

非对称含槽亚波长光栅波导衬底泄露损耗抑制研究

宋 岩, 徐亚萌*, 李宏健

长春理工大学物理学院/光波导实验室, 吉林 长春

收稿日期: 2025年3月26日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月21日

摘 要

目前基于绝缘体上硅基波导器件已经被大量的研发并投入实际生活使用, 随着制造水平的不断提高, 亚波长光栅波导已经成为研究热点。但是亚波长光栅波导的衬底泄露损耗较大, 限制了其应用。本工作仿真设计了非对称的含槽亚波长光栅波导, 利用结构的非对称性, 可以缓解直的以及弯曲的含槽亚波长光栅波导的衬底泄露损耗。本文工作可为绝缘体上硅基光学器件的研发和应用奠定基础。

关键词

含槽亚波长光栅, 非对称, 硅基

Research on Leakage Loss Suppression of Asymmetric Groove Sub Wavelength Grating Waveguides on Substrate

Yan Song, Yameng Xu*, Hongjian Li

Optical Waveguide Laboratory, School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Received: Mar. 26th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

At present, silicon-based waveguide devices based on insulators have been developed and put into practical use, and with the continuous improvement of manufacturing level, subwavelength grating

*通讯作者。

文章引用: 宋岩, 徐亚萌, 李宏健. 非对称含槽亚波长光栅波导衬底泄露损耗抑制研究[J]. 传感器技术与应用, 2025, 13(3): 414-420. DOI: 10.12677/jsta.2025.133041

waveguides have become a research hotspot. However, the substrate leakage loss of subwavelength grating waveguides is large, which limits their application. In this work, an asymmetrical slotted sub-wavelength grating waveguide is designed, and the asymmetry of the structure can be used to alleviate the substrate leakage loss of straight and curved slotted subwavelength grating waveguides. This work can lay a foundation for the development and application of silicon-based optical devices on insulators.

Keywords

Slotted Subwavelength Grating, Asymmetry, Silicon-Based

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济的飞速发展与科技的不断进步,人们的日常生活从解决温饱向追求生活质量转变,各种高科技数字产品开始出现在日常生活中。传感器作为数字产品与人类社会的连接纽带,在各个领域起到重要的作用,如检测血液成分[1]、药物浓度[2]、医疗保健[3]、环境检测[4][5]乃至军事反恐[6]等在类型众多的传感器中,光学传感器因其响应速率快、灵敏度高、抗电磁干扰能力强的优势,已经在绝缘体上硅平台(SOI)实现量产制造与片上集成。

传感灵敏度是衡量光学传感器性能的重要指标,为了提高传感灵敏度以增强光与物质相互作用[7],研究人员通过把硅层减薄,使波导对光的束缚性变弱,从而将更多的光释放到待测区域,提高了传感灵敏度。近年来,波导结构逐渐被优化,从条波导,槽波导 [7][8]-[10],再到亚波长光栅波导[11]-[15]。亚波长光栅波导通过其特有的结构来释放光场加强光与物质相互作用,从而得到更高的灵敏度。在该原理的思路下,含槽亚波长光栅波导结构得到了进一步的研究。在原有的亚波长光栅波导结构中放入一个与包层折射率相同的槽结构,释放出更多光场。含槽亚波长光栅波导同时拥有槽波导和亚波长光栅波导的优点,也就是槽模式与布洛赫模式的结合,既可以提高光与物质的相互作用,又可以在波导中低损耗传输。目前,已有报道的小半径亚波长光栅波导微环谐振器、含槽亚波长光栅波导微环谐振器[16][17]的传感灵敏度分别达到了 790 nm/RIU 和 1000 nm/RIU。但是,这是针对 TE 模式而言的,TE 模式的光被限制在硅块之间的槽结构中。然后,针对 TM 模式[18],光场主要集中在包层和衬底中,槽结果对其光场限制作用甚微,所以当含槽亚波长光栅波导被弯曲时,衬底泄露会明显加剧,导致器件损耗过大无法使用。

