

基于分段级联多模干涉的 Ta_2O_5 980/1550 nm 波分复用/解复用器*

何希文¹⁾²⁾ 马德岳¹⁾²⁾ 张政³⁾ 王荣平³⁾刘继桥¹⁾²⁾ 陈卫标¹⁾²⁾ 周治平^{1)4)†}

1) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 空天激光技术与系统部, 上海 201800)

2) (中国科学院大学, 材料与光电研究中心, 北京 100049)

3) (宁波大学, 高等技术研究院, 宁波 315211)

4) (北京大学电子学院, 北京 100871)

(2024 年 9 月 5 日收到; 2024 年 12 月 3 日收到修改稿)

提出一种紧凑的基于多模干涉效应的氧化钽 (Ta_2O_5) 波长双工器, 用于实现 980 和 1550 nm 波长的复用和解复用. 该器件采用对称干涉和配对干涉级联的混合多模干涉波导结构, 在不利用亚波长光栅等复杂结构调控泵浦光和信号光拍长的基础上, 将分段多模干涉波导的总长度缩短为普通配对型多模干涉波导结构的 1/3. 采用三维有限时域差分 (3D-FDTD) 工具对建立的模型进行分析和优化, 结果表明所设计的 MMI 型双工器具有较低的插损和较高的工艺容差性, 在 980 nm 处插损为 0.4 dB, 1550 nm 处插损为 0.8 dB, 消光比均优于 16 dB. 该器件在 1550 nm 波长周围的 1 dB 带宽达 150 nm, 在 980 nm 波长周围的 1 dB 带宽达 70 nm. 文中设计的多级干涉结构极大地降低了 MMI 器件的设计难度并缩小了 980/1550 nm 波分复用/解复用器的整体尺寸, 有望应用在片上集成的掺铒波导放大器和激光器领域. 此外, 不同多模干涉机制级联的设计思路为分离两个中心波长相隔较远的光信号提供了技术参考, 在通信波段和中红外波段波分复用/解复用器件上具有潜在的应用价值.

关键词: 多模干涉, 级联, 波分复用, 氧化钽**PACS:** 42.79.-e, 42.82.-m**DOI:** 10.7498/aps.74.20241243**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241243

1 引言

硅基光电子芯片正朝着大规模集成和功能多样化发展^[1-3], 然而, 更高的集成度和更多的功能器件往往伴随着更大的片上损耗. 光波导放大器作为硅基光电子芯片的一种重要元器件, 不仅可以有效补偿不同器件间的传输和耦合损耗, 而且是片

上激光器的基础^[4]. 由于铒离子 (Er^{3+}) 的发光中心 (约 1.55 μm) 恰好与常用的光通信波段匹配, 掺铒/铒镱共掺波导放大器 (EDWA/EYCDWA) 获得了国内外众多科研团队的广泛关注, 并在相关领域取得了丰硕的研究成果^[5-10].

EDWA/EYCDWA 通常包括增益介质和信号/泵浦光波分复用器 (WDM) 两个部分^[11]. 信号光和泵浦光经过 WDM 耦合后进入到增益介质中,

* 国家自然科学基金 (批准号: 62035001)、中国科学院国际伙伴计划 (批准号: 18123KYSB20210013) 和上海市“科技创新行动计划”科技支撑碳达峰碳中和专项 (批准号: 22dz208700) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zjzhou@pku.edu.cn

通过受激辐射过程产生和信号光同频的光子以实现信号光的放大. 作为 EDWA 最核心的部分, 增益介质的研究非常广泛, 近几年涌现了一批性能优秀的增益介质, 包括掺铒氮化硅^[5,12,13]、掺铒氧化铝^[7,8,14]、掺铒铌酸锂^[9,10,15]、掺铒氧化钽^[16,17]等. 和增益介质相比, 目前关于 980 nm 泵浦光/1550 nm 信号光复用和解复用器件的研究较少^[18–20]. 一方面在于之前的波导放大器并非全片上集成的, 通常使用光纤耦合器在片外进行 980/1550 nm 的耦合后, 再传输到掺铒波导中; 另一方面, 980 nm 和 1550 nm 光谱分离得较远, 在较紧凑的芯片面积内实现信号光和泵浦光的高效低损耦合难度较大.

定向耦合器 (directional coupler, DC)^[21,22]、Y 分支 (Y branch, Y)^[23–25]、马赫-曾德尔干涉仪 (Mach-Zehnder interferometer, MZI)^[26,27] 及阵列波导光栅 (arrayed waveguide grating, AWG)^[28,29] 等均可以实现不同波长光信号的复用和解复用. 和上述器件相比, MMI 型复用/解复用器具有高工艺容差性、低插损、大带宽等优点, 被广泛用于片上不同波长的复用与解复用^[30–32]. 但是, 目前大多数的片上 MMI 型波分复用/解复用器件主要是针对 1310/1550 nm 设计, 在绝缘体上硅平台 (SOI) 上实现的. 考虑到硅波导对 980 nm 的泵浦光有较强的吸收, 而泵浦光的耦合效率对光波导放大器的增益又十分关键, 有必要设计其他平台上的基于多模干涉效应的 980/1550 nm 波分复用/解复用器, 用于片上光波导放大器中的信号光和泵浦光的耦合. 目前, 已有基于 SiO₂-SiON 和 Si₃N₄ 的 MMI 型 980/1550 nm 波分复用/解复用器报道^[18–20], 尽管实现了低于 1 dB 的插损和 -20 dB 左右的串扰, 但多模干涉波导的长度均超过 450 μm , 整体尺寸较大. Ta₂O₅ 是一种很有潜力的 CMOS 兼容材料, 具有较低的传输损耗^[33] 和覆盖 300 nm—10 μm 的超宽透明窗口, 已经有很多基于氧化钽材料的无源和有源器件相关工作发表^[34–38]. 但是, 目前尚未有文献报道过基于 Ta₂O₅ 平台的波分复用/解复用器件.

