研究论文

相位单元和光栅辅助型微环的传感特性分析

袁轶群，孙士博，张　驰，常美玉，徐亚萌*

（长春理工大学 物理学院，长春 130022）

摘要：针对硅基微环在传感应用中存在的探测范围受限和检测极限较高的问题，本文提出一种相位单元和光栅辅助型微环结构。该结构通过在总线波导中引入T型相位单元激发非对称Fano共振，并在微环波导侧壁引入光栅结构以实现侧模抑制，进而通过追踪具有侧模抑制特性的Fano线型频谱来提升传感性能。采用时域有限差分法，系统研究了光栅周期、刻蚀深度及占空比对光谱侧模抑制特性的影响规律。经结构参数优化，微环的自由光谱范围扩大至39.19 nm，约为传统微环的3倍，且有效抑制了次级侧模。在折射率传感性能评估中，该结构在纯水及不同浓度甘油溶液环境下表现出显著的谐振红移。得益于Fano线型极陡峭的光谱边缘，其强度传感灵敏度达7.11×10^{3} dB/RIU，检测极限低至1.41×10^{-7} RIU。与传统微环结构相比，该结构实现了近3倍的灵敏度提升和约70.5%的检测极限降低。该相位单元和光栅辅助型微环结构能显著降低检测极限并扩大可探测范围，为高集成度、高精度的硅基光学传感器设计提供了重要参考。

关键词：硅基光子学；微环谐振器；Fano共振；折射率传感；检测极限

中图分类号：TN256　　**文献标志码：**A

DOI: 10.3724/jfmd.2604048　　CSTR: 32180.14.jfmd.2604048

Analysis of sensing characteristics in phase unit and grating-assisted microring resonators

YUAN Yiqun, SUN Shibo, ZHANG Chi, CHANG Meiyu, XU Yameng*

(Physics College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: To address the limited detection range and high detection limit inherent in silicon-based microring resonator sensors, this study proposes a microring resonator structure assisted by a phase unit and gratings. A T-shaped phase unit is introduced into the bus waveguide to excite asymmetric Fano resonance, while gratings patterned on the sidewall of the ring waveguide suppress lateral modes. By tracking the Fano lineshape resonance under such mode suppression, sensing performance is substantially improved. Using the finite-difference time-domain method, the influences of grating period, etching depth, and duty cycle on side-mode suppression are systematically investigated. Through structural

收稿日期：2026−04−10；　**修订日期：**2026−06−02

基金项目：吉林省自然科学基金面上项目（No. 20240101338JC）；吉林省博士研究生托举工程（No. BST202515）

作者简介：袁轶群（1999—），男，硕士，研究方向为基于布拉格光栅微环的器件设计（E-mail: 2023100006@mails.cust.edu.cn）

通信作者：徐亚萌（1987—），女，副教授，研究方向为硅基集成光子学器件及其传感应用（E-mail: yamengxu@cust.edu.cn）

optimization, the free spectral range is extended to 39.19 nm, approximately three times that of a conventional microring resonator, while secondary side modes are effectively suppressed. In refractive index sensing evaluations performed in pure water and glycerol solutions of varying concentrations, the proposed structure exhibits pronounced resonant redshifts. Benefiting from the ultra-steep Fano lineshape resonance, an intensity sensitivity of 7.11×10^{3} dB/RIU and a detection limit as low as 1.41×10^{-7} RIU are achieved. Compared with conventional microring structures, this represents a nearly 3-fold improvement in sensitivity and a 70.5% reduction in the detection limit. The proposed phase-unit and grating-assisted microring resonator structure significantly lowers the detection limit while expanding the detection range, offering valuable insights for the design of highly integrated and high-precision silicon-based optical sensors.

