋势。

硫系玻璃材料在光波导器件上的应用近年来备受关注。该类材料具有极高的非线性折射率系数  $n_2$  ( $n_2 =$

收稿日期: 2011-05-18; 收到修改稿日期: 2011-07-18; 网络出版日期: 2011-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(60978058, 61008041)、浙江省自然科学基金(Y1090996)和瞬态光学与光子技术国家重点实验室开放课题(SKLST201010)资助课题。

作者简介: 陈昱(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电子功能玻璃薄膜材料方面的研究。

E-mail: chen\_yu\_nb@mail.nbu.edu.cn

导师简介: 徐铁峰(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤通信技术、特种玻璃光纤、红外光学材料和红外信息系统等方面的研究。E-mail: xutiefeng@nbu.edu.cn

$2\sim 20\times 10^{-18}$  m<sup>2</sup>/W,是石英材料的 100~1000 倍<sup>[8,9]</sup>),较小的双光子吸收系数  $\alpha_2$  ( $0.01\sim 1\times 10^{-12}$  m/W<sup>[6]</sup>)、超快的非线性响应(响应时间小于 200 fs<sup>[10]</sup>),其中光克尔效应小于 50 fs、拉曼散射小于 100 fs<sup>[11]</sup>)等特点。更重要的是硫族元素可与其他元素形成化学计量或非化学计量组成的玻璃,使其性能具有随组分连续可调的优势<sup>[12]</sup>。因此,硫系材料已成为未来光波导器件首选膜层基质材料之一<sup>[13]</sup>。本文首先简介了硫系玻璃材料,然后综述了近年来硫系玻璃光波导制备工艺以及其应用的研究进展,最后总结了目前存在的主要问题,并对硫系玻璃光波导的进一步研究及应用进行了展望。

## 2 硫系玻璃材料特性

硫系玻璃是以 S,Se,Te 中的一种或几种元素为玻璃组分并与其他电负性较弱的元素(如 As,Sb,Ge 和 Si 等)形成共价键的无机玻璃<sup>[14]</sup>。与传统的氧化物玻璃相比,硫系玻璃具有相对较弱的键能和较大的原子质量,并且硫系原子在高于带隙能量的光辐照下易激活位于价带顶部的孤对电子。这些特性使得硫系玻璃具有独特的光学性质,具体如下。

1) 硫系玻璃具有较宽的透射光谱,其透过范围覆盖了近红外通信波段(约 1.5  $\mu$ m)和中红外的表征生物特征的指纹吸收区(2.5~25  $\mu$ m)<sup>[15]</sup>。宽的光谱范围使硫系玻璃光波导除了可应用于光通信领域<sup>[16]</sup>之外,在生物医学传感和中红外激光传输方面也具有重大的应用价值<sup>[4,17]</sup>。

2) 硫系玻璃具有较大的三阶非线性极化率  $\chi^{(3)}$  和较小的双光子吸收系数  $\alpha_2$ ,从而品质因子较高<sup>[2]</sup>;根据 Miller 规则<sup>[18]</sup>,三阶非线性极化率与线性极化率  $\chi^{(1)}$  之间存在着以下关系: $\chi^{(3)} = [\chi^{(1)}]^4 \times 10^{-10}$  (esu)。由此可见,折射率较高(一般来说  $n > 2.5$ )的硫系玻璃具有较大的非线性折射率。事实上在通信波段,As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 和 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> 的非线性折射率分别为  $2.92\times 10^{-18}$  和  $1.2\times 10^{-17}$  m<sup>2</sup>/W,是石英玻璃材料的 130 和 540 倍<sup>[19,20]</sup>。高折射率和高非线性特性使硫系玻璃波导对光场有很好的限域作用,弯曲半径可以更小,产生  $\pi$  非线性相变的作用距离更短,对提高光学器件的集成度非常有利<sup>[20]</sup>。另外,S 基硫系玻璃的光学带隙约为 2.5 eV,远大于 2 倍光通信波长处对应的光子能量( $\lambda = 1.55$   $\mu$ m 处约为 0.8 eV),双光子吸收基本可以忽略。并且由于该材料的非线性光学响应过程主要源于超快的电子云扭曲,因此还具有超快非线性响应(响应时间小于 200 fs)。表 1 给出了常见的几种光学材料的非线性折射率、双光子吸收系数和品质因子(FOM)<sup>[21~23]</sup>,其中 FOM 表示为  $n_2/\alpha_2\lambda$ ,在文献中常用来综合表征材料的三阶非线性性能。从表中可以看出,硫系玻璃具有明显的非线性优势,其 FOM 大于 10,因此在非线性光学器件应用中更具有吸引力。

