

基于 Ge-Sb-Se 薄膜的硫系光波导制备工艺研究

周杰^{1,2}, 赵阳^{1,2}, 张巍^{1,2*}

(1. 宁波大学 红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江省光电探测材料及器件重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 通过传统熔融淬冷技术制备 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 硫系玻璃, 并由热蒸发技术制备出 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 非晶态薄膜, 利用电感耦合等离子体(ICP)刻蚀机在不同刻蚀气体氛围下制备出 Ge-Sb-Se 硫系光波导. 研究了不同刻蚀功率和不同刻蚀气体流量比等条件参数对制备所得 Ge-Sb-Se 波导表面形貌的影响, 利用台阶仪测量其刻蚀速率, 扫描电子显微镜(SEM)和扫描探针显微镜(SPM)测量波导形貌以及表面粗糙度. 结果显示, 对于相同组分材料的 Ge-Sb-Se 硫系薄膜, 相比于 CF_4/O_2 刻蚀气体, CF_4/CHF_3 混合刻蚀气体制备出的波导具有较低的表面粗糙度、较光滑的侧壁和较大的刻蚀选择比, 1550 nm 处 2 μm 宽波导传输损耗为 $(1.73 \pm 0.24) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$.

关键词: 硫系玻璃; 薄膜; 电感耦合等离子体刻蚀; 光波导

中图分类号: TN252

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 04-0059-06

硅基半导体器件在通讯波段具有广泛的应用, 但是由于材料透光性的限制, 如单晶硅在 1100 nm 波长以下不透明, 二氧化硅在 3.5 μm 波长以上不透明, 使其在可见至近红外及中红外传感应用方面受限. 同时由于材料本身的特性, 很难将其器件柔性化, 限制了其在生物等领域的交叉应用. 硫系玻璃材料可以解决上述难题. 硫系玻璃材料是由 S、Se、Te 以及 Ge、Ga、As、Sb 等元素组成的化合物, 具有可见到中红外的透光性. 含 Te 玻璃甚至能达到远红外, 具有可调的折射率、较低的双光子吸收和非常高的三阶非线性等特性^[1-4], 并可以与其他有机物进行结合实现柔性化应用^[5]. 与不含 As 的硫基硫系玻璃, 如 Ge-Sb-S 相比^[6-7], Ge-Sb-Se 三元硫系玻璃具有较大的折射率和较宽的红外透过范围. Wang 等^[8]研究表明, 当 Sb(As)浓度相同时, Ge-Sb-Se 玻璃比 Ge-As-Se 玻璃具有更高的线性和非线性折射率. 近年来, 基于硫系材料的波导器件研究越加成熟, 对波导器件的性能也提出了越来越高的要求.

制备硫系波导的方法很多, 主要有激光直写、

干法刻蚀(包括电感耦合等离子体(ICP)和反应离子刻蚀)、剥离和热压印等^[9-14], 其中干法刻蚀具有可靠性高、成本低等优点而被广泛采用. 氟碳气体如 CF_4 、 SF_6 和 CHF_3 能有效地提供所需的自由基和离子, 可用于硫系材料波导刻蚀研究. Ruan 等^[15]报道了用干法刻蚀在 CF_4 和 O_2 混合气体下制备了 As_2S_3 波导, 在 1550 nm 处 5 μm 宽的脊形波导光学损耗为 $0.25 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$; Madden 等^[10]用氟等离子体刻蚀制备的大芯脊形 As_2S_3 波导的传输损耗仅为 $0.05 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$; Hu 等^[16]报道, 使用干法刻蚀在 SF_6 气体下制备出 6 μm 宽的 Ge-Sb-S 波导在 1550 nm 处的传输损耗为 $2.3 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$. 对于 Ge-Sb-Se 系统, 2015 年 Krogstad 等^[17]使用剥离法制备了 2.2 μm 宽和 45 nm 高的条形波导, 在 1030 nm 处得到了 $(11.9 \pm 1) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的传输损耗, 2016 年用同样的材料和制备方法获得的波导在 1550 nm 处的传输损耗仅为 $4 \sim 6.1 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ ^[18].

本文在热蒸发沉积 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜的基础上, 利用紫外曝光和电感耦合等离子体刻蚀, 结合前人对硫系光波导刻蚀气体和刻蚀参数的研究, 分

收稿日期: 2018-02-04.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.g.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市自然科学基金(2015A610122); 宁波大学微纳电子信息系统市重点学科基金(XK115D226).

