

硫系掺铒光波导在光通信的研究进展

李双¹ 齐磊¹ 王国祥² 李军¹ 沈祥² 徐培鹏² 戴世勋² 聂秋华¹ 徐铁锋¹

¹宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

²宁波高等技术研究院, 浙江 宁波 315211

摘要 概述了硫系掺铒光波导(EDWA)优良的材料特性及其巨大的发展前景,简述了硫系掺铒光波导结构设计及增益特性,同时对目前硫系掺铒光波导研究中存在的问题作出了总结,并对今后的研究工作也做出了进一步的展望。

关键词 光通信; 硫系掺铒光波导; 集成光器件; 刻蚀; 掺铒硫系薄膜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.030004

Process in Erbium-Doped Chalcogenide Waveguide of Optical Communications

Li Shuang¹ Qi Lei¹ Wang Guoxiang² Li Jun¹ Shen Xiang² Xu Peipeng²

Dai Shixun² Nie Qiuhua¹ Xu Tiefeng¹

¹College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

²Higher Technical Institute of Ningbo, Ningbo, Zhejiang 315211, China

Abstract An overview of the erbium-doped chalcogenide glass for its material properties and developmental prospects in waveguide is provided, Meanwhile, the description of the structure design and gain characteristics of erbium-doped chalcogenide waveguide is presented. A summary of the problems existing in the current study is made, and a prospect of the further research in erbium-doped chalcogenide waveguide is proposed.

Key words optical communications; erbium-doped chalcogenide waveguide; integrated optical devices; teching; erbium-doped chalcogenide films

OCIS codes 230.2755; 230.3120; 200.4740; 230.2285; 230.7370

1 引言

近年来光电信息转换能力滞后和电子线路传输速率的限制^[1],已成为制约信息传输的瓶颈。解决此瓶颈的关键是开发新型的超快非线性集成光子器件。但是非线性信息处理过程仍存在着转换效率低、产生的光信号能量弱等问题,因此在非线性光信号处理过程中如何实现光信号的在线放大是研究的热点。

掺铒光波导放大器(EDWA)是继半导体激光放大器(SOA)和掺铒光纤放大器(EDFA)之后的又一种新型集成光路放大器。较其他两种放大器相比,掺铒光波导放大器(EDWA)可以在同一衬底上提供有源和无源的集成光路。但为了同时实现无源非线性信号处理和有源信号的在线放大,EDWA的基质往往选取材料非线性性能优异和可溶解稀土离子的玻璃材料。

近年来硫系玻璃材料作为非线性基质平台在全光信息处理领域的应用得到了极大关注,已成功应用于超快Tbit/s速率的全光信号再生^[2]、光时分复用(OTDM)信号的全光解复用^[3]、自动色散监测和补偿^[4]、波形分析和性能监测^[5]等领域,但硫系玻璃在掺铒光波导放大器应用开发却进展缓慢。本文从硫系玻璃优良的材料特性出发,简述了硫系掺铒光波导结构设计及增益特性,同时对目前硫系掺铒光波导研究中存在的问题作

收稿日期: 2014-09-12; 收到修改稿日期: 2014-09-23; 网络出版日期: 2015-02-02

作者简介: 李双(1989—),男,硕士研究生,主要从事掺Er³⁺光波导的制备及测试等方面的研究。

E-mail: nbuhbxls@163.com

导师简介: 沈祥(1980—),男,副研究员,主要从事非晶无机玻璃材料及光器件等方面的研究。

E-mail: shenxiang@nbu.edu.cn(通信联系人)

出了总结,并对今后开发基于硫系的掺铒光波导放大器做出了进一步的展望。

2 硫系掺铒光波导的材料特性

硫系玻璃高的折射率($n \approx 2.0 \sim 3.5$)使得其制作的光波导对光具有较好的限域作用,有利于提高光器件的集成度,硫系玻璃具有极高的非线性系数 n_2 ($n_2 \approx 2^{-20} \times 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$, 是石英玻璃材料的非线性系数的 100~1000 倍)^[6],使得硫系光波导在非线性和光器件应用中得到极大的关注。硫系玻璃材料还具有很宽的透射光谱,其透射光谱如图 1 所示^[2],它的透过范围覆盖了近红外通信波段(1.55 μm 附近)和中红外表征生物特征的指纹吸收区(2.5~25 μm),其宽的透过特性确保了抽运光和红外波段信号光的低光吸收损耗,因而掺杂的稀土离子能较大限度地被激发至较高能级,从而增加了其亚稳态能级的粒子数。硫系玻璃材料的声子能量较小(200~450 cm^{-1}),因而降低了多声子弛豫几率,并大幅度地提高了自发辐射跃迁的量子效率。此外,硫系元素之间还可以以化学计量或非化学计量配比而形成玻璃,其光学性能可以随较宽的组分调节范围而连续变化。这些显著地优势使硫系掺铒光波导在近红外光通信和中红外区域具有应用前景,使其在未来的光信息处理器件、小型波导激光器和全光通信器件等领域具有广阔的应用空间。