表 1 几种代表性光学材料在  $\lambda = 1.5$   $\mu$ m 处的非线性参数比较

Table 1 Comparison of nonlinear properties of several nonlinear optical materials at  $\lambda = 1.5$   $\mu$ m

Material	Nonlinear refractive index	Two-photon absorption	Figure of merit (FOM)	Reference
	$n_2/(10^{-20}$ m <sup>2</sup> /W)	(TPA) coefficient $\alpha_2/(10^{-12}$ m/W)		
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	290	<0.01	>10	[21]
SiO <sub>2</sub>	2.2	—	—	[22]
Si	440	8.4	0.4	[22]
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	110	—	—	[23]

3) 硫系玻璃的柔性结构决定了该类材料具备很好的光敏性。硫系原子是二重配位的,并且拥有两个未成键的孤对电子。这些孤对电子位于价带的顶部,很容易由于光辐照而被激活,从而导致结构变化。硫系玻璃的光致折射率变化非常明显,一般的硫系玻璃中折射率变化在 2% 以上<sup>[24]</sup>,而在掺 Ag 离子的硫系玻璃中折射率变化高达 6%<sup>[6]</sup>。因此,利用硫系玻璃材料的光敏特性选择合适的激光波长可以制备光波导<sup>[7,25~27]</sup>、表面光栅<sup>[28]</sup>和集成布拉格光栅<sup>[29,30]</sup>等光学器件,以满足信息处理的需求。

综上所述,硫系玻璃宽的透射光谱、高折射率和高非线性折射率以及独特的光敏性质等优点,决定了该类材料在非线性光器件中具有极大的应用价值。

## 3 硫系玻璃光波导制备方法研究历程

硫系波导的发展最早要追溯到 20 世纪 70 年代初。Klein<sup>[31]</sup>在 1974 年报道了将 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 薄膜沉积到钽酸

锂晶体上形成的最早的一维硫系波导。随即, Bessonov 等<sup>[32]</sup>成功制备了以单晶氟化钡晶体为衬底, 膜层为 As-Se 的硫系波导, 并测量得到了该波导的折射率以及 3 dB/cm 的传输损耗。

然而硫系波导在制备和应用方面直到 21 世纪初光通信的蓬勃发展才得到了重视。Viens 等<sup>[33]</sup>首次报道利用光刻与湿刻对热蒸发制备的  $As_{24}S_{38}Se_{38}/As_2S_3$  多层膜进行刻蚀。尽管得到了在 1300 nm 通信窗口损耗为 1 dB/cm 的硫系玻璃光波导[如图 1(a)所示], 但是由于大多数硫系材料可溶于碱性光刻胶显影剂  $NH_4OH$ , 导致硫系玻璃部分光波导结构的破坏。

由于湿刻法具有难于进行工艺控制、颗粒沾污以及缺乏各向异性等缺点, 对波导的精密刻蚀有很大的限制<sup>[34]</sup>。因此近年来研究人员通常采用等离子体干刻配合光刻技术制备光波导。等离子体干刻包括溅射刻蚀、离子束刻蚀(离子铣)和反应离子刻蚀等几种技术手段。其原理是利用电离产生的等离子体轰击薄膜膜层表面或使反应气体与膜层表面发生化学反应形成需要的波导结构。美国麻省理工大学研究人员<sup>[35]</sup>报道了在热蒸发沉积的 Ge-Sb-S 薄膜上, 用反应离子刻蚀的方法[如图 1(b)所示]刻蚀了波导, 其中侧壁粗糙度达到 17~20 nm, 且在 1550 nm 波段的传光损耗高达 3~5 dB/cm。为获得更好的刻蚀结果, 人们采用更理想的离子刻蚀方法: 电感耦合等离子体技术(ICP)和电子回旋共振技术。其中 Ruan 等<sup>[19]</sup>采用电感耦合等离子体干刻技术[如图 1(c)所示]和电子回旋共振等离子体刻蚀[如图 1(d)所示]制备  $As_2S_3$  脊型波导, 脊宽 4 和 5  $\mu m$  的波导在 1550 nm 波段传输损耗仅为 0.25 dB/cm, 脊宽 3  $\mu m$  波导的损耗为 0.5 dB/cm。但需要指出的是, 在使用干刻技术刻蚀薄膜前, 需要对薄膜进行热退火处理, 并在刻蚀过程中选用合适的离子气体<sup>[36]</sup>。因为大多数热蒸发和激光脉冲沉积的硫系薄膜是由不同相位的分子团簇组成, 这些分子团簇在刻蚀时会导导致刻蚀速率不同, 造成波导表面粗糙度上升<sup>[16,37]</sup>。