在本工作中,我们提出了一种非对称的含槽亚波长光栅波导结构,通过优化设计可以减小含槽亚波长光栅波导在 TM 模式和 TE 模式下的衬底泄露损耗。

2. 波导结构与设计

本次工作所提出的非对称含槽亚波长光栅波导的结构示意图如图 1 所示,该波导由内侧较长的亚波长光栅波导和外侧较短的亚波长光栅波导互相靠近组合构成。

2.1. TM 模式非对称含槽亚波长光栅波导的结构设计

周期性波导结构的能带中通常存在着禁带,所以需要对其波导结构进行设计,使器件的工作波长(约 1550 nm)远离其禁带附近的共振区和截止波长附近的高损耗区域。我们利用平面波展开法对非对称含槽

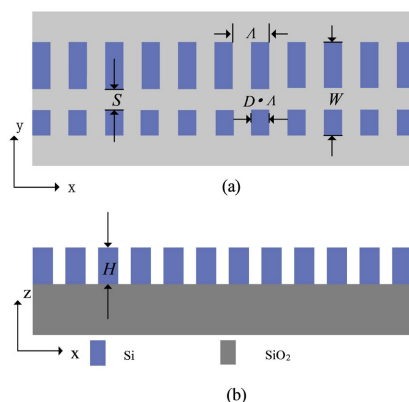


Figure 1. Asymmetric subwavelength grating waveguide with grooves. (a) Front view, (b) side view
图 1. 非对称含槽亚波长光栅波导。(a) 正视图, (b) 侧视图

亚波长光栅波导的结构参数进行计算, 先将对称含槽亚波长光栅波导的周期 $A = 300 \text{ nm}$ 和高度 $H = 220 \text{ nm}$ 保持不变, 分别改变宽度 W 、占空比 D 和槽宽 S 去设计满足工作波长的含槽亚波长光栅波导器件结构, 然后在含槽亚波长光栅波导的基础上设计非对称含槽亚波长光栅波导。

将 TM 模式含槽亚波长光栅波导的槽宽度 S 固定为 100 nm , 固定占空比 D 为 0.7 , 改变波导宽度 W , 分别为 660 nm 、 700 nm 、 760 nm 和 860 nm , 由图 2(a)所示结果可知, 工作波长范围会随着 W 的增加而增加; 将宽度 W 固定为 860 nm , 固定占空比 D 为 0.7 , 改变槽宽 S , 分别为 60 nm 、 80 nm 、 100 nm 和 120 nm , 由图 2(b)所示结果可知, 工作波长范围会随着 S 的增加而增加; 将波导宽度 W 固定为 700 nm , 槽宽度 S 固定为 100 nm , 改变波导占空比 D , 分别为 0.6 、 0.65 、 0.7 和 0.8 , 由图 2(c)所示结果可知, 工作波长范围会随着 D 的增加而增加。

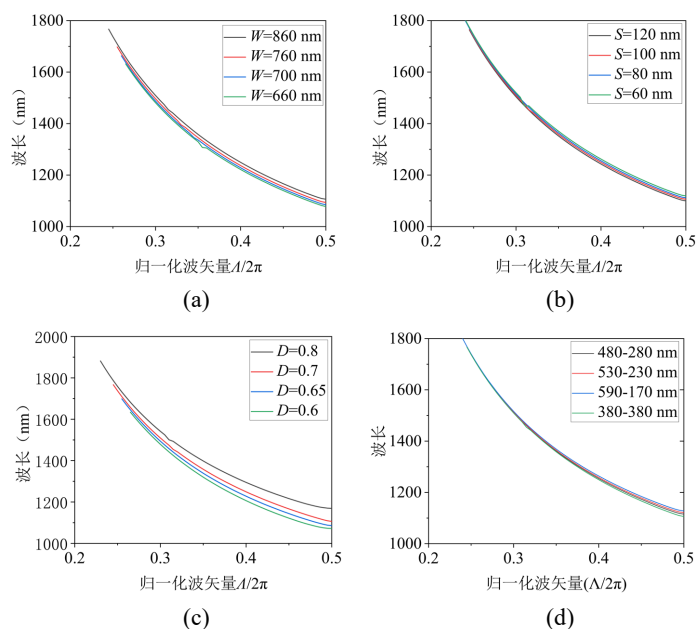


Figure 2. Band variation curve of fishbone type slotted subwavelength grating waveguide. (a) Band curve versus W variation curve, (b) Band curve versus S variation curve, (c) Band curve versus D variation curve, (d) Band curve versus inner and outer width variation curve

