

引用格式: LIU Ruixue, ZHANG Zheng, WU Jian, et al. Erbium-doped Ga₂O₃ Waveguide for Optical Amplification[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(8):0823003

刘瑞雪,张政,邬健,等.用于光放大的掺铒Ga₂O₃波导研究[J].光子学报,2023,52(8):0823003

用于光放大的掺铒 Ga₂O₃ 波导研究

刘瑞雪,张政,邬健,杨振,王威,魏腾秀,王荣平

(宁波大学 高等技术研究院红外材料与器件实验室,宁波 315211)

摘要:利用射频磁控溅射法制备了掺铒 Ga₂O₃ 薄膜,研究了不同氧化铒靶溅射功率和不同退火温度下薄膜的发光特性,发现在氧化铒靶溅射功率为 40 W 以及退火温度达到 600 °C 时薄膜显示出良好的光致发光强度。为了有效避免直接蚀刻掺铒薄膜层导致的表面粗糙等问题,设计了沟道型以及脊型掺铒 Ga₂O₃ 薄膜波导结构,并使用紫外光刻和等离子蚀刻技术制备相应的平面波导,使用截断法测得 4 μm 宽的掺铒 Ga₂O₃ 波导在 1 310 nm 处的光学损耗最小为 1.26 dB/cm。实验结果表明掺铒 Ga₂O₃ 波导作为片上光学放大器件具有良好的应用前景。

关键词:光学特性;掺铒波导;射频磁控溅射;Ga₂O₃;干法刻蚀

中图分类号:TB44

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235208.0823003

0 引言

近年来,基于硅光子平台构建的低损耗无源和有源传输组件,如紧凑高效的波导器件,随着集成规模越来越大,器件的性能也越来越复杂^[1],光信号在这样大规模集成的光学芯片传输中能量的损失不可避免。因此,片上光放大功能器件成为光学集成芯片中必不可少的元件^[2]。目前通信波段的片上波导放大主要采用掺铒波导放大器(Erbium-doped Waveguide Amplifier, EDWA),作为掺铒光纤放大器(Erbium-doped Optical Fiber Amplifier, EDFA)的对应物,其工作原理是在紧凑型波导结构中掺杂 Er 离子,通过泵浦光激发 Er³⁺发出 1.55 μm 波长附近的光,从而实现信号光放大的功能。

制约掺铒波导放大器性能的根本问题是 Er³⁺在大多数固体基质中的光学发射截面较小,稀土溶解度较低,所有这些都需要增加光与稀土的作用路径来实现高效的光放大能力,然而,这与光波导的紧凑尺寸相矛盾^[2]。另外,基质材料的选择需要具有较高的 Er³⁺溶解度、长的 ⁴I_{13/2} 辐射寿命、低声子能量以及高纯度等^[3]。到目前为止,已经研究了许多用于掺 Er³⁺的基质材料,其中一些氧化物材料显示出实现紧凑和高增益波导的良好性能,例如, VÁZQUEZ-CÓRDOVA S A 等通过实验和理论研究了不同长度和铒浓度的掺铒氧化铝(Al₂O₃)螺旋放大器,在波导长度分别为 12.9 cm 和 24.4 cm,浓度分别为 1.92×10²⁰ cm⁻³和 0.95×10²⁰ cm⁻³的两种样品配置下,在小信号增益状态下测得的最大内部净增益为 20 dB^[4]。SUBRAMANIAN A Z 等制备了 2.3 cm 长的铒浓度为 2.7×10²⁰ cm⁻³的掺铒 Ta₂O₅波导,在 977 nm 的泵浦功率为 20 mW 的情况下,在 1 531.5 nm 获得约 2.25 dB/cm 的片上净光增益^[5]。FRANKIS H C 等制备了 6.7 cm 长的掺铒 TeO₂涂层 Si₃N₄波导,使用以 1 470 nm 为中心且泵浦功率为 35 mW 的激光器激发,测得在 1 558 nm 处获得了 5 dB 峰值净增益^[6]。在这些材料中,掺铒 Al₂O₃波导放大器^[4,7-9]的技术与成果已经相对成熟,因此作为与 Al 同族的元素 Ga,其氧化物由于与 Al₂O₃具有相似的物理化学性质逐渐进入人们的视野。

氧化镓(Gallium oxide, Ga₂O₃)属于超宽禁带(4.5~5.0 eV)的 III 族氧化物材料,介电常数高达 10.2~14.2,具有良好的热稳定性和化学稳定性,在电力设备、光电子和传感方面已广泛应用^[10-13]。但有关 Ga₂O₃稀