本文提出了一种紧凑的基于多模干涉效应的 Ta₂O₅ 980/1550 nm 波长复用/解复用器. 该器件采用分段级联的多模干涉波导结构, 通过一个基于对称型干涉机制和一个基于配对型干涉机制的 MMI 级联, 在不利用亚波长光栅等复杂结构调控泵浦光和信号光拍长的基础上, 极大地缩短了多模

干涉波导的长度, 可以在约 70 μm $\times$ 4.5 μm 的干涉区域内实现 980 nm 和 1550 nm 波长光信号的分离. 采用时域有限差分 (finite-difference time-domain, FDTD) 工具对建立的模型进行分析和优化, 结果表明所设计的 MMI 双工器在 980 nm 处插损为 0.4 dB, 在 1550 nm 处插损为 0.8 dB, 并且两个波长的消光比均大于 16 dB. 另外, 该双工器具有较大的 1 dB 带宽, 以 1550 和 980 nm 为中心波长的 1 dB 工作带宽分别为 150 和 70 nm. 文中设计的分段级联 MMI 结构在性能上可以与先前报道的基于 Si₃N₄ 平台的 980/1550 nm 复用/解复用器媲美; 由于不需要严格满足泵浦光和信号光拍长的最小公倍数关系, 极大地缩小了 980/1550 nm 波分复用/解复用器的整体尺寸, 有望应用在片上集成的掺铒波导放大器和激光器领域. 此外, 这种分段的、不同多模干涉机制级联的思路降低了 MMI 器件的设计难度, 很适合用来分离两个中心波长相隔较远的光信号, 为通信波段和中红外波段波分复用/解复用器件的设计提供了参考.

2 分段多模干涉波分复用/解复用器件的设计

2.1 MMI 工作原理

多模干涉器件基于多模波导的自映像效应, 即任一输入光场在多模波导中会周期性地出现输入光场的单个或多个像, 这是由输入光场在多模波导中激发出的不同模式的光场相互干涉导致的. 基模和一阶模的拍频长度 L_π 可以由下式^[19]表示:

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0}, \quad (1)$$

其中, β_0 和 β_1 代表最低阶的两个模式的传播常数, W_e 为多模波导的有效宽度. 根据入射光场的初始位置, 可以将 MMI 分为一般干涉型、配对干涉型 and 对称干涉型, 三种干涉机制对应的输入光场条件和成像位置如表 1 所列^[39], 表中 C_ν 和 ν 分别代表第 ν 阶模式的激励系数和模式的阶数. 从表 1 可以看出, 配对干涉和对称干涉具有更短的多模干涉区域长度, 第 1 重镜像出现的位置分别为 L_π 和 $\frac{3}{4}L_\pi$, 考虑到 1×2 MMI 波分复用器的实际需要和器件的整体尺寸大小, 本文选用对称型和配对型 MMI 级联完成后续的器件设计.

表 1 不同干涉机制 MMI 的输入条件和成像位置^[39]Table 1. Input conditions and imaging positions of MMI with different interference mechanisms^[39].

	一般干涉	配对干涉	对称干涉
输入 × 输出	$N \times N$	$2 \times N$	$1 \times N$
第1个单重像位置	$3L_\pi$	L_π	$3L_\pi/4$
第1个N重像位置	$3L_\pi/N$	L_π/N	$3L_\pi/(4N)$
限制条件	—	$C_\nu = 0, \nu = 2, 5, 8 \dots$	$C_\nu = 0, \nu = 1, 3, 5 \dots$
输入位置	任意	$\pm W_e/6$	0

2.2 分段多模干涉区域器件设计

本文采用 400 nm 厚的 Ta_2O_5 材料作为波导芯层, 为了实现泵浦光 $\lambda_p = 980 \text{ nm}$ 和信号光 $\lambda_s = 1550 \text{ nm}$ 的分离, 典型的多模干涉区域的长度 L_M 应该满足泵浦光和信号光拍长的最小公倍数关系, 即 (2) 式的关系^[18]:

$$L_M = pL_\pi(\lambda_p) = qL_\pi(\lambda_s), \quad (2)$$

其中, p 为奇数 (1, 3, 5, ...), q 为偶数 (2, 4, 6, ...), 泵浦光和信号光的拍长之比为 q/p . 理论上只要找到合适的 q 值和 p 值, 就能实现两个波长的分离.

图 1 给出了利用 EME 仿真的不同多模波导宽度下对应的 q/p 值曲线图, 可以看出当多模波导宽度为 2—14 μm 时, $q/p \approx 1.6 = 8/5$, 这意味着使用不分段的多模干涉区域至少需要 8 个信号光拍频长度才能将两个波长分开, 但显然这样的设计是不能够满足器件小型化和集成化的要求的. 因此, 如何通过简单的设计, 有效分离两个波长十分重要.

