

基于悬空槽波导的高灵敏度折射率传感器

廖莎莎*, 赵帅, 张伍浩, 张艺达, 唐亮

重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065

摘要 介绍了一种基于绝缘体上硅(SOI)的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型高灵敏度折射率传感器。在该传感器中采用悬空槽(SSlot)波导作为传感臂,条形波导作为参考臂,利用两臂不同模式之间的干涉提高传感器的灵敏度。分析了MZI型传感器的工作原理,推导了灵敏度公式,通过灵活调节两臂长度和合理设计SSlot波导,实现了 9.824×10^4 nm/RIU的高灵敏度。该传感器还具有尺寸小、制造简单等优势,可广泛应用于生物医疗、环境监测等领域。

关键词 光谱学; 硅光子学; 折射率传感器; 马赫-曾德尔干涉仪; 灵敏度

中图分类号 TN256

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231445

1 引言

万物互联的发展使得越来越多的设备被连入网络,社会已经进入信息智能时代。计算机技术、通信技术和传感技术作为信息技术的三大支柱,代表了信息化、智能化程度。与计算机技术、通信技术相比,传感技术发展相对缓慢,为实现信息化、智能化,传感技术亟待研究和提升。在诸多传感器中,折射率传感器^[1-4]因被广泛应用于污水检测、气体检测、化学分析、环境监测等生物、化学、医疗、环保领域^[5-7],引起众多研究者的兴趣。随着光子集成技术的发展,越来越多的光子微型器件用于计算、通信、信号处理,采用集成材料实现光学折射率传感器已成为传感器领域的又一研究热点。常见的集成光学传感器通常采用III-V族半导体材料(如InP、InGaAsP等化合物型半导体材料)、Si材料、Si₃N₄材料和高分子聚合物材料等实现,具有体积小、损耗低、不易受环境干扰的优点。而采用Si材料实现的传感芯片因其与互补金属氧化物半导体(CMOS)工艺兼容的优势,更便于与传感系统的其他模块(如光源、调制模块、信号处理等)集成,因此具有重要的研究价值。

目前研究已经报道了多种基于硅基集成光波导结构的折射率传感器方案,大致可以分为如下几类:马赫-曾德尔干涉仪(MZI)型折射率传感器^[8-11]、亚波长光栅型折射率传感器^[12-13]、多模干涉耦合型折射率传感器^[14]和微环谐振器型折射率传感器^[15-16]。其中MZI型折射率传感器因其对分析物折射率的微小变化高度敏感,已成为应用广泛、常见的折射率传感器类型之

一。近年来,随着硅基集成技术的提高,其他微纳结构与MZI相结合的传感器方案不断涌现。2014年浙江大学何建军团队^[17]提出了一种使用游标效应的、基于级联微环和MZI的高灵敏度光学生物传感器,其灵敏度高达21500 nm/RIU。但是,该传感器方案中MZI的两臂长达5400 μm和5150 μm,同时带有级联微环,导致传感器尺寸较大;并且游标效应产生的包络波形检测难度大,容易出现误差。2021年中国地质大学吴志超团队^[18]提出了一种基于亚波长光栅的非对称MZI传感器,其灵敏度达到了40960 nm/RIU,检测限为 4.88×10^{-7} RIU。该方案利用亚波长光栅Bloch模式和条形波导TE₀模式的干涉实现凹陷峰,再通过检测输出光谱主瓣两侧凹陷峰的位移,实现折射率传感,其灵敏度是检测单边凹陷峰位移的两倍。但亚波长光栅结构复杂、工艺容差小,难以实现大规模集成。此外,近几年来,槽波导结构逐渐受到研究者的青睐,槽波导结构将光场约束在槽中,相较于普通条形波导,包层分析物与光场的相互作用更强。2020年印度科学学院的Selvaraja团队^[19]提出一种微环与槽波导结合的液体传感器,其灵敏度达到476 nm/RIU。2020年萨拉国立研究大学的Butt团队^[20]提出一种基于亚波长光栅双槽波导的跑道微环传感器,其灵敏度达到1000 nm/RIU。该方案采用的亚波长光栅双槽波导结构增强了光场与分析物之间的相互作用,其灵敏度约为基于普通槽波导微环结构的传感器的2.5倍。2021年美国开罗大学李勋团队^[21]提出将定向耦合器(DC)两端连接形成回环并与MZI和槽波导结合的一种气体传感器方案。该方案采用的回环结构能有效减小器

收稿日期: 2023-08-21; 修回日期: 2023-10-30; 录用日期: 2023-11-30; 网络首发日期: 2023-12-12

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202200613)、国家自然科学基金区域创新发展联合基金(U22A2018)

通信作者: *liaoss@cqupt.edu.cn

件的尺寸,该传感器的面积仅为 $7.08 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$,但其灵敏度较低,仅为 1070 nm/RIU 。

为了实现尺寸小、结构简单的高灵敏度折射率传感器,本文提出一种基于悬空槽(SSlot)波导的高灵敏度折射率传感器,该方案采用MZI结构,其中:MZI的一臂采用条形波导作为参考臂,传输 TE_0 模式;MZI的另一臂采用SSlot波导作为传感臂,传输Slot模式。利用两种不同模式间传播常数的差异,在仅 $6.2 \times$

10^{-2} mm^2 尺寸中实现了 $9.824 \times 10^4 \text{ nm/RIU}$ 的高灵敏度。此外,该传感器还具有结构简单、易于制备等优势。

2 基于SSlot波导的高灵敏度折射率传感器的工作原理

基于SSlot波导的高灵敏度折射率传感器采用上层厚度为 220 nm 、掩埋层厚度为 $2 \mu\text{m}$ 的绝缘体上硅(SOI)结构,其结构示意图如图1(a)所示。