Key words: silicon photonics; microring resonator; Fano resonance; refractive index sensing; limit of detection

0 引言

硅基平台凭借与互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺兼容、集成度高及光学性能优异等优势,在阵列光开关[1-2]和微传感芯片[3-4]等领域有着重要应用,已成为光子集成的核心支撑技术之一。硅基微环因小尺寸和高集成度,已成为片上集成光学传感领域的核心器件之一[5-6]。微环谐振器的传感原理基于谐振条件对外界待测物质折射率变化的敏感性:当待测物覆盖波导表面时,倏逝场与待测物质相互作用导致有效折射率改变,进而引起谐振波长漂移。因此,现有研究多集中于优化微环波导结构以提升传感灵敏度[7-9]。然而,微环在实际应用中面临两大瓶颈。一方面,传统微环的传输谱线呈对称洛伦兹线型,边缘斜率有限,导致对微量待测物的分辨能力不足,检测极限较高。对于早期疾病标志物检测等生化应用,所需检测极限通常需达到 10^{-5}~10^{-6} RIU 量级,传统微环难以满足该要求。另一方面,微环固有的多级谐振特性导致光谱中密集分布多个谐振峰,相邻峰间的自由光谱范围(free spectral range, FSR)通常仅为十余纳米或更小。当外界待测物折射率变化引起的谐振波长漂移量超过一个 FSR 时,将无法区分相邻谐振级次,产生测量歧义,难以满足宽动态范围检测需求。

为突破上述限制,研究者提出了多种技术方案。在降低检测极限方面,Fano 共振因其非对称且高斜率的谱线特征而备受关注。相较于洛伦兹线型,Fano 线型在谐振波长附近具有更陡峭的光谱边缘,对环境折射率变化更为敏感,从而能在强度传感模式下实现更低的检测极限。研究者已在级联微环结构[10-11]以及微环与马赫-曾德尔干涉仪耦合结构[12-13]中实现了 Fano 共振。然而,这些结构牺牲了微环的紧凑性,且器件制造精度要求极高。为保留微环的尺寸优势,研究者提出在微环总线波导中引入法布里-珀罗(Fabry-Perot, FP)腔,包括由渐变光子晶体[14]、锥形渐变亚波长光栅[15]、布拉格光栅[16]、空气孔[17]及 T 型块[18]等构成的 FP 腔。此时,FP 腔模式作为准连续态,微环模式作为离散态,两者通过微环耦合区发生干涉产生 Fano 共振。然而,FP 腔的谐振模式实质为宽带宽离散态,仅能在微环特定共振波长处形成 Fano 共振;此外,微环频谱包络受 FP 腔传输谱线调制,影响 Fano 共振的消光比和斜率,进而限制检测极限的进一步降低。在拓宽可探测范围方面,研究者通过级联两个 FSR 略有差异的微环[19-20],利用游标效应将有效探测范围扩展至 50 nm 以上,但该方法需级联多个微环,导致器件尺寸增大且调控复杂。另有研究者利用微环临界耦合条件的色散特性产生包络谱[21-22],虽能实现无 FSR 限制的探测,但通常伴随品质因子的显著下降,导致检测极限劣化。

基于现有研究,本文提出一种结合相位单元与光栅的微环结构。该结构在总线波导中引入单个相位单元以激发 Fano 线型谐振峰,并在微环波导内侧刻蚀光栅以实现模式选择。通过系统优化光栅周期、刻蚀深度与占空比等关键参数,旨在实现具有侧模抑制特性的非对称 Fano 线型频谱。追踪

该谱线有望在降低检测极限的同时拓宽可探测范围, 为高精度、宽动态范围的片上折射率传感提供新思路。

1 器件结构与工作原理

1.1 相位单元和光栅辅助型微环结构

本文设计的微环传感器基于绝缘体上硅(silicon-on-insulator, SOI)平台, 由 3 层结构组成: 底层为硅衬底, 中间层为二氧化硅埋氧层, 顶层为厚度 220 nm 的单晶硅薄膜。所有波导结构均通过刻蚀顶层硅形成。器件表面覆盖水溶液或不同浓度的甘油-水混合溶液。