基金项目:国家重点研发计划(No. 2020YFB1805900),浙江省宁波市 3315 创新团队

第一作者:刘瑞雪, xuexiang1999@126.com

通讯作者:王荣平, wangrongping@nbu.edu.cn

收稿日期:2023-02-09;录用日期:2023-04-28

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

土掺杂波导光放大的研究和报道仍较少。另外,由于 Ga_2O_3 薄膜具有较高 Er^{3+} 掺杂度^[14]、较大的折射率^[15-16]以及掺铒后较宽的发光带宽等优势,因此基于该材料来制备波导器件能够更好地实现宽带光放大功能。

本文研究了掺铒 Ga_2O_3 薄膜的制备工艺,探索了不同工艺条件下薄膜在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近的光谱特性。通过模拟设计并优化波导的结构参数将更多的能量集中在有源的波导芯层,实现光场能量在稀土有源层的最大分布,接着利用紫外光刻以及电感耦合等离子体刻蚀(Inductively Coupled Plasma, ICP)按照结构参数制备波导器件,再采用热退火处理手段对波导损伤进行拟补,最后测量了波导的传输损耗,分析了造成损耗的原因及改进的方法。

1 实验与原理

1.1 薄膜制备及其表征

实验使用 Kurt J. Lesker PVD75 磁控溅射装置进行薄膜的制备,以带有 $2\ \mu\text{m}$ 厚 SiO_2 层的硅片作为衬底,衬底温度为 $200\ ^\circ\text{C}$,氩气作为溅射环境。靶材采用纯度均为 99.99% 的氧化镓和氧化铒,并固定 Ga_2O_3 靶材射频功率为 $100\ \text{W}$,设置不同的 Er_2O_3 靶材溅射功率分别为 $20\ \text{W}$ 、 $40\ \text{W}$ 、 $60\ \text{W}$ 、 $80\ \text{W}$,一系列设置完成后开始沉积薄膜,沉积速率约为 $4\sim 6\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。为了提高薄膜的紧密性,激活更多稀土掺杂离子的活性,后期将在真空退火炉中进行长达 $10\ \text{h}$ 的热退火处理。

另外,实验还使用了扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)、Bruker D2型 X 射线衍射仪(X-ray Diffraction, XRD)对薄膜进行简单表征,并采用 FLS 980 型瞬态/稳态光谱仪测试薄膜样品在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近的荧光。

1.2 波导结构设计、制备和性能测量

首先设计波导结构并利用 Mode Solutions 光学仿真软件进行模拟,然后对带有 $2\ \mu\text{m}$ 厚 SiO_2 层的硅片进行光刻并利用 PlasmaPro100 CobraP180 型等离子刻蚀机进行刻蚀。采用 $\text{Ar}/\text{CHF}_3=40/15\ \text{sccm}$ 刻蚀气体进行波导刻蚀,经过一系列实验操作后制备出质量良好的 SiO_2 沟道型和脊型结构。最后,在制备的结构上沉积 $400\sim 500\ \text{nm}$ 左右的掺铒 Ga_2O_3 薄膜。

实验采用如图 1 所示的测试装置并选用截断法测量波导的传输损耗,测试设备由激光器、功率计、锥形透镜光纤、Thorlab 三维调节架和 CCD 等组成^[17-20]。传输损耗(dB/cm)定义为

$$L_{\text{oss}} = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中, P_{out} 是泵浦信号接通时测量的最大强度, P_{in} 是未接通状态的功率, L 是波导的长度差。测试采用 $1\ 310\ \text{nm}$ 的泵浦光, $1\ 310\ \text{nm}$ 信号光经输入光纤与波导样品耦合,再通过输出光纤输出到功率计,根据光功率计检测的输出和输入功率,即可算出端面的耦合损耗和传输损耗。