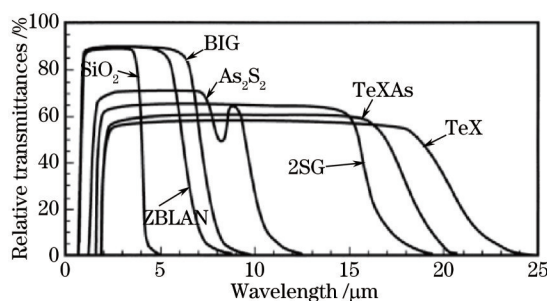


图 1 几种材料的透过光谱

Fig.1 Transmission spectrum of several materials

但是硫系基质材料的本征吸收系数较高,导致光传输损耗较大。例如文献报道 As_2S_3 玻璃光纤损耗最低区域在 3~5 μm 区域,该区域对应的光纤损耗就达到了 12~14 dB/km ^[7],远大于普通石英光纤在通信波段 0.2 dB/km 的传输损耗。与此同时,硫系玻璃中掺铒浓度(铒离子数分数 1%)^[8]比常见的氟化物玻璃(铒离子数分数为 1.5%以上)^[9]的掺铒浓度和石英玻璃材料(约铒离子数分数 1.2%)^[10]的掺铒浓度低。高吸收损耗和低掺杂浓度使得硫系掺铒光波导增益输出困难。通过选择合适的硫系玻璃组分以提高基质材料的掺杂浓度,是近年来解决该问题最直接有效的办法。

1993年,Gu等^[8]制备了掺铒离子数分数在 0.01%~2.0%范围内的 As_2S_3 块状玻璃材料,测得了不同温度下相应波长的荧光光谱,并指出其最佳掺杂离子数分数可达到 1%。铒离子在 Ge-Ga-La-S ^[11]、 Ge-Ga-As-S ^[12-14]、 Ge-As-S/Se ^[15]等玻璃中的荧光特性也得到了研究,但是掺杂浓度未见明显突破。2001年,Tverjanovich等^[16]研究了不同组分的 Ge-Ga-S 玻璃机制掺铒的荧光效应,指出不同组分玻璃的合适掺铒离子数分数均在 1% 以上,且其掺杂浓度随着 Ga_2S_3 的含量的增加而有所增加。2003年,Ivanova等^[17]研究了掺铒离子数分数为 1.8% Ge-Ga-S 、 Ge-Ga-S-Se 玻璃材料,并研究了其光学带隙的变化。而此后关于 Ge-Ga-S/Se 基质材料高的稀土掺杂性能引起了研究者的关注。2006年,Munzar等^[18]又进一步验证了 Ga 元素的存在对溶解及激活基质中 Er^{3+} 的重要性。同年,Koughia等^[19]探究了掺铒质量分数为 1.8% Ge-Ga-S 玻璃的荧光光谱,通过运用 Judd-Ofelt 理论计算基质中铒离子 $^4\text{I}_{13/2}$ - $^4\text{I}_{15/2}$ 的辐射寿命 $\tau_{10} \approx 2.6 \text{ ms}$,并指出基质中存在着轻微的铒离子淬灭现象。Kasap等^[20]同样在 Ge-Ga-S 玻璃中掺入了质量分数为 1.8% 的铒元素,并测得荧光寿命约为 2.6 ms 。2007年,Ivanova等^[21-23]分析了 Ge-Ga-S 基质中铒离子掺杂离子数分数在 0.17%~1.39% 之间的光谱特性,并测得其不同掺杂浓度中最大荧光寿命约为 3.25 ms ,总结出铒离子离子数分数在该玻璃中发生浓度淬灭的范围为 1.05%~1.39%。同时,在铒掺杂的 Ge-Ga-S 系统中,研究人员用 Se 取代 S 之后,也进行了相应研究。2013年,Koughia等^[24]研究了掺杂质量分数为 1.8% 的 Ge-Ga-S 玻璃体系测试了不同温度下的能级间辐射及吸收强度,探究了光增益系数与抽运波长的关系。2014年,Yan等^[25]制备了掺杂摩尔分数为 0.5%~0.75% 的 Ge-Ga-Se 玻璃样品并且获得了相应的薄膜和光波导,指出 0.7% 是理想的掺杂摩尔分数且 Ga 的含

