

用于光学放大的掺铒氧化碲脊型波导研究

杨家琦 龙浙 王威 牛磊 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)

(2025年5月13日收到; 2025年6月11日收到修改稿)

利用射频磁控溅射法制备了掺铒 TeO₂ 薄膜, 探究了氧化铒靶溅射功率、Ar/O₂ 气体比例以及退火温度对薄膜发光特性的影响. 实验结果表明, 在氧化铒靶溅射功率为 20 W、Ar/O₂ 气体流量比为 5:1、退火温度 250 °C 时, 薄膜呈现出良好的光致发光性能. 针对直接刻蚀掺铒薄膜层易引发表面粗糙等问题, 设计并采用紫外光刻和等离子体刻蚀工艺制备了双层波导结构. 使用截断法测得 0.5 cm 长的掺铒 TeO₂ 波导在 1310 nm 波长处的最低光学损耗为 0.607 dB/cm, 放大性能测量表明在 1545 nm 波段, 波导具有 7.2 dB/cm 的光学内增益. 这些实验结果表明, 掺铒 TeO₂ 波导在平面集成波导放大器领域极具应用潜力.

关键词: 光学特性, 掺铒波导, 光学放大器, TeO₂**PACS:** 42.60.Lh, 42.82.Et, 42.60.Da**DOI:** 10.7498/aps.74.20250624**CSTR:** 32037.14.aps.74.20250624

1 引言

随着信息技术的飞速发展, 对高速、大容量数据传输和处理的需求日益增长. 传统的电子通信技术在面对不断攀升的数据流量时, 逐渐显现出其带宽限制等瓶颈问题^[1]. 在此背景下, 光通信技术凭借其高带宽、低损耗、抗电磁干扰等显著优势, 成为解决这些问题的关键技术之一. 片上光波导作为光通信和光信息处理领域的核心部件, 在通信系统中扮演着至关重要的角色^[2]. 其能够将光信号约束在微小的结构中进行传输, 实现光信号的路由、分束、调制等功能. 与传统的光纤相比, 片上光波导具有尺寸小、易于集成、功耗低等优点, 能够满足芯片级光通信和光计算系统对小型化、高性能的要求. 这些特性使得片上光波导在光互联、光传感器、光信号处理等领域展现出巨大的应用潜力, 成为当前光电子学研究的热点之一.

片上波导放大技术对于保障通信波段光信号的

有效传输至关重要. 目前, 掺铒波导放大器 (erbium-doped waveguide amplifier, EDWA)^[3-5] 作为一种典型的有源光器件, 在片上波导放大技术中发挥着重要作用. 掺铒波导放大器利用稀土元素铒 (Er) 的能级特性, 通过泵浦光将处于基态的铒离子激发到高能级, 实现粒子数反转分布, 从而使光信号在通过掺铒波导时获得增益. 这种放大器在 1550 nm 通信波段具有较高的增益和较低的噪声系数, 与现有的光通信系统兼容性良好, 能够有效补偿片上光波导传输过程中的信号损耗, 极大地推动了片上光通信系统的发展与应用.

集成光学器件 (片上光波导) 通常是将薄膜沉积在硅片上, 因此高质量的薄膜是制备性能优异的光学器件的先决条件. 而薄膜的制备又离不开合适的材料, 目前用于制备光学放大器的材料包括稀土掺杂的硫系玻璃^[6,7]、氮化硅 (Si₃N₄)、氧化铝 (Al₂O₃)^[8,9]、氧化碲 (TeO₂)、氧化钽 (Ta₂O₅)^[10] 和铌酸锂 (LiNbO₃)^[11-14] 等. 材料的选择需综合考虑多个因素, 包括折射率、发射性质、最大掺杂浓度、

[†] 通信作者. E-mail: wangrongping@nbu.edu.cn

最大声子能量^[5]以及低损耗^[15-17]等. 对比这些不同的材料体系, TeO₂ 具有独特的优势. 在材料性能方面, TeO₂ 的折射率 (2.1—2.4) 较高, 这一特性能够更有效地使光在波导中的传输; TeO₂ 在通信波段的损耗表现极佳, 这使得基于 TeO₂ 制备的波导放大器能够实现更高的放大效率. 在材料稳定性方面, TeO₂ 具备良好的化学稳定性与热稳定性^[18], 在温度波动较大的条件下, 能使波导结构维持稳定可靠的状态. 从制备工艺来看, TeO₂ 的制备工艺与 CMOS 工艺完全兼容^[19], 这一特性可以有效降低波导制备成本, 提高制备效率.

本文研究了掺铒 TeO₂ 薄膜的制备工艺, 通过光学显微镜和电子显微镜评估了薄膜的表面颗粒状况以及表面粗糙度, 探索了不同制备工艺下薄膜在 1550 nm 附近的发光特性. 进一步模拟了波导结构中的光场束缚特性, 并通过紫外光刻制备了相应的波导结构, 测量了波导的光学放大特性. 在 0.5 cm 长的波导中, 在泵浦功率为 88.45 mW、信号功率为 -45 dBm 下, 在 1545 nm 波段得到 7.2 dB/cm 的光学内增益. 这些结果证明了掺铒 TeO₂ 波导在集成光学放大方面的应用潜力.