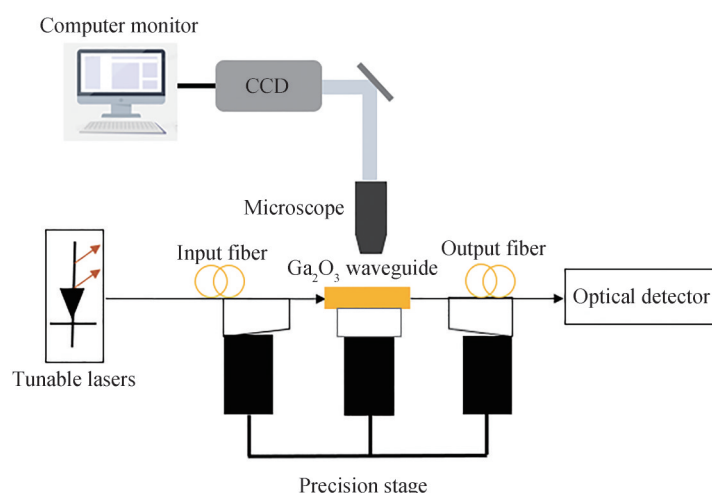


图 1 波导传输损耗测试装置原理

Fig. 1 Experimental setup for measuring optical propagation loss

2 结果与讨论

2.1 薄膜质量分析

首先分析所制备薄膜的表面质量。图2(a)是氧化铒靶材功率为40 W时的薄膜在光学显微镜10倍放大后的表面暗场光学图像,红色圆圈表示薄膜颗粒所在位置,可明显观测到少量闪亮的表面颗粒,因此可以判定由表面颗粒造成的光学损耗不会很大,达到了用于制备低损耗波导的薄膜条件。图2(b)是SEM下的薄膜表面图,可见薄膜表面比较光滑,无裂纹、液滴和明显杂质,证明掺铒Ga₂O₃薄膜具有较好表面质量。

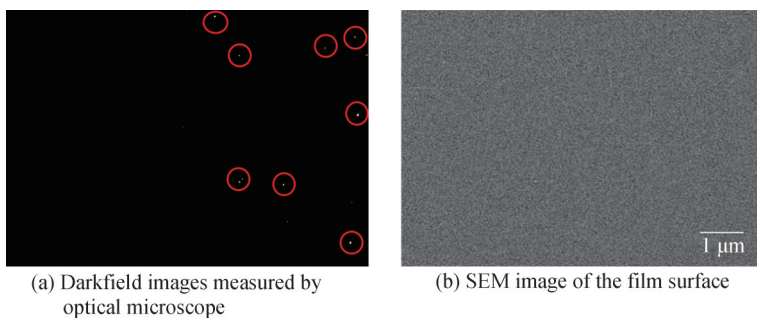


图2 光学显微镜和SEM下的薄膜表面观测图

Fig. 2 Observation of thin film surface under optical microscope and SEM

使用XRD测量了氧化铒靶材功率为40 W时的沉积态和不同温度退火后的掺铒Ga₂O₃薄膜的晶态,结果如图3。在10°~60°的衍射范围内,沉积态薄膜样品以及在500 °C和600 °C退火温度下的膜均呈现出一个宽的X射线衍射带,这是非晶材料的典型特征,由此可以看出薄膜经过600 °C及以下温度退火后很好地保持了非晶态。但经过700 °C退火的薄膜,除了硅衍射峰外还出现弱的但尖锐的XRD峰,这意味着薄膜发生了从非晶结构到晶体的结构转变。由于晶态材料物理性质的各向异性,对光传输会产生较大的光学散射,从而对波导造成较大的光学损耗,因此各向同性的非晶态氧化镓材料更适用于光学波导的制作。

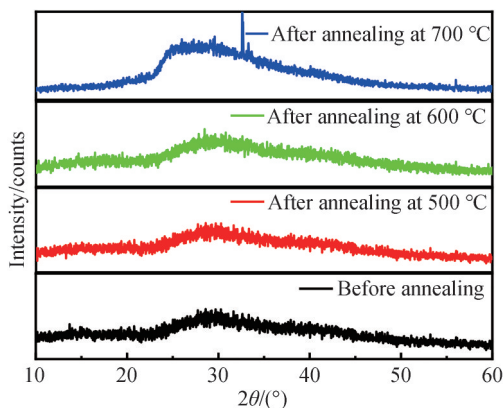


图3 薄膜的XRD谱图

Fig. 3 XRD spectra of the films

针对薄膜的荧光测试方面,实验中使用980 nm激光泵浦激发电子,将其激发到铒离子⁴I_{11/2}能级后又迅速无辐射地转移到⁴I_{13/2}能级,然后从⁴I_{13/2}到⁴I_{15/2}能级辐射跃迁产生1.55 μm附近的荧光。图4(a)为20 W、40 W、60 W、80 W四种不同Er₂O₃靶材溅射功率下沉积薄膜的荧光光谱图,薄膜厚度分别约为126.5 nm、136.4 nm、147.0 nm、150.1 nm,变化幅度不大,因此厚度影响可忽略。另外,还对薄膜进行了退火处理,即在半个大气压氧气环境中进行了温度为600 °C的退火,实验通氧的目的是减少由溅射缺陷带来的氧空位^[21]。由图谱可明显看出,当Er₂O₃靶材溅射功率达到40 W时荧光强度达到最大,其原因是随着靶材溅射功率增高,产生的Er³⁺越多,产生的荧光就越强,当功率超过40 W时,过高的Er³⁺浓度导致离子之间的间距过小,从而发生Er³⁺的团簇,导致不同程度的荧光猝灭,荧光强度降低^[17]。图4(b)给出了沉积的薄膜在处于400 °C、