图 2. 含槽亚波长光栅波导 TM 模式能带图。(a) 能带曲线随 W 变化曲线图, (b) 能带曲线随 S 变化曲线图, (c) 能带曲线随 D 变化曲线图, (d) 能带曲线随内外宽度变化曲线图

我们可以得知占空比 D 对波导工作波长范围影响最大, 其次是波导宽度, 槽宽对波导工作波长范围影响较小。在本次研究中, 最终选择占空比 $D=0.7$, 波导宽度 $W=860$ nm, 槽宽 $S=100$ nm 作为含槽亚波长光栅波导的结构参数。此时, 含槽亚波长光栅波导的禁带波长为 1150 nm, 而截止波长为 1900 nm, 这既确保了目标波长范围远离禁带波长, 又与截止波长保持较大的距离。

在确定含槽亚波长光栅波导的结构参数后, 在此基础上对非对称槽亚波长光栅波导进行结构参数调控, 将内层硅块宽度设置为 380 nm、480 nm、530 nm 和 590 nm, 外层硅块设置为 170 nm、230 nm、280 nm 和 380 nm。结果如图 2(d)所示, 可见, 随着内层硅块宽度的增加, 能带曲线也会有这小幅度增加。最终, 选择将内层波导宽度设置为 420 nm, 外层波导宽度设置为 340 nm。

2.2. TE 模式非对称含槽亚波长光栅波导的结构设计

同样, 利用平面波展开法对 TE 模式非对称含槽亚波长光栅波导进行结构参数的设计。将 TE 模式的含槽亚波长光栅波导的周期固定为 $A=300$ nm, 高度 $H=220$ nm 保持不变, 分别对宽度 W 、占空比 D 和槽宽 S 进行扫描设计。将 TE 模式含槽亚波长光栅波导的槽宽度 S 固定为 100 nm, 固定占空比 D 为 0.5, 改变波导宽度 W , 分别为 660 nm、700 nm、740 nm 和 780 nm, 由图 3(a)所示结果可知, 工作波长范围会随着 W 的增加而增加; 将宽度 W 固定为 700 nm, 固定占空比 D 为 0.5, 改变槽宽 S , 分别为 60 nm、80 nm 和 100 nm, 由图 3(b)所示结果可知, 工作波长范围会随着 S 的增加而增加; 将波导宽度 W 固定为 700 nm, 槽宽度 S 固定为 100 nm, 改变波导占空比 D , 分别为 0.5、0.6、0.7 和 0.8, 由图 3(c)所示结果可知, 工作波长范围会随着 D 的增加而增加。