2 实验过程

实验使用 Kurt J. Lesker 公司的 PVD75 磁控溅射装置制备薄膜, 采用纯度均为 99.99% 的单质 Te 和 Er 作为溅射靶材, 采用经标准超声清洗工艺处理的包含 2 μm 厚 SiO₂ 层的硅片作为衬底, 先将真空腔抽至 ~10⁻⁷ Torr^[20] 后通入氩气和氧气, 开始在不同的溅射功率下制备薄膜, 沉积温度为 100 °C, 沉积过程中 Te 靶材功率固定为 40 W, 设置不同的 Er 靶材溅射功率分别为 10 W, 20 W, 30 W, 用以调控掺铒浓度. 在实际实验中, 使用 X 射线能谱仪测量了 Er 靶材溅射功率 10 W, 20 W 和 30 W 时对应的摩尔浓度分别为 0.7%, 1.2% 和 1.8%. 进一步通过调节 Ar 和 O₂ 的流量比例制备薄膜. 沉积过程中, 沉积速率控制在 5—7 nm/min. 为了提高薄膜的紧密性, 激活更多稀土掺杂离子的活性, 后期将薄膜在半个大气压氧气环境中进行长达 10 h 的热退火处理^[21]. 使用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 检测薄膜的表面形貌, 并采用英国 Edinburgh Instruments 公司的 FLS980 型荧光光谱仪测试薄膜在 1550 nm 附近的荧光.

波导制备过程中首先采用 AZ5214 标准正性光刻胶均匀旋涂在薄膜表面, 形成厚度约 3 μm 的均匀光刻胶层. 完成匀胶后, 对基片进行前烘处理, 将基片放置在 110 °C 的加热板上加热 90 s. 前烘基片经 URE-2000 B 型紫外掩模对准曝光系统进行 10 s 紫外曝光, 随后浸入 ZX-238 显影液 1—2 min, 完成显影后将基片在 110 °C 的条件下烘烤 30 min 以固化光刻胶. 刻蚀阶段使用 Plasma Pro100 Cobra 型仪器, 工作气压设定为 10 mTorr, RF 功率为 30 W, ICP 功率为 300 W, 气体流量比例为 O₂:Ar:CHF₃ = 30:2:3. 刻蚀完成后, 还需进行去胶处理. 首先对基片进行 10 min 氧等离子清洗以去除表面杂质, 随后将其浸入浓度为 99.9% 的 N-甲基吡咯烷酮 (NMP) 溶液中, 通过 70 °C 恒温振荡 (30 rad/min) 实现光刻胶的热化学剥离. 实时观察胶层的脱落状态, 动态调节去胶时间以避免薄膜损伤.

实验使用截断法表征波导的光学损耗. 波导的插入损耗和耦合损耗分别为 α_i 和 α_c . 传输损耗为 α , 包括波导侧壁和表面上的散射损耗. 波导的插入损耗被定义为

$$\alpha_i = 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = 2\alpha_c + \alpha L. \quad (1)$$

在方程 (1) 中, P_{out} 为波导输出功率的最大强度, P_{in} 为波导的输入功率, L 为波导的长度. 通过测量不同长度波导的输出功率, 即可获得损耗数据. 将数据拟合处理, 得到 α_i , α_c 和 α .

波导放大器的信号净增益 (G , dB) 被定义为

$$G = 10 \log_{10} \left(\frac{S_{\text{on}} [\text{W}] - \text{ASE} [\text{W}]}{S_{\text{off}} [\text{W}]} \right) - \alpha L. \quad (2)$$

式中, S_{on} 和 S_{off} 分别为打开信号光输入时泵浦开启和关闭时的输出信号功率. ASE 为自发辐射, 通过关闭信号光, 开启泵浦光时测得. L 为波导总长度, α 是波导总损耗 (单位为 dB/cm), 其包含铒离子吸收损耗和传输损耗. 当测试波导为高浓度掺杂波导时, ASE 视为信号通道内干扰, 因此需要从 S_{on} 中减去^[10,21].

3 结果与讨论

实验发现, 镀膜过程中氧气流量对薄膜质量及沉积速率具有显著影响. 氧气流量不足会导致薄膜氧化不充分, 影响其致密性和光学性能; 氧气流量过高则易引发靶材表面过度氧化, 大幅降低溅射沉

积速率. 此外, 靶材功率也需精确调控: 功率过低时等离子体启辉不足, 导致粒子动能不足、薄膜堆积效率下降; 功率过高则会引起靶材局部积热, 甚至造成靶材熔化脱落或与靶头接触失效, 最终导致启辉中断. 本研究经过多次尝试, 将 Te 靶功率固定为 40 W, 通过调节铒 (Er) 靶溅射功率 (10—30 W) 优化薄膜发光.