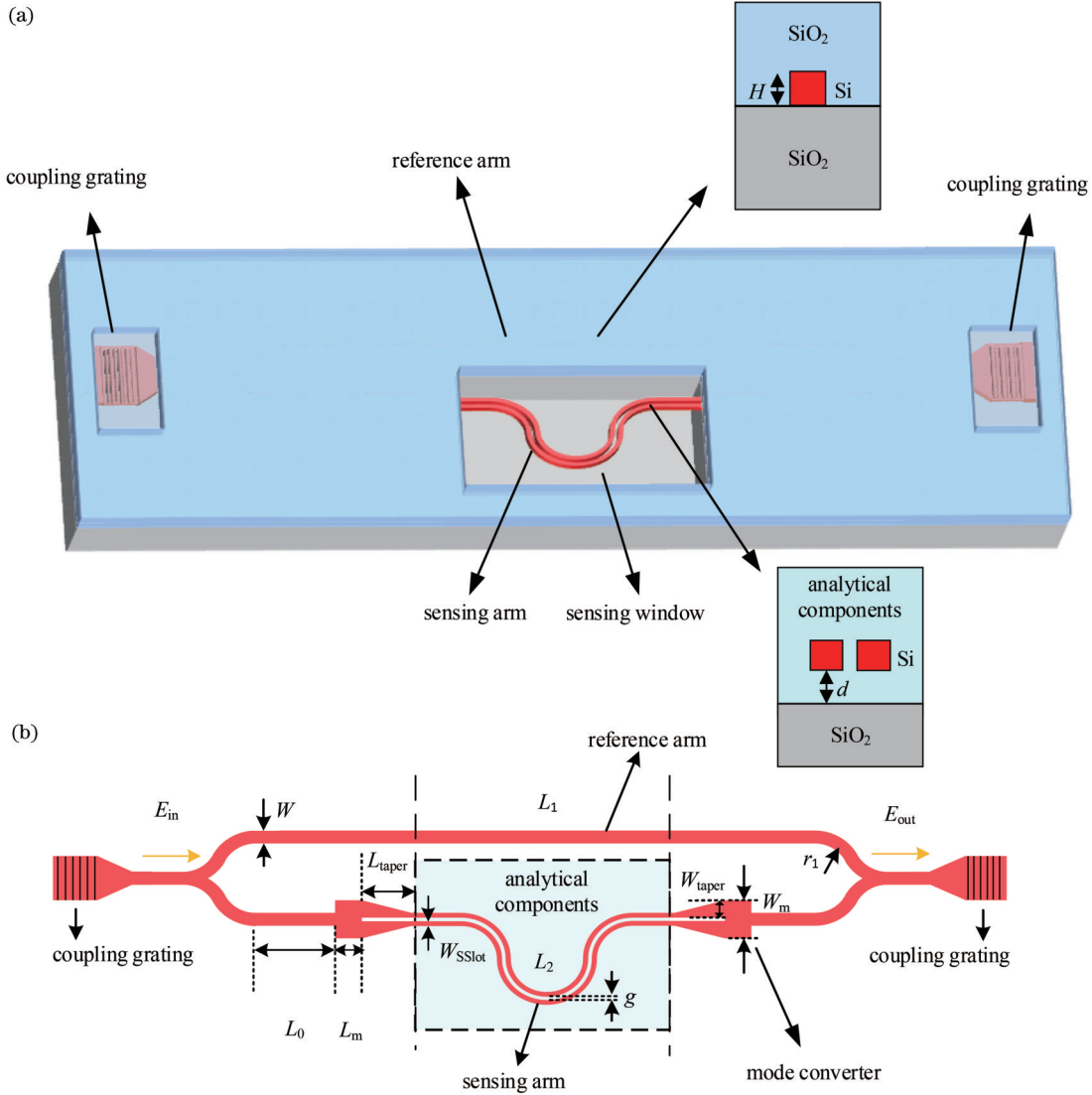


图 1 基于SSlot波导的高灵敏度折射率传感器的结构示意图。(a)三维结构;(b)俯视图及相关结构参数

Fig. 1 Schematic diagram of high-sensitivity refractive index sensor based on SSlot waveguide. (a) Three-dimensional view; (b) top view and related structure parameters

MZI的一臂采用条形波导作为参考臂,而另一条臂采用SSlot波导作为传感臂。光信号从左端口输入,经过Y分支后,分为两部分,上部分光通过参考臂以 TE_0 模式直接输出,下部分光则先经过 1×2 MMI模式转换器,将 TE_0 模式转换为Slot模式,再通过SSlot波导结构的传感臂,最后经 2×1 MMI模式转换器转换回 TE_0 模式,其在输出端与参考臂输出光发生干涉。利用两臂中传输的不同模式,可以在有限臂长

的前提下,使传感器获得超高灵敏度。其中波导厚度 $H=0.22 \mu\text{m}$,宽度 $W=0.5 \mu\text{m}$ 。波导悬空高度为 d , 1×2 MMI多模波导的长度和宽度分别为 L_m 和 W_m ,锥形波导的长度和宽度分别为 L_{taper} 和 W_{taper} ,槽间距为 g 。SSlot波导的长度和宽度分别为 L_2 (取悬空槽波导中间长度)和 W_{SSlot} ,参考臂的长度为 L_1 。根据以往制备硅基器件的经验,将连接波导的长度 L_0 设置为 $5 \mu\text{m}$,Y分支的半径 r_1 设置为 $23 \mu\text{m}$ 。

图 1(a)中耦合光栅结构示意图及各结构参数如图 2(a)和 2(b)所示。光栅刻蚀深度为 $0.07 \mu\text{m}$, 周期数 n 为 32, 宽度 W_g 为 $16 \mu\text{m}$, 周期 Λ 为 $0.615 \mu\text{m}$ 。该光栅耦合器结构来源于本课题组之前的工作^[22], 单个耦合器损耗为 $4 \text{ dB} \sim 5 \text{ dB}$ 。

该方案中存在 SSslot 波导, 因此在常规硅基芯片制备工艺基础上还需要增加制备悬空波导的流程。芯片制备工艺流程可分为三个阶段: 波导制备阶段、耦合光栅制备阶段和悬空波导制备阶段。波导制备流程示意图如图 3 所示。波导制备阶段将完成图 1 中所有波导结构的制备, 具体流程如下: 首先对基片进行清洗, 然后旋涂 PMMA 光刻胶并用电子束曝光 (EBL) 照射

波导区域, 待显影、定影后采用电感耦合等离子体刻蚀 (ICP) 技术刻蚀 220 nm 条形波导, 最后去胶 (图 3 第一行)。耦合光栅制备阶段与波导制备阶段相同, 其刻蚀深度仅为 70 nm (图 3 第二行)。在这两个阶段制备完成后, 首先使用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术在芯片表面沉积 $2 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 层, 再进入悬空波导制备阶段。再次旋涂 PMMA 光刻胶并用 EBL 照射悬空波导区域, 经显影、定影后将芯片放入氢氟酸 (HF) 溶液中浸泡。未经 EBL 照射区域因光刻胶保护, 波导上方和下方的 SiO_2 层未与 HF 接触, 得以保留; 而没有光刻胶覆盖的区域 SiO_2 层会被 HF 腐蚀掉, 形成悬空波导。最后去胶, 完成芯片的制备 (图 3 第三行)。

