

# 基于马赫-曾德干涉仪的色散转折效应 及其传感性能模拟研究

黄田野<sup>\*</sup>, 雷蓉蓉, 程卓, 张祥莉, 王勇, 罗大鹏, 许桂珍, 张港顺, 吴易恒, 潘建行

中国地质大学(武汉)机械与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

**摘要** 设计了工作在近红外波段的硅基马赫-曾德干涉仪(MZI)折射率传感器。理论和仿真模拟分析表明,通过改变 MZI 的结构参数可以对输出干涉谱的色散转折特性进行调控,经过优化后色散转折点(DTP)所对应的波长可以调至近红外波段(1550 nm),通过改变 MZI 周围的环境折射率(SRI)可以使折射率灵敏度达到 37500 nm/RIU。由于 DTP 两侧的干涉条纹对外界折射率响应有相反的特性,将干涉波谷的相对漂移量作为检测对象,能够将灵敏度提高 2 倍,即 75000 nm/RIU。不同于常规基于光栅和波导耦合构架的 DTP 传感器,所设计的 DTP 结构中两个干涉模式互不相关且均可独立调控,并可根据需要灵活调控色散转折波长。

**关键词** 集成光学; 传感器; 波导耦合; 近红外; 马赫-曾德干涉仪; 色散转折点; 环境折射率

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0513001

## Numerical Study on Dispersion Turning Effect Based on Mach-Zehnder Interferometers and Its Sensing Performance

Huang Tianye<sup>\*</sup>, Lei Rongrong, Cheng Zhuo, Zhang Xiangli, Wang Yong,  
Luo Dapeng, Xu Guizhen, Zhang Gangshun, Wu Yiheng, Pan Jianxing

*School of Mechanical Engineering and Electronic Information, China University of Geosciences (Wuhan),  
Wuhan, Hubei 430074, China*

**Abstract** In this paper, a silicon-based Mach-Zehnder interferometer (MZI) refractive index sensor working in the near infrared band is designed. Theoretical and simulation analysis show that the dispersion turning characteristics of the output interference spectrum can be regulated by changing the structural parameters of MZI. After optimization, the wavelength corresponding to the dispersion turning point (DTP) can be adjusted to the near-infrared band (1550 nm). By changing the ambient refractive index (SRI) around the MZI, the refractive index sensitivity can reach 37500 nm/RIU. Since the interference fringes on both sides of DTP have opposite characteristics to the refractive index response of the outside world, taking the relative drift of the interference trough as the detection object can improve the sensitivity by two times, the value is 75000 nm/RIU. Different from conventional DTP sensor based on grating and waveguide coupling structure, the two interference modes in the designed DTP structure are unrelated and can be adjusted independently, and the dispersion transition wavelength can be adjusted flexibly according to the needs.

**Key words** integrated optics; sensors; waveguide coupling; near-infrared; Mach-Zehnder interferometer; dispersion turning point; surrounding refractive index

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-08-11; 录用日期: 2021-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(61605179, 61973283)、武汉市科技局项目(2018010401011297)

通信作者: \*tianye\_huang@163.com

# 1 引言

光波导凭借其特殊的几何结构,可以将外界进入的光场压缩并限制在微米量级的二维或三维区域内传播。当外界环境条件变化时,光强度和相位或偏振等光场特性将在传播过程中发生改变,利用某些特殊的光波导结构可以增强或放大光波导器件对外界环境变化的敏感性<sup>[1-3]</sup>,因此其经常被用于探测有毒有害气体、分析环境污染物和实时监测分子间的相互作用等领域<sup>[4]</sup>。集成光波导传感器可以根据波导结构和传感器结构的不同来分类。基于波导结构的不同,集成光波导传感器有光子晶体<sup>[5]</sup>、狭缝波导<sup>[6]</sup>、条形波导<sup>[7]</sup>和光栅波导<sup>[8]</sup>等。基于传感器结构的不同,集成光波导传感器有微盘谐振器<sup>[9]</sup>、微环谐振器<sup>[10]</sup>、马赫-曾德干涉仪(MZI)<sup>[11]</sup>和杨氏干涉仪<sup>[12]</sup>等。这些传感器通常是通过倏逝场来感知环境变化,其灵敏度与波导模式的倏逝场大小直接相关。

基于绝缘衬底上的硅(SOI)平台的集成波导折射率传感器具有灵敏度高、体积小和抗电磁干扰的优点,而且容易实现光器件的微型化和集成化。这些折射率传感器有很多不同的结构。其中环形谐振器的传感机制是谐振效应,不需要对转换信号进行连续测量,容易复用,但是灵敏度较低,需要在一定的波长范围内进行扫描<sup>[13]</sup>;MZI利用基于光相移变化的传感方案,其中干涉是由传感器两臂之间的相对相移引起的,灵敏度较高,被广泛应用于环境监测、医疗诊断和生化探测等领域<sup>[14]</sup>。

色散转折点(DTP)具体来说是波导群折射率在两种不同电场模式下的交点,首次被发现在拉锥光纤

中<sup>[15]</sup>,之后在长周期光纤光栅(LPG)<sup>[16-17]</sup>和少模光纤中也发现了类似的效应<sup>[18-19]</sup>。与不具有 DTP 特性的传感器相比,具有 DTP 特性的传感器的灵敏度会有极大的提升。在目前报道的 DTP 传感器中,熔融拉锥光纤耦合器的灵敏度能达到 92020 nm/RIU<sup>[20]</sup>,LPG 的灵敏度能达到 5078 nm/RIU<sup>[21]</sup>,光栅耦合狭缝波导结构的灵敏度能达到 1970 nm/RIU<sup>[22]</sup>。这些结构大都是在满足相位匹配的情况下通过一种模式激发出另外一种高阶模,再通过两种模式的耦合进而形成 DTP 效应<sup>[23]</sup>。这些结构都是在一个波导中激发两种模式再进行干涉,由于两个模式同属一个波导,故两个模式不能独立调控,为此不利于灵活设计。