3.1 薄膜荧光测试

薄膜具有强的发光特性是实现波导光学放大的先决条件, 对于 Er 离子掺杂, 980 nm 的激光泵浦可以激发电子到铒离子 $^4I_{11/2}$ 能级后又迅速无辐射地转移到 $^4I_{13/2}$ 能级, 然后又从 $^4I_{13/2}$ 到 $^4I_{15/2}$ 能级辐射跃迁产生 1550 nm 附近的荧光^[22,23].

图 1(a) 为 3 种不同 Ar, O₂ 流量比例样品的荧光光谱, 所有的光谱都有相似的线形和峰位, 发射峰最大值位于 1545 nm 附近. 薄膜的发光强度与材料中 Er 离子有效激活的数目有关. 可以采用热退火的方式激活 Er 离子, 在退火过程中还可以通入适量的氧气, 进一步使得薄膜充分氧化. 早期的研究表明, 高于 300 °C 的退火温度导致薄膜结晶^[24], 这会增大薄膜的损耗. 本文选择 250 °C 作为退火温度.

图 1(b) 是退火后的样品 (标注 ann 的样品) 薄膜荧光光谱. 可以观测到, 对于图 1(a) 的 3 个样品, 退火后同样条件下测量的荧光光谱强度均有明显的提升, 因此, 对于氧化物薄膜体系 (如 TeO₂) 而言, 氧气环境退火具有双重优势, 既能热激活稀土离子 (Er³⁺), 又能有效补偿薄膜沉积过程中形成的氧空位缺陷^[25], 从而提升 TeO₂ 薄膜样品的本征光学性能.

后续样品均在氧气氛围、250 °C 退火温度条件下退火处理 10 h. 固定 Ar/O₂ 气流比为 1:1 以及 Te 靶溅射功率为 40 W 的情况下, 改变 Er 靶的溅射功率所制备的薄膜退火后的荧光光谱, 如图 2(a) 所示. 可以发现, 当铒 (Er) 靶材的溅射功率从 10 W 增至 20 W 时, 荧光强度随之增大. 这是由于随着靶材溅射功率升高, 所产生的 Er³⁺ 数量增多, 进而使得产生的荧光更强. 然而, 当功率进一步增至 30 W, 过高的 Er³⁺ 浓度引发 Er³⁺ 的团簇现象, 最终导致不同程度的荧光猝灭, 使得荧光强度降低^[22].

固定 Te/Er 靶的溅射功率分别是 40 W 和 20 W, 改变 Ar 和 O₂ 气流比例率制备的薄膜退火后的荧光光谱, 如图 2(b) 所示. 当通入的 Ar 和 O₂ 比例为 5:1 时, TeO₂ 薄膜的荧光效果最优, 荧光强度达到 3.5×10^6 的光子计数, 较之同样测试条件下得到的图 1(a) 所示的未退火薄膜的最大荧光强度几乎提升两个数量级. 此外, 这些荧光的半高宽几乎都在 80 nm 左右, 表明掺铒 TeO₂ 材料具有宽带放大的潜力.

3.2 薄膜表面形貌分析

高质量波导要求薄膜具有光滑的表面, 较少的表面颗粒. 图 3(a) 为在上述优化条件下制备的薄膜退火后的表面在光学显微镜 10 倍放大后的暗场光学图像, 红色圆圈表示闪亮颗粒所在位置, 仅可以观测到少量闪亮的表面颗粒, 因此由表面颗粒造成的光学损耗较小, 有利于制备低损耗的波导. 图 3(b) 是薄膜表面的 SEM 图, 可以发现薄膜表面较光滑, 没有裂纹、液滴和杂质, 证明 Er:TeO₂ 薄膜具有较好表面质量^[26].

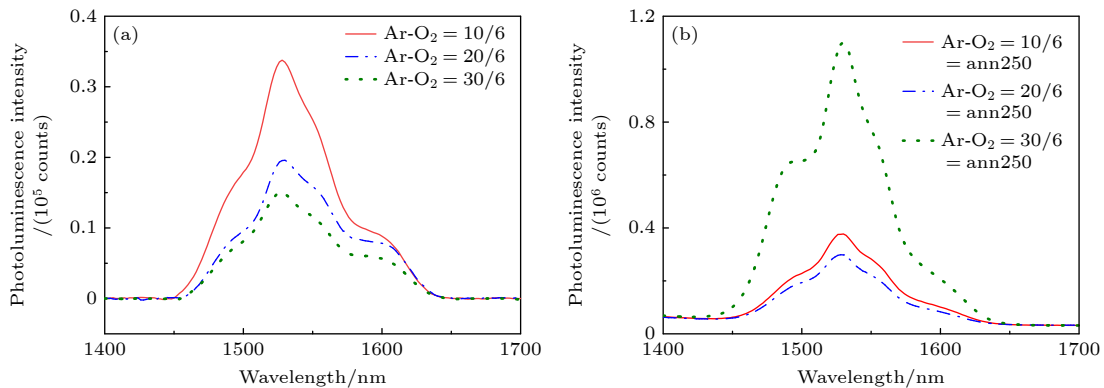


图 1 不同条件下沉积薄膜的荧光光谱

Fig. 1. Photoluminescence spectra of the films deposited under different conditions.