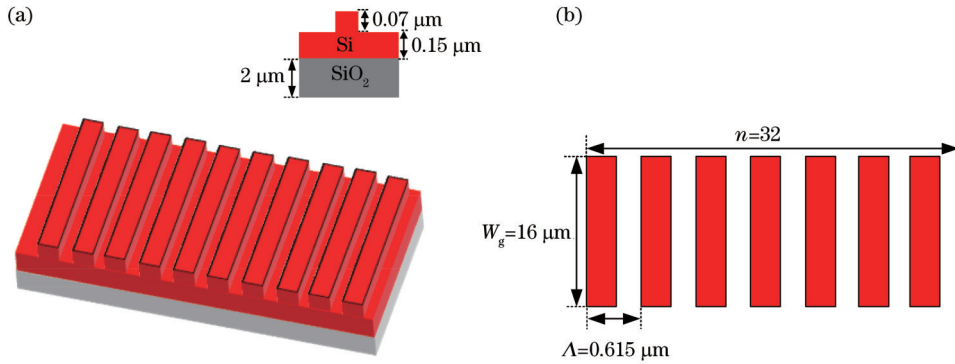


图 2 耦合光栅结构示意图。(a) 三维结构; (b) 俯视图及相关结构参数

Fig. 2 Schematic diagram of coupling grating. (a) Three-dimensional structure; (b) top view and related structure parameters

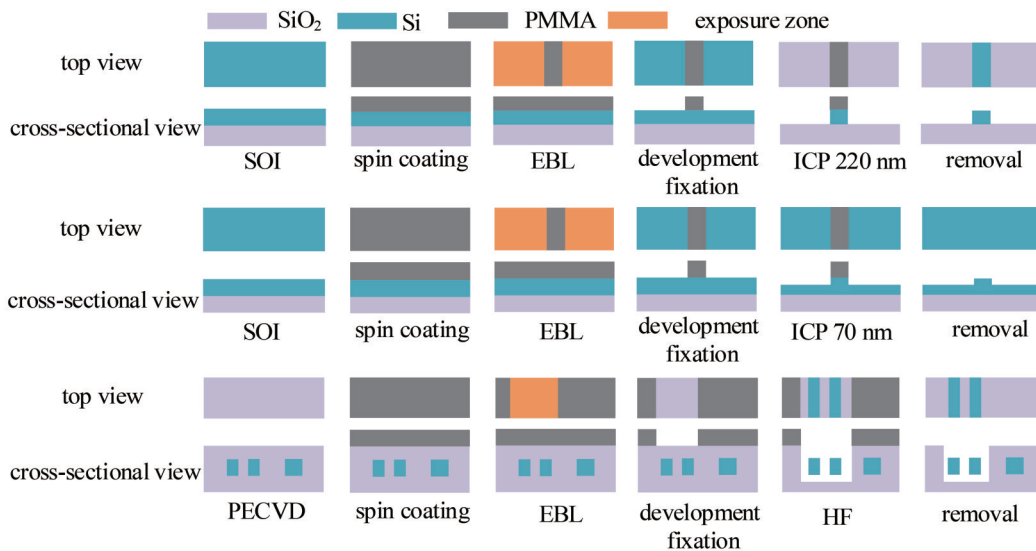


图 3 芯片制备流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of chip preparation process

假设输入传感器的光场强度为 E_{in} , 经 Y 分支后分别进入两分支波导的光场为 E_1 和 E_2 , 经过参考臂和传感臂后的光场为 E'_1 和 E'_2 , 最终输出光场为 E_{out} 。上述参数间有如下关系:

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 2 \end{bmatrix} E_{in}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} E_1' \\ E_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta_1 \exp(i\varphi_1) & 0 \\ 0 & \eta_2 \exp(i\varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{2\pi n_{\text{eff}1} L_1}{\lambda} - \frac{2\pi n_{\text{eff}2} L_2}{\lambda} + \phi, \quad (3)$$

式中: $\Delta\varphi$ 表示两臂之间的相位差; η_1 和 η_2 分别是参考臂和传感臂的损耗系数; $n_{\text{eff}1}$ 和 $n_{\text{eff}2}$ 分别是参考臂和传感臂的波导有效折射率; ϕ 为传感臂模式转换器引起的相位差; λ 为输入光信号波长。则最终输出光场 E_{out} 可表示为

$$E_{\text{out}} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1' \\ E_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\eta_2}{2} + \frac{\eta_1}{2} \exp(i\Delta\varphi) \\ \frac{\eta_2}{2} - \frac{\eta_1}{2} \exp(i\Delta\varphi) \end{bmatrix} E_{\text{in}}. \quad (4)$$

MZI 的透射率 T 可以表示为

$$T = \left| \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} \right|^2 = \frac{\eta_1^2 + \eta_2^2}{4} + \frac{\eta_1 \eta_2}{2} \cos(\Delta\varphi). \quad (5)$$

由式(5)可知, 该传感器输出谱按余弦规律变化, 参考臂和传感臂中由波导传输、模式转换等因素引起的损耗仅导致谱线功率下降, 并不影响透射谱形状。将波长位移变化量 $\Delta\lambda$ 与折射率变化量 Δn 的比值定义为灵敏度 S_λ ^[23]:

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}. \quad (6)$$

群折射率 n_g 可以表示为

$$n_g = n_{\text{eff}} - \lambda \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \lambda}. \quad (7)$$

结合式(3)、式(6)和式(7), 可以得到灵敏度 S_λ 的表达式为

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = \frac{\Delta\varphi/\Delta n}{\Delta\varphi/\Delta\lambda} = \frac{\lambda}{n_{g1} L_1/L_2 - n_{g2} - \lambda^2 \Delta\phi/(2\pi L_2 \Delta\lambda)} \times \frac{\partial n_{\text{eff}2}}{\partial n}, \quad (8)$$

式中: n_{g1} 、 n_{g2} 分别为参考臂和传感臂的波导群折射率。引入器件敏感度 S_1 , 其表达式为

$$S_1 = \frac{\lambda}{n_{g1} L_1/L_2 - n_{g2} - \lambda^2 \Delta\phi/(2\pi L_2 \Delta\lambda)}. \quad (9)$$

当 $n_{g1} L_1/L_2 - n_{g2} - \lambda^2 \Delta\phi/(2\pi L_2 \Delta\lambda)$ 趋于 0 时, S_1 趋于无穷大。为了寻找 $n_{g1} L_1/L_2 - n_{g2} - \lambda^2 \Delta\phi/(2\pi L_2 \Delta\lambda)$ 趋于 0 时的波长, 构建了 K 的表达式:

$$K = \frac{\partial(\Delta\varphi)}{\partial \lambda} = \frac{2\pi L_2 (n_{g2} - n_{g1} L_1/L_2)}{\lambda^2} + \frac{\Delta\phi}{\Delta\lambda}. \quad (10)$$