本文提出一种基于非对称 MZI 且具有超高灵敏度的 DTP 波导结构,MZI 的两个臂分别由条形波导与狭缝波导构成,通过设计两个臂的结构参数可使条形波导与狭缝波导具有相同的群折射率,两个臂的光场在输出端相互干涉可形成 DTP 效应。由于狭缝波导中的光场与外界环境有较大的交叠,当环境折射率发生变化时,干涉条纹将产生巨大的漂移,从而使波导结构具备极大的折射率灵敏度。波导结构经过优化后,折射率灵敏度可达 37500 nm/RIU。由于 DTP 两侧的干涉条纹具有相反的漂移特性,利用相对漂移量作为监测对象,得到灵敏度可达 75000 nm/RIU。在此基础上,进一步探讨了该结构在气压传感中的应用。

## 2 理论模型和波导设计

### 2.1 波导结构设计与理论分析

图 1 为基于 MZI 的折射率传感器的原理图。

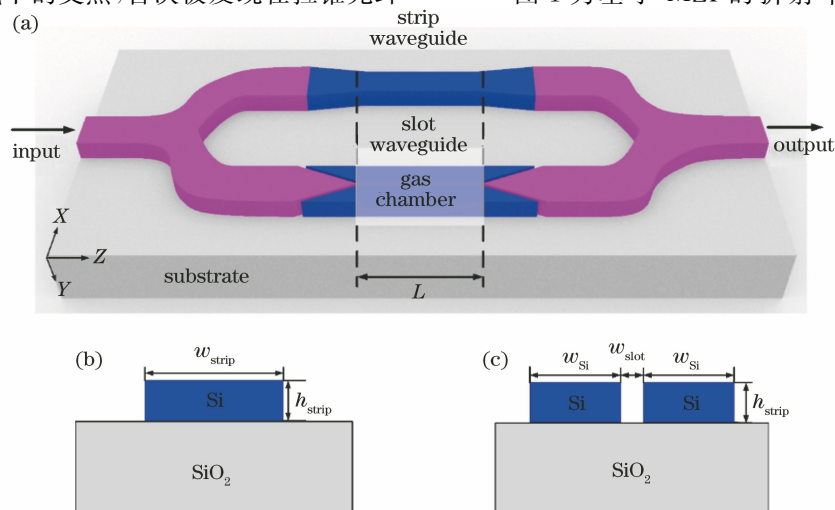


图 1 基于 MZI 的折射率传感器的原理示意图。(a)整体结构;(b)条形波导的截面;(c)狭缝波导的截面

Fig. 1 Schematic of refractive index sensor based on MZI. (a) Overall structure; (b) section of strip waveguide; (c) section of slot waveguide

如图 1(a)所示,传感器整体是一个基于 MZI 结构的硅基集成波导,其中衬底材料为二氧化硅,波导材料为硅。传感器分为上下支路,其中条形波导所在的上支路为参考支路,狭缝波导所在的下支路为传感支路,参与传感的气体填满下支路的气体腔。其中,上支路中的条形波导与 Y 分支通过对称的梯形体连接,下支路中的狭缝波导与 Y 分支通过锥形结构连接。条形波导的横截面如图 1(b)所示,条形波导的高度为  $h_{\text{strip}}$ ,宽度为  $w_{\text{strip}}$ 。狭缝波导的横截面如图 1(c)所示,狭缝波导的高度为  $h_{\text{slot}}$ ,硅的宽度为  $w_{\text{Si}}$ ,狭缝的宽度为  $w_{\text{slot}}$ 。

MZI 两条支路的输出光场因干涉效应而产生干涉条纹,外界环境的微小变化都会引起波导中导模倏逝场或者传输相位的改变,具体来说就是当待测物发生变化时,传感臂波导的有效折射率(ERI)随之发生变化,因传感臂的光程发生相应的变化,从而造成干涉条纹的移动,通过对干涉条纹分布及条纹移动的定量测量可以得到传感器的灵敏度。

假设  $I_1$  和  $I_2$  分别为 MZI 两臂上条形波导和狭缝波导中的电场强度, $\phi$  为两种模式经过干涉之后的累计相位,输出光谱的强度可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \phi. \quad (1)$$

干涉谱的周期性传输零点<sup>[24]</sup>满足

$$\phi_N = \Delta\beta L = \left(\Delta n_{\text{eff}} \times \frac{2\pi}{\lambda_N}\right)L = (2N - 1)\pi, \quad (2)$$

式中: $L$  为干涉腔的长度; $\Delta\beta$  和  $\Delta n_{\text{eff}}$  分别为传输常数的差值和 ERI 的差值; $\lambda_N$  为传输光谱上第  $N$  个传输零点所对应的波长。在  $\lambda_N$  处的折射率灵敏度

(SRI)可以表示为

$$S_{\text{RI}} = \frac{\partial \lambda_N}{\partial n} = \frac{\lambda_N}{n_g^1 - n_g^2} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial n} = \frac{\lambda_N}{G} \frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial n}, \quad (3)$$