除了光刻技术外, 还可以利用剥离法来制备条形或脊型硫系波导。剥离法首先在衬底上涂覆抗蚀胶层, 然后经过掩模板对其进行曝光和显影, 接着对其进行真空镀膜, 最后利用有机溶剂溶解抗蚀胶层形成波导。

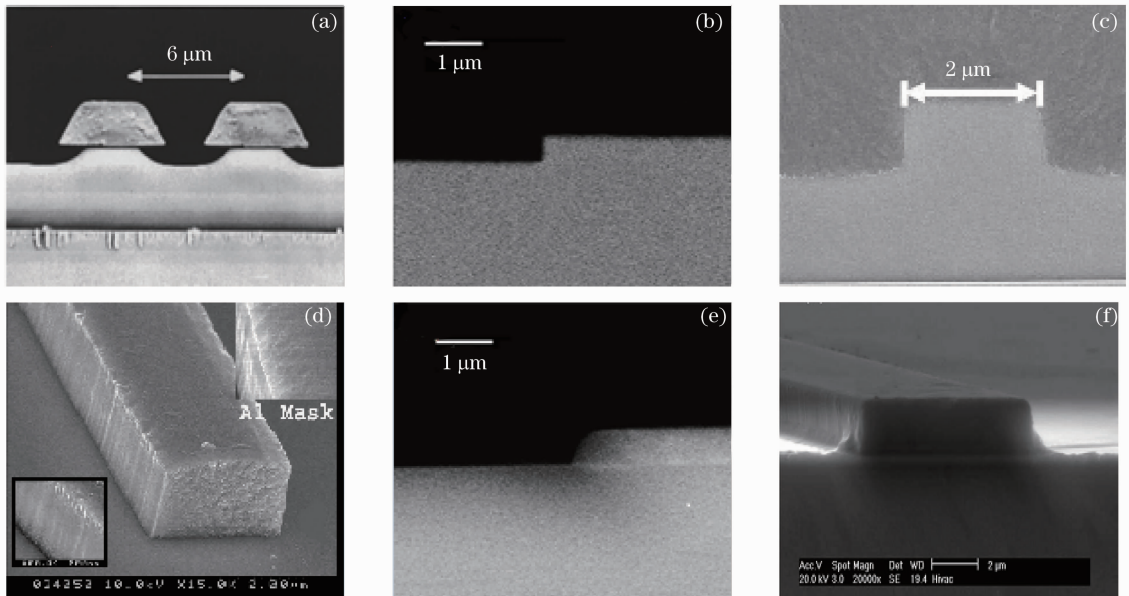


图 1 各种方法制备的硫系玻璃波导。(a)湿刻和光刻制备的  $As_{24}S_{38}Se_{38}/As_2S_3$  多层膜脊型硫系玻璃波导;(b) $SF_6$  等离子体刻蚀的  $Ge_{23}Sb_7S_{70}$  脊型波导;(c)电感耦合等离子体刻蚀的  $As_2S_3$  脊型波导和聚硅氧烷保护层;(d)电子回旋共振等离子体刻蚀的  $As_2S_3$  脊型波导;(e)剥离法制备的  $Ge_{23}Sb_7S_{70}$  脊型波导;(f)石英模具模压制备的  $As_2S_3$  脊型波导

Fig. 1 Chalcogenide glass waveguides made by a number of methods. (a) SEM micrograph of a multilayer  $As_{24}S_{38}Se_{38}/As_2S_3$  rid waveguide made by lithography and wet etching; (b) cross-sectional image of  $Ge_{23}Sb_7S_{70}$  waveguide patterned by  $SF_6$  plasma etching; (c) SEM micrograph showing the profile of  $As_2S_3$  waveguide etched by ICP and coated with polysiloxane cladding; (d) SEM images showing the profile of  $As_2S_3$  waveguide etched by helicon plasma; (e) cross-sectional image of  $Ge_{23}Sb_7S_{70}$  channel waveguide sidewall profile patterned by lift-off method; (f) SEM images of rib waveguides in the chalcogenide glass sample embossed by silicon mold

2007年, Hu等<sup>[35]</sup>采用该技术制备了组分为 Ge-Sb-S 的脊型波导[如图 1(e)所示]。与光刻和等离子体干刻结果相比, 剥离技术制备的波导侧壁粗糙度( $10 \pm 2$ ) nm 远小于前者的粗糙度, 且在 1550 nm 处的传光损耗也较小(3 dB/cm)。