量增加有利于铒离子的溶解度,其Ga/Er的合适比值为10。

3 硫系掺铒光波导制备工艺

硫系掺铒光波导放大器优异的增益性能是其在全光网络中对光信号进行放大处理的根本要求。但是由于硫系掺铒光波导放大器的制备工艺的好坏直接影响到其光的传输损耗,进而会影响到硫系掺铒光波导的整体增益性能。故而近年来研究人员不断探索硫系掺铒光波导制备的新工艺、新方法。硫系掺铒光波导的制作工艺与一般的硫系光波导基本一致,主要步骤为沉积薄膜和刻蚀(或压印)所需的波导结构。

硫系材料的沉积镀膜工艺主要有磁控溅射^[26](RF,如图2)、热蒸发^[27](TE,如图3)、激光脉冲沉积^[28-29](PLD,如图4)和电子束蒸发沉积^[30-31]等。用磁控溅射技术制备的薄膜纯度高、致密性好、成膜均匀性好,而其缺点在于相应口径的多元素复合靶材难制作且利用率较低;用热蒸发制备硫系薄膜的工艺相对简单,但缺点主要为:在液相向气相转变时可能出现多种不同于固态玻璃组分的结构,而蒸汽压高的结构体就会优先沉积,从而也导致薄膜与蒸发材料的组分差异较大^[32],特别在用热蒸发镀掺铒硫系薄膜时发现,基片上的铒离子浓度几乎可以忽略,说明铒离子与硫族化合物所形成化合物的蒸汽压极低。用激光脉冲沉积工艺制备掺铒硫系薄膜的最大优点就是具有良好的成分保持性,对靶材的种类没有限制,沉积速率高,适合制备成分复杂和高熔点的薄膜,但是会存在微米-亚微米的颗粒污染物和膜厚不均匀等问题^[33]。通过电子束蒸发制备硫系薄膜可聚焦电子束直接加热使蒸发材料汽化并在衬底上凝结成薄膜,其克服电阻加热蒸发的许多缺点,但其真空要求高、装置复杂、设备成本高。另外铒离子也可以通过离子注入方式在已制备的硫系薄膜中实现掺杂,如Ivanova等^[34]通过 Er^{3+} 离子注入制备了掺杂摩尔分数为0.1%、0.2%、0.4%薄膜,并在1540 nm波段周围得到了较强的光致发光宽带谱线,并指出退火可以减弱离子注入对膜层的损伤。

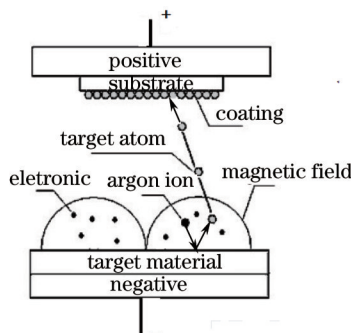


图2 磁控溅射(RF)沉积薄膜

Fig.2 Deposition thin films by magnetron sputtering

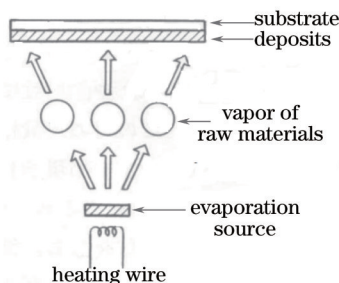


图3 热蒸发(TE)沉积薄膜

Fig.3 Deposition thin films by thermal evaporation

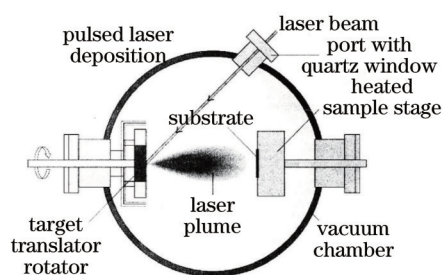


图4 激光脉冲沉积薄膜

Fig.4 Deposition thin films by pulsed laser

硫系材料光波导一般的制作方法有光刻技术^[35](如图5所示)、热压印技术^[36-38](如图6所示^[38])、剥离技术(如图7所示)及激光直写技术^[39]等。光刻技术是利用光致抗蚀剂保护其下层部分硫系薄膜,然后再用干刻或湿刻法将其余部分的硫系薄膜刻蚀掉而获得相应结构的硫系掺铒光波导。其中湿法刻蚀^[40](如图8所示)硫系薄膜的优点是制作过程简单、无需复杂的设备。但是它作为一种各向同性刻蚀方法,其侧壁往往会受到侵蚀而后直接增大光波导的传输损耗,其传输损耗高达2 dB/cm以上^[41];而干法刻蚀^[42]硫系薄膜则是一种各向异性的方法,故不会出现侧腐蚀,刻蚀表面也较为光滑,Madden等^[43]报道了利用 CF_4 和 O_2 的混合气体刻蚀