式中: $G$  为两臂波导模式的群折射率差值, $G = n_g^1 - n_g^2$ ,其中  $n_g^1$  为狭缝波导模式的群有效折射率, $n_g^2$  为条形波导基模  $\text{TE}_{00}$  的群有效折射率; $n$  为环境折射率。群有效折射率可由  $n_g = n_{\text{eff}} - \lambda_N \partial(\Delta n_{\text{eff}})/\partial \lambda$  计算得到,灵敏度主要受到  $\lambda_N$ 、 $G$  和  $\frac{\partial(\Delta n_{\text{eff}})}{\partial n}$  的影响,当  $G$  值趋近于 0 时,灵敏度趋近于无穷大。

## 2.2 波导电场模式

首先获得上下支路中传输光场的 ERI,进一步通过计算群折射率差值得到 DTP 的位置,并计算 MZI 的折射率灵敏度。计算中,硅和二氧化硅的折射率均由洛伦兹模型<sup>[25]</sup>得到。

在商业化仿真软件平台 COMSOL Multiphysics 中对波导结构进行仿真计算。当光从 Y 分支端口进入时,其以 1:1 等分进入上下两个支路<sup>[26]</sup>,分别同时激发出图 2(a)的  $\text{TE}_{00}$  模式和图 2(b)的狭缝模式,两种不同模式的光经过相同的干涉长度后在另一端耦合并输出。在  $h_{\text{strip}} = h_{\text{slot}} = 220 \text{ nm}$ 、 $w_{\text{strip}} = 1000 \text{ nm}$ 、 $w_{\text{slot}} = 150 \text{ nm}$  和  $w_{\text{Si}} = 800 \text{ nm}$  的参数设置下,得到的波导电场分布如图 2 所示。如图 2(a)所示,条形波导中大部分的光场被限制在硅波导里面。如图 2(b)所示,狭缝波导中的光场被限制在狭缝区域里面。

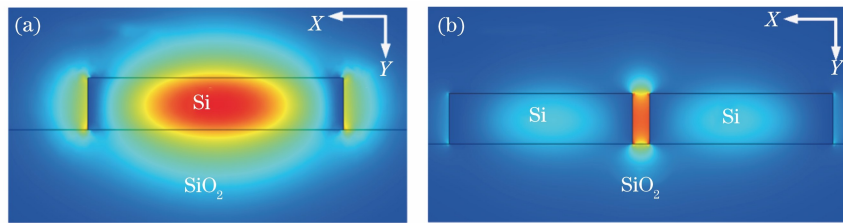


图 2 波导的电场分布。(a)条形波导的  $\text{TE}_{00}$  模式;(b)狭缝波导的狭缝模式

Fig. 2 Electric field distribution in waveguide. (a)  $\text{TE}_{00}$  mode of strip waveguide; (b) slot mode of slot waveguide

本文将狭缝波导作为传感臂,这是由于其结构相较于其他光栅波导<sup>[27]</sup>简单,而且易于制造,能够以一个较低的成本得到超高的灵敏度,并且狭缝波导与气体环境的接触面积更大,故对 SRI 的变化更为敏感。狭缝波导由纳米级的硅材料制成,其折射率相较于狭缝内的气体折射率更高,由于分界面处电场的法向分量具有不连续性,故光被限制在较低折射率的区域中,最终大部分光被限制在狭缝内,所

以狭缝内的光场得到显著加强<sup>[28]</sup>,该部分光场会受到传感介质的影响而具有高灵敏度。

## 3 灵敏度分析

### 3.1 SRI 传感分析

根据(3)式来分析折射率灵敏度是如何受到波长  $\lambda_N$  和群折射率差值  $G$  的影响,可以看出灵敏度与波长  $\lambda_N$  呈正相关,与  $G$  呈负相关。在不同的

$w_{\text{strip}}$ 、 $w_{\text{Si}}$  和  $w_{\text{slot}}$  下,研究 MZI 两臂波导的群折射率。腔长度  $L$  为 7.5 mm 能够观察到清晰的干涉光谱图,此时能够达到一个最高的灵敏度,后续仿真固定干涉长度  $L$  为 7.5 mm。为了简化分析,取上下两臂波导的传输损耗为 3 dB/cm<sup>[29-30]</sup>。

DTP 的位置可以通过改变  $w_{\text{strip}}$ 、 $w_{\text{Si}}$  和  $w_{\text{slot}}$  来调整。当  $L=7.5$  mm、 $h_{\text{strip}}=h_{\text{slot}}=220$  nm 时,群折射率与波长的关系如图 3 所示,其中分别有  $w_{\text{strip}}$ 、 $w_{\text{Si}}$  和  $w_{\text{slot}}$  三个变量。图 3(a)~3(f)分别表示当  $w_{\text{Si}}$  分别为 800,830,860,890,920,950 nm 时,  $w_{\text{strip}}$  在不同取值下  $n_g$  与波长的关系曲线(实线)和  $w_{\text{slot}}$  在不同取值下  $n_g$  与波长的关系曲线(虚线)的交点图,交点即为 DTP。由图 3(a)~3(f)可知,随

