

文章编号 1672-6634(2024)05-0076-08

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2024030010

基于飞秒激光刻写的微腔型波导马赫-曾德干涉器及其折射率传感性能研究

徐 堃,玄成聪,张燕青,姚一村,解艳茹

(聊城大学 物理科学与信息工程学院,山东 聊城 252059)

摘 要 平面光波导传感器相较于传统的光纤传感器结构,具有更好的机械性能,并且对于振动等因素具有更低的交叉响应,因此在光传感领域具有独特优势。在本研究中,我们利用飞秒激光刻写及激光辅助化学蚀刻技术,在石英玻璃中制备了微腔型波导传感器结构,该结构由对称的分支型波导马赫-曾德干涉器及在其中一路上所制备的光学微腔构成。当待测液体浸入微腔时,传感器呈现明显的干涉峰漂移,其折射率灵敏度在1.35折射率附近达到了约16 311.8 nm/RIU,因此在高灵敏度的波导液体传感及生化传感领域展现出了显著的应用潜力。

关键词 平面波导;飞秒激光微加工;微腔传感器;马赫-曾德干涉仪

中图分类号 TN814

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research on Microcavity Waveguide Mach-Zender Interferometer and Its Refractive Index Sensing Performance Based on Femtosecond Laser Writing

XU Kun, XUAN Chengcong, ZHANG Yanqing, YAO Yicun, XIE Yanru

(School of Physical Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Planar optical waveguide sensors have a unique advantage in the field of optical sensing because of their better mechanical properties and lower cross response to vibration and other factors than traditional optical fiber sensor structures. In this study, we use femtosecond laser writing and laser-assisted chemical etching techniques to fabricate microcavity waveguide sensor structures in quartz glass. The structures are composed of symmetric branch waveguide Mach-Zehnder interferometer and optical microcavities prepared along the way. When the liquid to be measured is immersed in the microcavity, the sensor shows obvious interference peak shift, and its refractive index sensitivity reaches about 16311.8 nm/RIU near 1.35 refractive index. Therefore, it shows significant application potential in the field of high-sensitivity

收稿日期:2024-03-23

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020F086);聊城大学博士科研基金项目(318052168)资助

通讯作者:姚一村,男,汉族,博士,副教授,研究方向:光纤传感,E-mail:yaoyicun@lcu.edu.cn;解艳茹,女,汉族,博士,副教授,研究方向:光电子材料与器件,E-mail:xieyanru@lcu.edu.cn.

waveguide liquid sensing and biochemical sensing.

Key words optical waveguide; femtosecond laser micromachining technology; microcavity sensor; Mach-Zehnder interferometer

0 引言

随着科技的不断进步,光纤传感器因其出色的抗电磁干扰能力^[1]、紧凑的结构设计以及快速的响应速度^[2],在众多领域得到了广泛应用。尤其是在精密测量^[3,4]、生物医学^[5-8]、环境监测^[9,10]等方面,光纤传感器展现出了巨大的潜力和优势^[11]。然而,传统的光纤传感器在某些应用场景下仍存在局限性^[12],例如对振动等外部干扰的敏感性较低^[13,14],限制了其在高精度测量领域的应用^[15-17]。光纤微腔型传感器是一种利用光纤微腔结构进行传感的装置,在这种传感器中,光纤的一端被构造造成微小的腔室,形成一个微型的光学腔室结构。这个微腔可以是空腔,也可以填充有特定的介质或材料。当外部环境中的某种参数(如温度、压力、化学成分等)发生变化时,会引起微腔中光的特性(如透射率、相位等)发生改变,进而反映到光纤输出端的光信号上。这类传感器的灵敏度相比于传统光纤传感器有了提升,它可以利用其微小的腔体结构,更敏感地检测微弱的光信号变化,具有更高的灵敏度^[18-21]。然而,这类光纤传感器存在一些不可避免的缺陷。例如光纤传感器极易受到压力、温度等外界因素的扰动,造成交叉响应,影响测试结果的准确性,且光纤传感器的机械性能较差^[22-24]。相比之下,波导微腔传感器不易受到外界无关因素的影响,可靠性比较高^[25-27]。那么基于平面光波导的光传感器以其优异的机械性能和对振动等交叉响应的低敏感性,以及与现有平面 CMOS 工艺的高度兼容性,显示出了独特的优势^[28]。平面光波导传感器的设计和制造,为高精度光学传感提供了新的可能性^[29]。