第一作者: 周杰(1992-), 男, 安徽亳州人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 硫系光波导制备及工艺优化. E-mail: 1208789600@qq.com

*通信作者: 张巍(1979-), 男, 江苏徐州人, 博士/副研究员, 主要研究方向: 微纳硫系光器件. E-mail: zhangwei3@nbu.edu.cn

别在 CF_4/O_2 和 CF_4/CHF_3 混合气体环境下进行波导刻蚀研究. 通过调节不同刻蚀功率和气体流量比等工艺参数比较其对制备所得波导表面形貌的影响, 用扫描电子显微镜、台阶仪等仪器观察波导表面及侧壁形貌, 获得波导表面粗糙度值, 并对不同刻蚀参数下制备的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导进行了探讨.

1 实验

1.1 玻璃样品制备

采用传统熔融淬冷技术制备 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 体系的玻璃样品. 实验选用纯度为 99.999%(质量分数)的粉状 Ge、Sb、Se, 将原料按照化学配比, 用分析天平精确称量. 将高纯度原料置于预处理过的石英管中, 抽真空后对石英管进行封接, 置于摇摆炉中按照特定的熔制曲线升温; 取出在冷水中淬冷, 随后置于退火炉中进行退火处理; 最后将玻璃样品加工成厚度为 3~4 mm 的圆片备用.

1.2 薄膜沉积

在 $2\ \mu\text{m}$ SiO_2/Si 硅片上用热蒸发方法沉积 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜. 沉积之前, 先依次使用丙酮、甲醇、异丙醇处理基片, 然后用蒸馏水冲洗并用热板在 $120\ ^\circ\text{C}$ 下烘干. 抽真空至 5.0×10^{-4} Pa 下开始镀膜, 控制镀膜速率在 $20\sim 30\ \text{nm}\cdot\text{min}^{-1}$, 厚度达到 $800\sim 1\ 200\ \text{nm}$ 后取出.

1.3 波导制备

薄膜沉积之后, 利用紫外曝光和 ICP 刻蚀方法制备 Ge-Sb-Se 波导. 采用 AZ5214 正性光刻胶, 旋涂光刻胶厚度至 $1\sim 1.3\ \mu\text{m}$, 在 $90\ ^\circ\text{C}$ 下前烘 6 min 后进行曝光, 然后再显影、后烘, 完成光刻. 光刻后, 分别基于 CF_4/O_2 和 CF_4/CHF_3 两种混合气体作为刻蚀气体环境进行 ICP 刻蚀制备波导. 对于 CF_4/O_2 , O_2 的存在对于改善刻蚀效率和去除刻蚀过程中形成的聚合物作用很大; 对于 CF_4/CHF_3 , CHF_3 气体的存在可以优化波导刻蚀速率和波导侧壁. 在这两种制备过程中, 分别调节 CF_4 在混合气体中的比例以及控制一系列的刻蚀功率、压强变化, 再使用 N 甲基吡咯烷酮(NMP)去除残胶后可以获得不同表面形貌的波导样品.

实验中利用掩模版上预先设定的不同宽度图形成功制备出宽度为 $2\sim 8\ \mu\text{m}$ 不等的条形和弧形波导. 整个波导制备流程如图 1 所示.

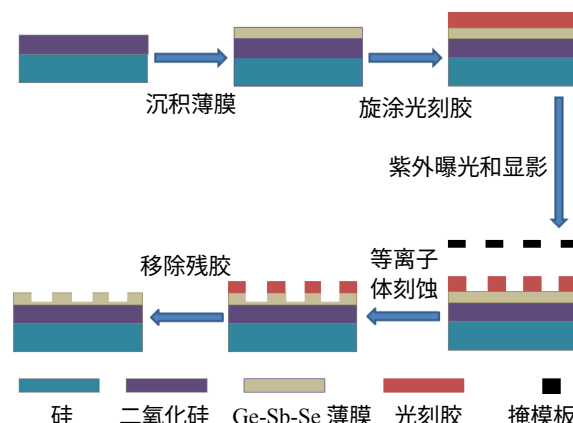


图1 Ge-Sb-Se 波导制备工艺流程

2 结果与讨论

2.1 化学组分和薄膜特性

采用熔融淬冷技术制备出的块状硫系玻璃, 化学成分比较均匀(图 2). 用能量色散光谱仪(EDS)测量块状玻璃组分与沉积薄膜组分, 误差在 3% 质量分数以内. 用电子显微镜观察发现, 薄膜表面较光滑, 没有裂缝和颗粒结构. 用台阶仪测量薄膜表面粗糙度在 $0.42\ \text{nm}$ 左右, 说明热蒸发法制备的薄膜具有较好的表面质量和较低的表面粗糙度.