在典型配对型多模干涉耦合器结构的基础上, 本文设计了对称型干涉和配对型干涉级联的多模干涉结构, 将多模波导一分为二. 如图 2 所示, 设计的分段 MMI 器件包括输入波导、多模干涉波导和输出波导三个部分. 其中输入、输出波导使用锥形波导结构, 主要原因在于锥形波导有利于降低插损, 但同时锥形波导会使得输出波导间隔太近, 导致串扰增强. 增大多模波导宽度可以有效降低串扰, 但会导致器件的整体尺寸变大. 因此, 需要合

理设计多模波导的宽度以实现器件整体尺寸和插损、串扰等性能参数的权衡. 两级级联的多模干涉波导中, 第一段多模干涉波导 (MMI 1) 采用对称型多模干涉机制, 其长宽分别为 L_{M1} 和 W_{M1} ; 第二段多模干涉波导 (MMI 2) 采用配对型多模干涉机制, 其长宽分别为 L_{M2} 和 W_{M2} . 从图 2 可以看出, 第一级 MMI 和第二级 MMI 首尾相连, 即 MMI 1 的输出位置与 MMI 2 的输入位置首尾重合. 如表 1 中不同干涉机制的输入和成像位置的描述, 对称型干涉输出位置在多模波导的正中, 而配对型干涉的输入位置在多模波导的 $\pm W_e/6$ 处, 也就是说, MMI 1 和 MMI 2 的宽度关系满足下式:

$$\frac{W_{M1}}{2} = \frac{W_{M2}}{2} - \frac{W_{M2}}{6}. \quad (3)$$

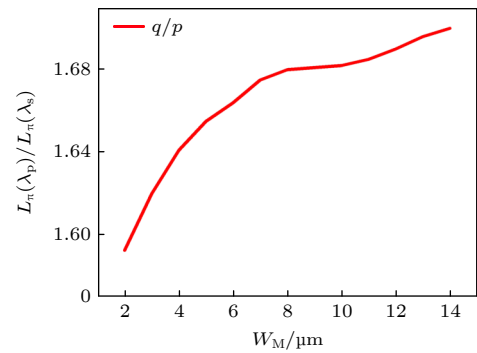


图 1 泵浦光和信号光的拍长比与多模波导宽度规律曲线

Fig. 1. Relationship curve between beat length ratio (q/p) and multimode waveguide width.

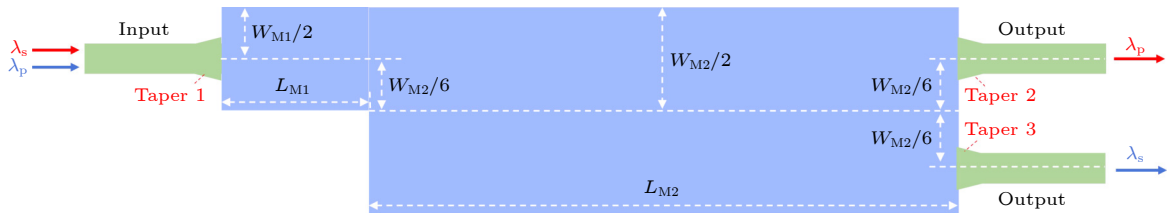


图 2 分段多模干涉耦合器结构示意图

Fig. 2. Schematic diagram of two-section multimode interference coupler.

以信号光 (λ_s) 和泵浦光 (λ_p) 为例, 两级多模干涉波导的分割点位于长波长出现第一个单重像的位置, 输出位置为短波长在 MMI 2 中出现第一个单重像的位置, 即 $L_{\pi-M1}(\lambda_s)$ 处为 MMI 1 和 MMI 2 的分割点, $L_{\pi-M1}(\lambda_p) + L_{\pi-M2}(\lambda_p)$ 处为最终输出位置. $L_{\pi-M1}(\lambda_s)$, $L_{\pi-M2}(\lambda_s)$ 和 $L_{\pi-M1}(\lambda_p)$, $L_{\pi-M2}(\lambda_p)$ 分别代表信号光和泵浦光在 MMI 1, MMI 2 中的拍长, 它们之间应满足:

$$\begin{aligned} & \frac{3L_{\pi-M1}(\lambda_s)}{4} + L_{\pi-M2}(\lambda_s) + M \\ &= \frac{3L_{\pi-M1}(\lambda_p)}{4} + L_{\pi-M2}(\lambda_p), \end{aligned} \quad (4)$$

(4) 式中引入了一个新的变量 M , 为分段级联多模干涉结构参数的优化提供了一个新的自由度. 通过调整 MMI 1 的长宽, 可以找到合适的 M 值, 使得信号光和泵浦光在输出位置上更接近, 以避免两个波长的拍长需要满足最小公倍数关系导致整体尺寸偏大. 当 M 值越大时, 泵浦光在进入第二级 MMI 时激发出的高阶模分量更多, 第二级 MMI 的长度越短, 器件整体长度越短. 而当 M 越小时, 泵浦光越接近基模 (第 1 重镜像点) 入射进第二级 MMI, 整体长度更长. 但是 M 值的调整除了会影响器件长度外, 对性能也有一定的影响. 在实际的设计过程中, 我们以输出端的透过率为优化目标, 在确定 MMI 1 的长宽后, 通过调整第二段多模干涉区域的长度以及输入、输出端锥形波导的长宽, 可以获得更低的插损值. 信号光和泵浦光的输出位置位于 $\pm W_{M2}/6$ 处. 使用 FDTD 对多模干涉区域结构参数进行优化后, 最终确定 MMI 1 和 MMI 2 宽度分别为 3 和 4.5 μm , 长度分别为 13 和 52 μm , M 的长度为 4.8 μm . 分段多模干涉波导结构的设计极大地缩短了器件的整体长度, 其长度不到普通配对型多模干涉器件的 30% (约为 250 μm 缩短为 70 μm), 并且整个器件没有引入复杂的结构, 很大程度上降低了器件的设计和加工难度.