了 22.4 cm 长的掺杂铟离子的 As_2S_3 平板脊形光波导, 并测得其在 1550 nm 波段的传输损耗低至 0.05 dB/cm。目前该刻蚀工艺已成为硫系波导制作的主流工艺。

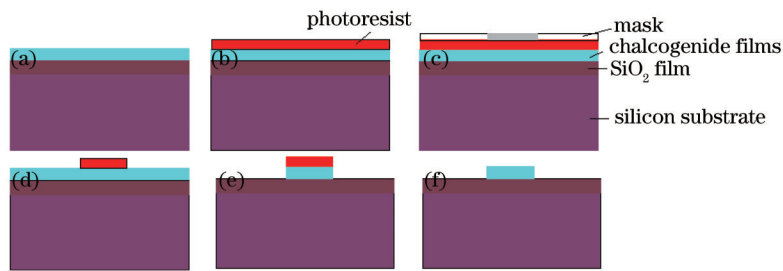


图5 光刻法制作光波导过程。(a) 在有薄层氧化硅的硅片上镀上一层硫系薄膜;(b) 涂上正性光刻胶;(c) 通过掩模板进行曝光处理;(d) 曝光后得到的光刻胶结构;(e) 通过刻蚀得到的薄膜结构;(f) 去除光刻胶, 获得理想的波导结构

Fig.5 Photolithography process of making optical waveguides. (a) Coated with a layer of chalcogenide film on a silicon wafer with a thin layer of silicon oxide; (b) coated with a layer of positive photoresist; (c) exposure processed through the mask; (d) photoresist structure after exposure; (e) film structure after etched; (f) removed the photoresist to obtain the desired waveguide structure

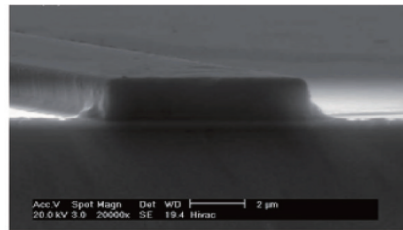


图6 热压印制备的 As_2S_3 波导

Fig.6 As_2S_3 waveguide prepared by hot embossing

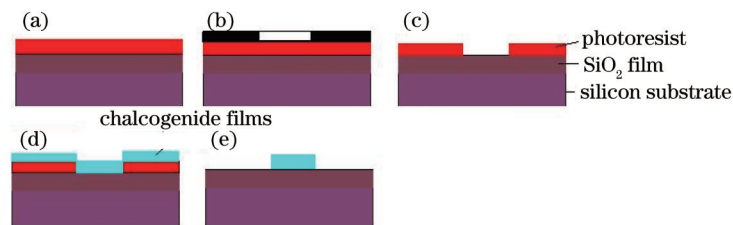


图7 剥离法制作光波导过程。(a) 在有薄层氧化硅的硅片上镀上一层正性光刻胶;(b) 通过掩模板进行曝光处理;(c) 曝光后得到的光刻胶结构;(d) 镀上一层硫系薄膜;(e) 剥离光刻胶, 获得理想的波导结构

Fig.7 Stripping process of making optical waveguides. (a) Coated with a layer of positive photoresist on a silicon wafer with a thin layer of silicon oxide; (b) exposure processed through the mask; (c) photoresist structure after exposure; (d) coated with a layer of chalcogenide film; (e) stripped the photoresist to obtain the desired waveguide structure

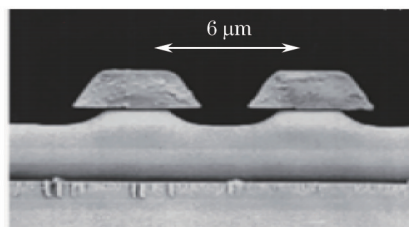


图8 湿法刻蚀的光波导

Fig.8 Waveguide prepared by wet etching

在硫系掺铟光波导的制备过程中, 之前研究发现在刻蚀过程中铟化物很难挥发^[25,44], 从而导致掺铟硫系薄膜很难被刻蚀完全。因而采用上述一般的刻蚀技术可能会导致刻蚀出的硫系掺铟光波导的表面十分粗糙, 从而增大光的传输损耗。如果采用剥离技术则可以很好地避免上述问题。剥离技术指首先在基底上涂一层光刻胶, 通过掩模板进行曝光之后再镀上一层掺铟硫系薄膜材料, 然后显影得到理想的波导结构。