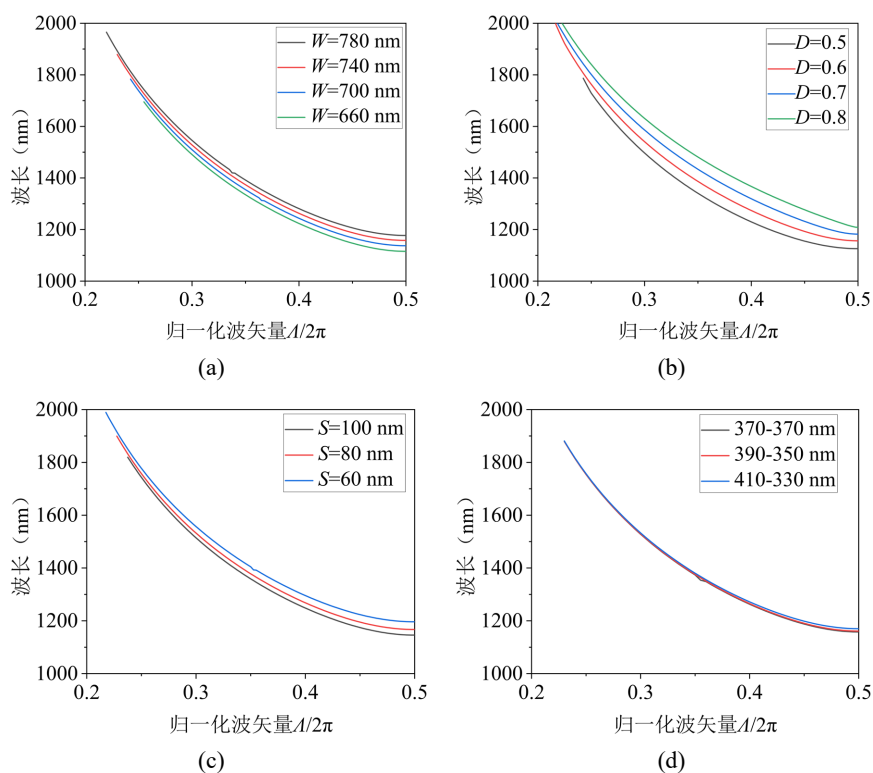


Figure 3. Band variation curve of fishbone type slotted subwavelength grating waveguide. (a) Band curve versus W variation curve, (b) Band curve versus S variation curve, (c) Band curve versus D variation curve, (d) Band curve versus inner and outer width variation curve

图 3. 含槽亚波长光栅波导 TE 模式能带图。(a) 能带曲线随 W 变化曲线图, (b) 能带曲线随 S 变化曲线图, (c) 能带曲线随 D 变化曲线图, (d) 能带曲线随内外宽度变化曲线图

从扫描结果可以得知,对于 TE 模式来说占空比 D 对波导工作波长范围影响最大,其次是波导宽度,槽宽对波导工作波长范围影响较小。最终,选择占空比 $D = 0.533$ 、波导宽度 $W = 740$ nm 和槽宽 $S = 100$ nm 作为含槽亚波长光栅结构参数,将非对称含槽亚波长光栅波导内层设置为 410 nm,外层设置为 330 nm。

3. 结果及分析

当含槽亚波长光栅波导被弯曲时,会加剧衬底泄露,导致光损耗过大而无法使用。我们采用图 4 所示的非对称含槽亚波长光栅波导结构的 U 形半环结构,以对比对称含槽亚波长光栅波导和非对称含槽亚波长光栅波导被弯曲后的功率透过率,此处将微环半径设置为 10 μm 。如图 4 所示,含槽亚波长光栅波导 U 型环中输入端和输出端的含槽亚波长光栅区域分别放置了输入监视器和输出监视器,将得到输出和输入的透过率 T_{out} 和 T_{in} 相除就可以得到非对称含槽亚波长光栅波导 U 形半环结构的功率透过率。

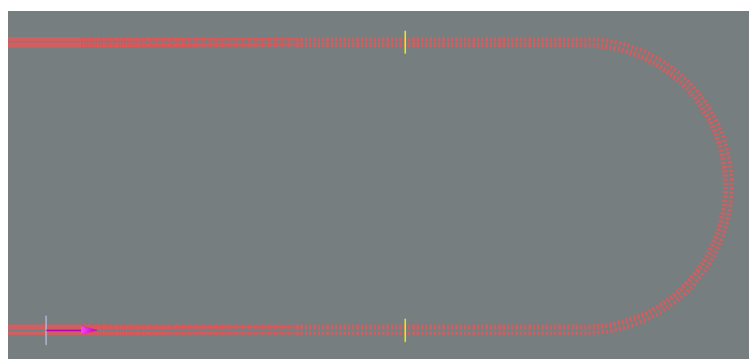


Figure 4. U-shaped ring structure of asymmetric slotted subwavelength grating waveguide track micro ring resonator
图 4. 非对称含槽亚波长光栅波导赛道微环谐振器的 U 形环结构

当外界折射率 $n_c = 1.333$ 时, TM 模式非对称含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率随波长的变化曲线如图 5 所示。从图中可以看出,在 1.4~1.6 μm 波长范围内, TM 模式的非对称含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率高于对称结构含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率。这表明弯曲的非对称含槽亚波长光栅结构在 TM 模式抗衬底泄露损耗方面有着良好表现。