3 分析与讨论

3.1 泵浦光和信号光波长分离功能的实现

为了直观地判断分段级联多模干涉耦合器的波分复用和解复用效果, 使用 FDTD 仿真 980 nm 泵浦光和 1550 nm 信号光分别输入的光场分布图, 如图 3 所示. 从光场分布可以看出, 多模干涉区域

分为两级, 第一级为对称型干涉区域, 第二级为配对型干涉区域. 输入模场经过锥形波导结构平稳过渡, 进入多模干涉区域激发出高阶模并发生多模干涉现象. 由于第一级干涉区域的长度为 1550 nm 的信号光出现第一个单重像的长度, 因此, 信号光以基模入射进第二级多模干涉区域; 而 980 nm 泵浦光由于拍长比信号光要长, 则以高阶模入射进第二级多模干涉区域. 在第二级多模干涉区域末端, 泵浦光和信号光分别通过输出端的锥形波导结构从 cross 端口和 bar 端口输出, 输出端较窄的直波导结构起到降低串扰和滤波的效果, 从而实现 980 nm 和 1550 nm 的高效分离.

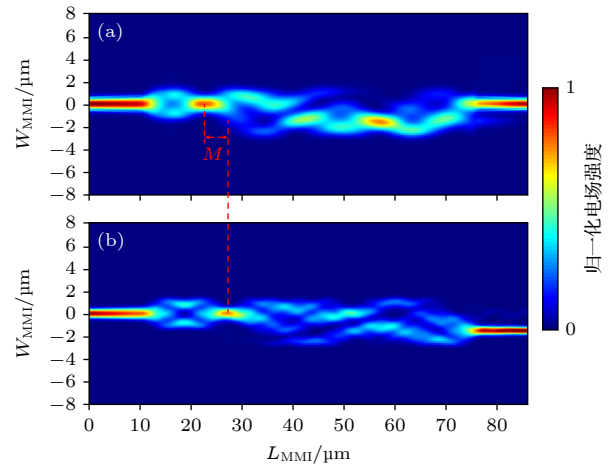


图 3 分段 MMI 的光场分布图 (a) 1550 nm; (b) 980 nm
Fig. 3. The field distributions of the two-section MMI: (a) 1550 nm; (b) 980 nm.

3.2 器件性能分析

对波分复用和解复用器来说, 衡量性能最重要的指标是插损 (insertion loss, IL) 和串扰 (crosstalk, CT), IL 和 CT 的定义如下 [40]:

$$IL(\text{dB}) = -10\lg\left(\frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}\right), \quad (5)$$

$$CT(\text{dB}) = 10\lg\left(\frac{P_{\text{out1}}}{P_{\text{out2}}}\right), \quad (6)$$

P_{in} 是输入端口的功率, P_{out1} 和 P_{out2} 分别是 cross (bar) 和 bar (cross) 端口的输出功率. 以 980 nm 泵浦光为例, 输出端口为 cross 端口, 则 P_{out1} 为 bar 端口的输出功率, P_{out2} 为 cross 端口的输出功率. 对波导放大器来说, 我们希望不仅仅只是放大单个波长, 而是在一段较宽的频谱范围内都有放大. 因此, 对波长双工器来说, 需要考虑波长变化对器件

性能的影响。

图4为设计的多级 MMI 在 1400—1600 nm 和 900—1100 nm 波长范围内的传输谱线图, 其中图4(a)为信号光 1550 nm 波段对应的 IL 和 CT; 图4(b)为泵浦光 980 nm 波段对应的 IL 和 CT. 可以看出信号光的 1 dB 带宽高达 150 nm 以上, 1550 nm 中心波长处插损低至 0.75 dB, 对应的串扰小于 23 dB. 泵浦光的 1 dB 带宽相对信号光较窄, 但仍有将近 70 nm 的频谱宽度, 并且 980 nm 中心波长处的损耗约为 0.3 dB, 对应的串扰约为 17 dB. 显然, 本文设计的分段干涉的 MMI 具有带宽大的优点, 可以在较宽的工作波长范围内保持较高的性能。

3.3 工艺容差性分析

在分段多级干涉 MMI 的实际制备过程中, 由于所设计的结构均为一个高度, 因此只需要单步的刻蚀工艺就可以实现. 但是, 由于薄膜沉积的高度

以及光刻产生的工艺误差不可避免, 需要评估所设计的 MMI 的工艺容差性, 主要包括薄膜厚度偏差 (thickness)、第一级 MMI 的长度 (L_{M1}) 和宽度 (W_{M1}) 以及第二级 MMI 的长度 (L_{M2}) 和宽度 (W_{M2}) 对器件性能的影响。

图5所示为薄膜厚度变化时, 对应 MMI 器件的插损和串扰变化情况. 从图中可以看出, 所设计的 MMI 器件对薄膜厚度的容差性较好, 当薄膜厚度在 350—450 nm 范围内时, 信号光和泵浦光的插损均小于 1 dB, 并且较 400 nm 厚度中心值 IL 劣化不到 0.2 dB. 在 100 nm 的厚度范围内, 信号光和泵浦光均保持较低的串扰, 其中信号光低于 19 dB, 泵浦光低于 16 dB.

