

基于集成光波导沟槽耦合器的超紧凑折射率传感器

张成龙^{1,2}, 蔡宸², 刘克¹, 关宝璐¹, 祁志美^{2,3*}

¹北京工业大学信息学部光电子技术省部共建教育部重点实验室, 北京 100124;

²中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室, 北京 100190;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 提出一种基于集成光波导沟槽耦合器的超紧凑折射率(RI)传感器。该结构包括入射波导、反射波导及透射波导,亚微米宽的沟槽位于三条波导的交汇处。入射波导中的导波光在沟槽侧壁发生受抑全内反射,使得一部分光经消逝场耦合进入透射波导,另一部分光被反射进入反射波导。因为消逝场耦合效率依赖于沟槽填充物的折射率,因此透射光强度和反射光强度都会随着沟槽填充物折射率的变化而改变,这意味着这种集成光波导沟槽耦合结构可作为微纳传感器用于实时探测液体折射率或溶液浓度。以氮化铝脊型波导为例,采用时域有限差分(FDTD)法对这种新型折射率传感器性能进行理论分析,经过结构优化,其折射率灵敏度可达 207.05 %/RIU。

关键词 集成光学; 沟槽耦合器; 受抑全内反射; 折射率传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.2413001

Ultracompact Refractive Index Sensor Based on Integrated Optical Waveguide Trench Coupler

Zhang Chenglong^{1,2}, Cai Chen², Liu Ke¹, Guan Baolu¹, Qi Zhimei^{2,3*}

¹Key Laboratory of Opto-Electronics Technology, Ministry of Education, Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

²State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This paper presents an ultra-compact refractive index (RI) sensor based on an integrated optical waveguide trench coupler fabricated on a chip. The coupler consists of an input waveguide, a reflective waveguide, and a transmission waveguide as well as a submicron-wide trench that is located at the intersection of the three waveguides. Light guided in the input waveguide undergoes frustrated total internal reflection on the sidewall of the trench, resulting in the evanescent coupling of light into the transmission waveguide and thus attenuation of light in the reflective waveguide. Because the evanescent field coupling efficiency is dependent on RI of the medium filling in the trench, both the transmitted and reflected light intensities are very sensitive to changes in RI of the liquid in the trench. This means that the integrated optical trench coupler mentioned above can be used as a micro-nano sensor for real-time detection of liquid RI or solution concentration. Performance of this novel optical sensor was theoretically analyzed based on the finite difference time domain (FDTD) method with use of the aluminum nitride ridge waveguide as the simulation model. After optimization of the sensor's geometry, its refractive index sensitivity can reach 207.05 %/RIU.

Key words integrated optics; trench coupler; frustrated total internal reflection; refractive index sensing

OCIS codes 130.3120; 130.6010; 230.7370

1 引 言

集成光波导折射率传感器具有高灵敏度、小尺

寸、低成本及易于规模化等特点,在生物化学分析和环境监测等领域发挥着越来越重要的作用^[1-5]。集成光波导传感器与微流控技术兼容性好,易于实现

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-08-14; 录用日期: 2020-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(61675203, 61775007, 61871365, 61931018)

* E-mail: qizm@aircas.ac.cn

“片上实验室 (lab on chip)”^[6]。目前,多种基于光波导结构的器件已被用于折射率传感,如微环谐振器型^[7-10]、微盘谐振器型^[11-12]、马赫-曾德尔干涉仪型^[13-14]、多模干涉型^[15-16]、“U”型弯曲波导型^[17]、直条波导耦合器型^[18]、光子晶体型^[6, 19-20]及棱镜耦合器型^[21-22]等器件。这些折射率传感器基于待测样品与光波消逝场的相互作用,通过测量传感器输出光信号的强度、波长或相位的改变量,获知待测样品的折射率或浓度^[23-24]。在这些折射率传感器中,混合有待测分析物的溶液通常覆盖在波导的表面,同时作为波导的上包层^[25],这将不利于微量待测溶液的检测;另一方面,这些传感器仍然存在尺寸较大的问题,通常尺寸在百微米至毫米或更大量级,这在一定程度上限制了其应用。因此,在技术上需要一种能够探测微量溶液的小尺寸且高灵敏的折射率传感器,以改善器件的小型化和便捷性。