K 代表了 MZI 上下两臂之间的相位差对于波长的导数。 $K=0$ 处对应的波长就是 $n_{g1} L_1/L_2 - n_{g2} - \lambda^2 \Delta\phi/(2\pi L_2 \Delta\lambda)$ 趋于 0 的位置。再将传感臂波导的有效折射率 $n_{\text{eff}2}$ 对待测分析物折射率 n 的偏导定义为波导敏感度 S_w ^[24], 即

$$S_w = \frac{\partial n_{\text{eff}2}}{\partial n}. \quad (11)$$

根据介电波导的变分方程, S_w 可以表示为

$$S_w = \frac{\partial n_{\text{eff}2}}{\partial n} \Big|_{n=n_0} = \frac{2n_0}{Z_0 |P|} \iint_C E |(x, y)|^2 dx dy, \quad (12)$$

式中: n_0 为固定分析物的折射率; Z_0 为真空波阻抗; P 为坡印亭矢量; C 为分析物与光场接触的区域; E 为电场向量。灵敏度公式 S_λ 可以简化为

$$S_\lambda = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} = S_1 S_w. \quad (13)$$

由式(13)可知, S_λ 由 S_1 和 S_w 共同决定。为使 S_λ 增大, 应尽量增大 S_1 和 S_w 。对于 S_1 , 应在波导结构确定的基础上调节 L_1 和 L_2 , 使其分母趋近于零; 对于 S_w , 应合理设计波导结构, 增加分析物与波导的接触区域光场强度和增大分析物与波导的接触面积, 使分析物与波导接触区域场强积分增大, 进而达到传感臂的波导结构对分析物折射率的变化更敏感的目的。

3 基于 SSslot 波导的高灵敏度折射率传感器的结构优化

由上述理论分析可知, 该折射率传感器可通过设计传感臂结构获得高 S_w 值, 并通过调节 n_{g2} 、 n_{g1} 、 L_1 、 L_2 等参数获得高 S_1 值, 从而实现高灵敏度。为了进一步提升传感器的性能, 采用商用光学仿真平台 Lumerical 对该结构进行优化仿真。

图 4(a) 和 4(b) 分别是条形波导的结构示意图和模场图(其中条形波导宽度为 W_s), 条形波导的大部分光场被限制在结构内, 只有少部分波导外的倏逝场与分析物进行相互作用, 光场与分析物之间的接触面积较小、光场强度也较低, 因此分析物对波导有效折射率的影响较小。图 4(c) 和 4(d) 分别是 Slot 波导结构的示意图和模场图(其中波导宽度为 W_{slot} , 波导间隔为 g)。不同于条形波导, Slot 波导结构的光场集中在低折射率材料的槽中, 相较于条形波导, 分析物与波导的接触区域的光场强度增大, 因此可以加强光场与分析物之间的相互作用, 提高 S_w 。本文为了进一步增强光信号与分析物的相互作用, 提出一种 SSslot 波导结构, 其结构示意图和模式图如图 4(e) 和 4(f) 所示(其中波导宽度为 W_{SSslot} , 波导间隔为 g , 波导与下方 SiO_2 层的距离为 d)。SSslot 波导结构下方悬空, 因此有更多的光场可与分析物接触。采用该结构作为传感器的传感臂, 能进一步提高 S_w , 从而有效提升传感器的灵敏度。

首先分析波导宽度对 S_w 的影响, 在固定波长 $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ 时, W_s 、 W_{slot} 和 W_{SSslot} 在 $0.2 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 间变化(假设此时 $g = 0.1 \mu\text{m}$, $H = 0.22 \mu\text{m}$, $d = 1 \mu\text{m}$), 可得图 5 所示的 S_w 与波导宽度的关系。条形波导在 W_s 大于等于 $0.4 \mu\text{m}$ 的情况下可稳定传输 TE_0 模式, 之后 S_w 随着 W_s 的增大而减小, S_w 在 $W_s = 0.4 \mu\text{m}$ 时达到最大值 0.225。而 Slot 波导在 W_{slot} 大于等于 $0.25 \mu\text{m}$ 的情况下可稳定传输 Slot 模式, S_w 在 $0.25 \sim 0.26 \mu\text{m}$ 范围内随着 W_{slot} 的增大而增大, 在 $0.26 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 范围内随

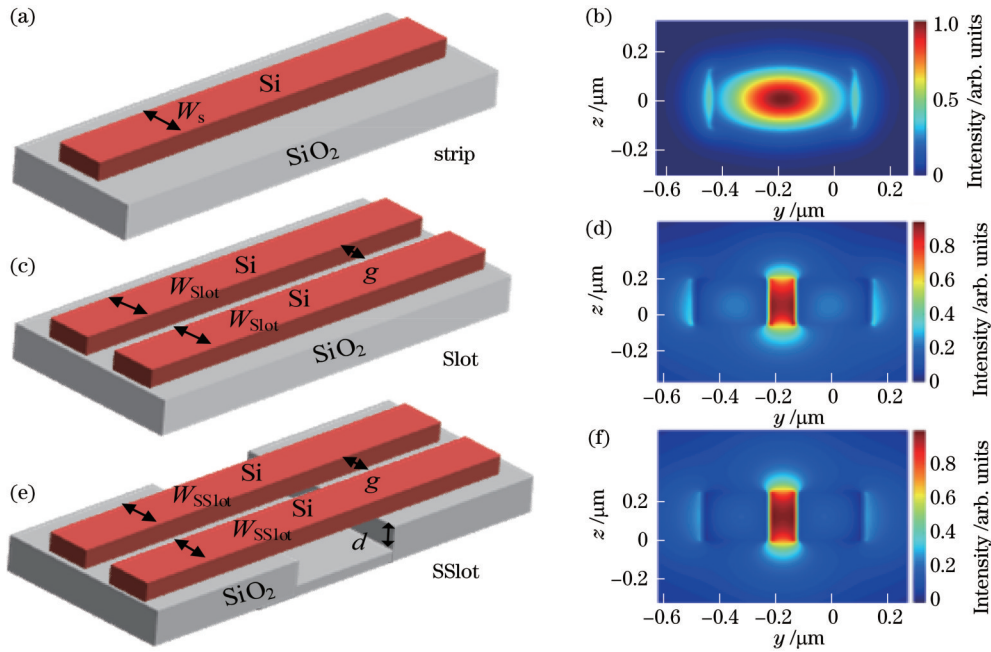


图 4 条形波导、Slot波导和SSlot波导的结构示意图及模场图。(a)(b)条形波导;(c)(d)Slot波导;(e)(f)SSlot波导

Fig. 4 Schematic diagrams and mode field diagrams of strip waveguide, Slot waveguide, and SSslot waveguide. (a)(b) Strip waveguides; (c)(d) Slot waveguides; (e)(f) SSslot waveguides

着 W_{slot} 的增大而减小, S_w 在 $W_{slot}=0.26 \mu\text{m}$ 时达到最大值 0.713。本文提出的 SSslot 波导结构的 S_w 在 $0.2 \sim 0.23 \mu\text{m}$ 范围内随着 W_{SSslot} 的增大而增大, 在 $0.25 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 范围内随着 W_{SSslot} 的增大而减小, 在 $W_{SSslot}=0.23 \mu\text{m}$ 和 $W_{SSslot}=0.24 \mu\text{m}$ 时达到最大值 1.313。在波导宽度相同的情况下, 条形波导的 S_w 最小、Slot 波