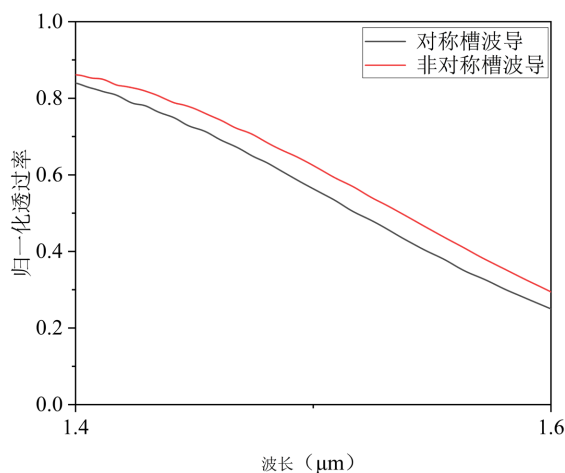


Figure 5. Transmittance of U-shaped ring structure of asymmetric slotted subwavelength grating waveguide in TM mode
图 5. TM 模式下非对称含槽亚波长光栅波导 U 形环结构的透过率

当外界折射率 $n_c = 1.333$ 时, TE 模式非对称含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率随波长的变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出, 在 $1.4 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 波长范围内, 非对称含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率高于对称含槽亚波长光栅 U 形环结构的透过率。这表明弯曲的非对称含槽亚波长光栅结构在 TE 模式抗衬底泄露损耗方面有着良好表现, 并且, 透过率随着波长的增加急剧下降, 这说明该结构都有明显的色散特性, 可应用于色散型微环谐振器传感器件。

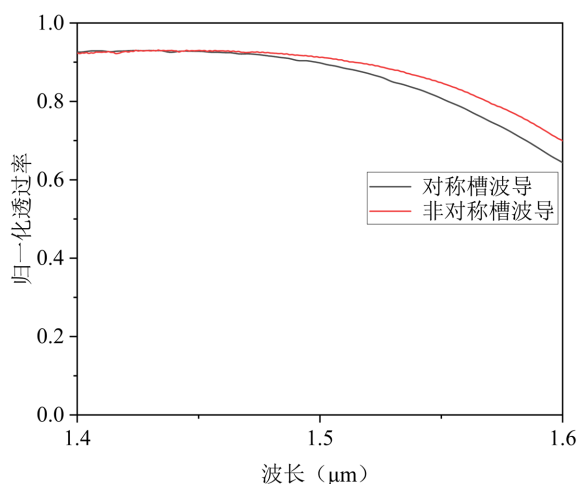


Figure 6. Transmittance of U-shaped ring structure of asymmetric slotted subwavelength grating waveguide in TE mode

图 6. TE 模式下非对称含槽亚波长光栅波导 U 形环结构的透过率

4. 结论

在 TE 模式和 TM 模式下, 直的和弯曲的非对称含槽亚波长光栅结构均优于对称含槽亚波长光栅结构, 说明该结构对抗衬底泄露损耗方面具有一定效果。

参考文献

- [1] Pradhan, A.K., Madagala, K., Naga Sravya, K. and Prakash, C. (2023) Design and Analysis of a Photonic Crystal Nanocavity Based Bio-Sensor for Blood Component Detection. *Applied Optics*, **62**, 9462-9469. <https://doi.org/10.1364/ao.503892>
- [2] Chalyan, T., Pasquardini, L., Gandolfi, D., Guider, R., Samusenko, A., Zanetti, M., *et al.* (2017) Aptamer and Fab'-Functionalized Microring Resonators for Aflatoxin M1 Detection. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **23**, 350-357. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2016.2609100>
- [3] Shi, S., Cheng, Q., Lin, R., Su, D. and Huang, Y. (2017) Micro-Ring Sensor Used in the Diagnosis of Gastric Cancer. *SPIE Proceedings*, Shanghai, 5 January 2017, 102441K. <https://doi.org/10.1117/12.2264220>
- [4] Chocarro-Ruiz, B., Fernández-Gavela, A., Herranz, S. and Lechuga, L.M. (2017) Nanophotonic Label-Free Biosensors for Environmental Monitoring. *Current Opinion in Biotechnology*, **45**, 175-183. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2017.03.016>
- [5] Badri, S.H. (2021) Transmission Resonances in Silicon Subwavelength Grating Slot Waveguide with Functional Host Material for Sensing Applications. *Optics & Laser Technology*, **136**, Article 106776. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106776>
- [6] Orghici, R., Lützwow, P., Burgmeier, J., Koch, J., Heidrich, H., Schade, W., *et al.* (2010) A Micro-Ring Resonator Sensor for Sensitive Detection of 1,3,5-Trinitrotoluene (TNT). *Sensors*, **10**, 6788-6795. <https://doi.org/10.3390/s100706788>
- [7] Fard, S.T., Donzella, V., Schmidt, S.A., Flueckiger, J., Grist, S.M., Talebi Fard, P., *et al.* (2014) Performance of Ultra-Thin Soi-Based Resonators for Sensing Applications. *Optics Express*, **22**, Article 14166. <https://doi.org/10.1364/oe.22.014166>