500 °C、600 °C、700 °C 四种不同热退火温度以及未退火状态下的荧光光谱图。固定 Er_2O_3 靶材溅射功率在 40 W，膜厚为 530 nm 左右，均在氧气氛围下退火，由图谱得出，未退火时薄膜表现出非常弱的荧光强度，随着温度增高，薄膜缺陷减少， Er^{3+} 的激活浓度变大，荧光增强，在退火温度达到 600 °C 时荧光强度最大，但当退火温度达 700 °C 时，荧光强度减弱，推测温度为 700 °C 时薄膜状态的由非晶到晶态的转变^[22]可能影响了荧光强度。综合荧光图谱，认为实验采用 Er_2O_3 靶材溅射功率 40 W，退火温度 600 °C 用于后期波导制作最佳。

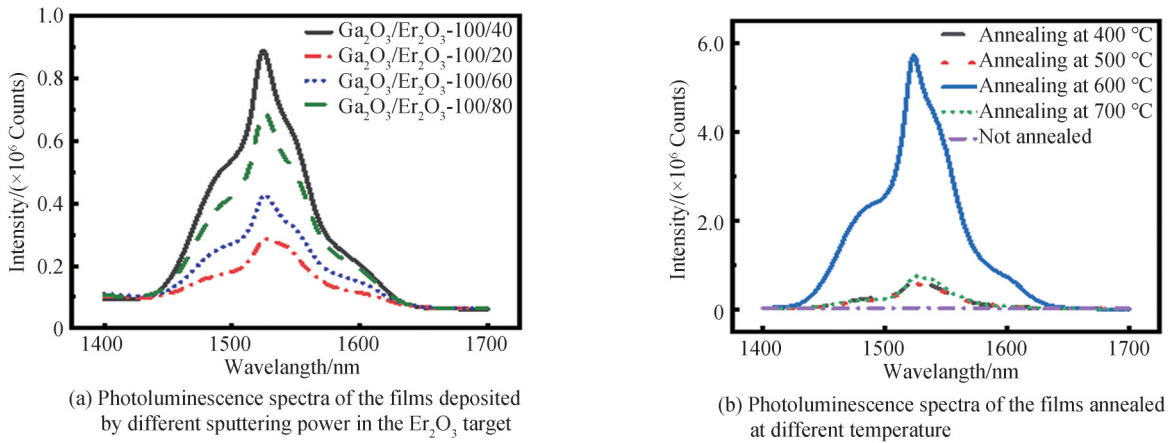


图4 不同条件下沉积薄膜的荧光光谱
Fig. 4 Photoluminescence spectra of the films deposited under different conditions

2.2 波导的结构设计

由于实验室只具备氟基气体，而氟基气体与 Ga_2O_3 反应会形成挥发性的气体和非挥发性的 GaF_x ， GaF_x 这种物质容易附着于薄膜表面且难以去除，导致刻蚀表面非常的粗糙^[17]。另外已有报道称氟基等离子体用于刻蚀 Ga_2O_3 时不是特别有效，使用氯基等离子体可以获得更快的刻蚀速率^[23-24]。因此为了解决这个问题，本实验试图通过波导结构设计避免直接刻蚀稀土掺杂的 Ga_2O_3 膜层。设计了两种波导结构，一种如图 5(a)，