本文提出了一种基于集成光波导沟槽耦合结构的超紧凑折射率传感器。该结构由入射波导、反射波导、透射波导、位于入射波导与反射波导交汇处的亚微米宽的沟槽构成。沟槽的宽度需接近或者小于输入光波长,沟槽侧壁面法线与入射波导之间的夹角应等于入射波导与反射波导间夹角的 $1/2$,且该角度应等于或者大于从入射波导到达沟槽侧壁的导波光发生全反射时的临界角。以氮化铝 (AlN) 脊型波导为例,首先介绍了基于集成光波导沟槽耦合结构的折射率传感器的构成和工作原理,接着采用时域有限差分 (FDTD) 法对这种新型传感器进行了仿真设计和仿真验证,最后从折射率传感的角度对沟槽宽度和入射波导与沟槽侧壁面法线之间的角度进

行了优化,提高了传感器的折射率灵敏度。这种新型折射率传感器具有结构简单、尺寸紧凑及适用于多种材料平台等特点。亚微米宽的沟槽既能对从入射波导渗透进沟槽内的消逝波进行耦合调控,又可以结合微流控技术作为液体样品的微流通道,大幅减小样品的损耗量。另外,还能通过改变沟槽宽度和入射波导与反射波导之间的角度来改变器件的灵敏度,因此所设计的传感器适合用于实时探测微量液体折射率或溶液浓度。

2 器件结构与传感原理

基于集成光波导沟槽耦合结构的折射率传感器包括入射波导、反射波导、透射波导,亚微米宽的沟槽位于入射波导与反射波导的交汇处。其中,沟槽的宽度应设计成接近或者小于入射光波长;沟槽侧壁面法线与入射波导之间的夹角等于入射波导与反射波导间夹角的 $1/2$,且该角度不能小于从入射波导到达沟槽侧壁的导波光发生全内反射时的临界角。当入射波导与沟槽侧壁面法线之间的夹角为 45° 时,结构如图 1(a) 所示,此时两条脊形波导相互垂直构成“T”型结构,在沟槽的两端刻蚀有直径大于沟槽宽度的圆形槽。这两个圆形宽槽分别作为液体样品微流通道的输入端口 (inlet) 和输出端口 (outlet),待测样品溶液从输入端口注入,逐渐填满沟槽后从输出端口流出。沟槽局部放大图如图 1(b) 所示,沟槽的刻蚀深度要求至少刻穿波导层,以确保从入射波导到达沟槽侧壁面的导波光能完全透进沟槽并发生耦合,耦合机理是基于受抑全内反射现象的^[26]。光通过入射波导进入沟槽区域,在波导

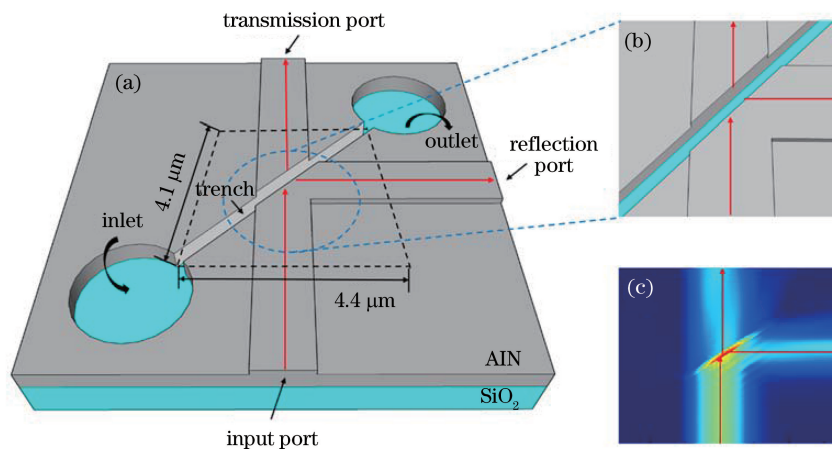


图 1 沟槽耦合器型折射率传感器示意图。(a) 三维结构图; (b) 沟槽局部放大图; (c) 沟槽耦合器的光场分布
Fig. 1 Schematic of refractive index sensor based on trench coupler. (a) Drawing of three-dimensional structure; (b) enlarged view of the trench; (c) optical field distribution of the trench coupler