在众多制备光波导的技术中,飞秒激光刻写技术因其高效、精确的特点而备受瞩目。该技术能够在各种透明光学材料,如光学晶体、陶瓷、玻璃及聚合物材料中^[30],直接进行三维结构的微加工,无需复杂的掩膜工艺^[31]。然而,飞秒激光刻写的波导在传感领域的应用尚不广泛,主要原因在于其距离材料表面较远,导致倏逝场的引出困难^[32]。针对这一问题,本研究利用飞秒激光刻写技术结合激光辅助化学腐蚀方法,在石英晶体中成功制备了微腔型波导马赫-曾德传感器结构。通过精确控制波导与材料表面的相对位置,实现了倏逝场的有效引出,从而显著提高了传感器的灵敏度。实验结果表明,该传感器在液体折射率传感方面的灵敏度达到了约 16 311.8 nm/RIU,这一性能优于传统的光纤微腔型马赫-曾德传感器。

所制备的波导传感器不仅结构紧凑、灵敏度高,而且易与现有的光纤系统直接融合,为实现高灵敏度光学折射率及生化传感器的开发提供了一种创新的解决方案。此外,该传感器的设计和制备方法具有较高的通用性,有望在其他高精度光学传感领域得到进一步的应用和发展。随着未来研究的深入,基于飞秒激光刻写的波导传感器有望在光学传感领域发挥更加重要的作用,为科学研究和工业应用带来新的突破。

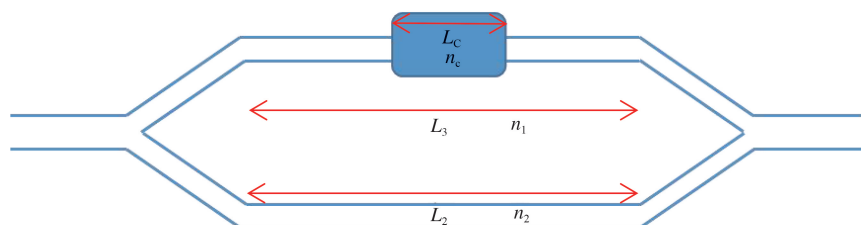


图1 波导微腔马赫曾德传感器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of waveguide microcavity Mach-Zehnder sensor structure

1 微腔波导 MZI 传感器的工作原理

本工作中,我们采用的波导干涉传感器结构如图1所示。该传感器由Y分支型波导马赫-曾德干涉器结构构成,并在其中一条分支波导中制备了光学微腔。当波导模式能量由入射波导输入后,被波导分支结构分为两路,其中一部分能量经过微腔后到达出射波导,而另一部分能量经另一分支波导传输后直接到达出射波

导,并与经微腔传输的信号形成干涉。该微腔由石英玻璃表面贯穿分支波导,当待测液体浸入微腔时,由于该路信号的光程发生变化,因此干涉谱曲线将发生漂移,从而实现传感功能。

出于一般性考虑,该波导马赫-曾德结构的两个分支波导的长度及有效折射率可能不同,如图 1 所示,假设 n_1 为上路波导的折射率, n_2 为下路波导的折射率, n_c 为腔内物质的折射率, L_3 为上路波导的总长度, L_2 为下路波导的总长度, L_c 为微腔的腔长, L_1 为 L_3 减去 L_c 的长度。为简单计,假设两路波导中信号的电场强度均为 A_0 ,并忽略波导损耗及微腔的散射损耗。则上路信号最终到达出射波导时,其电场强度表示为: $A_0 e^{i(n_1 k_0 L_1 + n_c k_0 L_c)}$,其中 k_0 为波矢。下路信号最终到达出射波导时,其电场强度为: $A_0 e^{i n_2 k_0 L_2}$ 。则出射波导中的总场为两者的叠加

$$A = A_0 [e^{i(n_1 k_0 L_1 + n_c k_0 L_c)} + e^{i n_2 k_0 L_2}] \quad (1)$$

因此,我们可以计算最终的出射光强 I 为

$$I = AA^* = A_0^2 [2 + 2 \cos k_0 (n_1 L_1 + n_c L_c - n_2 L_2)] \quad (2)$$

由于 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$,该结构的透射光谱将呈现周期震荡状的干涉曲线。假设某干涉共振峰位为 λ_0 , m 为某特定常数,则 λ_0 满足关系

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} (n_1 L_1 + n_c L_c - n_2 L_2) = m \times 2\pi \quad (3)$$