导的 S_w 次之、SSslot 波导的 S_w 最大, 这也符合提高 S_w 需增加分析物与波导的接触区域光场强度和增大分析物与波导区域光场的接触面积的分析。从三种结构的 S_w 结果对比可以看出, SSslot 波导结构的 S_w 相较于其他两种结构具有明显优势。因此, 选择 SSslot 波导结构作为 MZI 的传感臂, 并使 $W_{SSslot}=0.24 \mu\text{m}$ 。

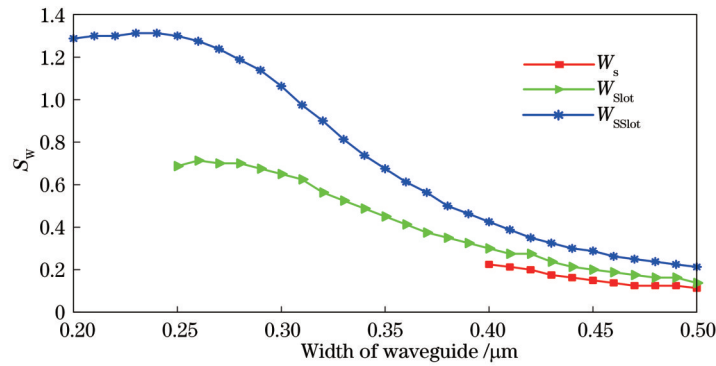


图 5 条形波导、Slot波导和SSlot波导中 S_w 随波导宽度的变化情况

Fig. 5 S_w varies with widths of waveguides in strip waveguide, Slot waveguide, and SSslot waveguide

然后分析 g 对 S_w 的影响, 假设 $W_{SSslot}=0.24 \mu\text{m}$, 可得如图 6(a) 所示的 S_w 与 g 的关系。由拟合曲线图可知, 当 g 较小时, S_w 受 g 的影响不大。当 g 在 $0.1 \sim 0.3 \mu\text{m}$ 范围内变化时, S_w 的最大值为 1.313, 最小值为 1.283。考虑到 g 值越小则槽模式越稳定, 确定 SSslot 波导的 g 为 $0.1 \mu\text{m}$ 。同样地, 分析了 d 对 S_w 的影响, 其结果如图 6(b) 所示。由拟合曲线图可知, 当 d 在 $0.6 \sim 1.1 \mu\text{m}$ 范围内变化时, S_w 最大值为 1.313, 最小值为 1.2925。当 d 大于 $0.8 \mu\text{m}$ 时, S_w 保持稳定, 故 d

选择 $1 \mu\text{m}$ 。

由于 Slot 模式与 TE_0 模式不匹配, 因此直接连接条形波导和 SSslot 波导会带来极大的损耗。为了解决这个问题, 传感臂中采用了一种 1×2 MMI 模式转换器。在调研了多种模式转换方案后^[21,25-28], 本文在文献 [21] 中的模式转换器基础上进行了优化设计。该模式转换器实现模式转换的示意图如图 7(a) 所示。为提高模式转换效率, 保持文献 [21] 中 $W_m=1.1 \mu\text{m}$ 和 $L_m=1.2 \mu\text{m}$ 的取值不变, 对 L_{taper} 和 W_{taper} 进行优化。经

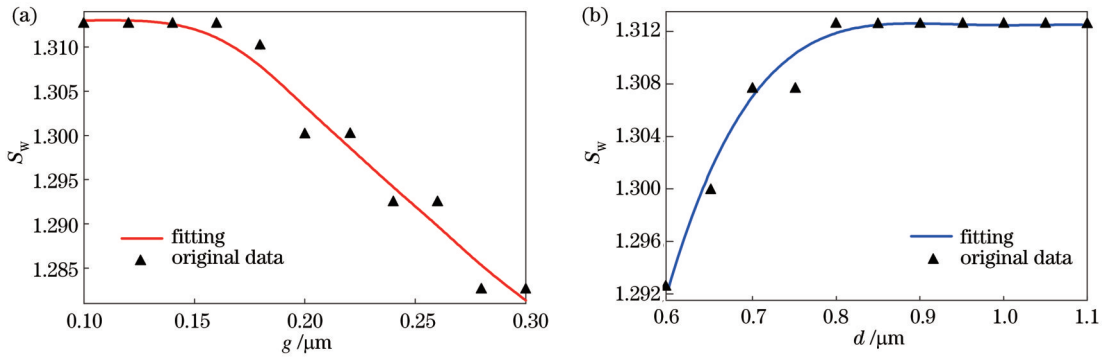


图 6 SSslot波导中 S_w 随 g 和 d 的变化情况。(a) g ; (b) d
Fig. 6 S_w varies with g and d in SSslot waveguide. (a) g ; (b) d

Lumerical 软件仿真计算后可得如图 7(b) 所示的模式转换器的转换效率随 L_{taper} 和 W_{taper} 的变化情况。由图 7 可知, 当 $L_{\text{taper}}=3 \mu\text{m}$ 、 $W_{\text{taper}}=0.5 \mu\text{m}$ 时, 转换效率最

高。此时, TE_0 与 Slot 模式之间的转换效率高于 97.3%, 因此模式转换带来的整体损耗约小于 0.24 dB。

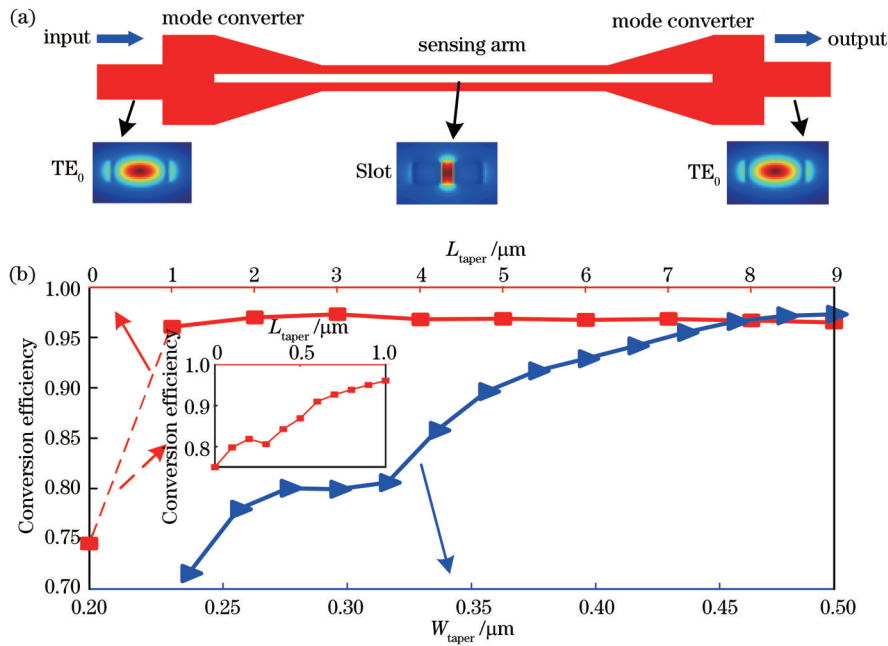


图 7 模式转换器结构、模场分布图, 以及转换效率随锥形波导长度和宽度的变化情况。(a) 结构图和模场分布图; (b) 转换效率
Fig. 7 Diagrams of mode converter and mode field distribution, and conversion efficiency varying with length and width of tapered waveguide. (a) Structure and model field diagrams; (b) conversion efficiency