微环器件结构示意图如图 1 所示, 核心结构包括总线波导、相位单元、环形谐振腔以及集成于环内侧壁的周期性光栅。总线波导和环形波导均采用条形波导结构, 波导宽度为 W, 设定为亚微米量级以确保单模传输条件。环形波导半径为 R, 选取数微米至十余微米范围, 以平衡弯曲损耗与器件集成密度。微环与总线波导间的耦合间距为 G。为激发 Fano 共振, 在总线波导与微环耦合区之外的直通路径上引入相位单元。该相位单元采用 T 型波导结构, 即在总线波导侧向延伸出一个矩形硅块, 其横向和纵向尺寸分别为 T_w 和 T_l, 旨在为传输光场引入可控的额外相位延迟。为抑制非目标谐振模式, 在微环内侧壁刻蚀周期性光栅。光栅由沿环向周期性排列的矩形凹槽构成, 几何特征包括光栅周期 Λ、刻蚀深度 H 及占空比 D。通过合理设计结构参数, 使光栅反射特性与微环谐振特性相匹配, 从而实现对目标模式的选择性增强及对非目标模式的滤除。

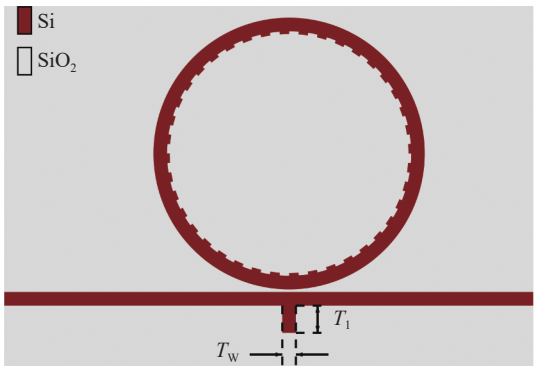

图 1 引入相位单元和光栅辅助的微环结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the microring resonator with phase unit and grating

1.2 微环的传输矩阵模型

微环的光场传输特性可采用传输矩阵法进行描述。设输入光场复振幅为 E_{in}, 直通端输出光场为 E_{out}, 则在耦合区域, 总线波导与微环之间的光场耦合关系可由一个 2×2 传输矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & \mathrm{i}k \\ \mathrm{i}k & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中, E_1 和 E_2 分别为总线波导和微环输入端口的光场, E_3 和 E_4 分别为总线波导和微环输出端口的光场; t 为振幅自耦合系数, k 为交叉耦合系数。在无损耗耦合区域, 能量守恒要求 $t^2+k^2=1$。系数 i 表示耦合过程中引入的 $\pi/2$ 相位延迟。

光在微环内传输一周的效应可表示为:

$$E_2 = a\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}E_4 \tag{2}$$

式中, $a=\exp(-\alpha L_R)$ 为环程振幅传输因子, α 为波导损耗系数, $L_R=2\pi R$ 为微环周长。$\delta=\beta L_R=2\pi n_{eff}L_R/\lambda$ 为光在微环内传输一周的往返相位延迟, β 为传播常数, n_{eff} 为波导模式的有效折射率, λ 为真空波长。

联立式(1)和式(2), 消去 E_2 和 E_4, 可得直通端的传输系数为:

$$\frac{E_3}{E_1} = t - \frac{k^2 a\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}}{1 - ta\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}} \tag{3}$$

将式(3)中第二项合并, 可写成统一的分式形式:

$$\frac{E_3}{E_1} = \frac{t - a\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}}{1 - ta\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}} \tag{4}$$

则直通端的功率透射率为:

$$T(\lambda) = \left|\frac{E_3}{E_1}\right|^2 = \frac{t^2 + a^2 - 2at\cos\delta}{1 + a^2t^2 - 2at\cos\delta} \tag{5}$$