与沟槽的交界面产生消逝波,当消逝波的渗透深度与沟槽的宽度相比拟时,一部分光经消逝场耦合进入透射波导,另一部分光被反射进入反射波导。透射光强度取决于消逝场的耦合效率,而后者依赖于沟槽填充物的折射率。一般来说,沟槽填充物的折射率越大,透射光强越大,反射光强越小。图 1(c)为沟槽耦合器的内部光场分布。

3 器件的仿真、优化与分析

使用 FDTD 法对图 1(a)所示的传感器结构进行功能仿真验证。光波导采用 AlN-SiO₂ 脊型波导结构,波导芯层为 AlN,下包层为 SiO₂,上包层为空气。器件的工作波长选择在水溶液环境中具有较低

损耗的 850 nm 波段^[27]。为了降低器件功耗,AlN 波导结构设计成脊形单模波导,如图 2(a)所示,波导的内脊高为 1.0 μm,刻蚀深度为 0.2 μm,宽度为 1.6 μm。850 nm 波长下的波导基模 TE₀ 的光场模式分布如图 2(b)所示。

首先研究入射波导与沟槽侧壁面法线之间的夹角为 45°时的情形,初步设定沟槽的宽度为 0.2 μm、长度为 4 μm。图 3 分别展示了当沟槽未填充水溶液样品和填充了水溶液样品(折射率 $n = 1.33$)情况下,沟槽耦合器的电场分布。对比图 3(a)和图 3(b)可以看出:当沟槽未填充水溶液样品时,反射光强远大于透射光强;当沟槽填充水溶液样品后,反射光强明显减小,透射光强显著增加,实现了器件的传感功能。

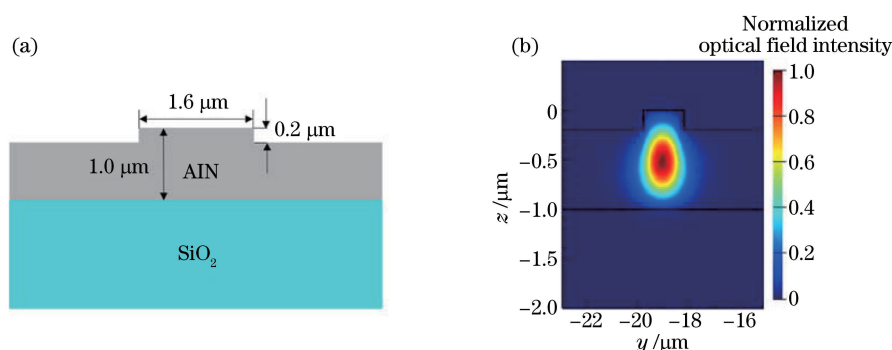


图 2 AlN 单模波导示意图。(a)二维截面图;(b) 850 nm 波长处基模 TE₀ 的光场强度分布

Fig. 2 Schematic of single mode AlN waveguide. (a) 2D cross section; (b) optical field intensity distribution of fundamental mode TE₀ at 850 nm wavelength

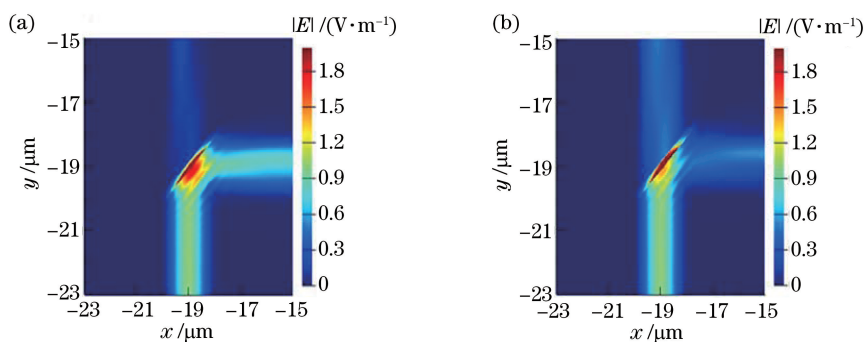


图 3 沟槽内有无填充水溶液样品时的电场强度分布 $|E|$ 。(a)无填充;(b)有填充

Fig. 3 Intensity distribution $|E|$ of electric field with or without water solution in trench. (a) Without water solution; (b) with water solution