-
- [8] Almeida, V.R., Xu, Q., Barrios, C.A. and Lipson, M. (2004) Guiding and Confining Light in Void Nanostructure. *Optics Letters*, **29**, 1209-1211. <https://doi.org/10.1364/ol.29.001209>
- [9] Singh, R.R., Kumari, S., Gautam, A. and Priye, V. (2019) Glucose Sensing Using Slot Waveguide-Based SOI Ring Resonator. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **25**, 1-8. <https://doi.org/10.1109/jstqe.2018.2879022>
- [10] Claes, T., Molera, J.G., De Vos, K., Schacht, E., Baets, R. and Bienstman, P. (2009) Label-Free Biosensing with a Slot-Waveguide-Based Ring Resonator in Silicon on Insulator. *IEEE Photonics Journal*, **1**, 197-204. <https://doi.org/10.1109/jphot.2009.2031596>
- [11] Donzella, V., Sherwali, A., Flueckiger, J., Grist, S.M., Fard, S.T. and Chrostowski, L. (2015) Design and Fabrication of SOI Micro-Ring Resonators Based on Sub-Wavelength Grating Waveguides. *Optics Express*, **23**, 4791-4803. <https://doi.org/10.1364/oe.23.004791>
- [12] Tu, Z., Gao, D., Zhang, M. and Zhang, D. (2017) High-Sensitivity Complex Refractive Index Sensing Based on Fano Resonance in the Subwavelength Grating Waveguide Micro-Ring Resonator. *Optics Express*, **25**, Article 20911. <https://doi.org/10.1364/oe.25.020911>
- [13] Ruan, Z., Shen, L., Zheng, S. and Wang, J. (2017) Subwavelength Grating Slot (SWGS) Waveguide on Silicon Platform. *Optics Express*, **25**, Article 18250. <https://doi.org/10.1364/oe.25.018250>
- [14] Odeh, M., Twayana, K., Sloyan, K., Villegas, J.E., Chandran, S. and Dahlem, M.S. (2019) Mode Sensitivity Analysis of Subwavelength Grating Slot Waveguides. *IEEE Photonics Journal*, **11**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/jphot.2019.2939088>
- [15] Ruan, Z., Zhou, N., Zheng, S., Cao, X., Long, Y., Chen, L., *et al.* (2020) Releasing the Light Field in Subwavelength Grating Slot Micro-Ring Resonators for Athermal and Sensing Applications. *Nanoscale*, **12**, 15620-15630. <https://doi.org/10.1039/d0nr00833h>
- [16] Xu, Y., Fu, C., Sun, S. and Kong, M. (2022) Wide-Range Refractive Index Sensing Relied on Tracking the Envelope Spectrum of a Dispersive Subwavelength Grating Micro-Ring Resonator. *Optics & Laser Technology*, **154**, Article 108304. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108304>
- [17] Sun, S., Chang, M., Kong, M. and Xu, Y. (2024) Two-Peak Envelope Spectrum of a Subwavelength Grating Micro-Ring Resonator for Wide-Range and High-Sensitivity Refractive Index Sensing. *Photonics and Nanostructures—Fundamentals and Applications*, **60**, Article 101273. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2024.101273>
- [18] Huang, L., Yan, H., Xiang, L., Zhou, N., He, D. and Mi, X. (2021) Subwavelength Racetrack Resonators with Enhanced Critically Coupled Tolerance for On-Chip Sensing. *IEEE Access*, **9**, 23424-23431. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3056797>