但上述光刻技术获得硫系光波导需要的设备精密复杂、价格昂贵, 并且刻蚀周期较长, 也不利于大规模

工业化生产,因此研究人员尝试利用硫系材料具有热塑性的特点采用更为简单、更加高效的热压印技术^[32]。热压印指利用在特定的温度和气压下,将定制好的模具紧密贴在硫系材料薄膜表面,在真空或惰性气体的环境下通过控制硫系薄膜的温度和模具对硫系薄膜的压强,进行压刻成既定结构的硫系波导片。Han等^[45]已通过热蒸发及纳米热压印技术制备出2~4 μm宽,1 μm脊高的As₂₄S₃₈Se₃₈光波导,并测得通信波段TE模和TM模的损耗分别为0.27 dB/cm,0.26 dB/cm。但热压印做硫系掺铒光波导的研究工作目前还未报道,并且热压印技术受限于模具尺寸大小,较高的温度也会导致部分材料分解以及发生析晶现象,但是随该制备工艺技术逐步优化与成熟,加上热压印制备技术的高效率和低成本的突出优势,其将会成为主导未来光波导制备的一项重要工艺^[38]。

除了以上介绍的方法,研究者也尝试利用硫系材料的光敏特性,采用激光直写技术制作硫系波导。目前也有利用这种技术成功制备硫系玻璃光波导的文献报道^[46]。Pleasant^[47]研究小组首次通过激光直写硫系相变材料形成表面浮雕结构,为复杂灰度图案的制备提供了新的解决办法,该方法具有新颖简单和成本低廉的优点。

4 硫系掺铒光波导的结构设计及增益特性

2000年,Fick等^[48]则采用制备每平方厘米波导中掺铒离子数约为10¹⁴的宽0.4 μm、刻蚀深度0.05 μm的As₂S₃的波导结构,测试到了其掺铒薄膜在1.54 μm波段的荧光现象,但未见其掺铒波导的光增益报道。之后关于硫系掺铒光波导放大器这一领域才有了些许发展。

Vu等^[44,49]在制作Er/Te比例为1%的掺杂浓度,长5 cm、宽2 μm的碲基掺铒波导时,发现刻蚀产生的铟氢化物由于低挥发性,会再次沉积在波导表面而引起粗糙度增加,严重影响了光的传输性能。因此铟离子掺杂的硫系薄膜常用剥离法或激光直写的制备工艺技术。Frantz等^[50]报道了掺Er³⁺硫系玻璃波导放大器(EDWA),采用剥离法在石英基片上制备出尺寸为11 μm×2 μm的Ga-La-S光波导通道,实验结果测得在1.55 μm波长下的增益为2.8 dB/cm。2012年,Sabapathy等^[51]利用超快激光直写技术制作了4 mm长的Ge₂₅Ga₅S_{69.5}:Er_{0.5}光波导,在1.541 μm处获得了2.5 dB/cm的相对增益。

除此之外,近年来硫系波导结构中出现了不同的玻璃材料,通过折射率匹配构成杂化的光波导器件。2014年,Yan等^[25]设计了Er:Ge₂₅Ga₁₀Se₆₅/As₂S₃结构的杂化光波导,刻蚀时只刻蚀表面的As₂S₃薄膜部分,余下的As₂S₃条形波导与底层的Er:Ge₂₅Ga₁₀Se₆₅薄膜组合成了2 μm宽的脊型光波导,该波导结构避免了前面所述铟离子难刻蚀的问题,截断法测试了光波导的传输损耗为2 dB/cm。同时为了解决铟离子在硫系玻璃中掺杂浓度低的问题,Vu等^[52]制备了Er:TeO₂/As₂S₃的杂化光波导,其中掺杂比例Er/Te高达2.7%,刻蚀时只刻蚀As₂S₃薄膜,最后在5 cm长的掺铒杂化光波导获得了14 dB内部增益峰值。