由于采用光刻与刻蚀技术所需要的设备精密复杂、价格昂贵, 并且刻蚀周期较长, 不利于大规模工业化生产, 研究人员将制备技术转向操作更为简单、更高效的热压法。热压法是利用事先刻好的模具在特定的温度和气压下, 对硫系薄膜进行压刻形成波导。Solmaz等<sup>[38]</sup>首次报道了在温度为 225 °C, 气压为  $5 \times 10^{-6}$  Pa 的环境下, 利用 SiO<sub>2</sub> 硬刻模具压刻 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 薄膜形成波导。尽管最终波导表面出现部分析晶, 但是该研究在硫系玻璃波导制备研究方面具有重大意义。接着, Lian等<sup>[39]</sup>采用 Si 模具压刻制备硫系玻璃波导[如图 1(f)所示], 并对该波导在 1.55 μm 波段的传输特性进行测量。尽管其损耗高达 2.9 dB/cm, 但具有良好的近场光强分布。之后, 澳大利亚 CUDOS 实验室 Han等<sup>[40]</sup>报道了利用软刻模 PDMS 对 As<sub>24</sub>Se<sub>38</sub>S<sub>38</sub> 薄膜进行热压印光刻制备脊型单模波导。脊宽和脊高的尺寸分别为 2~4 和 1 μm, 其中 4 μm(脊宽) × 1 μm(脊高) 在 1.55 μm 波段处对 TM 模和 TE 模的损耗分别为 0.24 和 0.29 dB/cm。尽管目前在制备过程中, 较高的温度会导致部分材料分解以及析晶现象的发生, 但是热压技术的高效率和低成本必将使其成为主导未来波导制备的一项工艺<sup>[40]</sup>。

除以上方法之外, 研究者尝试利用硫系玻璃的光敏性, 使用激光直写技术<sup>[25,26]</sup>制作硫系波导。2004年, 英国南安普顿大学光电子研究中心 Chardon等<sup>[26]</sup>报道了利用 244 nm 连续紫外激光器在 Nd<sup>3+</sup> 掺杂的 Ga-La-S 玻璃上制作损耗为 0.5 dB/cm 的平面波导。也有利用飞秒激光直写技术成功制备硫系玻璃波导的报道<sup>[25,27]</sup>。2006年, 邹林儿等<sup>[7]</sup>报道利用光刻设备对 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 薄膜样品进行选择性的紫外曝光, 形成 5 μm(宽) × 0.3 μm(高) 条形波导, 经测试该波导在 632.8 及 1310 nm 波段显示出良好的导光特性。

## 4 硫系平面波导的应用

尽管硫系基质波导器件研究历史不长, 但是由于其在非线性光信息处理、生物化学传感、中远红外激光传输等领域显示出广阔的应用前景, 近年来已引起了欧美发达国家一些知名研究机构的关注, 如澳大利亚 CUDOS 实验室、英国南安普顿大学、英国诺丁汉大学和美国麻省理工大学等在硫系玻璃光波导器件上做出了大量创新性研究工作。但国内在硫系玻璃光波导器件方面的研究基本处于起步阶段。中国科学院上海光学精密机械研究所、武汉理工大学和上海理工大学等单位在硫系光波导膜层材料的制备及性能表征方面做了系统的研究工作<sup>[7,41,42]</sup>, 为今后硫系光波导的制备及应用打下了坚实的基础。本文就硫系材料光波导器件在集成光器件中的应用展开论述。目前文献已报道硫系平面波导应用于光栅<sup>[21~23,40]</sup>、全光信号处理等光器件<sup>[41~50]</sup>, 具体工作综述如下。

### 4.1 波导光栅

波导光栅不仅是半导体激光器的重要组成部分, 而且具有许多优良性能, 如在集成光学中, 光的输入输出耦合、偏转、滤波、波分复用等。利用硫系玻璃的光诱导效应制备波导光栅最早是由 Tanaka等<sup>[51]</sup>提出。自此之后人们采用双光束全息曝光、掩模法曝光等技术制作硫系波导光栅, 使硫系波导光栅的研究得到飞速发展<sup>[28~30,43,44]</sup>。但在双光束全息曝光过程中, 由于马赫-曾德尔干涉仪对环境干扰极为敏感, 因此得到的光栅均匀性与透射率较低。为了降低相位失真对光栅的影响, 研究人员采用更为稳定的萨尼亚克干涉仪。另外, Baker等<sup>[29]</sup>提出利用振幅掩模与双光束全息相干写入技术对 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 脊型波导进行刻写, 使波导部分折射率变化率为 3%, 形成取样布拉格光栅。该光栅 3 dB 带宽跨度为 40 nm, 光谱中心 11 个损耗峰的带宽为 0.966 nm, 且最大损耗峰透射率达到 20 dB。之后, Choi等<sup>[30]</sup>为消除掩模板与波导之间的偏差, 采用半导体加工工艺将掩模板集成在 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 脊型波导上, 并刻写了取样布拉格光栅。相比于之前的研究成果, 尽管管道的损耗峰透射率并不是很强, 但是该光栅将 3 dB 带宽提高至 60 nm, 最重要的是该光栅的损耗峰尖锐程度有大幅度的提高且损耗带宽仅为 150 pm。因此研究人员对硫系波导光栅在未来光通信以及红外传感技术领域的应用给予了充分的肯定。