图 4 为传感器两个端口的输出效率随沟槽填充物折射率的变化关系。当沟槽填充物的折射率越大时,器件的透射率越大,反射率越小。从图 4 可以首先得到器件的插入损耗(IL)。插入损耗可以定义为输出效率与输入效率的比值,表示为

$$L_{IL} = -10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}}, \quad (1)$$

式中: P_{out} 为器件的总输出效率,即透射率与反射率之和; P_{in} 为器件的输入效率,为 100%。由图 4 可得,在沟槽填充物的折射率为 1~2 时,器件的总输出效率为 99.65%~99.70%,对应的插入损耗的计算值为 0.013 dB~0.015 dB。

传感器的折射率灵敏度 S 定义为透射率和反射率随待测液体样品折射率的变化。对于沟槽耦合

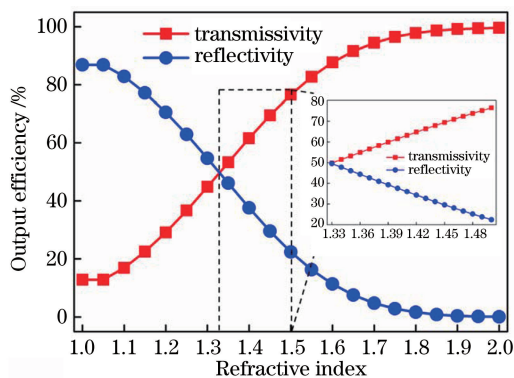


图 4 输出效率随沟槽填充物折射率的变化，插图为折射率为 1.33~1.50 的局部放大图

Fig. 4 Change of output efficiency with refractive index of trench filler. Inset shows the partial enlarged drawing in refractive index range of 1.33–1.50

器折射率传感器,透射波导端口的折射率灵敏度 S_T 和反射波导端口的折射率灵敏度 S_R 可分别表示为

$$S_T = \left| \frac{\Delta T}{\Delta n} \right|, \quad (2)$$

$$S_R = \left| \frac{\Delta R}{\Delta n} \right|, \quad (3)$$

式中: ΔT 为透射率的变化值; ΔR 为反射率的变化值; Δn 为待测液体样品折射率的变化值。灵敏度越高,代表器件感测溶液的能力越强。从图 4 可以看出,在折射率为 1.15~1.55 时,输出效率呈线性变化,这说明器件具有较宽的探测范围,可以用于多种溶液的浓度检测,如 NaCl 溶液 ($n=1.33\sim 1.38$)、葡萄糖溶液 ($n=1.33\sim 1.44$)^[28]、甘油溶液 ($n=1.33\sim 1.48$)^[29] 等。本文利用水溶液折射率的变化 ($n=1.33\sim 1.50$),得到传感器的折射率灵敏度,结果如图 4 中插图所示,其斜率即为折射率灵敏度。传感器透射端口对应的折射率灵敏度 S_T 为 157.19 %/RIU(RIU 为折射率单元),反射端口对应的折射率灵敏度 S_R 为 159.57 %/RIU。

沟槽作为器件最重要的组成部分,其长度 L 、宽度 W 及入射波导与沟槽侧壁面法线之间的角度 θ (如图 5 所示)都会影响耦合器的透射率和反射率,进而改变器件的灵敏度。

图 6 为传感器两个输出端口的折射率灵敏度随沟槽长度 L 的变化关系。在沟槽长度较小的情况下,传感器的灵敏度随沟槽长度的增加而增大,当沟槽长度大于 5 μm 时,灵敏度趋于恒定,所对应的透射端灵敏度约为 161.28 %/RIU,反射端灵敏度约为 163.08 %/RIU。