着条形波导宽度  $w_{\text{strip}}$  的增加或者狭缝波导宽度  $w_{\text{slot}}$  的增加,DTP 会向长波长的方向移动,光谱发生红移;随着  $w_{\text{Si}}$  的增加,DTP 会向短波长的方向移动,光谱发生蓝移。理论上,在每个 DTP 附近,MZI 传感器都具有一个很高的灵敏度。研究发现,在保证波导有正确模式的情况下,不同的波导尺寸对 MZI 灵敏度的影响较小,由于灵敏度与 DTP 所对应的波长  $\lambda_N$  呈正相关,所以理论上当波长更大时,灵敏度会相对较高。由图 3(a)~3(f)对比可知,为了在 2000 nm 波长附近取到 DTP,且便于观测关于 DTP 对称的波峰和波谷,在后续的研究中,折中选取  $w_{\text{slot}}=150$  nm、 $w_{\text{Si}}=800$  nm 和  $w_{\text{strip}}=1000$  nm 进行灵敏度的分析。

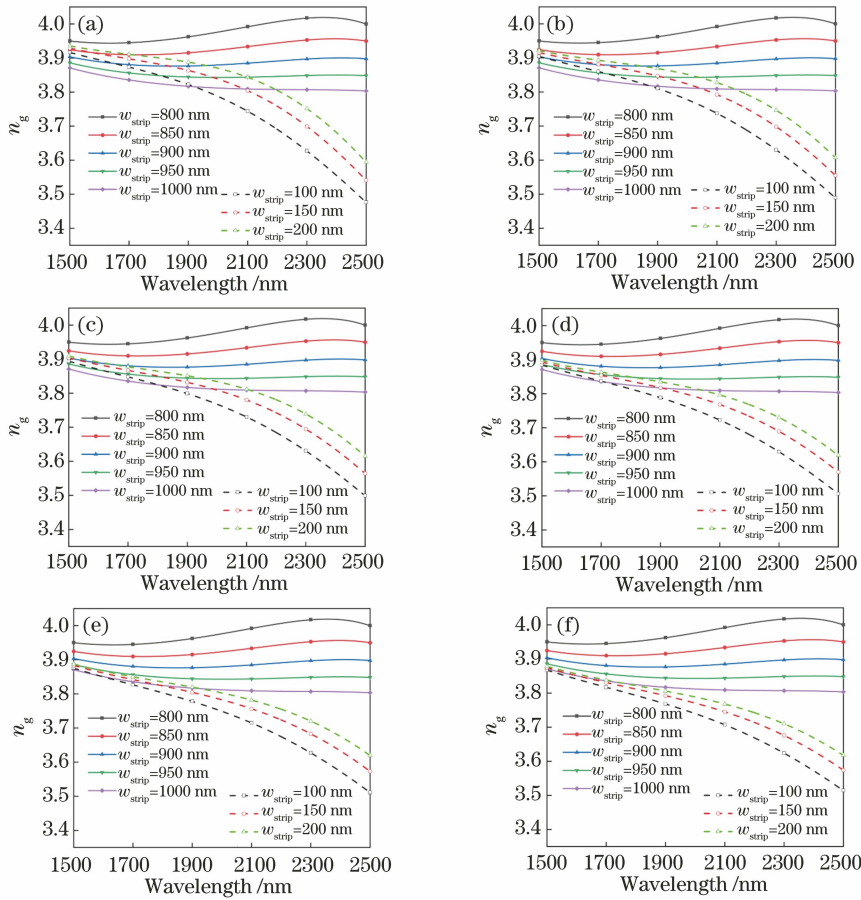


图 3 同一干涉长度、不同波导尺寸下群有效折射率与波长的关系。(a)  $w_{\text{Si}}=800$  nm;(b)  $w_{\text{Si}}=830$  nm;  
(c)  $w_{\text{Si}}=860$  nm;(d)  $w_{\text{Si}}=890$  nm;(e)  $w_{\text{Si}}=920$  nm;(f)  $w_{\text{Si}}=950$  nm

Fig. 3 Relationship between effective refractive index and wavelength under the same interference length and different waveguide sizes. (a)  $w_{\text{Si}}=800$  nm; (b)  $w_{\text{Si}}=830$  nm; (c)  $w_{\text{Si}}=860$  nm; (d)  $w_{\text{Si}}=890$  nm; (e)  $w_{\text{Si}}=920$  nm; (f)  $w_{\text{Si}}=950$  nm

为了更直观地看出  $G$  与波长的关系,固定  $w_{\text{slot}}=150$  nm 和  $w_{\text{strip}}=1000$  nm,  $w_{\text{Si}}$  从 800 nm 增大到 950 nm,步长取 30 nm,得到狭缝波导的六条群折射率曲线与条形波导的群折射率曲线的交

点图如图 4(a)所示,可以看出狭缝波导和条形波导的群折射率大小均与波长成反比,且随着  $w_{\text{Si}}$  的减小,交点会向长波长的方向移动。图 4(b)清楚地显示了不同  $w_{\text{Si}}$  下的  $G$ 。从图 4(b)可以看到:

不同  $G$  随波长的变化曲线都有相似的趋势,在某一特定波长处都会出现零点;随着波长的增长, $G$

值逐渐减小,且不同的  $w_{si}$  下, $G$  都表现为先接近于 0 后又远离 0。

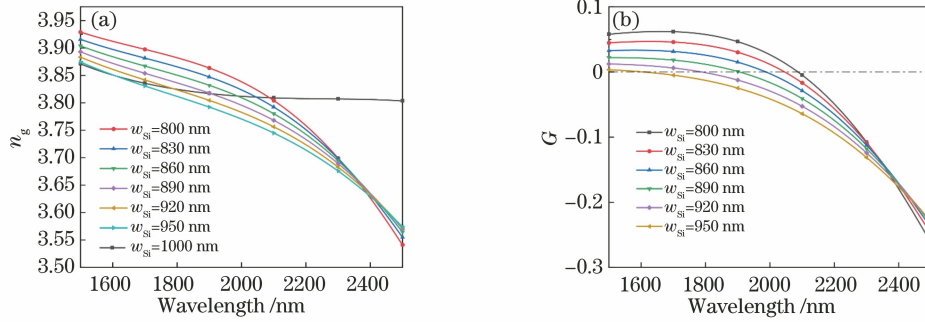


图 4 不同  $w_{si}$  下群折射率的特性曲线。(a)不同  $w_{si}$  下的曲线与  $w_{strip}=1000$  nm 曲线的交点; (b)不同  $w_{si}$  下  $G$  与波长关系

Fig. 4 Characteristic curves of group refractive index under different  $w_{si}$  conditions. (a) Intersections of curves under different  $w_{si}$  and curves with  $w_{strip}=1000$  nm; (b) relationship between  $G$  and wavelength at different  $w_{si}$

固定  $w_{strip}=1000$  nm、 $w_{slot}=150$  nm 和  $w_{si}=800$  nm,改变波导的 SRI,则干涉光谱和灵敏度的变化曲线如图 5 所示。图 5(a)显示了 SRI 从 1.0086 变化到 1.0066 的透射光谱,其中  $d_{AA'}$  为波谷 A 与 A'之间的波长差。从图 5(a)可以看到:当 SRI 从 1.0086 变化到 1.0078 时,两边最靠近 DTP 的两个波谷逐渐合并为一个宽的波峰;当 SRI 从 1.0078 变化到 1.0074 时,宽的波峰变浅,最后随着 SRI 的变化会成为双峰;越靠近 DTP 的波峰和波谷,它们的漂移程度会越大;靠近 DTP 的

波谷 A、B 和 C,它们的漂移对应正的灵敏度,波谷 A'、B' 和 C' 的漂移对应负的灵敏度,其中 A 和 A' 具有最高的灵敏度。图 5(b)为 SRI 从 1.0086 变化到 1.0066 的情况下,条形波导 TE<sub>00</sub> 模式和狭缝波导狭缝模式的相位累积量图。从图 5(b)可以看到,随着 SRI 的不断减小,(2)式中的  $\Delta n_{eff}$  会增大,则相位累积量增多,其中相位累积量最多的位置在线型顶点处,其对应着 DTP,DTP 两侧的波谷会向远离 DTP 的方向漂移,这也符合图 5(a)中光谱图的变化趋势。

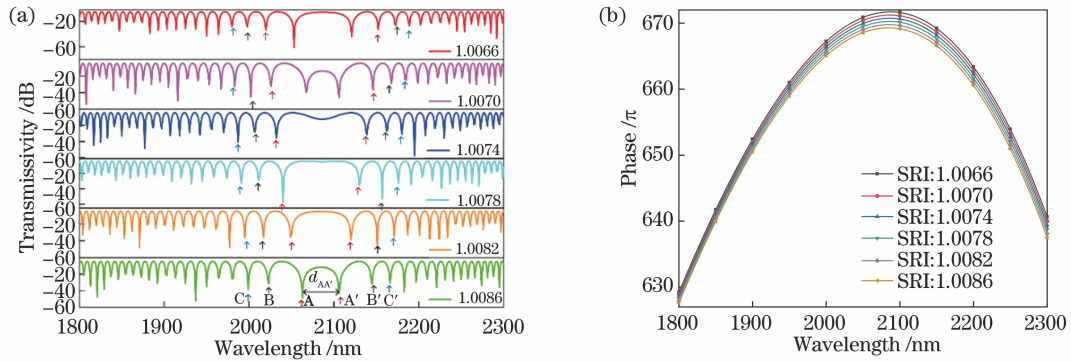


图 5 MZI 光谱特性图。(a) SRI 从 1.0086 变化到 1.0066 的透射光谱;(b) SRI 从 1.0086 变化到 1.0066 的情况下条形波导 TE<sub>00</sub> 模式和狭缝波导狭缝模式的相位累积曲线

Fig. 5 MZI spectra characteristic diagram. (a) Transmission spectra of SRI varying from 1.0086 to 1.0066; (b) phase accumulation curves of strip waveguide TE<sub>00</sub> mode and slot waveguide slot mode when SRI changes from 1.0086 to 1.0066

根据计算可知,条形波导和狭缝波导的截止波长分别约为  $3 \mu\text{m}$  和  $12 \mu\text{m}$ ,所以考虑的波长区域是远离截止波长的,故此时没有出现模式截止的现象。同时,由于二氧化硅衬底在  $3 \mu\text{m}$  波长以上将会有极大的损耗,所以研究中没有考虑更长的波段。图 6(a)显示了当  $w_{slot}=150$  nm 和  $w_{strip}=1000$  nm

时,在  $w_{si}$  分别为 800,830,860,890 nm 的情况下折射率灵敏度和波长的关系。从图 6(a)可以看出:当  $w_{si}$  增大时,DTP 会向短波长的方向漂移,并且靠近 DTP 的波谷处的灵敏度更高;当  $w_{si}$  为 800 nm 和 830 nm 时,传感器具有最高的单边灵敏度,值为  $35000 \text{ nm}/\text{RIU}$ 。图 6(b)给出了测量得到的灵敏度曲