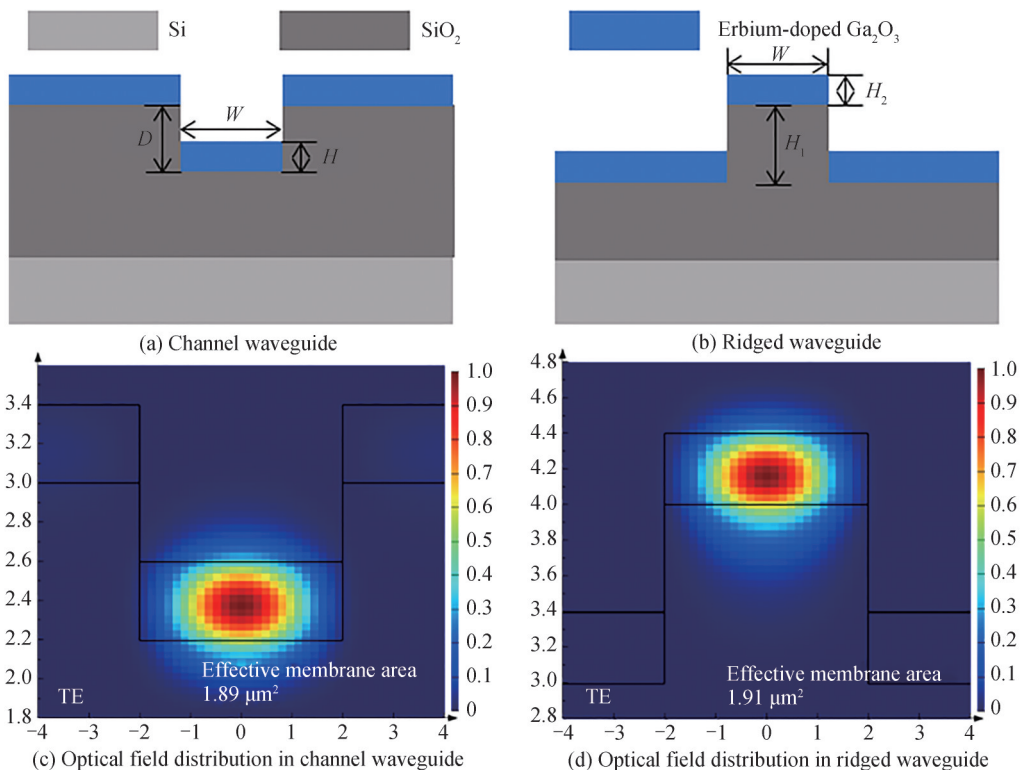


图5 不同波导的结构示意及模式分布特性
Fig. 5 Structure diagrams and optical field distributions in the different waveguide

在800 nm(D)深的SiO₂沟道中沉积高度为400 nm(H)的掺铟Ga₂O₃薄膜;另一种如图5(b),在1 μm(H₁)高的SiO₂脊型上同样沉积400 nm(H₂)厚的薄膜,并使用Mode Solutions仿真软件进行波导模拟。图5(c)、(d)显示了宽度W=4 μm的两种波导结构在λ=1.55 μm处的TE基模的模场分布。可以看出,在图5(c)的沟道波导中,光场大都集中在填充的掺铟Ga₂O₃波导层,而在图5(d)的脊型波导中,由于SiO₂的折射率小于Ga₂O₃,光场最终分布于覆盖在SiO₂上面的掺铟Ga₂O₃层。根据模拟结果可知,设计的这两种结构下的传输光都可以很好地限制在掺铟Ga₂O₃波导层,确保了传输光尽可能地都与掺杂有源层相互作用,其有效模场面积分别为1.89 μm²和1.91 μm²。

2.3 波导的制备与性能表征

按照结构设计进行实验,制备了设计的两种波导结构,如图6。图6(a)所示的沟道型是在800 nm深的SiO₂沟道中沉积了440.8 nm的掺铟Ga₂O₃薄膜,为避免沟道填满带来的台阶效应造成更大的光散射,实验采取了半填沟槽的方式,即只在沟槽内沉积了400 nm左右的膜;图6(b)所示的涂覆型是在1 μm高的SiO₂脊型上沉积了503.5 nm的薄膜,沉积后的薄膜紧贴SiO₂脊型轮廓,波导表面平整且无多余杂质。

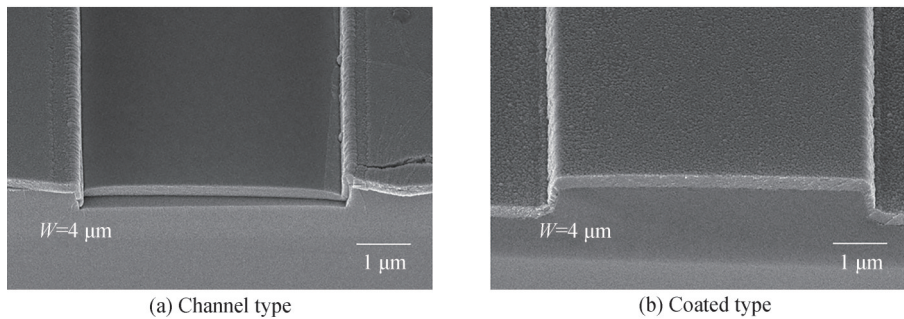


图6 波导截面的SEM图

Fig. 6 Cross-section SEM images of the waveguide

这两种结构的优势在于利用了刻蚀技术相对成熟的SiO₂刻蚀,有效地避免了直接使用氟基等离子体化学刻蚀Ga₂O₃材料的困难。由结构图可以看出,薄膜表面光滑平整,无明显裂纹,但横截面存在波导切割过程中表面不平整造成的痕迹,波导侧壁垂直但存在略微粗糙,这是导致波导损耗最小才达到1.26 dB/cm的关键因素,后续将继续优化刻蚀工艺,进一步降低波导损耗。