当腔内折射率由 n_c 变为 $n_c + \Delta n$ 时,假设该共振峰位的漂移量为 $\Delta \lambda$,则上述关系式应改写为

$$\frac{2\pi}{\lambda_0 + \Delta \lambda} [n_1 L_1 + (n_c + \Delta n) L_c - n_2 L_2] = m \times 2\pi \quad (4)$$

联立(3)式、(4)式,可得灵敏度 S 满足关系

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda_0 L_c}{n_1 L_1 + n_c L_c - n_2 L_2} \quad (5)$$

与之相比,传统光纤微腔 MZI 传感器,由于其微腔将纤芯一分为二,而两路信号在除微腔之外的区域不存在几何路程及有效折射率的差别,其灵敏度则固定为

$$S = \frac{\lambda_0}{\Delta n_{\text{eff}}} \quad (6)$$

式中 λ_0 仍为传感参考峰,而 Δn_{eff} 为微腔中物质的折射率与纤芯有效折射率之差。

由以上分析可知,对于传统光纤微腔传感器,考虑到纤芯有效折射率的变化空间极其有限,其传感灵敏度基本由(6)式固定,例如,在折射率 1.33 附近,对于 1 500 nm 的共振峰,其灵敏度约为 12 500 nm/RIU(取纤芯有效折射率为 1.45)。对于我们所提出的传感器结构,考虑到两分支波导的几何参数及有效折射率有进一步调节的空间,因此通过合理的设计,可以实现高于传统光纤微腔传感器的灵敏度。

2 微腔波导马赫-曾德结构的制备

2.1 石英玻璃一类光波导及 MZI 结构的刻写

在本研究中,我们采用了尺寸为 10 mm×15 mm×2 mm 的石英玻璃样品,以探索飞秒激光刻写技术在光波导制备中的应用。为了实现精确的波导刻写,选用了掺镱固体激光器作为光源。该激光器的中心波长设定在 520 nm,单脉冲能量控制在 480 nJ,重复频率为 200 kHz,而波导刻写过程中,激光的扫描速度则控制在 200 μm/s。在显微物镜的选用上,我们采用了数值孔径为 1.25 的油浸物镜,以确保激光的精确聚焦。飞秒激光刻写波导的过程如图 2 所示。

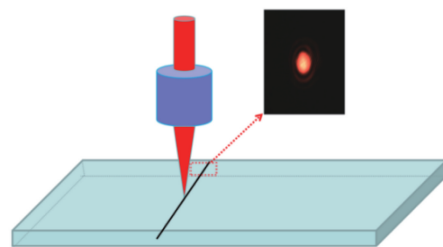


图 2 秒激光刻写直线波导的过程示意图,其中插图 of 波导近场模式图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Process of Femtosecond Laser Writing Straight Waveguides, with an Inset Showing the Near-Field Mode Profile of the Waveguide

实验过程中,首先将石英玻璃样品放置于飞秒激光三维操作平台上,并进行细致的调平处理。随后,激光束被聚焦至样品内部距离表面 $80\text{ }\mu\text{m}$ 的位置,进行直线型波导的刻写,该直线波导垂直于样品的两个 $10\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 端面并贯穿整个样品。刻写完成后,我们对波导样品进行了端面耦合测试,以测定其波导性能。端面耦合测试系统的示意图如图 3(a)所示,其装置实图如图 3(b)所示。在此过程中,我们使用中心波长为 632.8 nm 的氦氖激光器作为测试光源,其输出功率约为 2.13 mW 。通过放大倍率为 $40\times$ 的显微物镜将氦氖激光器的输出光聚焦至波导样品的入射端面,并使用相同放大倍率的显微物镜置于样品出射端,用于将波导的近场模式重新成像。为了确保成像质量,使用小孔光阑来滤除杂散光。最终,通过电荷耦合元件 (CCD) 成像系统对波导近场模式进行了观察,并使用功率计检测了波导的出射功率。

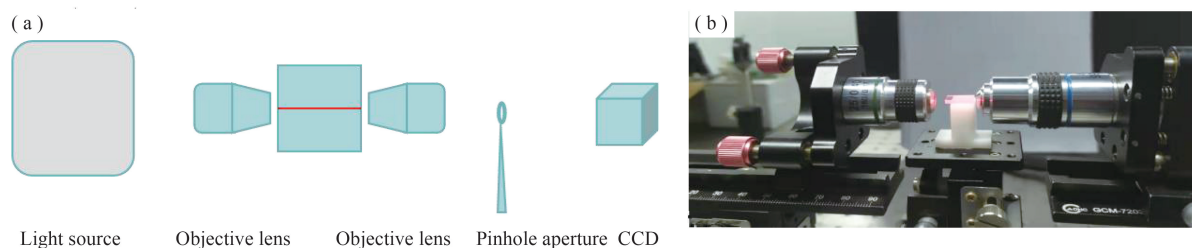


图 3 实验所采用的端面耦合测试系统的示意图(a);实验装置图(b)