### 4.2 全光再生

在光通信中, 色散会导致光脉冲发生展宽, 产生码间干扰, 并且随着传输距离增大导致信号的衰减, 因此每

传输一段距离都需要放置光再生器对光信号进行放大和整形。而基于硫系波导的 2R 再生器是以波导中的自相位调制和偏移滤波来实现的。2005 年, Ta'eed 等<sup>[45]</sup> 证明在长 5 cm, 1550 nm 波段损耗为 0.25 dB/cm 的  $As_2S_3$  脊型波导上, 能有效地提高脉冲宽度为 1.4 ps、信息速率为 640 Gb/s 的光传输信噪比, 并降低信号误码率。随即, 又实现了脉冲宽度为 1.4 ps、信息速率超过 1 Tb/s 的全光再生<sup>[46]</sup>, 并指出亚皮秒级光脉冲以及更小运行功率的发展方向。澳大利亚 CUDOS 实验室<sup>[47]</sup> 制备了长 22.5 cm, 在 1550 nm 通信窗口损耗为 0.05 dB/cm, TE 模式下色散为 433 ps<sup>2</sup>/km, 非线性系数为 1700 W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> 的  $As_2S_3$  脊型波导。基于该波导实现的 2R 再生器能够优化脉冲宽度为 1.2 ps 的光信号的信噪比及误码率, 并将运行功率有效地控制在 1 W 之内。另外仿真实验结果表明, 对波导的群速度色散的调整能使高速率信号的全光再生效果达到最优。

#### 4.3 波长转换

波长转换技术是波分复用(WDM)网络中不可或缺的关键技术之一。它将非匹配波长上的光信号转到符合要求的波长上, 从而提高网络的灵活性, 消除波长竞争, 优化 WDM 网络的运行、维护和管理。目前基于非线性效应的全光波长转换包括交叉相位调制(XPM)波长转换和四波混频(FWM)波长转换。2006 年, Ta'eed 等<sup>[48]</sup> 在  $As_2S_3$  薄膜上刻蚀了脊高 1.2 μm, 脊宽 4.2 μm, 长 5 cm 的脊型硫系波导, 并利用该波导制备了波长转换器。结果表明在 1550 nm 窗口, 采用 XPM 效应的转换带宽仅为 10 nm。2007 年, Lamont 等<sup>[49]</sup> 根据 XPM 效应, 制备了基于  $As_2S_3$  波导的波长转换器, 达到 25 nm 的转换带宽。之后, 利用长 22.5 cm, 在 1550 nm 波段损耗仅为(0.05±0.005) dB/cm, 非线性系数为 1700 W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup> 的“蛇形” $As_2S_3$  波导<sup>[50]</sup>, 制备了基于 XPM 的波长转换器。对比之前的研究成果发现, 处理信号速率提高了 4 倍, 信号占空比提高了 8 倍, 转换带宽也达到了 40 nm。2009 年, Luan 等<sup>[52]</sup> 在  $As_2S_3$  薄膜上刻蚀了非线性系数高达 9800 W<sup>-1</sup>·km<sup>-1</sup>、TM 模式下色散为 29.2 ps/(nm·km) 的硫系波导, 并采用 FWM 效应实现了可应用于 40 Gb/s 速率、转换带宽高达 80 nm 的波长转换器。

另外, 研究人员还根据硫系波导超强的非线性制备了光复用/解复用器<sup>[53,54]</sup>, 并研究了硫系波导在超连续谱<sup>[55]</sup>等方面的应用。