5 结 论

全光器件的进一步推广应用,在很大程度上取决于材料的选择与开发。硫系玻璃的宽透过波段、高的三阶非线性系数、超快的响应速度的特性,以及稀土可溶解性和组分连续可调等属性,使得硫系玻璃材料的光波导具有很好的发展前景,同时吸引着越来越多的科技工作者投身于硫系玻璃光波导的研究开发工作中。但是硫系掺铒光波导还处于研究的初期,还存在着很多基础或工艺问题亟待解决^[53-54],包括探索如何制备高铟离子掺杂浓度的硫系玻璃材料,研究硫系薄膜中的缺陷对其掺杂浓度的影响,优化制备低损耗的硫系玻璃薄膜和光波导器件的工艺参数^[55]。通过低损耗的硫系掺铒光波导的制备,可以为其他稀土掺杂硫系光波导器件提供借鉴思路,并拓宽硫系玻璃在有源光波导器件领域的应用^[56],最终使得硫系光波导器件在全光通信、中红外激光及中远红外传感的应用领域占有重要的地位。

参 考 文 献

- 1 Benjamin J, Eggleton, Trung D Vo, *et al.*. Photonic chip based ultrafast optical processing based on high nonlinearity dispersion engineered chalcogenide waveguides[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 6(1): 97-14.
- 2 Vahid G Ta'eed, Mehrdad Shokooh-saremi, Libin Fu, *et al.*. Integrated all-optical pulse regenerator in chalcogenide waveguides[J]. *Opt Lett*, 2005, 30(21): 2900-2902.

- 3 T D Vo, H Hu, M Galili, *et al.*. Photonic chip based transmitter optimization and receiver demultiplexing of a 1.28 Tbit/s OTDM signal[J]. *Opt Express*, 2010, 18(16): 17252–17261.
- 4 J Van Erps, J Schröder, Trung D Vo, *et al.*. Automatic dispersion compensation for 1.28 Tb/s OTDM signal transmission using photonic-chip-based dispersion monitoring[J]. *Opt Express*, 2010, 18(24): 25415–25421.
- 5 Trung D Vo, J Schröder, Bill Corcoran. Photonic-chip-based ultrafast waveform analysis and optical performance monitoring[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2012, 18(2): 834–846.
- 6 F Smektala, C Quemard, L Leneindre, *et al.*. Chalcogenide glasses with large non-linear refractive indices[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1998, 239(1–3): 139–142.
- 7 G E Snopatin, V S Shiryaev, V G Plotnichenko, *et al.*. High-purity chalcogenide glasses for fiber optics[J]. *Inorganic Materials*, 2009, 45(13): 1439–1460.
- 8 S Q Gu, Q Xu, E E Reuter, *et al.*. Photoluminescence and excitation spectroscopy in Er: As₂S₃ glass[J]. *Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting*, 1993. 206–207.
- 9 L Wetenkamp, G F West, H Többen. Optical properties of rare earth-doped ZBLAN glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1992, 140: 35–40.
- 10 Shiling Li, Gang Fu, Yongkai Ye. 1.54 μm photoluminescence emission from Er-implanted SiO₂ crystal and SiO₂ glass [J]. *Phys Res B*, 2013, 307: 434–437.
- 11 Kohei Kadono, Tetsuo Yazawa, Shibin Jiang, *et al.*. Rate equation analysis and energy transfer of Er³⁺-doped Ga₂S₃-GeSe₂-La₂S₃ glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 331(1–3): 79–90.
- 12 D A Turnbull, B G Aitken, S G Bishop. Broad-band excitation mechanism for photoluminescence in Er-doped Ge₂₅Ga_{1.7}As_{8.3}S₆₅ glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1999, 244(2–3): 260–266.
- 13 Yong Gyu Choi, Kyong Hon Kim, Byoung Joo Lee, *et al.*. Emission properties of the Er³⁺: I_{11/2}–⁴I_{13/2} transition in Er³⁺- and Er³⁺/Tm³⁺-doped Ge-Ga-As-S glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2000, 278(1–3): 137–144.
- 14 Se Ho Park, Dong Chin Lee, Jong Heo, *et al.*. Pr³⁺/Er³⁺ codoped Ge-As-Ga-S glasses as dual-wavelength fiber-optic amplifiers for 1.31 and 1.55 μm windows[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, 83(5): 1284–1286.
- 15 D T Tonchev, C J Haugen, R G DeCorby, *et al.*. Thermal and photoluminescence properties of Er³⁺-doped (GaSe)_x(As₂Se₃)_{1-x} glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 326–327: 364–368.
- 16 A Tverjanovich, Ya G Grigoriev, S V Degtyarev, *et al.*. Up-conversion fluorescence in Er-doped chalcogenide glasses based on GeS₂-Ga₂S₃ system[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2001, 286(1–2): 89–92.
- 17 T Yu Ivanova, A A Man shina, A V Kurochkin, *et al.*. Non-radiative energy transfer from Er³⁺ ions to the electronic states of the chalcogenide glass matrix[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2003, 326–327: 320–324.
- 18 M Munzar, C Koughia, D Tonchev, *et al.*. Optical properties of Er-doped Ga_x(Ge_{0.3}Se_{0.7})_{100-x} glasses[J]. *Optical Materials*, 2006, 28(3): 225–230.
- 19 K Koughia, D Saitou, T Aoki, *et al.*. Photoluminescence lifetime spectrum in erbium doped Ge-Ga-S glasses[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, 352(23–25): 2420–2424.
- 20 S Kasap, K Koughia, G Soundararajan, *et al.*. Optical and photoluminescence properties of erbium-doped chalcogenide glasses (GeGaS:Er)[J]. *IEEE Journal*, 2008, 14(5): 1353–1360.
- 21 Z Ivanova, Z Aneva, R Ganesan, *et al.*. Low-temperature Er³⁺ emission in Ge-S-Ga glasses excited by host absorption [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353(13–15): 1418–1421.
- 22 Z Ivanova, E Cernoskova, Z Cernosek. Er-doped Ge-S-Ga glasses: Photoluminescence and thermal properties[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2007, 68(5–6): 1260–1262.
- 23 Z Ivanova, Z Aneva, K Koughia, *et al.*. On the optical absorption and photoluminescence of Er-doped Ge-S-Ga glasses [J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2007, 353(13–15): 1330–1332.
- 24 C Koughia, M G Brik, Gokulakrishnan Soundararajan, *et al.*. Optical properties of Ge₂₅Ga_{6.2}S_{65.3}:Er_{0.5} glass: Stark levels and optical gain coefficient[J]. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2013, 377: 90–94.
- 25 K Yan, K Vu, Z Yang, *et al.*. Emission properties of erbium-doped Ge-Ga-Se glasses, thin films and waveguides for laser amplifiers[J]. *Optical Materials Express*, 2014, 4(3): 464–475.
- 26 T Imai, K Maeda, M Fujita, *et al.*. Photoluminescence properties of erbium-doped amorphous gallium-germanium-selenium films fabricated by RF sputtering[J]. *Physica Status Solid (C)*, 2009, 6(S1): S106–S109.
- 27 D Bulla, R Wang, A Prasad, *et al.*. On the properties and stability of thermally evaporated Ge-As-Se thin films[J]. *Appl*