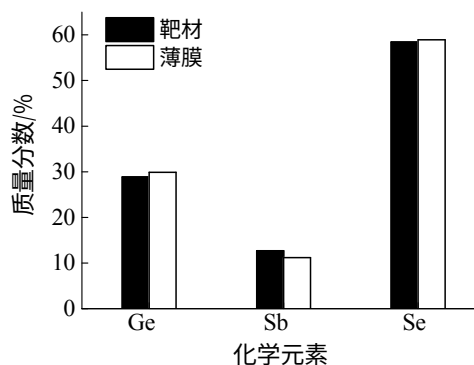


图2 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 块状玻璃和薄膜组分质量分数对比

用 X 光线衍射(XRD)测量 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜的非晶特性(图 3), 没有发现结晶峰, 说明薄膜没有出现晶化.

采用紫外-可见-近红外光谱仪(PerkinElmer Lambda 950)测量 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜的透过光谱. 通过计算得到光学带隙为 $1.58\ \text{eV}$, 该结果接近于 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 块状玻璃的 $1.62\ \text{eV}$ ^[14]. 此外, 在 $1\ 550\ \text{nm}$ 处得到薄膜的折射率为 2.5 左右, 低于相同波段内块状玻璃的折射率(2.65). 分析其原因可能是因为薄膜的化学组分和薄膜的物理结构与对应的块

状玻璃相比都发生了改变^[14].

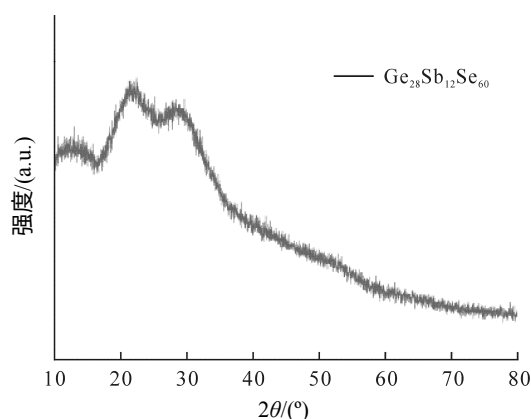


图3 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜的 XRD 图谱

2.2 刻蚀参数优化

根据文献[19-20]研究结果可知, 波导的散射损耗与侧壁粗糙度的均方根成正比. 因此, 减小刻蚀过程产生的波导侧壁粗糙度非常重要. 为此, 我们系统研究了在 CF_4/O_2 和 CF_4/CHF_3 两种混合刻蚀气体作用下, 刻蚀功率在 200~350 W 之间, 压强在 0.16~0.35 Pa 之间变化时刻蚀参数的选择对波导侧壁形貌的影响, 并利用 SEM 观察制备所得的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导的表面和侧壁形貌.

当刻蚀功率选定为 300 W 时, 两种刻蚀气体氛围下得到的波导侧壁垂直度都较好, 因此在刻蚀参数优化研究过程中首先固定刻蚀功率为 300 W, 然后用平板电感耦合 13.56 MHz 射频等离子体刻蚀机研究一系列刻蚀气体流量对波导侧壁的影响, 最后研究刻蚀功率变化对波导侧壁粗糙度的影响.

对于 CF_4/O_2 刻蚀气体氛围下, 当气体总流量为 50 sccm, 刻蚀功率为 300 W 时, 不同 CF_4/O_2 比下的刻蚀速率和选择比结果见表 1.