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the end-fire coupling test system used in the experiment, (b) Experimental setup diagram

为了研究脉冲激光能量对波导性能的影响,我们采用了不同的飞秒激光单脉冲能量进行波导刻写,其能量覆盖了从 $120\sim 1\,080\text{ nJ}$ 的范围。测试结果表明,当激光单脉冲能量介于 $360\sim 720\text{ nJ}$ 范围内时,可以由端面耦合测试观察到清晰的波导近场模式亮斑。我们对不同刻写条件下波导的出射功率进行了对比,结果如表 1 所示。

表 1 波导输出功率、插入损耗与单脉冲能量的关系

Table 1 Relationship between Waveguide Output Power, Insertion Loss, and Single Pulse Energy

Laser pulse energy/nJ	Output power/ μW	Insertion loss/dB
120	None	None
240	None	None
360	32.97	18.1
480	46.67	16.0
600	40.49	17.2
720	20.02	20.3
840	None	None
960	None	None
1 080	None	None

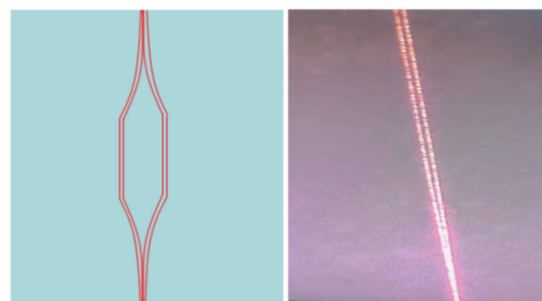


图 4 (a) 波导 MZI 结构示意图;(b) 显微镜下 CCD 所拍摄的波导 MZI 前端(红光二极管激发)

Fig. 4 (a) Schematic diagram of the waveguide MZI (Mach-Zehnder Interferometer) structure; (b) The front end of the waveguide MZI captured by a CCD under a microscope (excited by a red light-emitting diode)

刻写完成后对样品进行端面耦合,如图所示,用小孔光阑滤掉杂散光之后,分别测得不同激光脉冲能量下波导的功率,对波导的损耗进行了计算。当激光脉冲能量为 480 nJ ,波导的输出功率为 $46.67\text{ }\mu\text{W}$,损耗为 -16.0 dB 。经测试,波导的重复性较好,初步判断,波导刻写成功。实验表明,当飞秒激光的单脉冲能量为 480 nJ 时,所刻写的条形波导具有最大的输出功率,功率值为 $46.67\text{ }\mu\text{W}$,对应的总损耗值约为 16.0 dB 。在后续波导 MZI 结构的制备中,我们均采用 480 nJ 的单脉冲能量进行波导的刻写。

本工作中,我们采用了对称的波导 MZI 结构,其示意图如图 4(a)所示。所采用的具体参数为:弯曲波导的弯曲角度为 1.3° ,双光路波导的直线距离为 $60\text{ }\mu\text{m}$,我们采用中心波长为 620 nm 的红光二极管作为激

发光源,通过光纤耦合的方式对所制备的波导 MZI 进行激发,并于样品上方通过显微镜进行观察,其结果如图 4(b)所示,入射波导的光被分为两束,并分别沿 MZI 的两个对称分支波导传播,这证明了我们所制备的波导 MZI 起到了良好的功率分束效果。

2.2 光学微腔的制备

我们采用了飞秒激光辅助化学刻蚀的方法制备光学微腔,微腔完全贯通 MZI 的其中一个分支波导,其结构示意图如图 1 所示。为了在后续传感测试中,使光学微腔更容易被待测液体浸润,我们将微腔的宽度设置为 $5\,000\,\mu\text{m}$ 的较大数值,于此同时,微腔的长度被设计为 $80\,\mu\text{m}$ 。对于我们所涉及的对称波导 MZI 结构,其干涉曲线在波长 λ 附近的自由光谱范围(Free Spectral Range, F_{SR})可以表示为

$$F_{\text{SR}} = \lambda^2 / \Delta n L, \quad (7)$$

式中 L 为微腔长度, Δn 为微腔折射率与波导有效折射率的差值。因此,当微腔被空气填充时,干涉光谱在 $1\,450\,\text{nm}$ 波长附近的 F_{SR} 约为 $53\,\text{nm}$ 。