微环利用光在环内的谐振效应实现对特定波长光的选择性传输, 其谐振波长满足:

$$\lambda_{res} = \frac{n_{eff} \cdot L_R}{m_M} \tag{6}$$

式中, m_M 为微环谐振级数(取正整数)。在谐振条件下, 透射率简化为:

$$T_{res} = \frac{(t-a)^2}{(1-at)^2} \tag{7}$$

在谐振波长附近, 可对式(5)进行近似展开。令 $\delta=2m_M\pi+\Delta\delta$, 其中 $\Delta\delta \ll 1$, 则 $\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}\approx 1+\mathrm{i}\Delta\delta$。代入式(5)并忽略高阶项, 可得洛伦兹线型近似:

$$T(\lambda) \approx \frac{(t-a)^2 + at(\Delta\delta)^2}{(1-at)^2 + at(\Delta\delta)^2} \tag{8}$$

式(8)表明,传统微环的透射谱在谐振波长附近呈现对称的洛伦兹线型。

1.3 Fano 共振的传输矩阵描述

为将洛伦兹线型转换为非对称 Fano 线型,需在总线波导中引入额外的相位调控单元。本文采用 T 型波导结构作为相位调控单元,将其置于总线波导与微环耦合区域之外。该结构等效于在总线波导的直通路径上引入一个独立的相移单元,其传输矩阵可表示为:

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} \mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Delta\phi} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{9}$$

式中,$\Delta\phi$ 为相位单元引入的额外相移。将式 (9) 与微环耦合矩阵联立,可得引入相位单元后的直通端传输系数:

$$\frac{E_3}{E_1} = t\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Delta\phi} - \frac{k_1 k_2 a \mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}}{1 - ta\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}} \tag{10}$$

其中 k_1 为光从总线波导耦合至微环的系数,k_2 为光从微环耦合回总线波导的系数。在非对称耦合情况下,二者满足 $k_1 \cdot k_2 = k^2 = 1 - t^2$,但 k_1 与 k_2 可以不相等。

微环直通端的功率透射率为:

$$T(\lambda) = \left| t\mathrm{e}^{-\mathrm{i}\Delta\phi} - \frac{k_1 k_2 a \mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}}{1 - ta\mathrm{e}^{\mathrm{i}\delta}} \right|^2 \tag{11}$$

展开式 (11),可将其写成标准的 Fano 共振形式:

$$T(\lambda) = T_0 \frac{(q+\Omega)^2}{1+\Omega^2} \tag{12}$$

式中,$\Omega = (\lambda - \lambda_0)/\Gamma$ 为归一化频率失谐量,λ_0 为谐振波长,Γ 为线宽,q 为非对称因子。当相位单元引入的额外相移 $\Delta\phi$ 不为 2π 的整数倍时,式 (11) 中两项之间的干涉相位不再满足完全相消或相长条件,导致 q 取有限值,从而激发非对称 Fano 共振。通过调节 $\Delta\phi$,可实现对 Fano 线型的连续调谐。

1.4 光栅辅助侧模抑制的耦合模描述

光栅的周期性微扰引入折射率调制,可表示为:

$$n(\mathrm{z}) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} z\right) \tag{13}$$

式中,n_0 为未扰动波导的有效折射率,Δn 为折射率调制深度,Λ 为光栅周期。根据耦合模理论,该周期性结构导致前向传播模式与后向传播模式之间的耦合,耦合系数正比于折射率调制深度。此时光栅区域的平均有效折射率 n_{avr} 可由占空比 D 调制:

$$n_{avr}^2 = D \cdot n_{\mathrm{eff,Si}}^2 + (1-D) \cdot n_{\mathrm{eff,gap}}^2 \tag{14}$$

式中,$n_{\mathrm{eff,Si}}$ 和 $n_{\mathrm{eff,gap}}$ 分别为硅波导区域和光栅凹陷区域的有效折射率。则光栅的反射波长由相位匹配条件决定:

$$\lambda_{\mathrm{R}} = \frac{2 n_{avr} \Lambda}{m_{\mathrm{R}}} \tag{15}$$

在微环中集成光栅后,当微环的谐振波长与光栅的反射波长相吻合时,可实现对该波长模式的滤波,同时抑制其他非目标侧模。

2 侧模抑制型 Fano 共振谱线的产生

2.1 基于相位单元微环的 Fano 谱线产生

在器件结构设计中,波导宽度 W 设为 500 nm,旨在满足 1550 nm 波段下的单模传输条件,有效抑制高阶模激发以避免多模干涉引起的光谱畸变。本文所有的数值仿真分析均在横电模(transverse electric, TE)偏振下进行。微环半径 R 选取为 10 mm,是基于弯曲损耗与器件紧凑性的综合平衡考量;在保证器件高集成度的前提下,10 mm 的半径能够有效降低波导的辐射损耗,确保微环谐振器维持较高的品质因子与消光比,从而获得更优的传感探测信噪比。为了保证总线波导和微环波导之间的有效耦合,将它们之间的耦合间距 G 设为 120 nm。T 型波导相位调控单元的宽度 T_{w} 取为 0.5 μm,长度 T_{l} 取为 1 μm,以引入足够的相位差。由于微环波导引入的光栅结构不会影响此部分结果,因此此处先研究未引入光栅结构而仅引入相位单元的微环。

由于硅基矩形波导具有强烈的双折射特性,输入偏振态的偏移会导致目标 TE 模式能量下降,并可能激发微弱的横磁(transverse magnetic, TM)模式。这不仅会引起谐振峰基底功率的波动,还可能产生杂散谐振峰,对基于固定波长的强度传感造成干扰。在实际工程应用中,通常通过在芯片输入端集成片上偏振选择器或偏振旋转分束器,确保进入传感区域的光场始终保持单一的 TE 偏振态,从而维持传感系统的高信噪比与探测稳定性。

采用时域有限差分法,边界条件设置为完美匹配层,仿真时间设为足够长以确保光场演化至稳态。波导材料折射率采用 Palik 模型,包层折射率设为

1.333 以模拟水环境。为确证相位单元对线型整形的贡献并保证对比的公平性, 本文在完全相同的微环半径、波导宽度及耦合间距参数下, 通过将 T 型相位单元的尺寸设为 0(即无相位单元状态), 获取如图 2(a)所示的洛伦兹传输谱线, 从而与如图 2(b)所示的引入相位单元后的 Fano 传输谱线进行单一变量对比。这种对比方法有效排除了由于微环结构差异可能引入的系统性偏差。通过对比可知, 引入相位单元后, 谐振波长并未发生改变, 但谐振峰的线型由洛伦兹型变为 Fano 型。这是由于总线波导耦合区域的相位单元为直通路径光场引入了额外相移, 打破了原有路径的相位平衡, 使直通光场与谐振光场产生显著相位差。原本对称的洛伦兹谐振线型经相干干涉发生剧烈突变, 形成典型的非对称 Fano 线型谱线。

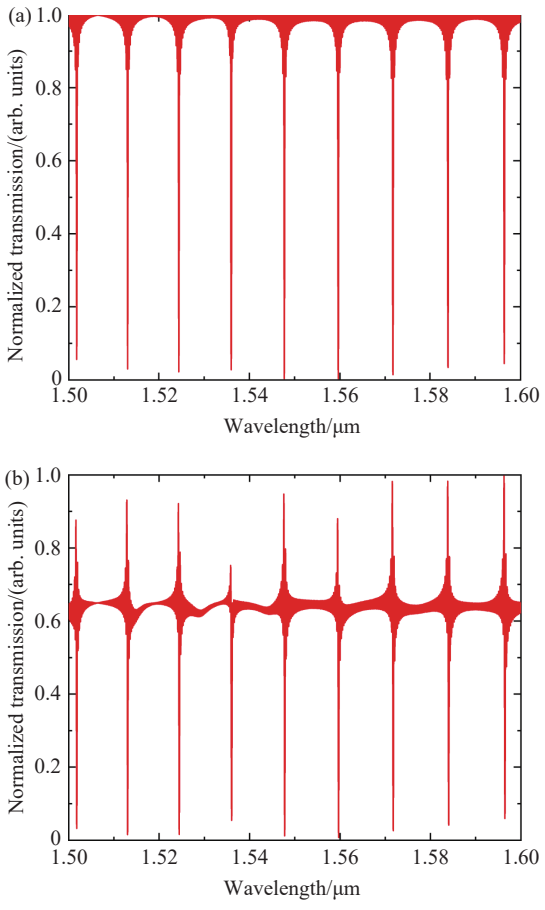

图 2　微环传输谱线图。(a)未引入相位单元的微环; (b)引入相位单元的微环

Fig. 2 Spectrum diagram of the microring resonator. (a) The microring resonator without a phase unit; (b) the microring resonator with a phase unit introduced in the bus waveguide