图6和图7所示为器件性能参数随第一级 MMI 结构参数和第二级 MMI 结构参数的变化. 其中, 图6(a)和图6(b)分别为第一级 MMI 的不同宽度和长度对器件 IL/CT 的影响, 图7(a)和图7(b)则分别表示在第二级 MMI 的不同宽度和

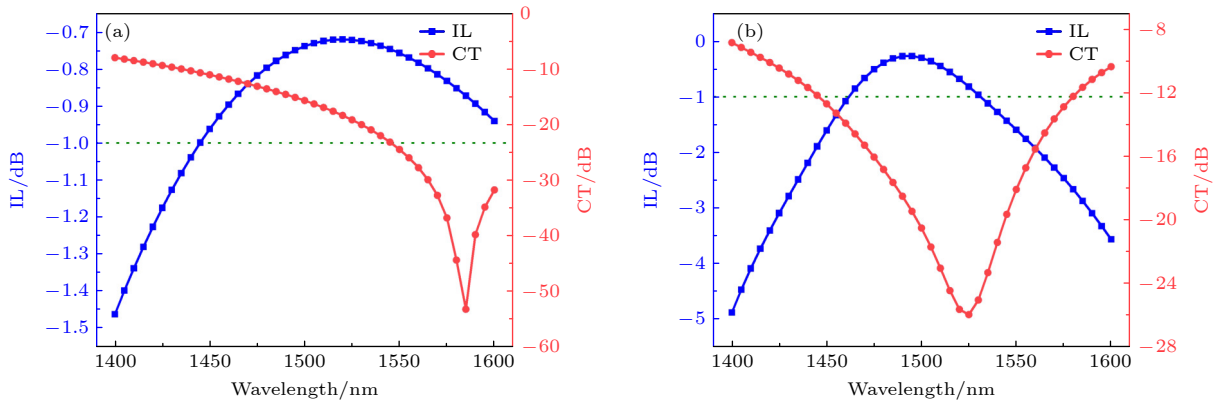


图4 分段 MMI 的传输谱线图 (a) 1550 nm 波段的 IL/CT; (b) 980 nm 波段的 IL/CT

Fig. 4. Transmission spectrum of the two-section MMI: (a) IL/CT in 1550 nm band; (b) IL/CT in 980 nm band.

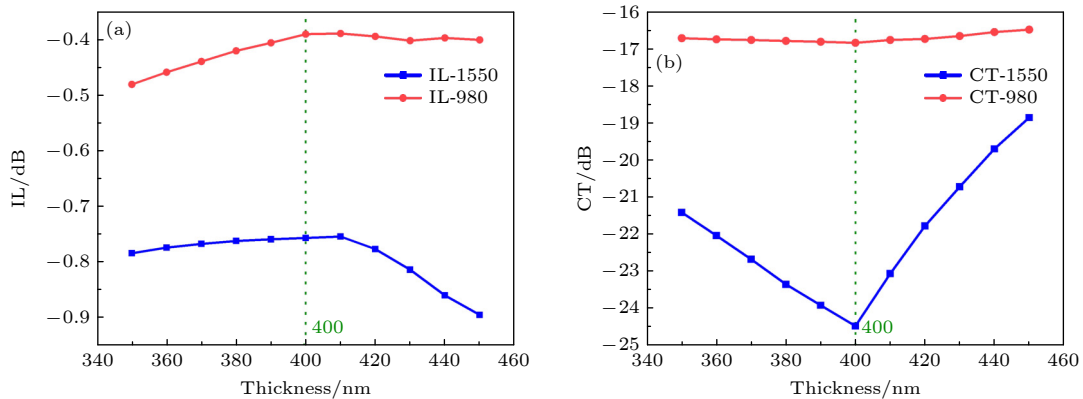
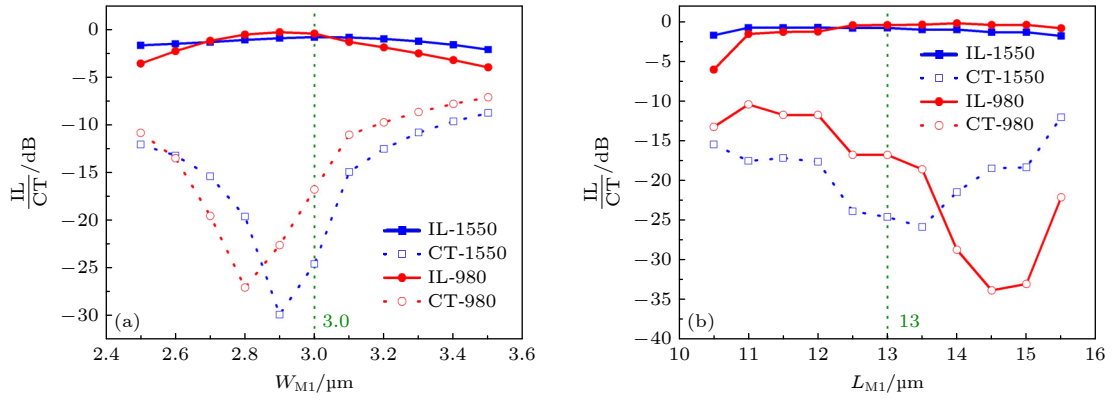
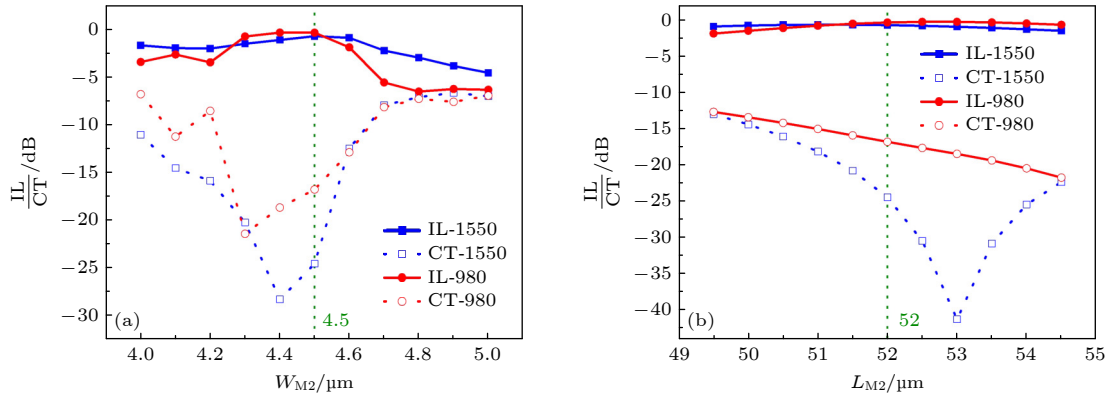


图5 性能参数随薄膜厚度的变化 (a) IL; (b) CT

Fig. 5. Performances with vary film thickness: (a) IL; (b) CT.