考虑到腔体的整体体积较大,为了实现快速的化学刻蚀,我们在飞秒激光刻蚀的过程中,将整个腔体分为若干立方块,每个立方块的尺寸为 $50\,\mu\text{m}$ (宽) $\times 40\,\mu\text{m}$ (高) $\times 80\,\mu\text{m}$ (深),使飞秒激光聚焦并扫描各立方块的侧边缘及底面。在刻蚀过程中,我们所使用的显微物镜数值孔径为 0.75 ,激光的重复率被设定为 $200\,\text{kHz}$,中心波长为 $520\,\text{nm}$,脉冲能量为 $1.6\,\mu\text{J}$,扫描速度为 $200\,\mu\text{m}/\text{s}$,在深度方向,刻写的步长(即层与层之间的距离)为 $1\,\mu\text{m}$ 。

当飞秒激光干刻完成后,石英玻璃表面的形貌如图 5 所示。可见,所涉及的立方体之间形成了一系列纵横交错,宽度约 $1.5\,\mu\text{m}$ 的微通道。下一步,我们将样品放入浓度为 10% 的氢氟酸溶液,并在室温下置于超声机中进行腐蚀。由于氢氟酸可以浸入微通道,因此可以保证待刻蚀结构的不同部分腐蚀速率较为一致。在超声腐蚀过程中,我们以每 3 分钟为一个循环,中途将样品取出并观察刻写部分是否脱落。经过 9 个循环($27\,\text{min}$)后,微腔中残余的石英玻璃块体全部脱落,从而实现了微腔结构的最终制备。所制备的波导微腔形貌如图 6 所示。可见,该微腔具有较为陡直和光滑的侧壁。最终腐蚀形成的微腔实际宽度为 $86\,\mu\text{m}$,略大于设计值 $80\,\mu\text{m}$ 。

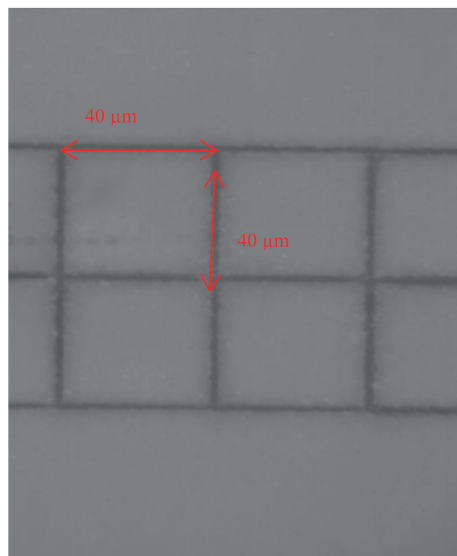


图 5 飞秒激光干刻之后的样品表面局部显微镜照片
Fig. 5 Local microscopic photo of the sample surface after femtosecond laser dry etching.

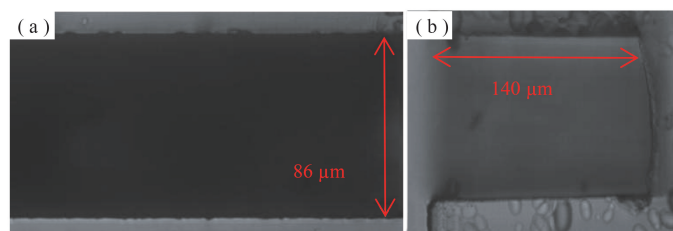


图 6 最终刻蚀形成的微腔的显微镜照片 (a) 俯视图; (b) 侧视图

Fig. 6 Microscope photos of the microcavity formed by final etching (a) Top view; (b) Side view

3 折射率传感测试及结果分析

我们对所制备的波导微腔 MZI 传感器的折射率响应特性进行了测试。我们采用光纤输出的超辐射发光二极管(Super luminescent Diode, SLD)作为激发光源,采用端面耦合的方式,将入射及出射光纤直接对准

所刻写的石英波导,并使用光谱分析仪在出射端采集干涉光谱信号。整体实验架构如图7所示。当出射光谱的整体损耗达到最小时,则认为端面耦合的效率达到最优。为了消除光纤与样品端面之间的法布里-珀罗效应,我们将折射率匹配液滴于样品的两个端面处,并填充光纤与样品端面之间的空隙,以抑制端面的菲涅尔反射。