传感器两个输出端口的折射率灵敏度随沟槽宽

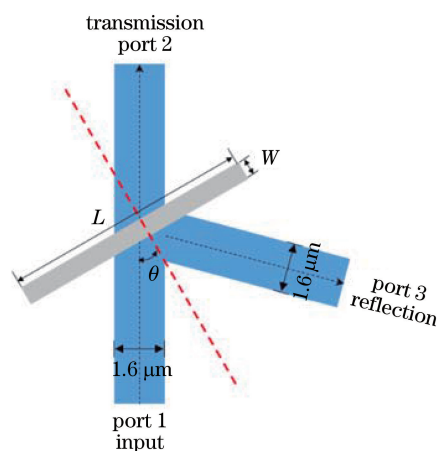


图 5 沟槽各参数示意图

Fig. 5 Schematic of each parameter of the trench

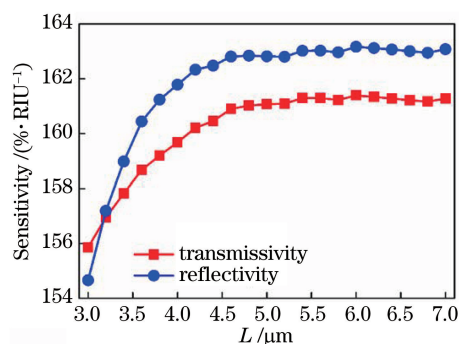


图 6 折射率灵敏度与沟槽长度的关系

Fig. 6 Relationship between refractive index sensitivity and trench length

度 W 的变化关系如图 7 所示,此时沟槽长度固定为 6 μm 。从图 7 可以得出:折射率灵敏度随沟槽宽度的增加,先增大后减小,存在最大值;当沟槽的宽度为 0.32 μm 时,折射率灵敏度最大,所对应的透射

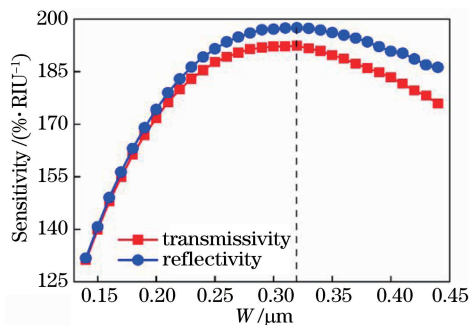


图 7 折射率灵敏度与沟槽宽度的关系

Fig. 7 Relationship between refractive index sensitivity and trench width

端灵敏度为 191.79 %/RIU,反射端灵敏度为 197.53 %/RIU。图 8 为传感器两个输出端口的折射率灵敏度随入射波导与沟槽侧壁面法线之间的角度 θ 的变化关系,此时沟槽的宽度固定为 0.32 μm 、

长度固定为 $6 \mu\text{m}$ 。可以看到,当 θ 逐渐减小时,折射率灵敏度先增大后减小,当 θ 为 43° 时,折射率灵敏度达到最优值,所对应的透射端折射率灵敏度为 $202.58 \text{ \%}/\text{RIU}$, 反射端折射率灵敏度为 $207.05 \text{ \%}/\text{RIU}$ 。

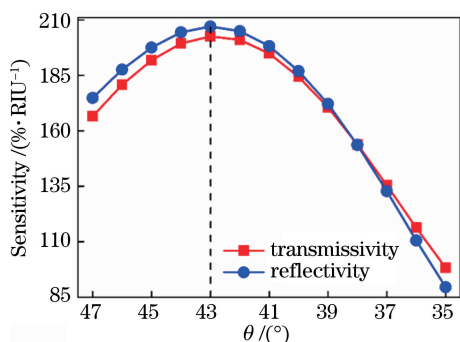


图 8 折射率灵敏度和入射波导与沟槽侧面法线的角度之间的关系

Fig. 8 Relationship between refractive index sensitivity and angle between incident waveguide and normal of trench sidewall

传感单元的结构大小是集成光波导传感器的关键参数之一,取决于沟槽的长度和入射波导与沟槽侧面法线之间的角度。通过以上对传感器结构的优化,得到在沟槽长度为 $6 \mu\text{m}$ 、入射波导与沟槽侧面法线之间的角度为 43° 的情况下,传感器的折射率灵敏度达到最优值的结论,此时对应的传感单元的结构尺寸为 $4.4 \mu\text{m} \times 4.1 \mu\text{m}$,如图 1(a)所示。