表1 不同 CF_4/O_2 比率下所得波导刻蚀速率和选择比

$\text{CF}_4/$ %	刻蚀厚 度/nm	刻蚀时 间/min	掩膜刻 蚀/nm	选择 比	刻蚀速率/ ($\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$)
60	900	8	690	1.30	112.5
70	1 130	8	770	1.47	141.2
80	1 220	8	570	2.14	152.5
90	1 160	8	430	2.70	145.0
100	1 110	8	250	4.44	138.7

从表 1 可看出, 随着 CF_4/O_2 比增加, 刻蚀速率先上升后下降, 在 CF_4 为 80% 时刻蚀速率最大. 当 CF_4 浓度较低时, 刻蚀速率较低是由于其等离子体

中电子的有效温度较低; 而 CF_4 浓度较高时刻蚀速率变低则是因为电子密度较低^[21], 两种情况都会影响刻蚀腔体内刻蚀薄膜的等离子体浓度. 除了刻蚀速度外, 另一个重要参数是刻蚀薄膜与刻蚀光刻胶掩膜的选择比. 从表 1 可以发现, 虽然在 100% 的 CF_4 下选择比最大, 但是其刻蚀速率较低, 这是因为缺少 O_2 的存在, O_2 有调节刻蚀速率的作用. 综合考虑刻蚀选择比和刻蚀速率, 刻蚀薄膜选择 80% 的 CF_4 浓度比较适合. 清除残留的光刻胶后, 用 SEM 研究制备所得波导形貌, 如图 4 所示. 从图 4 看, 在 CF_4/O_2 条件下刻蚀得到的波导形貌都不太理想, 相比之下图 4(c) 所示波导形貌具有相对较好的侧壁垂直度.

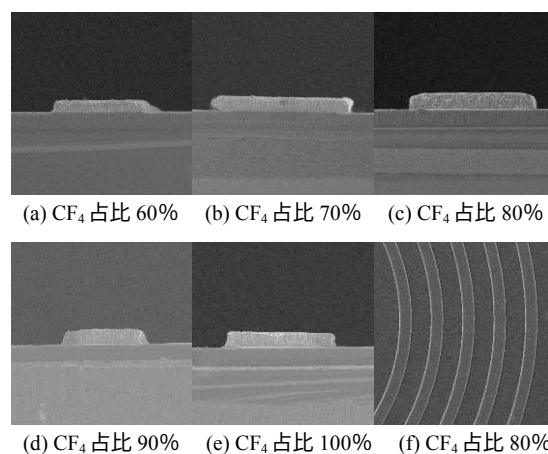


图4 波导端面 SEM 形貌

将刻蚀气体改成 CF_4/CHF_3 混合气体进行研究. 在 CF_4/CHF_3 刻蚀气体氛围下, 当气体总流量为 30 sccm, 刻蚀功率为 300 W 时, 不同 CF_4 和 CHF_3 气体流量下的刻蚀速率和选择比见表 2.

表2 不同 CF_4/CHF_3 比率下所得波导刻蚀速率和选择比

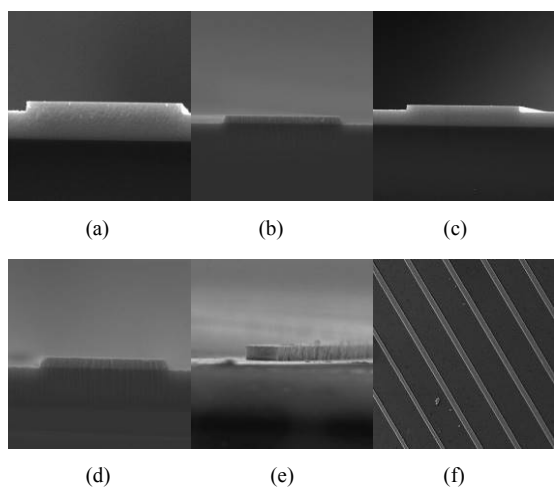
$\text{CHF}_3/$ sccm	刻蚀厚 度/nm	刻蚀时 间/min	掩膜刻 蚀/nm	选择 比	刻蚀速率/ ($\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$)
30	625	3	59	10.59	208.3
25	510	2	61	8.36	255.0
20	561	2	73	7.68	280.5
15	581	2	80	7.26	290.5
0	1 117	3	191	5.85	372.3

由表 2 可以看出, 气体总流量为 30 sccm 时, 随着 CF_4 流量的增加, 刻蚀速率不断增大. 其原因是氟碳化合物中的 CF_x ($x=1\sim3$) 自由基和 F 原子对薄膜的刻蚀反应有较大的影响, 而 CF_4 有较高的离

子浓度,能促进刻蚀反应的进行^[22-23]。然而,随着 CF_4 流量的增加,薄膜与光刻胶刻蚀的选择比却在下降,这是因为较高的离子浓度降低了光刻胶掩膜的保护作用。