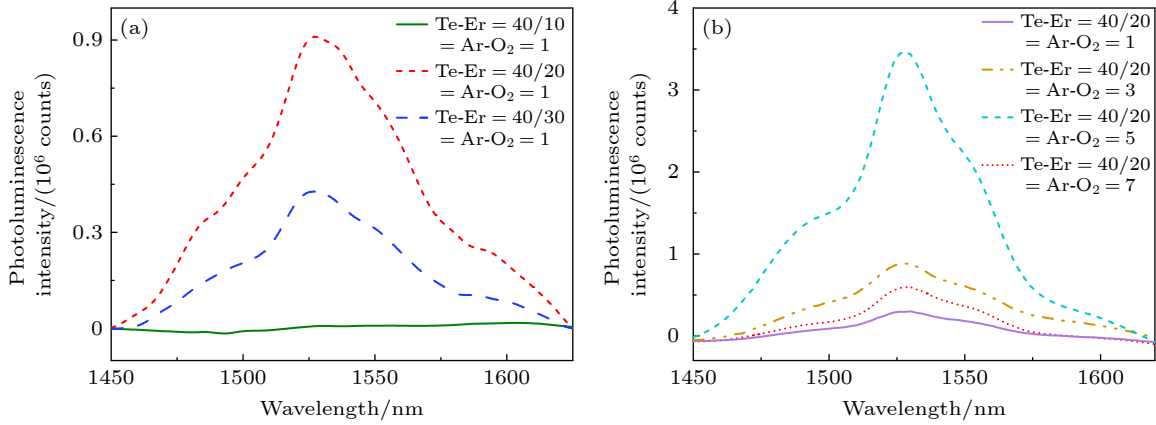


图 2 不同条件下沉积薄膜的荧光光谱 (a) 铈靶材不同溅射功率下沉积薄膜的光致发光光谱; (b) 不同气体比例下沉积薄膜的光致发光光谱

Fig. 2. Photoluminescence spectra of the films deposited under different conditions: (a) Photoluminescence spectra of the films deposited by different sputtering power in the Er target; (b) photoluminescence spectra of the films deposited by different gas ratio.

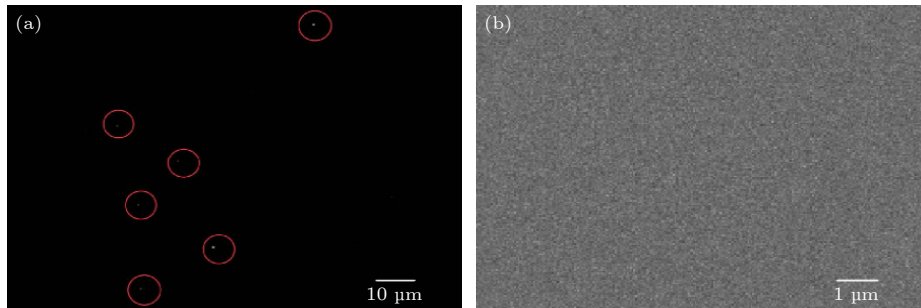


图 3 光学显微镜和 SEM 下的薄膜表面 (a) 观测图光学显微镜下观测的暗场图像; (b) 薄膜表面的 SEM 图像

Fig. 3. Observation of thin film surface under optical microscope and SEM: (a) Darkfield image observed by optical microscopy; (b) SEM image of film surface.

3.3 波导的结构设计

早期研究表明, 薄膜中残留的金属铈 (Er) 在波导刻蚀过程中易形成微掩模效应, 致使刻蚀表面粗糙度显著增大. 为避免这一问题, 本研究采用双层波导结构设计, 波导的横截面结构如图 4(a) 所示, 底层为厚度为 H_1 的掺铈氧化碲薄膜, 上层为厚度为 H_2 的纯氧化碲薄膜, 刻蚀工艺仅作用于上层非掺杂层, 从而规避对稀土掺杂层的直接刻蚀. 这样的结构设计目的是通过上层的脊型波导约束光, 同时尽可能地让光场与下层的有源层相互重叠, 从而让光与稀土离子的相互作用最大化. 同时也需要考虑自身在实际波导加工过程中所能达到的实验精度, 我们确定最佳化的波导参数是 $W = 2 \mu\text{m}$, $H_1 = 500 \text{ nm}$, $H_2 = 150 \text{ nm}$, 图 4(b), (c) 分别显示了仿真获得的在 980 nm 和 1550 nm 波长下横向电场 (TE) 基模的模场分布, 可以看出光场被很好地约束, 且大都集中在掺铈 TeO_2 波导层, 其有效模场面积分别为 $0.86 \mu\text{m}^2$ 和 $0.91 \mu\text{m}^2$.