线,能够看出越靠近 DTP,传感器的灵敏度越高,波谷 A 和 A' 处的灵敏度最高可以达到 35000 nm/RIU。DTP 两侧的干涉条纹对外界折射率响应有相反的现象,利用干涉波谷的相对漂移量作为监测对象,能够将灵敏度提高 2 倍。如图 5(a)所示,规定 A 与 A' 之间的波长差为  $d_{AA'}$ , B 与 B' 之间的波长差为  $d_{BB'}$ , C 与

C' 之间的波长差为  $d_{CC'}$ ,通过测量两个波谷之间的距离变化量能够得到一个相较于测量一个波谷漂移量的双倍灵敏度。通过图 6(c)可以计算出具体双倍灵敏度,得到的最高 SRI 灵敏度为测量  $d_{AA'}$  得到的 -70000 nm/RIU,其中测量  $d_{BB'}$  和  $d_{CC'}$  得到的灵敏度分别为 -30000 nm/RIU 和 -22500 nm/RIU。

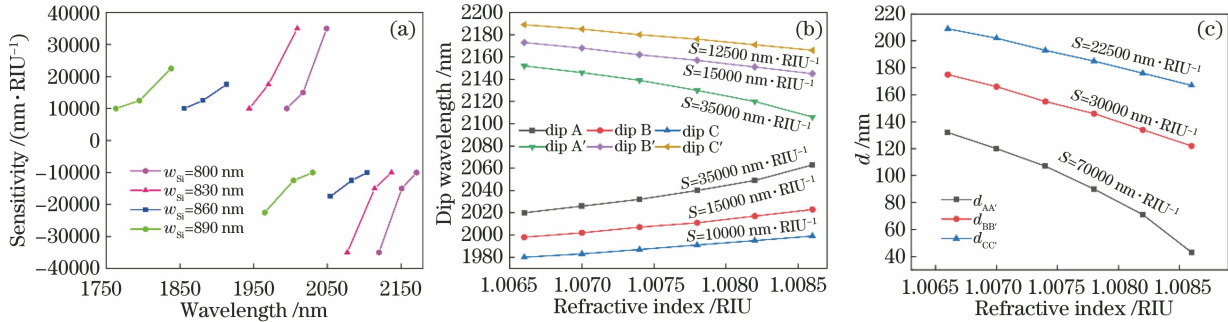


图 6 SRI 灵敏度分析图。(a)不同  $w_{si}$  下折射率灵敏度与波长的关系;(b) A、A'、B、B'、C 和 C' 随 SRI 变化的波长漂移曲线;(c) AA'、BB' 和 CC' 随 SRI 变化的距离曲线

Fig. 6 SRI sensitivity analysis diagram. (a) Relationship between refractive index sensitivity and wavelength at different  $w_{si}$ ; (b) wavelength shift curves of A, A', B, B', C, and C' with SRI; (c) distance curves of to AA', BB', and CC' with SRI

### 3.2 气压传感模拟分析

由于传感器中气压的改变会引起气体折射率的变化,故该传感器同样可以用于气压传感,保持温度为 25 °C,湿度恒定,令真空室的相对压强以 60 kPa 的步长从 -240 kPa 逐步调整到 0。其中 SRI 随压强变化的关系<sup>[31]</sup>为

$$n = 1 + 7.82 \times 10^{-7} P / (273.6 + T), \quad (4)$$

式中: $n$  为气体的 SRI; $P$  为气体的绝对压强。在 COMSOL Multiphysics 5.4 中,通过调整环境折射率可以实现模拟压强的改变。

图 7(a)为相对压强从 0 变化到 -240 kPa 的透射光谱。从图 7(a)可以看到:当气体腔内压强增加时, DTP 两侧的波峰和波谷都向 DTP 靠近,并且波峰逐渐变宽;越靠近 DTP 的波峰和波谷,它的漂移程度会越大。图 7(b)比较了传输光谱中波谷对压力和 SRI 的敏感性,单位分别为 nm/MPa 和 nm/RIU。从图 7(b)可以看到,离 DTP 最近的波谷 A 和 A' 有最高的灵敏度,其中波谷 A 处的 SRI 灵敏度为 37500 nm/RIU,气压灵敏度为 133.33 nm/RIU,其他离 DTP 远一些的波谷(B、B'、C 和 C')的灵敏度低很

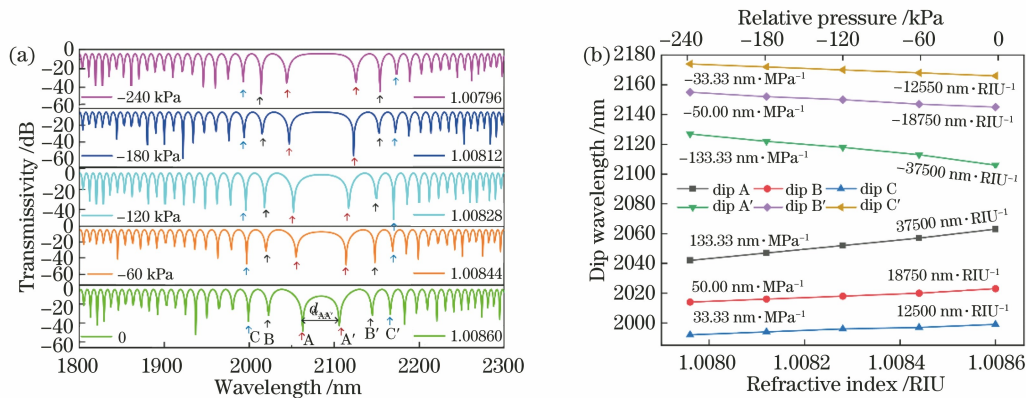


图 7 气压灵敏度分析图。(a)气压相对压强从 0 变化到 -240 kPa 的透射光谱;(b) A、A'、B、B'、C 和 C' 随 SRI 和相对压强变化的波长漂移曲线