图5是对应表2刻蚀条件下去除光刻胶后的波导SEM形貌图。相比于 CF_4/O_2 ,图5显示出更好的形态特性和更光滑的波导侧壁。从图5(b)和图5(c)可以看出,相对于其他各图其有更光滑的侧壁,其中图5(c)展示出相对最佳的侧壁形貌。图5(e)表明,当仅使用 CF_4 时,侧壁粗糙度仍然非常大。因此认为 CHF_3 气体的加入对刻蚀所得波导的侧壁形貌改善有很大的帮助。而且,刻蚀中主要是F原子、 CF_x 基团起作用, CF_4 可以提供较大的刻蚀速率,而 CHF_3 相对而言可以充当保护气体提供保护^[23]。并且随着刻蚀的进行,波导侧壁和表面上沉积的聚合物越来越多,由于刻蚀各向异性,此时侧壁的钝化可使侧壁变得光滑、垂直, CF_4/CHF_3 结合的速率也比 CF_4/O_2 的刻蚀速率大,去除聚合物的效率高,可使刻蚀持续有效进行,刻蚀选择比也较大,掩膜对波导保护作用好。实验表明, CHF_3 的流量比 CF_4 大时刻蚀效果好,且不影响刻蚀效率,这是采用 CF_4/O_2 气体刻蚀所达不到的。综上分析得出,在刻蚀气体总量为30 sccm,功率为300 W条件下,当混合气体中 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=2:1$ 时,刻蚀所得波导形态最好。

在其他刻蚀条件不变情况下,刻蚀功率对波



(a)为 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=30:0$; (b)为 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=25:5$; (c)为 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=20:10$; (d)为 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=15:15$; (e)为 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=0:30$; (f)为20 sccm CHF_3 下的波导整体形貌。

图5 波导端面SEM形貌

导形貌的影响如图6所示。从图6可看出,在功率为200 W和250 W时,波导侧壁粗糙度好于刻蚀功率为300 W和350 W,这是因为在较高功率下,刻蚀速率变大,等离子体浓度有所增加,导致光刻胶掩膜保护不充分,得到的波导侧壁较粗糙。相比于200 W刻蚀功率,在250 W条件下获得的波导具有更好的垂直度,通过测量可得其侧壁垂直度为 86° 。

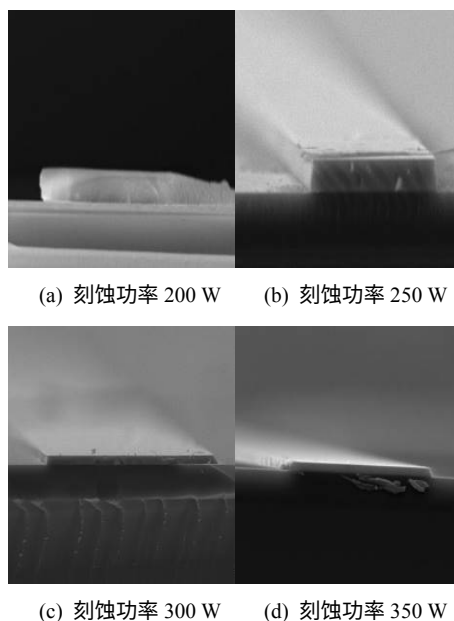


图6 波导端面SEM形貌

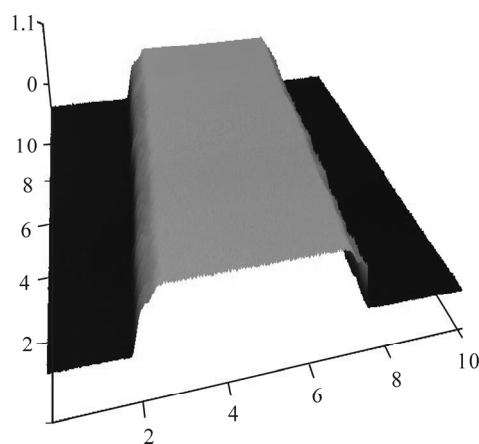
综上分析,当气体总流量为30 sccm, $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=2:1$,刻蚀功率250 W时,所得刻蚀波导在系统研究中具有最佳的侧壁垂直度和粗糙度。