3.4 波导的制备与性能表征

根据前述波导制备工艺流程成功制备了相应波导结构, 为表征掺铈 TeO_2 波导的光学特性, 采用截断法在 1310 nm 波段对系列化长度样品的插入损耗进行系统测试. 实验设置中保持输入功率恒定于 24.59 mW, 初始波导长度为 1.4 cm, 通过精确控制截断工艺逐步获得 1.4 cm, 1.2 cm, 1.0 cm, 0.8 cm 和 0.5 cm 长度的样本. 测试过程中严格控制截断面一致性, 并通过多次测量取平均的方法降低耦合损耗干扰. 通过对各长度样本的输入/输出功率比进行线性拟合 (图 5), 依据传输损耗公式计算得出 0.5 cm 宽波导的传输损耗系数为 0.607 dB/cm. 此外, 拟合曲线与纵轴的截距为 12.68, 因此波导的耦合损耗大致为 6.34 dB/面. 图 5 插图 of 波导截面的 SEM 图. 可以看出, 所制备薄膜表面呈现良好的光滑平整度且未观察到明显裂纹, 但在横截面区域可见因切割工艺产生的波导端面粗糙度过高, 这是导致波导传输损耗最低仅为 0.607 dB/cm,

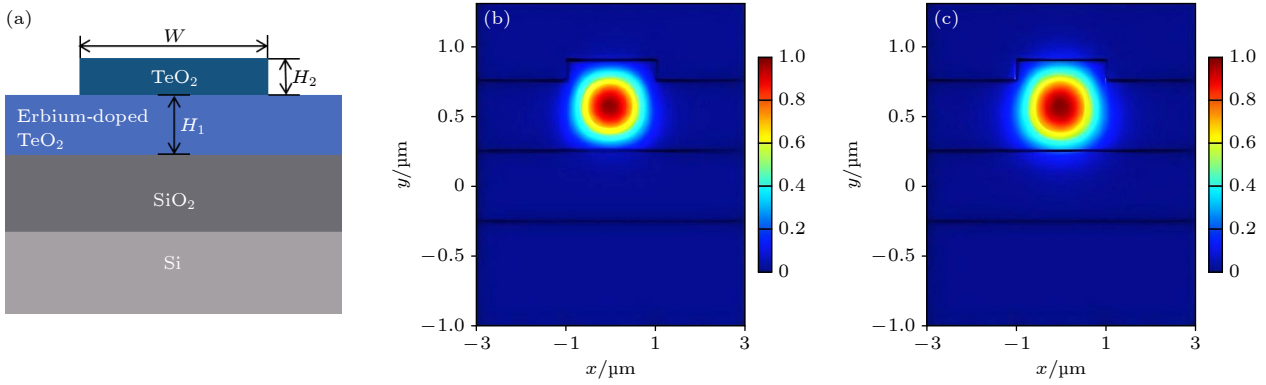


图 4 波导的结构示意图以及模式分布特性

Fig. 4. Schematic diagram of the waveguide structure and mode distribution characteristics.

但耦合损耗较大 (6.34 dB/面) 的关键因素. 且锥形光纤与波导端面间的模式失配也会导致较大的耦合损耗. 后期可通过对波导端面进行抛光来减少端面损耗并通过采用斜切端面、添加抗反射涂层或使用锥形过渡结构等方法提升整体光耦合效率, 改善模式匹配问题 [22,27].

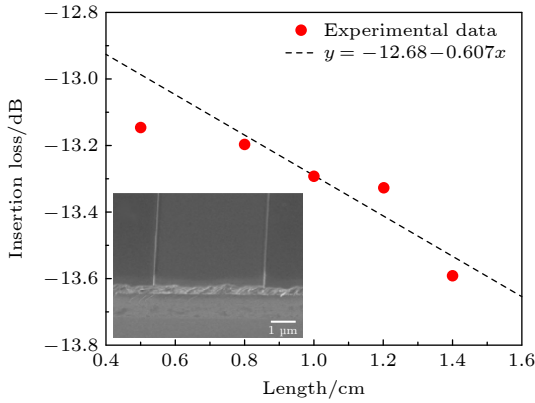


图 5 通过线性回归拟合得到的波导传输损耗曲线, 插图是波导的界面 SEM 图

Fig. 5. Waveguide propagation loss data by linear regression fit lines, the inset is a cross-section SEM of waveguide.

进一步采用文献 [10,27] 同样的方法, 去除波导的 ASE 信号, 测量了波导的放大特性, 图 6(a) 展示了基于掺铒 TeO₂ 薄膜制备的光波导在 1550 nm 通信波段的放大测试结果. 实验测量将信号光功率固定于 -45 dBm, 逐步提升泵浦功率. 在低泵浦功率区间 (<15 mW), 吸收光谱在 1550 nm 处呈现向下凹陷峰, 随着泵浦功率增大, 内部增益逐渐增大, 且在 1545 nm 处可以观测到明显的峰增强, 未开启泵浦光所测得的吸收随着泵浦功率的增大而逐渐被增强的信号所补偿. 当泵浦功率达到 90 mW 时, 放大特性趋于饱和, 表明此时 Er³⁺ 离子布居数反转达到动态平衡状态. 对比薄膜的发光带宽, 波

导的发光带宽减小很多. 这可能是因为放大测试过程中光与波导的作用路径 (5 mm) 远大于薄膜荧光测试过程中的作用路径 (薄膜厚度, 小于 1 μm), 相应的光学损耗对光信号的衰减影响更大, 窄化了增益宽度. 图 6(b) 为不同泵浦功率下的最大增益数值, 这些数值随着泵浦功率增加逐渐增大, 在 88.45 mW 泵浦功率下可实现 3.6 dB 的内增益, 这些结果表明, 掺铒 TeO₂ 薄膜制备的光波导在 C 波段具备实现高效光放大的潜力.