参考臂条形波导与模式转换器之间存在一定的相位差, 通过计算得到如图 8 所示的结果。由图 8 可知, 参考臂条形波导与模式转换器之间的相位差范围在 $0.14\pi \sim 0.47\pi$ 之间。

由式(13)可知, 传感器的灵敏度 S_i 除受 S_w 影响外, 还会受到 S_1 , 即 n_{g2} 、 n_{g1} 、 L_1 、 L_2 的影响。当 K 趋于 0 时, S_1 趋向于无穷大。因此, 除提高 S_w 外, 还应合理设计 n_{g2} 、 n_{g1} 、 L_1 、 L_2 , 以进一步提升传感器灵敏度。为使 $K=0$ 处的波长接近 1550 nm, 联合优化了 L_1 和 L_2 (空气折射率近似为 1.00029)。最终发现: 当 $L_1=1250 \mu\text{m}$ 、 $L_2=1600 \mu\text{m}$ 时, $K=0$ 处的波长为 1544 nm。此时, 传感器的相位差和功率谱如图 9 所示。

实现基于 SSslot 波导的高灵敏度折射率传感器的结构设计和参数的优化后, 检测了该传感器的性能。气体折射率与气体体积分数有关, 混合气体折射率 = 目标气体折射率 \times 目标气体体积分数 + 空气中折射率 \times (1 - 气体体积分数), 利用该折射率公式可以得到目标气体体积分数与混合气体折射率的对应关系。CO₂、NH₃、CH₄ 气体 100% 体积分数下的折射率如表 1 所示。经计算可得: 当折射率由 1.00029 变化到 1.00049 时, 可以满足 CO₂、NH₃、CH₄ 气体体积分数为 0%~100% 的监测需求。

仿真了传感区域 $n=1.00029$ (无分析物, SSslot 波导被空气覆盖) 到 $n=1.00049$ 情况下, 传感器的传输谱

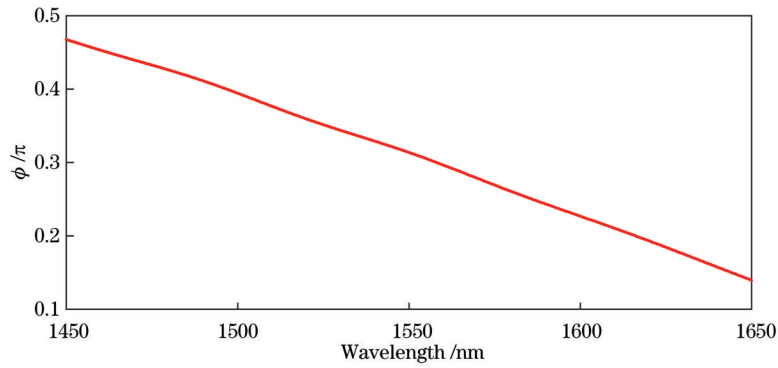


图 8 条形波导与模式转换器之间的相位差 ϕ

Fig. 8 Phase difference ϕ between strip waveguide and mode converter

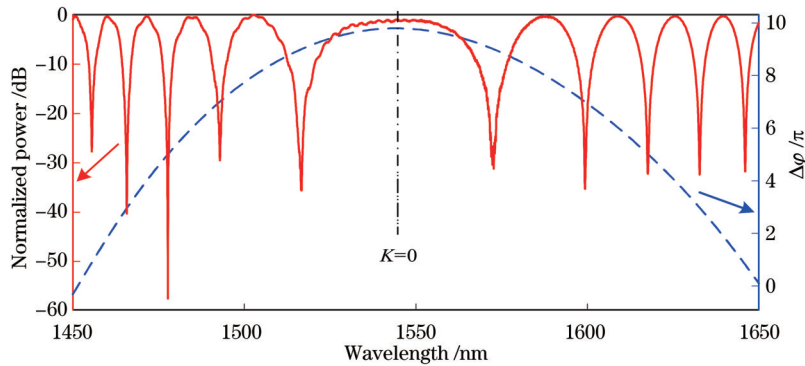


图 9 折射率传感器上下两臂之间的相位差 $\Delta\phi$ 和输出功率随波长的变化情况

Fig. 9 Phase difference $\Delta\phi$ between upper and lower arms of refractive index sensor and output power varying with wavelength

表 1 100% 体积分数下的不同气体折射率

Table 1 Refractive index of different gas under 100% volume fraction

Gas	Refractive index
CO ₂	1.00045
NH ₃	1.00038
CH ₄	1.00044

线随折射率的变化曲线,其结果如图 10 所示。随着分析区域折射率 n 的增大,传感器的谱线主瓣带宽减小。因此,通过测量主瓣两侧凹陷峰间距离的变化,可以得到待测分析物折射率。基于图 10 中两侧凹陷峰波长偏移量,得到如图 11 所示的波长偏移量与折射率的变化关系。经过计算可得,拟合曲线的斜率为 9.824×10^4 , 由此得到该传感器的灵敏度为 $9.824 \times 10^4 \text{ nm/RIU}$ 。

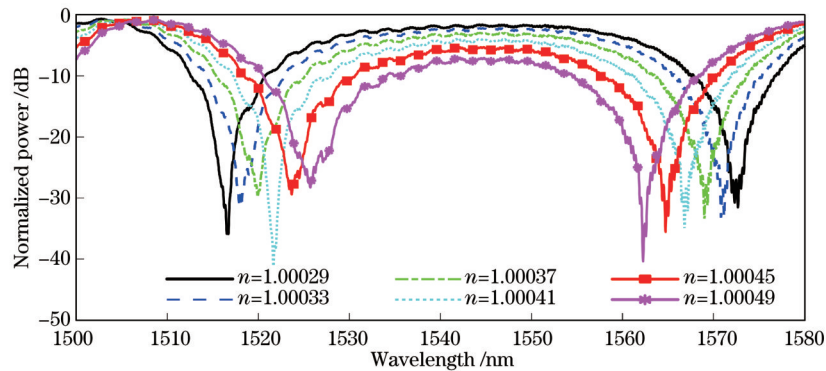


图 10 不同折射率下传感器的传输谱

Fig. 10 Transmission spectra of sensor under different refractive index

为了分析本文提出的折射率传感器的性能,将该方案与以往的几种 MZI 结构传感器方案的性能进行了比较,其结果如表 2 所示。由表 2 可知,该方案的灵敏度具有极大的优势,并且在灵敏度同量级的情况下,