对于不同长度的掺铟Ga₂O₃波导的插入损耗已经在1.31 μm波段经截断方法进行了测量,经过拟合得到的4 μm宽的波导样品的传输特性如图7。实验中测量了两种结构分别为沟道型(红色实线)和覆盖型(黑色虚线)的波导,波导芯片的截断长度分别为4、9、15 mm,经过多次测量取得了较为准确的拟合数据,明显可见损耗随着波导长度的增加而不断增加,其中沟道型(红色实线)达1.26 dB/cm,覆盖型(黑色虚线)达

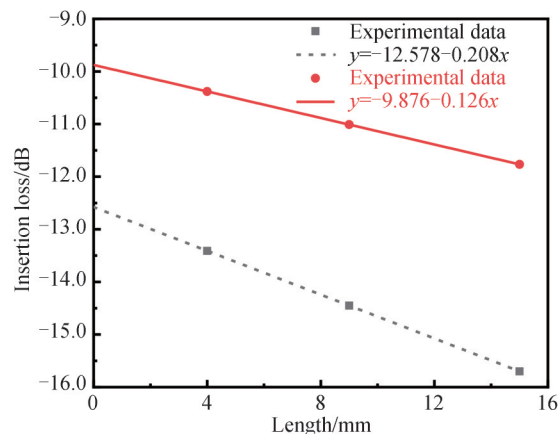


图7 波导在1.31 μm处传输损耗

Fig. 7 Transmission loss of waveguide at 1.31 μm

2.08 dB/cm。造成波导损耗较大的原因应该是泵浦光在传输过程中与侧壁相互接触,侧壁的粗糙导致波导的损耗加大。

此外,曲线与纵坐标的截距分别为9.876、12.578,因此波导的耦合损耗大致为4.938、6.289 dB/面,其对应的耦合效率 M 约为32%和24%。造成耦合损耗较大的原因可能是锥形光纤与波导之间的较大模式不匹配,该问题可以通过对波导端面进行抛光或引入抗反射涂层物质等方法来克服^[25-26]。

3 结论

本文研究的目的是制备用于光学放大的掺铟氧化镓的平面光学波导。首先制备了不同氧化铟靶溅射功率条件下的高质量掺铟 Ga_2O_3 薄膜,并研究了薄膜的热退火温度,测量了薄膜的晶态和光学性质,结果表明薄膜在室温至600℃的退火条件下均保持非晶态,在40 W的氧化铟溅射功率以及600℃退火温度下制备的薄膜的荧光强度最大。然后设计了波导结构分别是掺铟 Ga_2O_3 薄膜填充 SiO_2 沟道型和涂覆 SiO_2 脊型并进行光学仿真。接着利用光刻与等离子干法刻蚀技术制备出侧壁光滑形貌良好的 SiO_2 沟道和 SiO_2 脊型结构,并在此结构上沉积掺铟 Ga_2O_3 薄膜,有效地避免了直接蚀刻掺铟 Ga_2O_3 薄膜带来的刻蚀速率慢、刻蚀平面粗糙等刻蚀困难问题。最后测得了1310 nm处的传播损耗最小达1.26 dB/cm。未来有望通过完善优化薄膜和波导加工条件,减小光学损耗,进一步提升波导的光学放大性能,为制备性能更好的掺铟波导放大器提供可能。