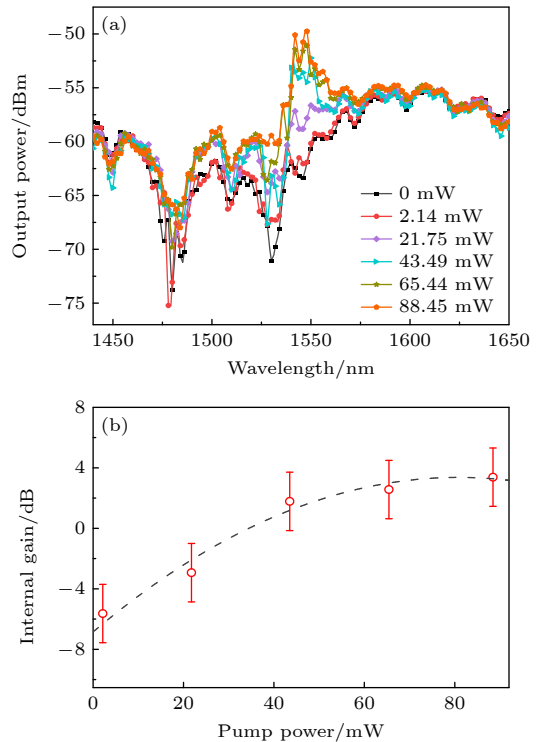


图 6 (a) 掺铒碲氧化物波导放大效应的测量; (b) 内部增益特性与泵浦强度的关系曲线

Fig. 6. (a) Measurement of amplification effect of erbium-doped tellurium oxide waveguide; (b) internal gain characteristics versus pump intensities.

4 结论与展望

本研究在单质靶材 Te 和 Er 的溅射功率分别为 40 W 和 20 W, 通入 Ar 和 O₂ 气体比例为 5:1, 退火条件为在 250 °C 氧气氛围下, 最终获得厚度为 250 nm 的薄膜, 该薄膜的荧光强度达到 1.1×10^6 的光子计数, 较优化前提高 37 倍. 后续使用该薄膜通过紫外光刻与等离子干法刻蚀技术制备出双层波导结构. 通过截断法测试表明, 该波导在 1310 nm 波长处的传播损耗为 0.607 dB/cm. 光放大性能测试结果显示, 该波导在 1450—1630 nm 光谱范围内具有显著的宽带增益响应, 其中 0.5 cm 长度的波导在特征波长 1545 nm 处实现了 3.6 dB 的内增益. 实验表明掺铒 TeO₂ 波导在集成光学放大方面具有应用潜力, 特别是作为片上光放大器的增益介质具有重要研究价值.