## 5 结束语

硫系玻璃波导在近红外和中红外区域具有优良的透光性能及超强的非线性, 使其在未来的光信息处理器件、小型波导激光器和生物传感器等领域具有广阔的应用空间。但现阶段硫系玻璃薄膜波导仍存着以下问题: 首先, 硫系玻璃组分受限于商用的玻璃材料, 采用自行研制的组分作为膜层材料研究很少, 这就限制了硫系波导组分可调控的优势。值得注意的是, 现在研究的硫系波导膜层材料中绝大多数含有有毒成分 As, 为后期的加工和使用埋下了安全隐患。其次, 尽管有一些关于硫系玻璃波导结构的设计报道, 但是对于如何在大截面单模传输结构基础上尽可能提高波导非线性效应还缺少系统的研究; 最重要的是, 在硫系波导的制备工艺上, 由于镀膜与刻蚀技术不成熟, 造成的损耗极大地阻碍了硫系玻璃薄膜光波导的发展, 其中包括镀膜过程中产生的膜层表面粗糙和膜层材料不均匀以及刻蚀波导过程中产生的侧壁粗糙。由此可见, 对于硫系玻璃薄膜波导还需要进一步的深入探索和研究, 包括优化分析并选取合适的膜层材料和衬底材料, 优化设计波导的结构, 以及制备超高光克尔效应的色散位移波导以拓展硫系光波导在非线性光学方面的应用。另外还要研究硫系玻璃薄膜波导的刻蚀工艺, 改进刻蚀参数, 从制备过程上降低波导的损耗以及解决热模压法印刻硫系波导过程中产生的膜层部分分解、析晶以及脱膜时侧壁破损等问题。最终随着在理论研究、制备工艺、性能优化和器件耦合等方面的不断进步与完善, 硫系玻璃薄膜波导必将在光通信领域占有一席之地。

## 参 考 文 献

- Jiang Zhonghong, Liu Yuehui, Dai Shixun. New Optical Functional Glass[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008. 245~246  
姜中宏, 刘粤惠, 戴世勋. 新型光功能玻璃[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008. 245~246
- Chen Fang, Liu Ruipeng, Qi Zhimei. Design, fabrication and characterization of LiNbO<sub>3</sub>-based integrated optical waveguide Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0513001

- 陈方, 刘瑞鹏, 祁志美. 铋酸锂基集成光波导马赫-曾德尔干涉仪的设计、制备及其特性的初步测试[J]. 光学学报, 2011, **31**(5): 0513001
- 3 Gao Yuan, Zhang Xiaoxia, Liao Jinkun. Analysis of single-mode condition for organic polymer asymmetric ridge waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0813001
- 高原, 张晓霞, 廖进昆. 有机聚合物非对称脊波导单模条件分析[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0813001
- 4 Shen Liangbiao, Xu Qingbo, Jian Mingming *et al.*. Development of planar waveguides for optical sensing[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(5): 24~30
- 沈亮标, 徐清波, 剪明明等. 平面波导光传感器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2009, **46**(5): 24~30
- 5 Song Muping, Zou Lianggang. Chromatic dispersion monitoring based on four-wave mixing in silicon optical waveguides[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 181~185
- 宋牟平, 邹良港. 基于硅光波导四波混频的色散监测技术[J]. 中国激光, 2010, **37**(S1): 181~185
- 6 A. Zakery, S. R. Elliott. Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 2003, **330**(1-3): 1~12
- 7 Zou Lin'er, Chen Baoxue, Chen Lin *et al.*. Study on  $As_2S_8$  glass stripe waveguide fabrication using illumination[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1043~1047
- 邹林儿, 陈抱雪, 陈林等.  $As_2S_8$  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
- 8 F. Smektala, L. Brilland, T. Chartier *et al.*. Recent advances in the development of holey optical fibers based on sulfide glasses[C]. *SPIE*, 2006, **6128**: 61280M
- 9 Fan Xinye, Xu Tiefeng, Shen Xiang *et al.*. Third order nonlinear optical properties of  $GeS_2-Ga_2S_3-Sb_2S_3-AgCl$  glass[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(2): 210~213
- 范鑫烨, 徐铁峰, 沈祥等.  $GeS_2-Ga_2S_3-Sb_2S_3-AgCl$  玻璃的三阶非线性光学特性[J]. 光子学报, 2010, **39**(2): 210~213
- 10 Liu Qiming, He Xuan, Gan Fuxi *et al.*. Ultrafast optical Kerr effect in amorphous chalcogenide films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(2): 1002~1005
- 刘启明, 何漩, 干福熹等. 硫系非晶半导体薄膜中的超快光 Kerr 效应[J]. 物理学报, 2009, **58**(2): 1002~1005
- 11 R. E. Slusher, G. Lenz, J. Hodelin *et al.*. Large Raman gain and nonlinear phase shifts in high-purity  $As_2Se_3$  chalcogenide fibers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(6): 1146~1155
- 12 M. Cathelinaud, V. Nazabal, F. Charpentier *et al.*. Properties and limitations of chalcogenide films[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(s1): 127~129
- 13 X. Gai, T. Han, A. Prasad *et al.*. Progress in optical waveguides fabricated from chalcogenide glasses[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(25): 26635~26646
- 14 A. B. Seddon. Chalcogenide glasses: a review of their preparation, properties and applications[J]. *J. Non-Cryst. Solids*, 1995, **184**(1): 44~50
- 15 Cao Ying, Nie Qiuhua, Xu Tiefeng *et al.*. Optical properties and structure of  $Ge_{28}Sb_6S_{(66-x)}Se_x$  glasses[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1153~1157
- 曹莹, 聂秋华, 徐铁峰等.  $Ge_{28}Sb_6S_{(66-x)}Se_x$  玻璃系统光学特性与结构[J]. 光子学报, 2010, **39**(7): 1153~1157
- 16 M. D. Pelusi, V. G. Ta'eed, L. Fu *et al.*. Applications of highly-nonlinear chalcogenide glass devices tailored for high-speed all-optical signal processing[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2008, **14**(3): 529~539
- 17 J. J. Hu, C. R. Menyuk, L. B. Shaw *et al.*. Maximizing the bandwidth of supercontinuum generation in  $As_2Se_3$  chalcogenide fibers[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 6722~6739
- 18 E. M. Vogel, W. J. Weber, D. M. Krol. Nonlinear optical phenomena in glass[J]. *Physics and Chemistry of Glasses*, 1991, **32**(6): 231~254
- 19 Y. Ruan, W. Li, R. Jarvis *et al.*. Fabrication and characterization of low loss rib chalcogenide waveguides made by dry etching[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21): 5140~5145
- 20 G. Lenz, J. Zimmermann, T. Katsufuji *et al.*. Large Kerr effect in bulk Se-based chalcogenide glasses[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(4): 254~256
- 21 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics*[M]. San Diego: Academic Press, 2001
- 22 M. Dinu, F. Quochi, H. Garcia. Third-order nonlinearities in silicon at telecom wavelengths[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(18): 2954~2956
- 23 N. Sugimoto, H. Kanbara, S. Fujiwara *et al.*. Third-order optical nonlinearities and their ultrafast response in  $Bi_2O_3-B_2O_3-SiO_2$  glasses[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(11): 1904~1908
- 24 K. Petkov, P. J. S. Ewen. Photoinduced changes in the linear and non-linear optical properties of chalcogenide glasses[J].