该方案的尺寸也优于其他方案。

4 结 论

提出了一种基于 SSlot 波导的高灵敏度折射率传

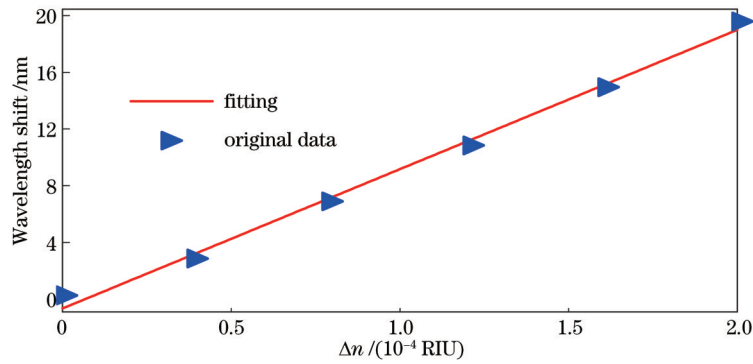


图 11 波长偏移量与折射率的变化关系

Fig. 11 Relationship between wavelength offset and refractive index change

表 2 不同传感器的性能比较

Table 2 Comparison of performance of different schemes

Sensor	Size /mm ²	Sensitivity / (nm/RIU)	Method
Ref. [7]	$\sim 1.4 \times 10^{-2}$	7.028×10^3	Simulation
Ref. [17]	~ 1.2	2.15×10^4	Experiment
Ref. [18]	$\sim 8 \times 10^{-2}$	4.096×10^4	Simulation
Ref. [21]	$\sim 7.08 \times 10^{-3}$	1.07×10^3	Experiment
Ref. [29]	$\sim 1.27 \times 10^{-3}$	1.061×10^3	Experiment
This work	6.2×10^{-2}	9.824×10^4	Simulation

感器,通过合理设计 SS1ot 波导结构和 MZI 两臂的长度,最终实现了 9.824×10^4 nm/RIU 的超高灵敏度。该折射率传感器的尺寸仅为 6.2×10^{-2} mm²,远低于同类型高灵敏度传感器。除此之外,该折射率传感器还具有结构简单、易于制备等优势,能满足 CO₂、NH₃、CH₄ 等气体浓度检测,适用于生物医疗、环境监测、灾难预警等多个领域。

参 考 文 献

- [1] 贾磊,葛益娴,芮菲,等. 温度自补偿的级联式光纤表面等离子体共振折射率传感器[J]. 光学学报, 2023, 43(13): 1306002. Jia L, Ge Y X, Rui F, et al. Cascaded fiber-optic surface plasmon resonance refractive index sensor with temperature self-compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(13): 1306002.
- [2] Yan R Q, Wang T, Yue X Z, et al. Highly sensitive plasmonic nanorod hyperbolic metamaterial biosensor[J]. Photonics Research, 2021, 10(1): 84.
- [3] 陈颖,张敏,丁志欣,等. 基于全介质超表面的微流体折射率传感器[J]. 中国激光, 2022, 49(6): 0613001. Chen Y, Zhang M, Ding Z X, et al. Microfluidic refractive index sensor based on all-dielectric metasurfaces[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(6): 0613001.
- [4] 刘春娟,王嘉伟,吴小所,等. 一种光栅辅助狭缝微环谐振器的传感特性[J]. 光学学报, 2022, 42(16): 1613001. Liu C J, Wang J W, Wu X S, et al. Sensing characteristics of grating-assisted slot microring resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(16): 1613001.
- [5] Viphavakit C, Komodromos M, Themistos C, et al. Optimization of a horizontal slot waveguide biosensor to detect DNA hybridization[J]. Applied Optics, 2015, 54(15): 4881-4888.
- [6] Lo S M, Hu S R, Gaur G, et al. Photonic crystal microring resonator for label-free biosensing[J]. Optics Express, 2017, 25(6): 7046-7054.
- [7] El Shamy R S, Swillam M A, Khalil D A. Mid infrared integrated MZI gas sensor using suspended silicon waveguide[J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(17): 4394-4400.
- [8] Ding Z Q, Dai D X, Shi Y C. Ultra-sensitive silicon temperature sensor based on cascaded Mach-Zehnder interferometers[J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2787-2790.
- [9] Zhang Y, Zou J, Cao Z, et al. Temperature-insensitive waveguide sensor using a ring cascaded with a Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Letters, 2019, 44(2): 299-302.
- [10] Ding Z Q, Shi Y C. Demonstration of an ultra-sensitive temperature sensor using an asymmetric Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(4): 6800505.
- [11] Troia B, De Leonardis F, Passaro V M N. Cascaded ring resonator and Mach-Zehnder interferometer with a Sagnac loop for Vernier-effect refractive index sensing[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 240: 76-89.
- [12] Huang L J, Yan H, Xiang L, et al. Subwavelength racetrack resonators with enhanced critically coupled tolerance for on-chip sensing[J]. IEEE Access, 2021, 9: 23424-23431.
- [13] Luan E, Yun H, Laplatine L, et al. Enhanced sensitivity of subwavelength multibox waveguide microring resonator label-free biosensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 25(3): 1-11.
- [14] Huang T Y, Xu G Z, Tu X, et al. Design of highly sensitive interferometric sensors based on subwavelength grating waveguides operating at the dispersion turning point[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2021, 38(9): 2680-2686.
- [15] Liu L, Hu Z H, Ye M Y, et al. On-chip refractive index sensor with ultra-high sensitivity based on sub-wavelength grating racetrack microring resonators and Vernier effect[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(5): 6849007.
- [16] Fu P H, Chiang T Y, Cheng N C, et al. Microring resonator composed of vertical slot waveguides with minimum polarization mode dispersion over a wide spectral range[J]. Applied Optics, 2016, 55(13): 3626-3631.
- [17] Jiang X X, Chen Y Q, Yu F, et al. High-sensitivity optical biosensor based on cascaded Mach-Zehnder interferometer and ring resonator using Vernier effect[J]. Optics Letters, 2014, 39(22): 6363-6366.
- [18] Zhang G S, Huang T Y, Wu Z C, et al. Design of an on-chip sensor operating near the dispersion turning point with ultrahigh sensitivity[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2021, 38(9): 2786-2791.
- [19] Mere V, Muthuganesan H, Kar Y, et al. On-chip chemical sensing using slot-waveguide-based ring resonator[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(11): 5970-5975.