参考文献

- [1] Mizuno T, Miyamoto Y 2017 *Opt. Fiber Technol.* **35** 108
- [2] Xiao P P, Wang B 2022 *Opt. Commun.* **508** 127709
- [3] Bradley J D B, Pollnau M 2010 *Laser Photonics Rev.* **5** 368
- [4] Kish F, Lal V, Evans P, Corzine S W, Ziari M, Butrie T, Reffle M, Tsai H S, Dentai A, Pleumeekers J, Missey M, Fisher M, Murthy S, Salvatore R, Samra P, Demars S, Kim N, James A, Hosseini A, Studenkov P, Lauer mann M, Going R, Lu M, Zhang J, Tang J, Bostak J, Vallaitis T, Kuntz M, Pavinski D, Karanicolas A, Behnia B, Engel D, Khayam O, Modi N, Chitgarha M R, Mertz P, Ko W, Maher R, Osenbach J, Rahn J T, Sun H, Wu K T, Mitchell M, Welch D 2018 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **24** 6100120
- [5] Chen Z P, Shu H W, Wang X J 2017 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **47** 127301 (in Chinese) [陈子萍, 舒浩文, 王兴军 2017 中国科学: 物理学 力学 天文学 **47** 127301]
- [6] Yan K L, Vu K, Madden S 2015 *Opt. Lett.* **40** 796
- [7] Yan K L, Vu K, Wang R P, Madden S 2016 *Opt. Express* **24** 23304
- [8] Demirtas M, Ay F 2020 *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **26** 9801801
- [9] Yang J, van Daltsen K, Wörhoff K, Ay F, Pollnau M 2010 *Applied Physics B* **101** 119
- [10] Zhang Z, Liu R X, Wang W, Yan K L, Yang Z, Song M Z, Wu D D, Xu P P, Wang X S, Wang R P 2023 *Opt. Lett.* **48** 5799
- [11] Rönn J, Zhang W, Autere A, Leroux X, Pakarinen L, Alonso-Ramos C, Säynätjoki A, Lipsanen H, Vivien L, Cassan E, Sun Z 2019 *Nat. Commun.* **10** 432
- [12] Hu J J, Tarasov V, Agarwal A, Kimerling K 2007 *Opt. Express* **15** 2307
- [13] Pelusi M D, Luan F, Madden S, Choi D Y, Bulla D A, Luther-Davies B, Eggleton B J 2010 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **22** 3
- [14] Vu A T, Vu A N, Grunwald T, Bergs T 2020 *Journal of the American Ceramic Society* **103** 2791
- [15] Nayak R, Gupta V, Dawar A L, Sreenivas K 2003 *Thin Solid Films* **445** 118
- [16] Pietralunga S M, Lanata M, Ferè M, Piccinin D, Cusmai G, Torregiani M, Martinelli M 2008 *Opt. Express* **16** 21662
- [17] Frankis H C, Kiani K M, Su D, Mateman R, Leinse A, Bradley J D B 2018 *Opt. Lett.* **44** 118
- [18] Madden S J, Vu K T 2009 *Opt. Express* **17** 17645
- [19] Foster M A, Moll K D, Gaeta A L 2004 *Opt. Express* **12** 2880
- [20] Wu J, Yang Z, Wei T X, Zhang Z, Wang W, Liu R X, Wang R P 2023 *Appl. Laser* **43** 127 (in Chinese) [邬健, 杨振, 魏腾秀, 张政, 王威, 刘瑞雪, 王荣平 2023 应用激光 **43** 127]
- [21] Liu R X, Zhang Z, Yang Z, Wang W, Yan K L, Song M Z, Wang R P 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 151109
- [22] Liu R X, Zhang Z, Wu J, Yang Z, Wang W, Wei T X, Wang R P 2023 *Acta Photonica Sin.* **52** 1 (in Chinese) [刘瑞雪, 张政, 邬健, 杨振, 王威, 魏腾秀, 王荣平 2023 光子学报 **52** 1]
- [23] Wang W, Wei T X, Zhang Z, Yang Z, Liu R X, Yan K L, Cai D, Yang X Y, Xu P P, Wang X S, Wang R P 2023 *Opt. Lett.* **48** 5715
- [24] Saikumar A K, Nehate S D, Sundaram K B 2019 *ECS J. Solid State Sci. Technol.* **8** 3064
- [25] Liang H W, Chen Y P, Xia X C, Zhang C, Shen R S, Liu Y, Luo Y M, Du G T 2015 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **39** 582
- [26] Wei T X, Yang Z, Wu J, Sun Y H, Wang R P 2022 *Acta Photonica Sin.* **51** 117 (in Chinese) [魏腾秀, 杨振, 邬健, 孙元欢, 王荣平 2022 光子学报 **51** 117]
- [27] Lu R C, Link S, Zhang S B, Breen M, Gong S B 2019 *J. Microelectromech. Syst.* **28** 569

Erbium-doped tellurium oxide ridge waveguides for optical amplification

YANG Jiaqi LONG Zhe WANG Wei NIU Lei WANG Rongping[†]

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

(Received 13 May 2025; revised manuscript received 11 June 2025)