2.3 波导损耗

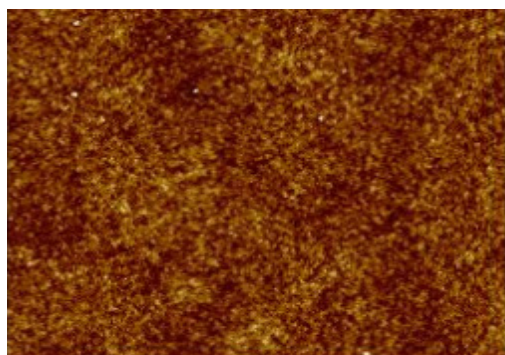
图7是扫描探针显微镜(SPM)测试 $6\mu\text{m}$ 宽 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 条形波导的形貌图。测量得其上表面粗糙度(RMS)仅为0.67 nm。在扫描区域为 $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ 时,得到整个样片($2\text{cm}\times 2\text{cm}$)上不同宽度波导的平均粗糙度仅为0.80 nm。波导的光传输损耗主要来源于波导上表面和侧壁的散射,而我们制备的波导表面粗糙度值很小,对于表面散射损耗的贡献几乎可以忽略不计,因此侧壁粗糙度在波导的传输损耗中有着重要作用。通过测量可以得出我们制备的波导侧壁粗糙度约为12 nm,而用 CF_4/O_2 方法制备出的波导侧壁粗糙度则远大于50 nm。

用截断法测量波导在1550 nm处的传输损耗,得到在 CF_4/CHF_3 和 CF_4/O_2 方法下 $2\mu\text{m}$ 宽、700 nm

高的条形波导的损耗分别为 $(1.8 \pm 0.2) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ 和 $(4.6 \pm 0.4) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$. 表明用 CF_4/CHF_3 方法制备的波导优于 CF_4/O_2 方法, 也优于用剥离法制备的 $2 \mu\text{m}$ 宽的 Ge-Sb-Se 波导在 1550 nm 处 $4 \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的损耗^[18].



(a) 波导整体形貌(单位: μm)



(b) 波导粗糙度

图7 $6 \mu\text{m}$ 宽波导的 SPM 图

3 结语

制备出高质量的 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 薄膜, 并用干法刻蚀法制备出 $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ 波导. 分别在 CF_4/O_2 和 CF_4/CHF_3 刻蚀气体氛围下研究混合气体流量比及刻蚀功率对波导性能的影响. 结果表明: 在相同刻蚀功率下, 刻蚀气体为 CF_4/CHF_3 时所得波导形貌优于 CF_4/O_2 气体; 在总流量为 30 sccm 条件下, 当 $V(\text{CF}_4)/V(\text{CHF}_3)=2:1$ 时所得波导形貌最好. 此外, 相同条件下刻蚀功率为 250 W 时波导侧壁和粗糙度最佳, 其中侧壁垂直度为 86° , 表面粗糙度仅为 0.67 nm . 利用截断法在 1550 nm 波段处测量出 $2 \mu\text{m}$ 宽波导传输损耗为 $(1.8 \pm 0.2) \text{ dB} \cdot \text{cm}^{-1}$. 表明 Ge-Sb-Se 硫系薄膜波导器件具有良好的物化特性

和光学特性, 可为硫系光波导器件在集成光学方面的应用打下基础.

参考文献:

- [1] Eggleton B J, Luther-Davies B, Richardson K. Chalcogenide photonics[J]. Nature Photonics, 2011, 5(3): 141-148.
- [2] Hu J, Li L, Lin H, et al. Chalcogenide glass microphotonics: Stepping into the spotlight[J]. American Ceramic Society Bulletin, 2015, 94(4):24-29.
- [3] Ta'eed V G, Baker N J, Fu L, et al. Ultrafast all-optical chalcogenide glass photonic circuits[J]. Optics Express, 2007, 15(15):9205-9221.
- [4] Vo T D, Pelusi M D, Schröder J, et al. Simultaneous multi-impairment monitoring of 640 Gb/s signals using photonic chip based RF spectrum analyzer[J]. Optics Express, 2010, 18(4):3938-3945.
- [5] Li L, Lin H, Qiao S, et al. Integrated flexible chalcogenide glass photonic devices[J]. Nature Photonics, 2014, 8(8):643-649.
- [6] Savage J A. Infrared optical materials and their antireflection coatings[J]. Adam Hilger Bristol, 1985(12): 213-235.
- [7] Nazabal V, Charpentier F, Adam J L, et al. Sputtering and pulsed laser deposition for near- and mid-infrared applications: A comparative study of $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$ and $\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{Se}_{65}$ amorphous thin films[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2011, 8(5):990-1000.
- [8] Wang T, Gai X, Wei W, et al. Systematic z-scan measurements of the third order nonlinearity of chalcogenide glasses[J]. Optical Materials Express, 2014, 4(5):1011-1022.
- [9] Wang J, He B, Dai S, et al. Waveguide in Tm^{3+} doped chalcogenide glass fabricated by femtosecond laser direct writing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(3):237-240.
- [10] Madden S J, Choi D Y, Bulla D A, et al. Long, low loss etched As_2S_3 chalcogenide waveguides for all-optical signal regeneration[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14414-14421.
- [11] Anne M L, Keirsse J, Nazabal V, et al. Chalcogenide glass optical waveguides for infrared biosensing[J]. Sensors, 2009, 9(9):7398-7411.
- [12] Hu J, Tarasov V, Carlie N, et al. Si-CMOS-compatible lift-off fabrication of low-loss planar chalcogenide waveguides[J]. Optics Express, 2007, 15(19):11798-