- [20] Kazanskiy N L, Khonina S N, Ali Butt M. Subwavelength grating double slot waveguide racetrack ring resonator for refractive index sensing application[J]. *Sensors*, 2020, 20(12): 3416.
- [21] El Shamy R S, Swillam M A, Elrayany M M, et al. Compact gas sensor using silicon-on-insulator loop-terminated Mach-Zehnder interferometer[J]. *Photonics*, 2021, 9(1): 8.
- [22] Liao S S, Zhang T T, Bao H, et al. On-chip fano-like resonator with a high slope and low-complexity fabrication processing[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7809908.
- [23] Xie Y W, Zhang M, Dai D X. Design rule of Mach-Zehnder interferometer sensors for ultra-high sensitivity[J]. *Sensors*, 2020, 20(9): 2640.
- [24] Dell'Olio F, Passaro V M. Optical sensing by optimized silicon slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4977-4993.
- [25] Wang Z C, Zhu N, Tang Y B, et al. Ultracompact low-loss coupler between strip and slot waveguides[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(10): 1498-1500.
- [26] Palmer R, Alloati L, Korn D, et al. Low-loss silicon strip-to-slot mode converters[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(1): 2200409.
- [27] Zhang H J, Zhang J, Chen S Y, et al. CMOS-compatible fabrication of silicon-based sub-100-nm slot waveguide with efficient channel-slot coupler[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(1): 10-12.
- [28] Deng Q Z, Yan Q J, Liu L, et al. Robust polarization-insensitive strip-slot waveguide mode converter based on symmetric multimode interference[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7347-7355.
- [29] Sun X, Dai D X, Thylén L, et al. High-sensitivity liquid refractive-index sensor based on a Mach-Zehnder interferometer with a double-slot hybrid plasmonic waveguide[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 25688-25699.

High-Sensitivity Refractive Index Sensor Based on Suspended Slot Waveguide

Liao Shasha*, Zhao Shuai, Zhang Wuhao, Zhang Yida, Tang Liang

School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract

Objective High-sensitivity, miniaturization, and integration sensors are still in great demand in medical detection, environmental monitoring, and other fields. One of the hot issues in the current research on sensors is to improve the sensitivity and reduce the size of sensors. Mach-Zehnder interferometer (MZI) is an important part of integrated optics, which is widely used in optical filters, optical lasers, optical sensors, and other fields. The refractive index sensor based on MZI has been widely utilized in sensing according to its advantages of simple structure, convenient manufacture, and large process tolerance. In general, MZI-based sensors implement sensing by detecting the variety of interference signals between the reference arm and the sensing arm. The proposed sensor schemes based on MZI usually have large sizes and complex structures. Therefore, the study of small-size and high-sensitivity MZI sensors is very suitable for the current development needs.

Methods To improve the sensitivity of the sensor without increasing the complexity, we choose to add a new type of waveguide to the MZI-based sensor. The sensitivity of the MZI-based sensor is mainly determined by the difference in the length of the two MZI arms and the group refractive index of the optical signal transmitted in the waveguide. In traditional MZI-based sensor schemes, the light transmits in the same mode in the sensing arm and the reference arm, so the group refractive index difference is limited. To solve this problem, we transmit different modes on different MZI arms to obtain ultra-sensitive refractive index sensors. It is found that the sensitivity of a sensor can be improved effectively by increasing the intensity and the contact area between the waveguide and analyte. Therefore, we emit suspended slot mode into the sensing arm, launch TE_0 mode into the reference arm, and adjust the length of both arms to maximize the sensitivity of the sensor.

Results and Discussions According to formula (13), the sensitivity of the sensor is mainly determined by the waveguide sensitivity (S_w) and the device sensitivity (S_d). The magnitudes of S_d and S_w are dependent on both the length of the two arms of the MZI and the waveguide structure. The slot gap (g) is assumed as $0.1 \mu\text{m}$, the height of silicon (H) as $0.22 \mu\text{m}$, and the hanging height (d) as $1 \mu\text{m}$. According to the calculations, it is shown that within the range of $0.4\text{--}0.5 \mu\text{m}$, the S_w of the strip waveguide decreases as the width (W_s) of the strip waveguide increases. The S_w of the slot waveguide increases as the waveguide width (W_{slot}) increases within the range of $0.25\text{--}0.26 \mu\text{m}$, and the S_w of the slot waveguide decreases as the W_{slot} increases within the range of $0.26\text{--}0.5 \mu\text{m}$. S_w of SSslot waveguide increases with the increase in SSslot waveguide width (W_{SSslot}) in the range of $0.2\text{--}0.23 \mu\text{m}$ and it decreases with the increase in W_{SSslot} in the range of $0.25\text{--}0.5 \mu\text{m}$. The

sensitivity of the suspended slot waveguide is superior to that of the slot waveguide and strip waveguide, reaching a maximum of 1.313 (Fig. 5). After optimizing the length of the tapered waveguide (L_{taper}) and the width of the tapered waveguide (W_{taper}), the conversion efficiency between TE_0 mode and slot mode reaches 97.3% (Fig. 7). The refractive index n of the analytical component region is set from 1.00029 to 1.00049, and the main bandwidth of the sensor spectral line decreases with the increase in refractive index. Through calculation, the sensitivity of the MZI sensor reaches $9.824 \times 10^4 \text{ nm/RIU}$ (Fig. 11).

Conclusions We propose a refractive index sensor with high sensitivity, utilizing an MZI based on silicon-on-insulator (SOI). The transmission and sensitivity formulas of the sensor are derived and analyzed. The structures of different waveguides are compared and analyzed, and it is found that the suspended slot waveguide outperforms the other two waveguides. Thus, the strip waveguide is selected as the reference arm and the suspended slot waveguide is selected as the sensing arm in the MZI sensor. Then, we conduct tests on the conversion efficiency between the TE_0 mode and the slot mode in the sensor. After optimizing the length and width of the tapered waveguide, we can achieve a conversion efficiency of 97.3%. Finally, we optimize the arm length of the MZI and change the refractive index of the analyte region to obtain different transmission spectra. By detecting the wavelength shift between different transmission spectra, the sensitivity of the sensor is calculated by the formula to reach $9.824 \times 10^4 \text{ nm/RIU}$. Our scheme also has the advantages of small size and simple manufacture and can be widely applied in biomedicine, environmental monitoring, and other fields.

Key words spectroscopy; silicon photonics; refractive index sensor; Mach-Zehnder interferometer; sensitivity