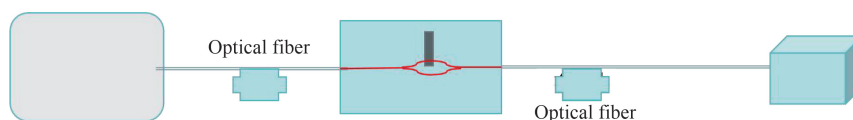


图7 折射率传感系统结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the refractive index sensing system structure

当微腔未填充待测液体时,测得该空气腔波导 MZI 结构的归一化透射光谱如图8所示。可见,透射光谱呈现周期震荡特点,符合 MZI 结构的干涉光谱特点。在 1 450 nm 附近,该干涉谱的 F_{SR} 约为 53 nm。如果认为 MZI 的两分支波导具有相同的有效折射率及几何长度,则根据公式(7),可以计算出对应的空气腔长度约为 92 μm ,这与实际的微腔长度 86 μm 较为接近,因此可以判定,该干涉光谱确为光学微腔引入的两路信号间光程差所导致。

我们用不同比例的酒精和水配置了一系列不同折射率的待测液体,并使用阿贝折射仪来确定各组待测液体的实际折射率。选取酒精溶液作为待测液体是考虑到酒精和石英玻璃表面之间较好的浸润性,以确保液体可以快速填充光学微腔。在进行液体折射率传感的过程中,为了保持光路的稳定性,我们将样品固定于光学平台上。在测试完一组液体之后,使用气囊对腔内液体进行吹干,直至光谱回到空气腔状态下的原始光谱,再进行下一组测试。测试结果如图9所示。

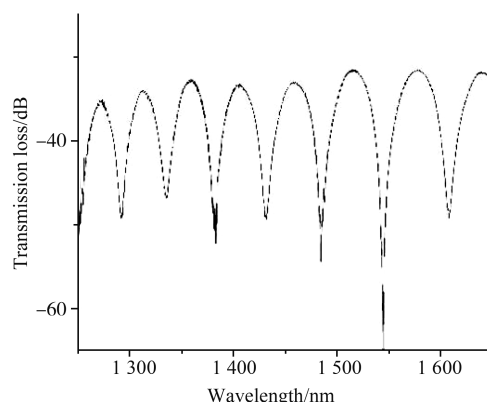


图8 微腔未填充待测液体样本时传感器的透射光谱

Fig. 8 Transmission spectrum of the sensor when the microcavity is not filled with the liquid sample to be tested

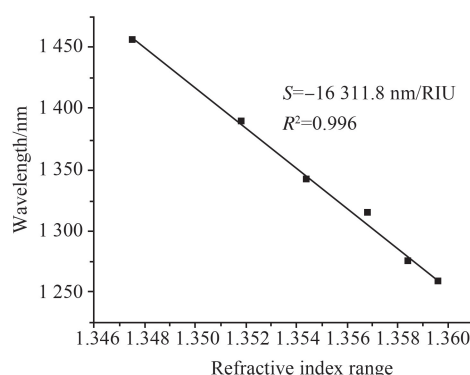
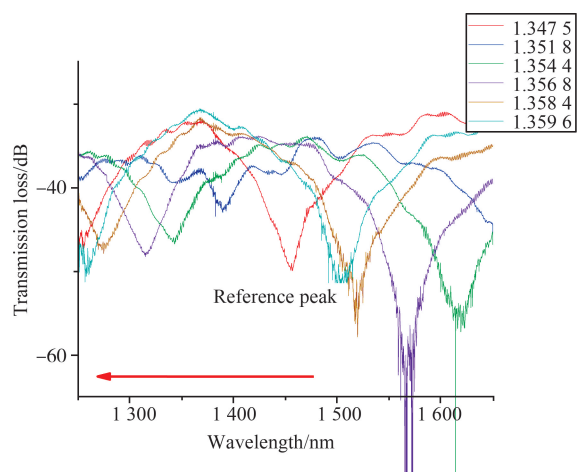


图9 (a) 不同折射率待测液体对应的透射光谱;(b) 灵敏度线性拟合曲线

Fig. 9 (a) Transmission spectra corresponding to liquids with different refractive indices; (b) Linear fitting curve of sensitivity

由图9(a)可知,我们选取 1 456 nm 附近的共振峰作为参照,红色箭头方向表示干涉光谱漂移方向,可见,随着液体折射率的增加,干涉光谱向短波长方向发生整体漂移。当液体折射率变化范围在 1.347 5 至 1.359 6 之间时,其共振参考峰的峰位随液体折射率变化的曲线如图9(b)所示,该拟合曲线的斜率即代表了传感器的折射率传感灵敏度。在该折射率变化范围内,传感器的平均灵敏度达到了-16 311.8 nm/RIU,该