- Phy A, 2009, 96(3): 615–625.
- 28 R Jarvis, R Wang, A Rode, *et al.*. Thin film deposition of $\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$ by pulsed laser deposition and thermal evaporation: Comparison of properties[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2007, 353(8–10): 947–949.
- 29 M Frumar, B Frumarova, P Nemeč, *et al.*. Thin chalcogenide films prepared by pulsed laser deposition—new amorphous materials applicable in optoelectronics and chemical sensors[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2006, 352(6–7): 544–561.
- 30 T S Yang, C B Shiu, M S Wong. Structure and hydrophilicity of titanium oxide films prepared by electron beam evaporation[J]. Surface Science, 2004, 548(1–3): 75–82.
- 31 P Mohanty, D Kabiraj, R Mandal, *et al.*. Evidence of room temperature ferromagnetism in argon/oxygen annealed TiO_2 thin films deposited by electron beam evaporation technique[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2014, 355: 240–245.
- 32 M Krbal, T Wagner, T Kohoutek, *et al.*. The comparison of Ag– $\text{As}_{33}\text{S}_{67}$ films prepared by thermal evaporation (TE), spin-coating (SC) and a pulsed laser deposition (PLD)[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2007, 68(5–6): 953–957.
- 33 Ao Yuhong, Hu Shaoliu, Long Hua, *et al.*. Study on pulsed laser deposition technology[J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 453–459.
敖育红, 胡少六, 龙华, 等. 脉冲激光沉积薄膜技术研究新进展[J]. 激光技术, 2003, 27(5): 453–459.
- 34 Z G Ivanova, K Koughia, D Tonchev, *et al.*. Photoluminescence in Er-implanted amorphous Ge–S–Ga thin films[J]. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, 2005, 7(3): 1271–1276.
- 35 Chen Xin, Zhao Qing, Fang Liang, *et al.*. Fabrication of 100 nm mask by laser interference lithography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(3): 806–810.
陈欣, 赵青, 方亮, 等. 激光干涉光刻法制作 100 nm 掩模[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(3): 806–810.
- 36 Chen Fang, Gao Hongjun, Liu Zhongfan. Hot embossing lithography[J]. Micronanoelectronic Technology, 2004, 41(10): 1–9.
陈芳, 高宏军, 刘忠范. 热压印刻蚀技术[J]. 微纳电子技术, 2004, 41(10): 1–9.
- 37 Shen Xiang, Zong Shuangfei, Nie Qiuhua, *et al.*. A Thermal Imprinting Apparatus for Making Optical Waveguides[P]. China, Patent: 201310091748.2.
沈祥, 宗双飞, 聂秋华, 等. 一种光波导的热压印装置[P]. 中国, 申请号: 201310091748.2.
- 38 Chen Yu, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.*. Research progress of chalcogenide glass waveguide[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(11): 111301.
陈昱, 沈祥, 徐铁峰, 等. 硫系玻璃光波导研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(11): 111301.
- 39 Yan Shuhua, Dai Yifan, Lü Haibao, *et al.*. Research advances in technology of laser direct writing for binary optical elements[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2002, 23(3): 159–162.
颜树华, 戴一帆, 吕海宝, 等. 二元光学器件激光直写技术的研究进展[J]. 半导体光电, 2002, 23(3): 159–162.
- 40 D Bharrat, A Hosalli, D Van, *et al.*. Gallium nitride nanowires by maskless hot phosphoric wet etching[J]. Appl Phys Lett, 2013, 103(8): 082106.
- 41 Su L, Rowlands, C J, *et al.*. Fabrication of photonic waveguides in sulfide chalcogenide glasses by selective wet-etching[J]. Electronics Letters, 2008, 44(7): 472–474.
- 42 K R Choi, J C Woo, Y H Joo, *et al.*. Dry etching properties of TiO_2 thin films in $\text{O}_2/\text{CF}_4/\text{Ar}$ plasma[J]. Vacuum, 2013, 92: 85–89.
- 43 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.
- 44 K Vu, S Madden. Tellurium dioxide Erbium doped planar rib waveguide amplifiers with net gain and 2.8 dB/cm internal gain[J]. Opt Express, 2010, 18(18): 19192–19200.
- 45 Ting Han, Steve Madden, Douglas Bulla, *et al.*. Low loss chalcogenide glass waveguides by thermal nano-imprint lithography[J]. Opt Express, 2010, 18(18): 19286–19291.
- 46 R Osellame, G Della Valle, N Chiodo, *et al.*. Lasing in femtosecond laser written optical waveguides[J]. Appl Phys A, 2008, 93(1): 17–26.
- 47 S Pleasants. Lithography: Chalcogenide promise[J]. Nature Photonics, 2014, 8(5): 352–352.
- 48 J Fick, É J Knystautas, A Villeneuve, *et al.*. High photoluminescence in erbium-doped chalcogenide thin films[J].