图6 性能参数随第1级MMI结构参数的变化 (a) W_{M1} ; (b) L_{M1} Fig. 6. Performances with vary 1 st level MMI structural parameters: (a) W_{M1} ; (b) L_{M1} .图7 性能参数随第2级MMI结构参数的变化 (a) W_{M2} ; (b) L_{M2} Fig. 7. Performances with vary 2 nd level MMI structural parameters: (a) W_{M2} ; (b) L_{M2} .

长度下对应的器件的 IL/CT 值. 图 6(a) 和图 7(a) 中绿色虚线代表设计的两级 MMI 的宽度中心值: $3 \mu\text{m}$ 和 $4.5 \mu\text{m}$, 可以看出, 第一级 MMI 的宽度在偏离中心值 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 的范围内, IL 和 CT 的劣化较少, 尤其是信号光 1550 nm 几乎没有劣化; 而在距离中心值 $0.2\text{--}0.5 \mu\text{m}$ 范围内, 泵浦光 980 nm 的 IL 劣化较多, 并且信号光和泵浦光之间的串扰增强, 这主要是因为第一级 MMI 宽度 W_{M1} 变化较大, 导致第二级 MMI 的入射位置和第一级 MMI 的出射位置没有满足配对干涉 $\pm \frac{W_{M2}}{6}$ 的入射条件, 造成了两级 MMI 的错位, 使性能劣化.

同样, 在图 7(a) 中, 第二级 MMI 的宽度变化较大也会导致与第一级 MMI 的错位, 造成性能劣化. 在实际的加工过程中, 由于 MMI 1 和 MMI 2 是单次光刻, 不需要进行两级 MMI 结构的对准套刻, 实际上不会出现两级 MMI 在中间连接点之间的错位情况. 图 6(b) 和图 7(b) 中绿色虚线代表设计的两级 MMI 的长度中心值, 分别为 $13 \mu\text{m}$ 和 $52 \mu\text{m}$, 可以看出, 所设计的器件具有非常好的长

度容差性, 在中心长度附近 $5 \mu\text{m}$ 范围内, 信号光和泵浦光的 IL 均小于 1 dB , 串扰均小于 10 dB . 长度对串扰的影响较大, 主要是因为自镜像点有一定的宽度, 远离这个宽度自镜像点的成像质量较差, 并且有较大的串扰, 可以通过优化输入波导的宽度和 MMI 区域的宽度调节自镜像点的宽度和位置. 图 6(b) 中, $L_{M1} = 10.5 \mu\text{m}$ 时, 980 nm 泵浦光 IL 较差, 主要原因是我们取信号光出现第一个单重像的长度(约 $13 \mu\text{m}$) 作为第一段 MMI 的长度, 实际上这个点的长度本身是小于泵浦光出现第一个单重像长度(约 $17 \mu\text{m}$) 的. 如果第一段 MMI 的长度进一步减小到 $10.5 \mu\text{m}$, 会影响到泵浦光入射到第二段 MMI 的质量, 从而导致最终出射端的插损变大.

从本节的分析可以看出, 对称干涉和配对干涉级联的思路可以有效地缩小器件整体尺寸, 实现 980 nm 泵浦光和 1550 nm 信号光波长的高效分离. 此外, MMI 器件在工艺容差性上优势比较明显, 在一定加工误差范围内能保持较高的性能.

但是级联的思路使得对两级 MMI 的对准要求提升, 如果错位程度过大则会导致明显的性能劣化, 影响器件的正常使用. 在未来的设计中, 可以在两级 MMI 相连的位置设计特殊的结构, 使得多模干涉波导中的光场分布尽可能远离两级 MMI 相连的位置, 以减小拼接错位的影响.

4 结 论

本文提出一种基于 Ta₂O₅ 平台的分段级联干涉的紧凑型 980/1550 nm 波长双工器, 在约 70 μm $\times$ 4.5 μm 的多模干涉区域内实现了 980 nm 波段和 1550 nm 波段光信号的高效分离. 仿真结果表明, 所设计的 MMI 双工器在 980 nm 处插损约 0.4 dB, 在 1550 nm 处插损约 0.8 dB, 并且两个波长的消光比均大于 16 dB. 此外, 该双工器具有较大的工作带宽, 以 1550 和 980 nm 为中心波长的 1 dB 工作带宽分别为 150 和 70 nm. 本文采用对称干涉和配对干涉级联的混合多模干涉机制, 无需严格满足泵浦光和信号光拍长的最小公倍数关系, 在不利用亚波长光栅等复杂结构调控泵浦光和信号光拍长的基础上, 将多模干涉波导的总长度缩短为相同宽度下普通配对型多模干涉波导的 1/3. 文中设计的 980/1550 nm 波长双工器在片上掺铒/铒镱共掺波导放大器和激光器领域有潜在的应用价值, 并且这种分段的、混合级联干涉的设计思路极大地缩短了中心波长相隔较远的 (解) 波分复用器的设计难度, 为 800/1310 nm, 1550/2000 nm 等波段的复用和解复用器件的设计提供了参考.