灵敏度水平略高于理论预期。其可能的原因在于,在刻写波导 MZI 结构的过程中,由于两分支波导的刻写具有前后顺序,可能导致在相同刻写条件下,两分支波导的实际有效折射率略有差别。另外,我们发现干涉光谱的背景损耗过高,超过了 30 dB。我们分析损耗可能来源于以下机制:(1) 波导的传输损耗,飞秒激光刻写过程会造成材料的结构损伤,造成一定程度的散射损耗,该损耗可以通过后续的退火工艺进行改善;(2) 波导前后端面的耦合损耗,由于光纤与波导的模式不能完全匹配,加上光路校准过程中可能存在的误差,以及端面的菲涅尔损耗等因素,可能导致该干涉传感器存在两个端面的耦合损耗;(3) 微腔散射损耗,本实验中,微腔的腔长为 80 μm ,加上微腔侧壁可能存在一定倾角及表面粗糙问题,导致微腔部分会形成额外的散射损耗;(4) 波导 MZI 结构的插入损耗,由于波导连接处及弯曲波导转折处存在结构突变,也可能导致一定程度的额外散射损耗。因此,本工作所涉及的干涉传感器结构存在一系列的损耗机制,这些机制的综合作用导致最终的背景损耗较高,但需要说明的是,该损耗不会对光谱曲线的基本线性及变化规律造成影响,因此并不影响传感器的探测精度。在后续工作中,我们将尝试进一步优化结构设计参数和制备工艺,以期实现更低的器件能量损耗。无论如何,该传感器显示了较高的传感灵敏度,可能在高性能波导传感器的开发领域具有潜在的应用价值。

4 结论

本文本工作中,我们采用飞秒激光刻写技术,在石英玻璃中制备了埋层波导马赫-曾德干涉器结构,并利用飞秒激光辅助化学刻蚀的方法,在干涉器其中一路分支波导中制备了光学微腔,从而形成了微腔型传感器结构。该结构是首次在平面波导中实现的微腔干涉型光传感器。该传感器相较于传统的基于光纤的微腔传感器,其机械性能和抗交叉响应能力更强。另外,由于将微腔置于分支波导中,显著降低了对微腔刻写精确度及侧壁质量的要求,从而提高了工艺容差。实验发现,该传感器结构在 1.35 折射率附近,可以实现对液体样本的超高折射率灵敏度响应,其灵敏度达到了一 16 311.8 nm/RIU,优于传统的光纤微腔型马赫-曾德传感器。值得注意的是,通过合理设计,该传感器的灵敏度可以实现进一步提升,从而在高灵敏度的痕量物质检测等领域具有显著的优势。

参 考 文 献

- [1] WANG Y, YANG M, WANG D N, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity[J]. JOSA B, 2010, 27(3): 370-374.
- [2] LIU J, YANG C, ZHAO Z, et al. Fabrication and characterization of femtosecond laser inscribed long-period fiber grating in few-mode fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-6.
- [3] WANG Y, LI Y, LIAO C, et al. High-temperature sensing using miniaturized fiber in-line Mach-Zehnder interferometer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2009, 22(1): 39-41.
- [4] HAO H, PANG Z, WANG G, et al. Indoor optical fiber eavesdropping approach and its avoidance[J]. Optics Express, 2022, 30(20): 36774-36782.
- [5] GAO L, ZHU T, DENG M, et al. Long-period fiber grating within D-shaped fiber using magnetic fluid for magnetic-field detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(6): 2095-2104.
- [6] LIU J, Yang C, ZHAO Z, et al. Fabrication and characterization of femtosecond laser inscribed long-period fiber grating in few-mode fiber[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(3): 1-6.
- [7] SHEN F, SHU X, ZHOU K, et al. Compact vector twist sensor using a small period long period fiber grating inscribed with femtosecond laser[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(9): 090601.
- [8] SUN Y, YAO Y C, NIU H J. Peak wavelength and bandwidth tunable fiber Bragg grating notch filter induced by femtosecond laser point by point inscription[J]. Optics Communications, 2022, 521: 128583.
- [9] YIN G, WANG Y, LIAO C, et al. Long period fiber gratings inscribed by periodically tapering a fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 698-701.
- [10] JIANG S, WANG J, SUI Q. One novel type of miniaturization FBG rotation angle sensor with high measurement precision and temperature self-compensation[J]. Photonic Sensors, 2018, 8: 88-96.