图 3 展示了 T 型相位单元相对于微环耦合区中心的距离 L_F 对 Fano 线型特征的影响。仿真结果表明, 改变 L_F 实质上调节了总线波导传输光场与微环谐振光场之间的初始相位差, 进而实现了对 Fano 非对称因子 q 的有效调控。从光谱演化趋势可见, 谱线的非对称程度及边缘斜率对位置变化高度敏感。当 L_F=200 nm 时, 干涉失配效应显著, 谱线仍呈现典型的陡峭 Fano 特征; 随着偏移距离进一步增大, 干涉相位差逐渐趋近于 2π 的整数倍, 导致非对称因子 q 趋向于 0 或极大值, 光谱线型最终由非对称 Fano 型演变为对称洛伦兹型。

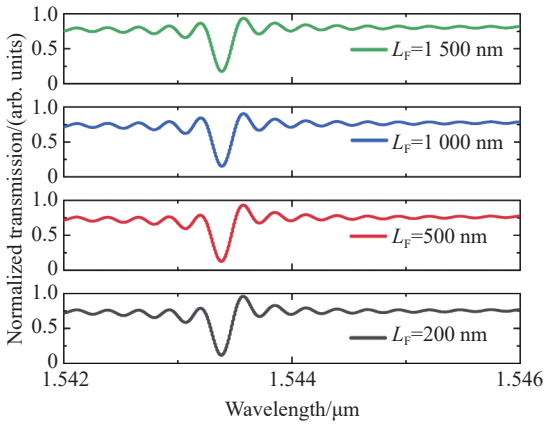

图 3　相位单元位置对微环传输谱线的影响

Fig. 3 Effect of phase unit position on the transmission spectrum of the microring resonator

2.2　基于光栅辅助微环的侧模抑制

微环的侧模抑制效应由环形波导上的周期性微扰激发, 其抑制特性取决于光栅周期 Λ、刻蚀深度 H 及占空比 D。下文将分别探讨这些参数对侧模抑制特性的影响。鉴于前文所述的相位单元不影响本节结果, 此处将其长宽尺寸均设为 0, 即模拟未引入相位单元的情形。

设定刻蚀深度 H 为 100 nm, 占空比 D 为 0.9, 光栅周期分别选取 300 nm、600 nm、900 nm 和 1 200 nm, 仿真不同周期下的微环传输谱线, 结果如图 4 所示。结果表明, 当周期为 300 nm 时, 光谱呈现密集谐振峰, 无明显侧模抑制效应; 当周期为 600 nm 时, 谐振峰分布稀疏, 次级谐振模被有效滤除, 实现了高效的侧模抑制; 当周期为 900 nm 和 1 200 nm 时, 谐振波长发生红移并偏离仿真波段, 光栅对光场的微扰作用减弱, 导致谐振深度急剧减

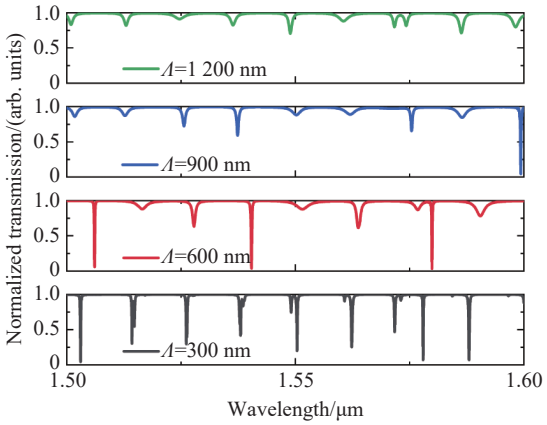

图 4　不同光栅周期下光栅辅助型微环的传输谱线

Fig. 4 Transmission spectrum of the grating-assisted microring resonator with different grating periods