- J. Non-Cryst. Solids*, 1999, **249**(2-3): 150~159
- 25 K. Miura, H. Inouye, T. Mitsuyu. Photowritten optical waveguides in various glasses with ultrashort pulse laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(23): 3329~3331
- 26 A. M. Chardon, D. P. Shepherd, D. W. Hewak. Laser performance and spectroscopic analysis of optically written channel waveguides in neodymium-doped gallium lanthanum sulphide glass[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2002, **8**(6): 1381~1388
- 27 O. M. Efimov, L. B. Glebov, K. A. Richardson *et al.*. Waveguide writing in chalcogenide glasses by a train of femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Mater.*, 2001, **17**(3): 379~386
- 28 T. V. Galstyan, J. F. Viens, A. Villeneuve *et al.*. Photoinduced self-developing relief gratings in thin film chalcogenide  $As_2S_3$  glasses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1343~1347
- 29 N. J. Baker, H. W. Lee, I. C. M. Littler *et al.*. Sampled Bragg gratings in chalcogenide ( $As_2S_3$ ) rib-waveguides[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(20): 9451~9459
- 30 D. Y. Choi, S. Madden, A. Rode *et al.*. Integrated shadow mask for sampled Bragg gratings in chalcogenide ( $As_2S_3$ ) planar waveguides[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7708~7712
- 31 R. M. Klein. Chalcogenide glasses as passive thin film structures for integrated optics[J]. *J. Electron. Mater.*, 1974, **3**(1): 79~99
- 32 A. F. Bessonov, A. I. Gudzenko, L. N. Deryugin *et al.*. Thin film chalcogenide glass waveguide for medium infrared range[J]. *Sov. J. Quantum Electron.*, 1976, **6**(10): 1248~1249
- 33 J. F. Viens, C. Meneghini, A. Villeneuve *et al.*. Fabrication and characterization of integrated optical waveguides in sulfide chalcogenide glasses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1184~1191
- 34 Tang Tiantong, Wang Zhaohong. Integrated Optics[M]. Beijing: Science Press, 2005. 189~192  
唐天同,王兆宏. 集成光学[M]. 北京:科学出版社, 2005. 189~192
- 35 J. J. Hu, V. Tarasov, N. Carlie *et al.*. Exploration of waveguide fabrication from thermally evaporated Ge-Sb-S glass films[J]. *Opt. Mater.*, 2008, **30**(10): 1560~1566
- 36 D. Y. Choi, S. Madden, D. Bulla *et al.*. Thermal annealing of arsenic tri-sulphide thin film and its influence on device performance[J]. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(5): 053106
- 37 D. Y. Choi, A. Rode, R. P. Wang *et al.*. Nanoscale phase separation in ultrafast pulsed laser deposited arsenic trisulfide ( $As_2S_3$ ) films and its effect on plasma etching[J]. *J. Appl. Phys.*, 2007, **102**(8): 083532
- 38 M. Solmaz, H. Park, C. K. Madsen *et al.*. Patterning chalcogenide glass by direct resist-free thermal nanoimprint[J]. *Vacuum Sci. Technol. B*, 2008, **26**(2): 606~610
- 39 Z. G. Lian, W. Pan, D. Furniss *et al.*. Embossing of chalcogenide glasses; monomode rib optical waveguides in evaporated thin films[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(8): 1234~1236
- 40 T. Han, S. Madden, D. Bulla *et al.*. Low loss chalcogenide glass waveguides by thermal nano-imprint lithography[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(18): 19286~19291
- 41 Liu Qiming, Gan Fuxi. Photoinduced changes of structure and properties in amorphous  $GeSe_2$  films[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 634~640  
刘启明, 干福熹.  $GeSe_2$  非晶半导体薄膜中光致结构及性能变化[J]. 光学学报, 2002, **22**(5): 634~640
- 42 Aihuan Dun, Jingsong Wei, Fuxi Gan. Laser direct writing pattern structures on  $AgInSbTe$  phase change thin film[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2011, **9**(8): 082101
- 43 A. Salimnia, A. Villeneuve, T. V. Galstyan *et al.*. First- and second-order Bragg gratings in single-mode planar waveguides of chalcogenide glasses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(5): 837~842
- 44 R. Vallee, S. Frederick, K. Asatryan *et al.*. Real-time observation of Bragg grating formation in  $As_2S_3$  chalcogenide ridge waveguides [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **230**(4-6): 301~307
- 45 V. G. Ta'eed, M. Shokooh-Saremi, L. Fu *et al.*. Integrated all optical pulse regenerator in chalcogenide waveguides[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(21): 2900~2902
- 46 V. G. Ta'eed, M. Shokooh-Saremi, L. Fu *et al.*. Self-phase modulation-based integrated optical regeneration in chalcogenide waveguides[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2006, **12**(3): 360~369
- 47 S. J. Madden, D. Y. Choi, D. A. Bulla *et al.*. Long, low loss etched  $As_2S_3$  chalcogenide waveguides for all-optical signal regeneration[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(22): 14414~14421
- 48 V. G. Ta'eed, M. R. E. Lamont, D. J. Moss *et al.*. All optical wavelength conversion via cross phase modulation in chalcogenide glass rib waveguides[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(23): 11242~11247