在实际的器件制备测试中,器件的传感性能主要取决于微纳沟槽的制备质量。本课题组^[30]曾成功制备出 InP 基三端口沟槽耦合器,通过测量各端口的光功率,得到其固有插入损耗约为 0.4 dB 。Jung 等^[31]曾在硅衬底上成功制备出 $2.5 \mu\text{m}$ 宽的 AlN-SiO₂ 波导。因此所设计的 $2 \mu\text{m}$ 宽的 AlN-SiO₂ 脊型波导、开口宽度为 $0.32 \mu\text{m}$ 且具有类似深宽比的沟槽在实验上可行。传感器的制备流程如下:首先,采用气相沉积法(PECVD)在硅衬底上生长 SiO₂ 层;然后再采用磁控溅射技术生长 AlN 层;接着在 AlN 层上进行紫外光刻和反应耦合等离子体(ICP)干法刻蚀,制备出 AlN-SiO₂ 脊型波导;再采用电子束曝光(EBL)及 ICP 干法刻蚀制备出微纳沟槽与微流通道的输入输出。传感测试系统如图 9 所示,波长为 850 nm 的光源信号通过单模透镜光纤耦合进传感芯片,透射端口和反射端口的输出光信号通过单模光纤耦合进入光功率计,待测液体在蠕动泵的作用下通过微流通道上的输入导管引入,流经沟槽后从输出导管引出。通过分析光功率

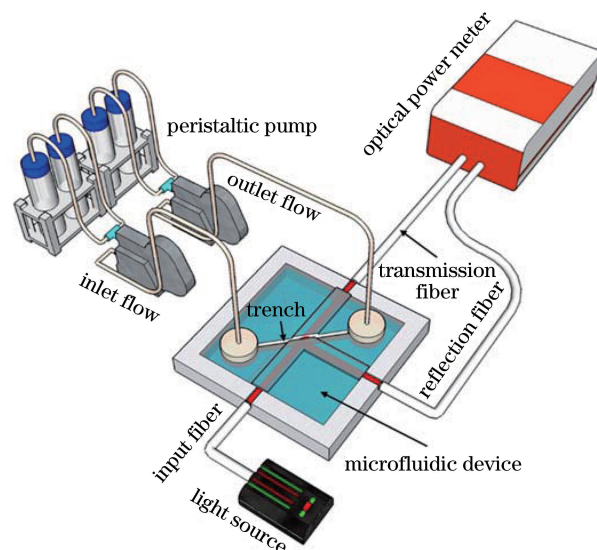


图 9 传感测试系统示意图

Fig. 9 Schematic of the sensing measurement system
计采集到的信号数据便可得出待测液体的折射率。

4 结 论

提出了一种利于微量液体样品测量的基于集成光波导沟槽耦合器的超紧凑折射率传感器。这种新型传感器结合微流控技术,使用亚微米宽的沟槽作为微流通道,可以大幅减小样品的损耗量。该新型传感器结构简单、尺寸紧凑,且适用于多种材料平台。以 AlN 脊形波导为例,对这种新型折射率传感器进行仿真设计与仿真验证,设计了满足单模传输条件的 AlN 波导和折射率传感器的结构。在提高折射率灵敏度的目标下,通过优化沟槽宽度和入射波导与沟槽侧面法线之间的角度,进一步提高了传感器的折射率灵敏度。经计算,折射率灵敏度达 $207.05 \text{ \%}/\text{RIU}$ 。研究结果给集成光波导折射率传感器的小型化和便捷性提供了一种新思路和新方法。

参 考 文 献

- [1] Balslev S, Jorgensen A M, Bilenberg B, et al. Lab-on-a-Chip with integrated optical transducers[J]. Lab on a Chip, 2006, 6(2): 213-217.
- [2] Zhou Z P. Silicon nanophotonic devices based on resonance enhancement [J]. Journal of Nanophotonics, 2010, 4(1): 041001.
- [3] Passaro V M N, de Tullio C, Troia B, et al. Recent advances in integrated photonic sensors[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2012, 12(11): 15558-15598.
- [4] Troia B, Khokhar A Z, Nedeljkovic M, et al. Design