参考文献

- [1] Shekhar S, Bogaerts W, Chrostowski L, Bowers J E, Hochberg M, Soref R, Shastri B J 2024 *Nat. Commun.* **15** 751
- [2] Gao D S, Zhou Z P 2022 *Front. Optoelectron.* **15** 27
- [3] Zhou Z P, Chen W B, He X W, Ma D Y 2023 *IEEE Photonics J.* **16** 0600109
- [4] Wang B, Zhou P Q, Wang X J, He Y D 2022 *Sci. China Inf. Sci.* **65** 162405
- [5] Liu Y, Qiu Z R, Ji X R, Lukashchuk A, He J J, Riemensberger J, Hafermann M, Wang R N, Liu J Q, Ronning C, Kippenberg T J 2022 *Science* **376** 1309
- [6] Bonneville D B, Frankis H C, Wang R J, Bradley J D 2020 *Opt. Express* **28** 30130
- [7] Rönn J, Zhang W W, Autere A, et al 2019 *Nat. Commun.* **10** 432
- [8] Mu J F, Dijkstra M, Korterik J, Offerhaus H, García-Blanco S M 2020 *Photonics Res.* **8** 1634
- [9] Liang Y T, Zhou J X, Liu Z X, Zhang H S, Fang Z W, Zhou Y, Yin D D, Lin J T, Yu J P, Wu R B, Wang M, Cheng Y 2022 *Nanophotonics* **11** 1033
- [10] Zhang Z H, Li S M, Gao R H, Zhang H S, Lin J T, Fang Z W, Wu R B, Wang M, Wang Z H, Hang Y, Cheng Y 2023 *Opt. Lett.* **48** 4344
- [11] Kik P, Polman A 1998 *MRS. Bull.* **23** 48
- [12] Liu Y, Qiu Z R, Ji X R, Bancora A, Lihachev G, Riemensberger J, Wang R N, Voloshin A, Kippenberg T J 2024 *Nat. Photonics* **18** 829
- [13] Qiu Z R, Ji X R, Liu Y, Hafermann M, Kim T, Olson J C, Ning W R, Ronning C, Kippenberg T J 2024 *Optical Fiber Communication Conference* San Diego, March 24–28, 2024 pM4A.5
- [14] Bonneville D B, Osornio-Martinez C E, Dijkstra M, García-Blanco S M 2024 *Opt. Express* **32** 15527
- [15] Bao R, Fang Z W, Liu J, Liu Z X, Chen J M, Wang M, Wu R B, Zhang H S, Cheng Y 2024 *Laser Photonics Rev.* **19** 2400765
- [16] 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
- [17] Subramanian A Z, Murugan G S, Zervas M N, Wilkinson J S 2012 *J. Lightwave Technol.* **30** 1455
- [18] Mu J F, Vázquez-Córdova S A, Sefunc M A, Yong Y S, García-Blanco S M 2016 *J. Lightwave Technol.* **34** 3603
- [19] Paiam M, Janz C, MacDonald R, Broughton J 1995 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **7** 1180
- [20] Han X Y, Pang F F, Cai H W, Qu R H, Fang Z J 2008 *Optik* **119** 69
- [21] Yang Y D, Li Y, Huang Y Z, Poon A W 2014 *Opt. Express* **22** 22172
- [22] He J H, Zhang M, Liu D J, Bao Y X, Li C L, Pan B H, Huang Y S, Yu Z J, Liu L, Shi Y C, Dai D X 2024 *Nanophotonics* **13** 85
- [23] Weissman Z, Nir D, Ruschin S, Hardy A 1995 *Appl. Phys. Lett.* **67** 302
- [24] Bucci D, Grelin J, Ghibaudo E, Broquin J E 2007 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **19** 698
- [25] Onestas L, Bucci D, Ghibaudo E, Broquin J E 2011 *IEEE Photonics Tech. Lett.* **23** 648
- [26] Chen S T, Fu X, Wang J, Shi Y C, He S L, Dai D X 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 2279
- [27] Sabri L, Nabki F, Ménard M 2024 *Opt. Express* **32** 10660
- [28] Pathak S, Dumon P, Van Thourhout D, Bogaerts W 2014 *IEEE Photonics J.* **6** 1
- [29] Pańnikowska A, Stopiński S, Kaźmierczak A, Piramidowicz R 2023 *J. Lightwave Technol.* **42** 2371
- [30] Liu L, Deng Q Z, Zhou Z P 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **29** 1927
- [31] Zhang S C, Ji W, Yin R, Li X, Gong Z S, Lv L Y 2017 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **30** 107
- [32] Han J L, Bao R, Wu R B, Liu Z X, Wang Z, Sun C, Zhang Z H, Li M Q, Fang Z W, Wang M, Zhang H S, Cheng Y 2024 *Nanophotonics* **13** 2839
- [33] Belt M, Davenport M L, Bowers J E, Blumenthal D J 2017 *Optica* **4** 532
- [34] Zhang C, Chen L, Lin Z L, Song J, Wang D Y, Li M X, Koksol O, Wang Z, Spektor G, Carlson D R, J Lezec H, Zhu W Q, Papp S B, Agrawal A 2024 *Light Sci. Appl.* **13** 23
- [35] Black J A, Streater R, Lamee K F, Carlson D R, Yu S P, Papp S B 2021 *Opt. Lett.* **46** 817
- [36] Dorche A E, Nader N, Stanton E J, Nam S W, Mirin R P 2023 *Optical Fiber Communication Conference* San Diego, March 05–09, 2023 pTu3C-6
- [37] Bankwitz J R, Wolff M A, Abazi A S, Piel P M, Jin L, Pernice W H, Wurstbauer U, Schuck C 2023 *Opt. Lett.* **48** 5783