- 11807.
- [13] Rezem M, Gunther A, Rahlves M, et al. Hot embossing of polymer optical waveguides for sensing applications [J]. *Procedia Technology*, 2014, 15:514-520.
- [14] Zhang W, Dai S X, Shen X, et al. Rib and strip chalcogenide waveguides based on Ge-Sb-Se radio-frequency sputtered films[J]. *Materials Letters*, 2013, 98(5):42-46.
- [15] 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(21): 5140-5145.
- [16] Hu J, Tarasov V, Agarwal A, et al. Fabrication and testing of planar chalcogenide waveguide integrated microfluidic sensor[J]. *Optics Express*, 2007, 15(5):2307-2314.
- [17] Krogstad M R, Ahn S, Park W, et al. Nonlinear characterization of $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ bulk and waveguide devices[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6):7870-7878.
- [18] Krogstad M R, Ahn S, Park W, et al. Optical characterization of chalcogenide Ge-Sb-Se waveguides at telecom wavelengths[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(23):2720-2723.
- [19] Payne F P, Lacey J P R. A theoretical analysis of scattering loss from planar optical waveguides[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1994, 26(10):977-986.
- [20] Tien P K. Light waves in thin films and integrated optics [J]. *Applied Optics*, 1971, 10(11):2395-2413.
- [21] Kechkar S, Swift P, Conway J, et al. Investigation of atomic oxygen density in a capacitively coupled O_2/SF_6 discharge using two-photon absorption laser-induced fluorescence spectroscopy and a Langmuir probe[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2013, 22(22): 447-450.
- [22] Miyat A, Arai H, Hori M, et al. Absolute density measurement of cyanogen fluoride in CHF_3/N_2 electron cyclotron resonance plasma using infrared diode laser absorption spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 1997, 82(10):4777-4780.
- [23] Hebner G A. CF , CF_2 , and SiF densities in inductively driven discharges containing C_2F_6 , C_4F_8 , and CHF_3 [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(2):900-910.

Fabrication process optimization of chalcogenide waveguide based on Ge-Sb-Se films

ZHOU Jie^{1,2}, ZHAO Yang^{1,2}, ZHANG Wei^{1,2*}

(1.Laboratory of Infrared Materials and Devices, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Photoelectric Materials and Devices of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: The target $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ glasses are prepared from conventional melt-quenching technique, and the $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ films are deposited by thermal evaporation method, followed by Inductively Coupled Plasma (ICP) etching to fabricate waveguide, under different etching atmosphere. The influences of different parameters such as etching power, pressure and total gases flow are investigated. The surface profiler is used to determine the etching rate, and the profile and surface roughness of the waveguides are measured by the scanning electron microscope (SEM) and the scanning probe microscope (SPM). The measurement results show that the waveguides fabricated by CF_4/CHF_3 recipe achieve better surface profile and etching selectivity, comparing to CF_4/O_2 recipe with the same composition of the materials. Propagation loss of $2\text{ }\mu\text{m}$ wide waveguides are tested and found to be as low as $(1.73\pm0.24)\text{ dB}\cdot\text{cm}^{-1}$ at $1\text{ }\mu\text{m}$. The research shows that it is feasible to fabricate high quality $\text{Ge}_{28}\text{Sb}_{12}\text{Se}_{60}$ thin film and waveguides, which are promising in integrated optical and photonic devices applications.

Key words: chalcogenide glass; thin film; inductively coupled plasma etch; optical waveguide

(责任编辑 史小丽)