- procedure and fabrication of reproducible silicon vernier devices for high-performance refractive index sensing[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(6): 13548-13567.
- [5] Butt M A, Khonina S N, Kazanskiy N L. Silicon on silicon dioxide slot waveguide evanescent field gas absorption sensor [J]. *Journal of Modern Optics*, 2018, 65(2): 174-178.
- [6] Pal S, Yadav A R, Lifson M A, et al. Selective virus detection in complex sample matrices with photonic crystal optical cavities [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 44: 229-234.
- [7] Claes T, Girones Molera J, De Vos K, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(3): 197-204.
- [8] Jin L, Li M Y, He J J. Highly-sensitive silicon-on-insulator sensor based on two cascaded micro-ring resonators with vernier effect [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 156-159.
- [9] Bogner A, Steiner C, Walter S, et al. Planar microstrip ring resonators for microwave-based gas sensing: design aspects and initial transducers for humidity and ammonia sensing[J]. *Sensors*, 2017, 17(10): 2422.
- [10] Mu Z, Liu C J, Wu X S, et al. Feedback-coupled waveguide microring resonator based on slot structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(12): 1213001.
穆洲, 刘春娟, 吴小所, 等. 基于 slot 结构的反馈耦合波导微环谐振器[J]. *光学学报*, 2019, 39(12): 1213001.
- [11] Gandolfi D, Ramiro-Manzano F, Rebollo F J A, et al. Role of edge inclination in an optical microdisk resonator for label-free sensing[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2015, 15(3): 4796-4809.
- [12] Kim H S, Park J M, Ryu J H, et al. Optical biochemical sensor based on half-circled microdisk laser diode [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 24939-24945.
- [13] Irawan D, Saktioto T, Ali J, et al. Design of Mach-Zehnder interferometer and ring resonator for biochemical sensing[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 12-18.
- [14] Qi Z M, Matsuda N, Itoh K, et al. A design for improving the sensitivity of a Mach-Zehnder interferometer to chemical and biological measurands [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2002, 81(2/3): 254-258.
- [15] Kim S. Design and experiment results of high-speed wireless link using sub-terahertz wave generated by photonics-based technology[J]. *ETRI Journal*, 2013, 35(4): 578-586.
- [16] Kumar M, Kumar A, Dwivedi R. Ultra high sensitive integrated optical waveguide refractive index sensor based on multimode interference [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 222: 556-561.
- [17] Prabhakar A, Mukherji S. Microfabricated polymer chip with integrated U-bend waveguides for evanescent field absorption based detection [J]. *Lab on a Chip*, 2010, 10(6): 748-754.
- [18] McCosker R J, Town G E. Multi-channel directional coupler as an evanescent field optical sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 150(1): 417-424.
- [19] Wang C, Sun F J, Fu Z Y, et al. Research progresses on theory and experiments of photonic crystal micronano sensing technology [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 0328003.
王超, 孙富君, 付中原, 等. 光子晶体微纳传感技术的理论与实验研究进展[J]. *光学学报*, 2018, 38(3): 0328003.
- [20] Chen Y, Gao X B, Xu Y M, et al. Fano resonance-sensing mechanism of photonic crystal nanobeam side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1123002.
陈颖, 高新贝, 许扬眉, 等. 光子晶体纳米梁侧耦合孔径啾啾光子晶体纳米梁腔结构的 Fano 共振传感机理[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1123002.
- [21] Qi Z M, Matsuda N, Santos J H, et al. Prism-coupled multimode waveguide refractometer [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(9): 689-691.
- [22] Lu D F, Qi Z M, Liu R P. An interferometric biosensor composed of a prism-chamber assembly and a composite waveguide with a Ta₂O₅ nanometric layer [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 157(2): 575-580.
- [23] Fan X D, White I M, Shopova S I, et al. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, 620(1/2): 8-26.
- [24] Kwon S. Plasmonic waveguide coupled ring cavity for a non-resonant type refractive index sensor [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2526.
- [25] Chao C Y, Fung W, Guo L J. Polymer microring resonators for biochemical sensing applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, 12(1): 134-142.
- [26] Zhu S, Yu A, Hawley D, et al. Frustrated total internal reflection: a demonstration and review [J]. *American Journal of Physics*, 1986, 54(7): 601-607.
- [27] Kou L, Labrie D, Chylek P. Refractive indices of water and ice in the 0.65- to 2.5- μm spectral range

- [J]. Applied Optics, 1993, 32(19): 3531-3540.
- [28] Haynes W M, Lide D R, Bruno T J. CRC handbook of chemistry and physics[M]. 95th ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2014: 423.
- [29] Rao Y J, Deng M, Duan D W, et al. In-line fiber Fabry-Perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 148(1): 33-38.
- [30] Zhang C L, Guan B L, Qi B, et al. Highly efficient and ultracompact InP/InGaAsP three-port trench-based couplers [J]. Applied Optics, 2020, 59(3): 825-832.
- [31] Jung H, Xiong C, Fong K Y, et al. Optical frequency comb generation from aluminum nitride microring resonator [J]. Optics Letters, 2013, 38(15): 2810-2813.