- [38] Splitthoff L, Wolff M A, Grottke T, Schuck C 2020 *Opt. Express* **28** 11921
- [39] Li Z Y, Fan Z W, Cong Q Y, Zhou J J, Zeng X F, Zheng S N, Dong Y, Hu T, Zhong Q Z, Jia L X 2023 *Study on Optical Communications* **3** 53 (in Chinese) [李赵一, 范作文, 丛庆宇,

周敬杰, 曾宪峰, 郑少南, 董渊, 胡挺, 钟其泽, 贾连希 2023 光通信研究 **3** 53]

- [40] Wang J L, Chen Z Y, Chen H M 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 054206 (in Chinese) [汪静丽, 陈子玉, 陈鹤鸣 2020 物理学报 **69** 054206]

Ta₂O₅ 980/1550 nm wavelength multiplexer/demultiplexer based on segmented cascaded multimode interference^{*}

HE Xiwen¹⁾²⁾ MA Deyue¹⁾²⁾ ZHANG Zheng³⁾ WANG Rongping³⁾

LIU Jiqiao¹⁾²⁾ CHEN Weibiao¹⁾²⁾ ZHOU Zhiping^{1)4)†}

1) (Aerospace Laser Technology and Systems Department, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2) (Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3) (Advanced Technology Research Institute, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

4) (School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

(Received 5 September 2024; revised manuscript received 3 December 2024)

Abstract

On-chip erbium-doped/erbium-ytterbium co-doped waveguide amplifiers (EDWAs/EYCDWAs) have received extensive research attention in recent years. However, there has been relatively little research on integrated wavelength division multiplexing/demultiplexing devices for 980-nm pump light and 1550-nm signal light. This work aims to propose a compact Ta₂O₅ diplexer for 980/1550-nm wavelengths based on multimode interference effects. The device utilizes a structure that combines symmetric interference with a cascaded paired interference design, thereby reducing the total length of the segmented multimode interference waveguide to one-third that of a conventional paired multimode interference waveguide. This is achieved without using any complex structure, such as subwavelength gratings, to adjust the beat length of the pump and signal light. The three-dimensional finite difference time domain (3D-FDTD) tool is used to analyze and optimize the established model. The results demonstrate that the designed MMI diplexer has low insertion loss and high process tolerance, with an insertion loss of 0.4 dB at 980 nm and 0.8 dB at 1550 nm, and that the extinction ratios are both better than 16 dB. Moreover, the 1 dB bandwidth reaches up to 150 nm near the 1550 nm wavelength and up to 70 nm near the 980 nm wavelength. The segmented structure designed in this work greatly reduces both the difficulty in designing the MMI devices and the overall size of 980/1550 nm wavelength division multiplexers/demultiplexers. It is expected to be applied to on-chip integrated erbium-doped waveguide amplifiers and lasers. In addition, the segmented design method of cascading the hybrid multimode interference mechanism provides a technical reference for separating two optical signals with long center wavelengths such as 800/1310 nm and 1550/2000 nm, and has potential application value in communication and mid infrared diplexing devices.

Keywords: multimode interference, cascade, wavelength division multiplexing, Ta₂O₅

PACS: 42.79.-e, 42.82.-m

DOI: 10.7498/aps.74.20241243

CSTR: 32037.14.aps.74.20241243

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62035001), the International Partnership Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. 18123KYSB20210013), and the Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan, China (Grant No. 22dz208700).

† Corresponding author. E-mail: zjzhou@pku.edu.cn

基于分段级联多模干涉的 Ta_2O_5 980/1550 nm波分复用/解复用器

何希文 马德岳 张政 王荣平 刘继桥 陈卫标 周治平

Ta_2O_5 980/1550 nm wavelength multiplexer/demultiplexer based on segmented cascaded multimode interference

HE Xiwen MA Deyue ZHANG Zheng WANG Rongping LIU Jiqiao CHEN Weibiao ZHOU Zhiping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 024202 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241243

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241243>

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

基于拓扑优化的自由形状波分复用超光栅

Freeform wavelength division multiplexing metagrating based on topology optimization

物理学报. 2022, 71(22): 224204 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221013>

基于单光子计数反馈的低噪声光纤信道波分复用实时偏振补偿系统

Real-time polarization compensation system for wavelength division multiplexing in low noise fiber channel based on single photon counting feedback

物理学报. 2022, 71(13): 130306 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220120>

基于夹层结构的偏振无关 1×2 定向耦合型解复用器的设计

Design of polarization-insensitive 1×2 directional coupler demultiplexer based on sandwiched structure

物理学报. 2021, 70(1): 014202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200721>

一种基于三芯光子晶体光纤的宽带模分复用器的设计与研究

Design and research of a broadband mode-division multiplexer based on three-core photonic crystal fiber

物理学报. 2022, 71(4): 044206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211187>

Ti-V-Ta多主元合金辐照位错环形成的级联重叠模拟

Cascade overlap simulation of formation of dislocation loops in Ti-V-Ta multi-principal element alloy

物理学报. 2024, 73(22): 226102 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241074>

小型化涡旋光模式解复用器: 原理、制备及应用

Miniaturized optical vortex mode demultiplexer: Principle, fabrication, and applications

物理学报. 2023, 72(20): 204207 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20231521>