参考文献

- [1] HECK M J R, BAUTERS J F, DAVENPORT M L, et al. Ultra-low loss waveguide platform and its integration with silicon photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(5): 667-686.
- [2] XIAO P, WANG B. Design of an erbium-doped Al_2O_3 optical waveguide amplifier with on-chip integrated laser pumping source[J]. *Optics Communications*, 2022, 508(1): 127709.
- [3] CHEN Ziping, SHU Haowen, WANG Xingjun. The latest research progress of silicon-based integrated optical waveguide amplifier[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2017, 47(12): 5-23.
陈子萍, 舒浩文, 王兴军. 硅基集成光波导放大器的最新研究进展[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(12): 5-23.
- [4] VÁZQUEZ-CÓRDOVA S A, DIJKSTRA M, BERNHARDI E H, et al. Erbium-doped spiral amplifiers with 20 dB of net gain on silicon[J]. *Optics Express*, 2014, 22(21): 25993-26004.
- [5] SUBRAMANIAN A Z, MURUGAN G S, ZERVAS M N, et al. High index contrast Er: Ta_2O_5 waveguide amplifier on oxidized silicon[J]. *Optic Communications*, 2012, 285(2): 124-127.
- [6] FRANKIS H C, MBONDE H M, BONNEVILLE D B, et al. Erbium-doped TeO_2 -coated Si_3N_4 waveguide amplifiers with 5 dB net gain[J]. *Photonics Research*, 2020, 8(2): 127-134.
- [7] DEMIRTAS M, ODACI C, PERKGOZ N K, et al. Low loss atomic layer deposited Al_2O_3 waveguides for applications in on-chip optical amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(4): 3100508.
- [8] LI N, MAGDEN E S, SINGH G, et al. Ultra-narrow-linewidth Al_2O_3 : Er^{3+} lasers with a wavelength-insensitive waveguide design on a wafer-scale silicon nitride platform[J]. *Optics Express*, 2017, 25(12): 13705-13713.
- [9] BRADLEY J D B, AGAZZI L, GESKUS D, et al. Integrated Al_2O_3 : Er^{3+} ring lasers on silicon with wide wavelength selectivity[J]. *Optic Letters*, 2010, 35(1): 73-75.
- [10] PING L K, BERHANUDDIN D D, MONDAL A K, et al. Properties and perspectives of ultrawide bandgap Ga_2O_3 in optoelectronic applications[J]. *Chinese Journal of Physics*, 2021, 73: 195-212.
- [11] PEARTON S J, YANG J, CARY P H, et al. A review of Ga_2O_3 materials, processing, and devices[J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5(1): 011301.
- [12] DAKHEL A A. Investigation of opto-dielectric properties of Ti-doped Ga_2O_3 thin films[J]. *Solid State Sciences*, 2013, 20: 54-58.
- [13] ONUMA T, FUJIOKA S, YAMAGUCHI T, et al. Correlation between blue luminescence intensity and resistivity in β - Ga_2O_3 single crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041910.
- [14] WANG R, YAN K, ZHANG M, et al. Chemical environment of rare earth ions in $\text{Ge}_{28.125}\text{Ga}_{6.25}\text{S}_{65.625}$ glass-ceramics doped with Dy^{3+} [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(16): 161901.
- [15] REBIEN M, HENRION W, HONG M, et al. Optical properties of gallium oxide thin films[J]. *Applied physics letters*, 2002, 81(2): 250-252.
- [16] GHOSE S, RAHMAN M S, ROJAS-RAMIREZ J S, et al. Structural and optical properties of β - Ga_2O_3 thin films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and*

- Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena, 2016, 34(2): 02L109.
- [17] LIANG H W, CHEN Y P, XIA X C, et al. A preliminary study of SF₆ based inductively coupled plasma etching techniques for beta gallium trioxide thin film[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2015, 39: 582-586.
- [18] MUTTALIB M F A, CHEN R Y, PEARCE S J, et al. Optimization of reactive-ion etching (RIE) parameters for fabrication of tantalum pentoxide (Ta₂O₅) waveguide using Taguchi method[J]. EPJ Web of Conferences, 2017, 162: 01003.
- [19] GARCÍA-VALENZUELA J A, RIVERA R, MORALES-VILCHES A B, et al. Main properties of Al₂O₃ thin films deposited by magnetron sputtering of an Al₂O₃ ceramic target at different radio-frequency power and argon pressure and their passivation effect on p-type c-Si wafers[J]. Thin Solid Films, 2016, 619: 288-296.
- [20] LI C, GUO P, HUANG W, et al. Reverse-strip-structure Ge₂₈Sb₁₂Se₆₀ chalcogenide glass waveguides prepared by micro-trench filling and lift-off[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2019, 37(1): 82.
- [21] SAIKUMAR A K, NEHATE S D, SUNDARAM K B. Review—RF sputtered films of Ga₂O₃[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2019, 8(7): Q3064-Q3078.
- [22] SINGH A K, GUPTA M, SATHE V, et al. Effect of annealing temperature on β-Ga₂O₃ thin films deposited by RF sputtering method[J]. Superlattices and Microstructures, 2021, 156: 106976.
- [23] HOGAN J E, KAUN S W, AHMADI E, et al. Chlorine-based dry etching of β-Ga₂O₃[J]. Sciences Technology, 2016, 31(6): 065006.
- [24] SHAHA A P, BHATTACHARYA A. Inductively coupled plasma reactive-ion etching of β-Ga₂O₃: Comprehensive investigation of plasma chemistry and temperature[J]. Journal Vacuum Science & Technology A, 2017, 35(4): 041301.
- [25] LU R, LINK S, ZHANG S, et al. Aluminum nitride lamb wave delay lines with Sub-6 dB insertion loss[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2019, 28(4): 569-571.
- [26] CHOI C G, HAN Y T, KIM J T, et al. Air-suspended two-dimensional polymer photonic crystal slab waveguides fabricated by nanoimprint lithography[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(22): 221109-221112.