Fig. 7 Barometric sensitivity analysis diagram. (a) Transmission spectra of barometric relative pressure varying from 0 to -240 kPa; (b) wavelength shift curves of A, A', B, B', C, C' with SRI and relative pressure

多,但 SRI 灵敏度仍然高于  $10^4$  nm/RIU。波谷位置、压力与 SRI 都呈线性变化,DTP 位于 2085 nm。根据 DTP 两侧的干涉条纹对 SRI 响应有相反的特性,当取波谷的双边漂移量为参考对象时,灵敏度会加倍,取  $d_{AN}$  变化量为参考量,得到理论的最高气压灵敏度为  $-226.66$  nm/MPa,SRI 灵敏度为  $-75000$  nm/RIU。

## 4 讨 论

本文设计的 MZI 结构可以在基于成熟技术的 SOI 平台上制作。首先利用电子束光刻技术来刻画器件的形状结构,通过电感耦合等离子体将器件的

形状结构转移到硅基上<sup>[32-33]</sup>。对于片上气室的制备,可以采用微流控芯片工艺,即软光刻<sup>[34-35]</sup>,过程如图 8 所示,其中光刻胶(SU-8)是在硅衬底上旋转涂覆并预热的。然后使用带有气室形状的掩模网线将光刻胶放在紫外线下,经过显影和热处理后可以形成具有气室结构的硅基板模板,将聚二甲基硅氧烷(PDMS)倒在硅衬底模板上并加热固化。从模板中剥离的 PDMS 结构由打孔机冲孔,以便甲烷气体的注入。最后使 PDMS 和集成器件同时接受氧离子的处理以激活表面并进行热粘合,从而形成片上气室。

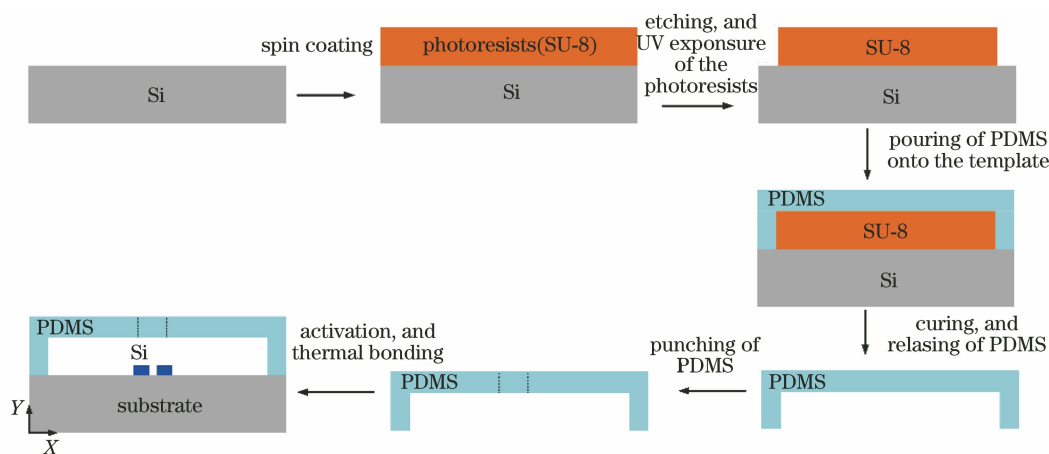


图 8 使用 PDMS 制造片上气室的过程

Fig. 8 Fabrication of on-chip gas chambers using PDMS

## 5 结 论

本文主要提出了一种基于 DTP 的新型片上集成传感器,并对其传感性能进行仿真模拟分析。该传感器采用 MZI 结构,上支路为条形波导,下支路为狭缝波导,通过独立调节两个支路的模式特性可获得相近的群折射率,从而在 MZI 输出端形成具有 DTP 特性的干涉条纹。干涉条纹的漂移对外界折射率的变化具有极高的敏感性,在 1550 nm 波段处的灵敏度可达 37500 nm/RIU,进一步根据 DTP 两侧干涉条纹对外界折射率响应有相反的特性,灵敏度可提升 2 倍。在此基础上对传感器在气压传感中的应用进行探索,灵敏度可达 133.33 nm/MPa。相比于早期报道的 DTP 传感器,本文所提出的方案无需光栅结构,也无需采用多模干涉,工作波长可灵活调控。该结构中的超敏感机制有望应用于化学和生物传感领域,同时也为低功耗电光调制器的结构设计提供了思路。

### 参 考 文 献

[1] Bamiedakis N, Hutter T, Penty R V, et al. PCB-

integrated optical waveguide sensors: an ammonia gas sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(10): 1628-1635.