小。综上所述，选取 600 nm 作为光栅周期。

刻蚀深度影响光栅波导的有效折射率 $n_{\mathrm{eff,Si}}$ 与 $n_{\mathrm{eff,gap}}$，进而调制平均有效折射率 n_{avr}，引起反射中心波长漂移，最终影响侧模抑制效果。下面研究刻蚀深度对侧模抑制的影响。固定光栅周期 Λ 为 600 nm、占空比 D 为 0.9，研究刻蚀深度 H（分别取 50 nm、100 nm、150 nm 和 200 nm）对侧模抑制的影响，不同刻蚀深度下的微环传输光谱如图 5 所示。当刻蚀深度为 50 nm 时，相较于 100 nm，反射波长出现红移；这是由于此时折射率调制深度较小，光栅平均折射率增大所致。当刻蚀深度为 150 nm 和 200 nm 时，尽管耦合强度提升，但深刻蚀引入了显著的散射损耗，破坏了微环的临界耦合条件，导致谐振峰消光比大幅降低。因此，选取 100 nm 作为最佳刻蚀深度。

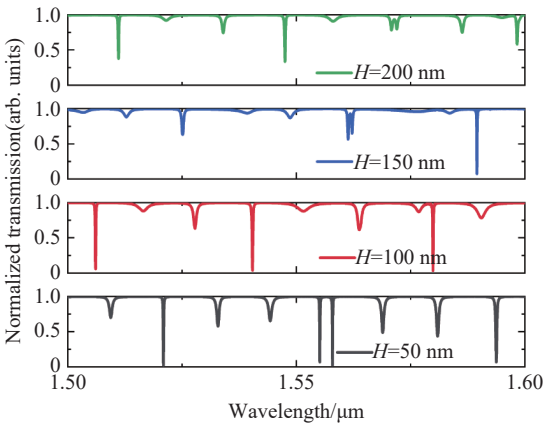

图 5　不同刻蚀深度下光栅辅助微环的传输谱

Fig. 5 Transmission spectrum of the grating-assisted microring resonator with various etching depths

占空比可调制平均有效折射率 n_{avr}。本节研究占空比 D 对侧模抑制比的影响，固定光栅周期 L 为 600 nm，刻蚀深度 H 为 100 nm，对占空比在 0.8~0.95 范围内以 0.05 为步长进行参数扫描。仿真结果如图 6 所示。可见，各占空比下均存在 1510 nm 和 1570 nm 附近的谐振峰。随着占空比从 0.8 增至 0.95，这两个谐振峰均发生红移。这是因为占空比增加导致光栅平均折射率 n_{avr} 升高，进而引起反射波长红移。此外，当占空比为 0.8 时，1550 nm 附近无明显主谐振峰；当占空比增至 0.85 时，该处主模开始凸显；当占空比为 0.9 时，1550 nm 处主谐振峰消光比高、波形尖锐，侧模抑制效果优异；当占空比继续增至 0.95 时，主谐振峰发生分裂。因此，本文选取占空比为 0.9。

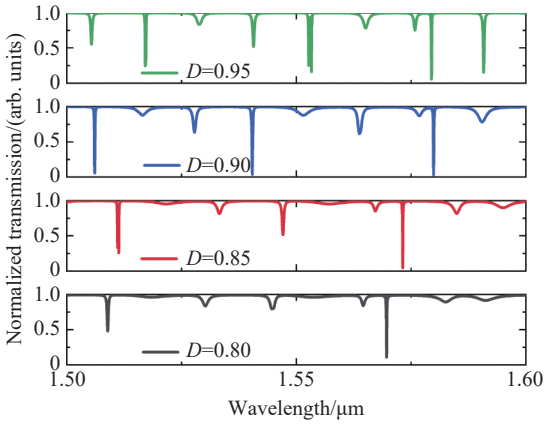

图 6　不同占空比下光栅辅助微环的传输谱线

Fig. 6 Transmission spectrum of the grating-assisted microring resonator with various duty cycles