Erbium-doped Ga₂O₃ Waveguide for Optical Amplification

LIU Ruixue, ZHANG Zheng, WU Jian, YANG Zhen, WANG Wei,
WEI Tengxiu, WANG Rongping

(Laboratory of Infrared Material and Devices, Advanced Technology Research Institute, Ningbo University,
Ningbo 315211, China)

Abstract: The commercial success of Erbium-doped Optical Fiber Amplifier (EDFA) is stimulating the development of Erbium-doped Waveguide Amplifier (EDWA) which is expected to play a key component in the long-distance optical communication system in the future due to its compacted volume and low power consuming. Er ions can emit strong light at 1.55 μm that coincides with the optical communication wavelength. Therefore, when Er³⁺ ions are doped in a compacted waveguide structure, these ions can be excited by pump light to emit near 1.55 μm and thus amplify the signal light. Numerous studies have shown that, the fluorescence performance of Er³⁺ is closely related to the factors like matrix material, doping method, preparation and annealing conditions. Especially, many available Er³⁺-doped matrix materials have been studied so far, some of which show good properties in achieving compacted and high-gain waveguides. Among them, Er doped Al₂O₃ waveguide has been demonstrated to have excellent performance in optical amplification. Ga is located at the same group of Al, and thus gallium oxide (Ga₂O₃) has similar physical and chemical properties of Al₂O₃. Meanwhile, Ga₂O₃ has many unique advantages, such as high Er³⁺ doping, broad half width of full maximum in photoluminescent peak at 1.55 μm and high refractive index. Therefore, Ga₂O₃ has the potential to be used as a host material to fabricate planar optical waveguide device for optical amplification, however, there are no such reports in the literature. In this paper, the fabrication and properties of the erbium-doped gallium oxide films are reported. The films are characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD). The effect of the Er-doping concentration, thermal annealing temperature and film thickness on the photoluminescence properties are studied. The results show that the films are amorphous even at an annealing temperature up to 600 °C. The maximum photoluminescence intensity appears in the film prepared at 40 W erbium oxide sputtering power and 600 °C annealing temperature. After optimizing the film performance, we start

structural design of the Ga_2O_3 waveguide. Considering the fact that the fluorine-based gas reacts with Ga_2O_3 to form volatile gas and non-volatile GaF_x is easily adhered to the surface of the film that is difficult to be removed, fluorine-based plasma is not effective in etching Ga_2O_3 . On the other hand, direct etching of the materials containing metallic rare earth element usually leads to the aggregation of the residual metallic Er due to the different etching rate between the host materials and Er. Both could result in a very rough etched surface in the waveguide. In order to solve this problem, two kinds of waveguide structures, e.g., erbium-doped Ga_2O_3 film filled into SiO_2 channel and erbium-doped Ga_2O_3 film coated on the top of the SiO_2 ridge waveguide, are designed to avoid the issues caused by direct etching of Er-doped Ga_2O_3 film. The light field distribution in these two types of waveguides are simulated in order to maximize the interaction between the light and the effective Er-doped area. Then the waveguides are prepared based on the structural parameters from the simulation, the silicon wafer with a 2 μm thick thermally oxidized layer is used to prepare SiO_2 channel and ridge structures via lithographing and etching by Ar/CHF_3 etching gas, and then Er-doped Ga_2O_3 film with a thickness of about 400~500 nm is deposited on these structures to get the final waveguide structure. The minimum propagation loss at 1 310 nm is 1.26 dB/cm. In the future, it is expected to optimize the processing conditions of thin films and waveguides and reduce the optical loss, which could provide the possibility for the preparation of erbium-doped waveguide amplifier with better performance.

Key words: Optical properties; Erbium-doped waveguide; RF-magnetron sputtering; Ga_2O_3 ; Dry etching

OCIS Codes: 230.7370; 310.6860; 310.1860; 220.3740