- [2] Bernini R, Campopiano S, Zeni L. Design and analysis of an integrated antiresonant reflecting optical waveguide refractive-index sensor[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(1): 70-73.
- [3] Luff B J, Wilkinson J S, Piehler J, et al. Integrated optical Mach-Zehnder biosensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(4): 583-592.
- [4] Liu Q, Tu X G, Kim K W, et al. Highly sensitive Mach-Zehnder interferometer biosensor based on silicon nitride slot waveguide [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, 188: 681-688.
- [5] Ertman S, Rutkowska K, Woliński T R. Recent progress in liquid-crystal optical fibers and their applications in photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(11): 2516-2526.
- [6] Sanchis P, Blasco J, Martinez A, et al. Design of silicon-based slot waveguide configurations for optimum nonlinear performance [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(5): 1298-1305.
- [7] Wong W P, Chiang K S. Design of optical strip-

- loaded waveguides with zero modal birefringence[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998, 16(7): 1240-1248.
- [8] Wei X, Weiss S M. Guided mode biosensor based on grating coupled porous silicon waveguide[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11330-11339.
- [9] Luo X, Poon A W. Coupled spiral-shaped microdisk resonators with non-evanescent asymmetric inter-cavity coupling[J]. *Optics Express*, 2007, 15(25): 17313-17322.
- [10] Zheng Y, Pu M H, Sahoo H K, et al. High-quality-factor AlGaAs-on-sapphire microring resonators[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(3): 868-874.
- [11] Li Y, Tong L. Mach-Zehnder interferometers assembled with optical microfibers or nanofibers[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(4): 303-305.
- [12] Leppänen L P, Saastamoinen K, Friberg A T, et al. Detection of electromagnetic degree of coherence with nanoscatterers: comparison with Young's interferometer[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2898-2901.
- [13] Iqbal M, Gleeson M A, Spaugh B, et al. Label-free biosensor arrays based on silicon ring resonators and high-speed optical scanning instrumentation [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2010, 16(3): 654-661.
- [14] Ahsani V, Ahmed F, Jun M B G, et al. Tapered fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for ultra-high sensitivity measurement of refractive index[J]. *Sensors*, 2019, 19(7): E1652-E1662.
- [15] Lacroix S, Gonthier F, Black R J, et al. Tapered-fiber interferometric wavelength response: the achromatic fringe[J]. *Optics Letters*, 1988, 13(5): 395-397.
- [16] Pilla P, Trono C, Baldini F, et al. Giant sensitivity of long period gratings in transition mode near the dispersion turning point: an integrated design approach[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(19): 4152-4154.
- [17] Shu X W, Zhang L, Bennion I. Sensitivity characteristics near the dispersion turning points of long-period fiber gratings in B/Ge codoped fiber[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(22): 1755-1757.
- [18] Lu C X, Dong X P, Su J. Detection of refractive index change from the critical wavelength of an etched few mode fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(13): 2593-2597.
- [19] Salik E, Medrano M, Cohoon G, et al. SMS fiber sensor utilizing a few-mode fiber exhibits critical wavelength behavior[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(7): 593-595.
- [20] Li K W, Zhang N, Zhang N M Y, et al. Ultrasensitive measurement of gas refractive index using an optical nanofiber coupler [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 679-682.
- [21] Høvik J, Yadav M, Noh J W, et al. Waveguide asymmetric long-period grating couplers as refractive index sensors [J]. *Optics Express*, 2020, 28(16): 23936-23949.
- [22] Liu Q, Kee J S, Park M K. A refractive index sensor design based on grating-assisted coupling between a strip waveguide and a slot waveguide [J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5897-5909.
- [23] Burns W K, Milton A F, Lee A B, et al. Optical modal evolution 3-dB coupler [J]. *Applied Optics*, 1976, 15(4): 1053-1065.
- [24] Ji W B, Tan Y C, Lin B, et al. Nonadiabatically tapered microfiber sensor with ultrashort waist [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(22): 2303-2306.
- [25] Oughstun K E, Cartwright N A. On the Lorentz-Lorenz formula and the Lorentz model of dielectric dispersion[J]. *Optics Express*, 2003, 11(13): 1541-1546.
- [26] Xie Y, Huang T Y, Ji Q Z, et al. Design of an arbitrary ratio optical power splitter based on a discrete differential multiobjective evolutionary algorithm[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1780-1785.
- [27] Tehranian A, Ahmadi-Boroujeni M, Abbaszadeh A. Waveguiding characteristics of a metal-clad dielectric grating for terahertz applications [J]. *Optics Communications*, 2020, 476: 126315.
- [28] Testa G, Bernini R. Slot and layer-slot waveguide in the visible spectrum [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2979-2984.
- [29] Jalali B, Fathpour S. Silicon photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(12): 4600-4615.
- [30] Gui C C, Li C, Yang Q, et al. Demonstration of terabit-scale data transmission in silicon vertical slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9736-9745.
- [31] Zhang N M Y, Li K W, Zhang N, et al. Highly sensitive gas refractometers based on optical microfiber modal interferometers operating at dispersion turning point [J]. *Optics Express*, 2018, 26(22): 29148-29158.
- [32] Wu Y D, An J M, Li J G, et al. Silicon based optical waveguides chemical sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1983-1986.
- 吴远大, 安俊明, 李建光, 等. 硅基光波导化学传感



器研究[J]. 光学学报, 2009, 29(7): 1983-1986.

- [33] Fang S S, Wu X Q, Zhang G, et al. High-sensitivity fiber optic temperature and strain sensors based on the vernier effect [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0106004.

方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0106004.

- [34] Xia Y N, Whitesides G M. Soft lithography [J]. Annual Review of Materials Science, 1998, 28(1):

153-184.

- [35] Huang G J, Ma S Z, Wang L, et al. Photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer based on refractive index sensitivity of cladding corrosion optimization [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170629.

黄国家, 马诗章, 王恋, 等. 基于包层腐蚀优化折射率敏感的光子晶体光纤马赫-曾德尔干涉仪[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170629.