- Journal of Non-Crystalline Solids, 2000, 272(2-3): 200-208.
- 49 C Tewell, S King. Observation of metastable erbium trihydride[J]. Appl Surf Sci, 2006, 235(5): 2597-2602.
- 50 J Frantz, L Shaw, J Sanghera, *et al.*. Waveguide amplifiers in sputtered films of Er³⁺-doped gallium lanthanum sulfide glass[J]. Opt Express, 2006, 14(5): 1797-1803.
- 51 T Sabapathy, A Ayiriveetil, A K Kar, *et al.*. Direct ultrafast laser written C-band waveguide amplifier in Er-doped chalcogenide glass[J]. Optical Materials Express, 2012, 2(11): 1556-1561.
- 52 K Vu, K Yan, Z Jin, *et al.*. Hybrid waveguide from As₂S₃ and Er-doped TeO₂ for lossless nonlinear optics[J]. Opt Lett, 2013, 38(11): 1766-1768.
- 53 Liu Shan, Shen Xiang, Xu Tiefeng, *et al.*. Dispersion characteristics of Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅ chalcogenide[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(5): 0513001.
- 刘珊, 沈祥, 徐铁峰, 等. Ge₂₀Sb₁₅Se₆₅硫系脊形光波导的色散特性[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0513001.
- 54 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.
- 55 Zou Liner, Chen Baoxue, Chen Lin, *et al.*. Study on As₂S₃ glass stripe waveguide fabrication using illumination[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(7): 1043-1047.
- 邹林儿, 陈抱雪, 陈林, 等. As₂S₃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.
- 56 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

栏目编辑: 王晓琰