- 49 M. R. E. Lamont, V. G. Ta'eed, M. A. F. Roelens *et al.*. Error-free wavelength conversion via cross-phase modulation in 5 cm of As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide glass rib waveguide[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(17): 945~947
- 50 V. G. Ta'eed, M. D. Pelusi, B. J. Eggleton *et al.*. Broadband wavelength conversion at 40 Gb/s using long serpentine As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> planar waveguides[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15047~15052
- 51 K. Tanaka, N. Toyosawa, H. Hisakuni. Photoinduced Bragg gratings in As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(19): 1976~1978
- 52 F. Luan, M. D. Pelusi, M. R. E. Lamont *et al.*. Dispersion engineered As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> planar waveguides for broadband four-wave mixing based wavelength conversion of 40 Gb/s signals[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(5): 3514~3520
- 53 M. Galili, J. Xu, H. C. H. Mulvad *et al.*. Breakthrough switching speed with an all-optical chalcogenide glass chip: 640 Gb/s demultiplexing[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(4): 2182~2187
- 54 T. D. Vo, H. Hu, M. Galili *et al.*. Photonic chip-based simultaneous multi-impairment monitoring for phase-modulated optical signals[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2010, **28**(21): 3176~3183
- 55 M. R. E. Lamont, B. Luther-Davies, D. Y. Choi *et al.*. Supercontinuum generation in dispersion engineered highly nonlinear ( $\gamma=10$  W/m) As<sub>2</sub>S<sub>3</sub> chalcogenide planar waveguide[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(19): 14938~14944