Abstract

The rapid advancement of information technology has sparked an exponential demand for high-speed, large-capacity data transmission and processing. Traditional electronic communication systems face inherent limitations such as bandwidth constraints and electromagnetic interference, prompting people to shift toward photonic technologies. Integrated optical waveguides, as core components of on-chip photonic systems, enable efficient light confinement and manipulation at microscale dimensions, offering advantages in miniaturization, low power consumption, and high compatibility with existing optical communication infrastructure. Among these, erbium-doped waveguide amplifiers (EDWAs) have emerged as critical active devices for signal amplification in the 1550 nm communication band, leveraging the radiative transitions of Er^{3+} ions to achieve optical gain. Numerous studies have shown that the fluorescence performance of Er^{3+} is closely related to the factors such as doping method, preparation and annealing conditions. Besides, the performance of such amplifiers heavily relies on the choice of host materials, which must exhibit low optical loss, high rare-earth ion solubility, and compatibility with complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) fabrication processes. Tellurium dioxide (TeO_2), with its high refractive index (2.1–2.4), broad transparency range (0.33–5 μm), exceptional chemical stability, and low phonon energy, has shown significant promise as a superior alternative to traditional materials such as silicon nitride (Si_3N_4) and aluminum oxide (Al_2O_3). This study focuses on the development of erbium-doped TeO_2 ($\text{Er}:\text{TeO}_2$) ridge waveguides for on-chip optical amplification. The $\text{Er}:\text{TeO}_2$ thin films are deposited via radio frequency (RF) magnetron sputtering using high-purity Te and Er targets. The key deposition parameters, including Er_2O_3 target sputtering power (10–30 W), Ar/O_2 gas flow ratio (1:1 to 5:1), and post-deposition annealing conditions (200–300 °C under oxygen atmosphere), are systematically optimized to improve photoluminescence properties. Scanning electron microscopy (SEM) and fluorescence spectroscopy are employed to evaluate film morphology and emission characteristics. A bilayer waveguide structure is designed to mitigate surface roughness induced by direct etching of the Er-doped layer. The lower $\text{Er}:\text{TeO}_2$ active layer (500 nm in thickness) and upper undoped TeO_2 cladding layer (150 nm in thickness) are patterned by using ultraviolet lithography and plasma etching ($\text{O}_2/\text{Ar}/\text{CHF}_3$ gas mixture), achieving a ridge width of 2 μm . Optical confinement and mode field distribution are simulated by using finite-difference eigenmode (FDE) analysis, confirming effective light-matter overlap within the Er-doped region. Experimental results reveal that the optimal $\text{Er}:\text{TeO}_2$ film, deposited at an Er target power of 20 W and an Ar/O_2 flow ratio of 5:1, and annealed at 250 °C for 10 hours, exhibits a photoluminescence intensity of 3.5×10^6 photon counts at 1545 nm—nearly two orders of magnitude higher than non-annealed samples. Oxygen annealing effectively activates Er^{3+} ions while passivating oxygen vacancies, which is critical for minimizing non-radiative recombination. Excessive Er doping (30 W in sputtering power) leads to ion clustering and fluorescence quenching, highlighting the importance of controlled dopant concentration. Surface morphology analysis via SEM and optical microscopy confirms smooth, crack-free films with minimal particulate contamination, which is

[†] Corresponding author. E-mail: wangrongping@nbu.edu.cn

essential for low-loss waveguide fabrication. Waveguide performance is characterized by using the cut-back method at 1310 nm, yielding a propagation loss of 0.607 dB/cm for a 0.5 cm-long device. However, a coupling loss of 6.34 dB/facet is observed due to rough end-faces from mechanical dicing, highlighting the need for post-fabrication polishing or anti-reflective coatings. Amplification tests at 1545 nm under 980 nm pumping demonstrate an internal gain of 7.2 dB/cm at a pump power of 88.45 mW, with gain saturation observed beyond 90 mW. The broadband emission spectrum (80 nm full-width at half-maximum) further validates Er:TeO₂'s potential for wideband amplification in the C-bands. In summary, this study elucidates the advantages of erbium-doped tellurium oxide (Er:TeO₂) ridge waveguides as on-chip optical amplifiers, optimizes their deposition and annealing protocols, and designs a bilayer waveguide structure. The achieved low propagation loss and significant internal gain highlight the compatibility of materials with photonic integrated circuits (PICs). Future efforts will focus on improving the quality of waveguide endface, enhance pump efficiency, and scaling device lengths to achieve practical net gains for telecommunications and quantum photonic applications. These advancements render Er:TeO₂ a cornerstone material for next-generation compact, high-performance photonic systems.

Keywords: optical properties, erbium-doped waveguide, optical amplifier, TeO₂

PACS: 42.60.Lh, 42.82.Et, 42.60.Da

DOI: [10.7498/aps.74.20250624](https://doi.org/10.7498/aps.74.20250624)

CSTR: [32037.14.aps.74.20250624](https://cstr.cn/32037.14.aps.74.20250624)



用于光学放大的掺铒氧化碲脊型波导研究

杨家琦 龙浙 王威 牛磊 王荣平

Erbium-doped tellurium oxide ridge waveguides for optical amplification

YANG Jiaqi LONG Zhe WANG Wei NIU Lei WANG Rongping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 164208 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20250624

CSTR: 32037.14.aps.74.20250624

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250624>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于不可信纠缠源的高斯调制连续变量量子密钥分发

Gaussian-modulated continuous-variable quantum key distribution based on untrusted entanglement source

物理学报. 2023, 72(4): 040301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221902>

石英基L波段扩展掺铒光纤及其放大性能

Silicate-based erbium-doped fiber extended to L-band and its amplification performance

物理学报. 2022, 71(15): 154204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220503>

基于M型掺铒光纤的近单模2 kW光纤放大器

Near-single-mode 2-kW fiber amplifier based on M-type ytterbium-doped fiber

物理学报. 2022, 71(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211751>

扭转变形对掺金黑磷烯电子结构和光学性质的影响

Effect of twisting deformation on electronic structure and optical properties of gold-doped black phosphorene

物理学报. 2021, 70(22): 226301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210795>

基于金属纳米球等离子增强的高效钙钛矿/硅电池设计

Design of high efficiency perovskite/silicon tandem solar cells based on plasmonic enhancement of metal nanosphere

物理学报. 2022, 71(3): 038801 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211585>

基于四波混频过程的纠缠光放大

Amplification of entangled beam based on four-wave mixing process

物理学报. 2022, 71(5): 050301 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211324>