- [11] JIANG L, ZHAO L, WANG S, et al. Femtosecond laser fabricated all-optical fiber sensors with ultrahigh refractive index sensitivity: modeling and experiment[J]. *Optics Express*, 2011, 19(18): 17591-17598.
- [12] COOK K, SMELSER C, CANNING J, et al. Regenerated femtosecond fibre Bragg gratings[C]. //Third Asia Pacific Optical Sensors Conference. SPIE, 2012, 8351: 245-250.
- [13] WANG Y, YANG M, WANG D N, et al. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer fabricated by femtosecond laser micromachining for refractive index measurement with high sensitivity[J]. *JOSA B*, 2010, 27(3): 370-374.
- [14] CHIU M H, SHIH C H. Searching for optimal sensitivity of single-mode D-type optical fiber sensor in the phase measurement[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 131(2): 596-601.
- [15] AHN J H, SEONG T Y, Kim W M, et al. Fiber-optic waveguide coupled surface plasmon resonance sensor[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21729-21738.
- [16] ALLSOP T, NEAL R, MOU C, et al. Exploitation of multilayer coatings for infrared surface plasmon resonance fiber sensors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(2): 276-286.
- [17] CENNAMO N, DAGOSTINO G, GALATUS R, et al. Sensors based on surface plasmon resonance in a plastic optical fiber for the detection of trinitrotoluene[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 188: 221-226.
- [18] LIU Y, WU G, GAO R, et al. High-quality Mach-Zehnder interferometer based on a microcavity in single-multi-single mode fiber structure for refractive index sensing[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 847-853.
- [19] LIN Z, LV R, ZHAO Y, et al. High-sensitivity special open-cavity Mach-Zehnder structure for salinity measurement based on etched double-side hole fiber[J]. *Optics letters*, 2021, 46(11): 2714-2717.
- [20] WANG L, YANG L, ZHANG C, et al. High sensitivity and low loss open-cavity Mach-Zehnder interferometer based on multimode interference coupling for refractive index measurement[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 109: 193-198.
- [21] PARK M, LEES, HAW, et al. Ultracompact intrinsic micro air-cavity fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(15): 1027-1029.
- [22] WANG X, XU Z, LU N, et al. Ultracompact refractive index sensor based on microcavity in the sandwiched photonic crystal waveguide structure[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(6): 1725-1731.
- [23] ZOU Y, CAKRAVARTY S, KWONG D N, et al. Cavity-waveguide coupling engineered high sensitivity silicon photonic crystal micro-cavity biosensors with high yield[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 20(4): 171-180.
- [24] WANG X, YUAN T, WU J, et al. Enhanced temperature sensing by multi-mode coupling in an on-chip microcavity system[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2024: 2300760.
- [25] BAIN F M, LAGA A, Thomson R R, et al. Ultrafast laser inscribed Yb: KGd(WO₄)₂ and Yb: KY(WO₄)₂ channel waveguide lasers[J]. *Optics Express*, 2009, 17(25): 22417-22422.
- [26] CALMAO T, S J, REUCHERT F, et al. Crystalline Pr: SrAl₁₂O₁₉ waveguide laser in the visible spectral region[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(23): 4620-4622.
- [27] TAN Y, RODENAS A, CHEN F, et al. 70% slope efficiency from an ultrafast laser-written Nd: GdVO₄ channel waveguide laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(24): 24994-24999.
- [28] LIN C Y, CHERN G W, WANG L A. Periodical corrugated structure for forming sampled fiber Bragg grating and long-period fiber grating with tunable coupling strength[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(8): 1212.
- [29] MURIB M S, MARTENS D, BIENSTMAN P. Label-free real-time optical monitoring of DNA hybridization using SiN Mach-Zehnder interferometer-based integrated biosensing platform[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(12): 127002-127002.
- [30] SPASOPOULIOS D, KAZIANNIS S, DANAKAS S, et al. LSPR based optical fiber sensors treated with nanosecond laser irradiation for refractive index sensing[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 256: 359-366.
- [31] PARK M, LEE S, HA W, et al. Fabrication of intrinsic fiber Mach-Zehnder interferometer by imbedding micro air-cavity[C]. //International Quantum Electronics Conference. Optica Publishing Group, 2009: JWA94.
- [32] JUNG Y, LEE S, LEE B H, et al. Ultracompact in-line broadband Mach-Zehnder interferometer using a composite leaky hollow-optical-fiber waveguide[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(24): 2934-2936.

[责任编辑:赵海军]