上述研究表明，光栅周期、刻蚀深度与占空比之间存在协同调控机制。其中，光栅周期依据反射波长条件确定模式选择的中心波长；刻蚀深度与占空比则通过调制平均有效折射率微调反射波长，以实现与微环目标谐振波长的精准匹配，并平衡反向耦合强度与散射损耗。经参数优化，该结构可有效滤除侧模并维持主谐振峰的高消光比，从而获得具有稀疏谐振峰的光谱输出。

基于前述 Fano 谱线产生及侧模抑制的研究结果可知，引入相位单元和光栅结构的微环谐振器呈现出侧模抑制型 Fano 谱线特征。相位单元位于直通路径的总线波导上，主要起相位调节作用；侧壁光栅位于微环内部，主要承担模式选择功能。由于两者在空间上解耦，且相位单元不改变微环的谐振

频率, 因此组合后相位单元仍能产生陡峭的 Fano 边缘, 而光栅仍能有效抑制多余侧模, 二者具有良好的功能独立性。如图 7 所示, 此时谱线同时具备高斜率的 Fano 线型特征和显著的侧模抑制特性。仿真结果表明, 优化后的微环结构主谐振峰与次级侧模的归一化透过率分别为 0.074 85 和 0.762 16, 边模抑制比达到 10.08 dB。这说明侧壁光栅的引入显著增强了模式选择性, 通过拉大目标模式与干扰侧模的强度反差, 有效抑制了模式间串扰, 提升了传感信号的辨识精度。在频谱特征方面, 该结构的 FSR 由原微环的 12.11 nm 大幅提升至 39.19 nm, 增幅约为 3 倍。从物理机制分析, 传统微环 FSR 较小, 当环境折射率变化引起的谐振峰波长漂移跨越 FSR 时, 光谱响应会产生周期性混叠, 导致谐振级次无法唯一辨识, 从而引发测量歧义。本文通过光栅的选择性滤波实现频域频谱重构, 显著扩展了结构的等效 FSR, 为目标谐振峰提供了更广阔的光谱不模糊范围。这种机制确保了在大范围折射率变动下, 传感信号仍能保持严格的单值映射关系, 从物理层面扩大了量程, 显著拓宽了传感器的动态探测范围。此外, 陡峭的 Fano 共振还有助于降低器件的检测极限。

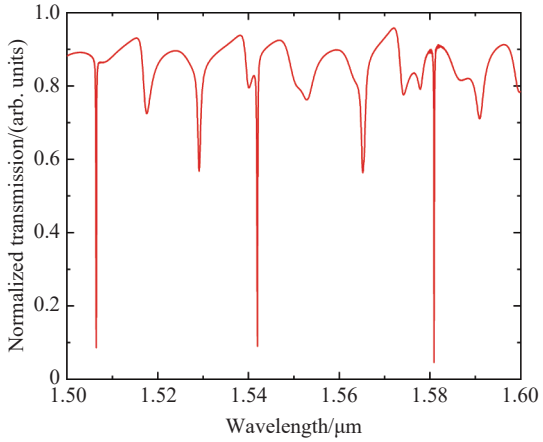

图 7　同时引入相位单元和光栅结构的微环频谱图

Fig. 7 Transmission spectrum of the microring resonator with the phase unit and grating

引入侧壁光栅后, 波导基模的有效折射率 n_{eff} 从原始波导的 2.467 增加至 2.580。根据群折射率的定义,

$$n_{\mathrm{g}} = n_{\mathrm{eff}} - \lambda\left(\frac{\mathrm{d}n_{\mathrm{eff}}}{\mathrm{d}\lambda}\right) \tag{16}$$

光栅在布拉格波长附近引入的正色散效应导致群折射率 n_{g} 较原始波导呈现上升趋势。依据 FSR 与群折射率 n_{g} 的反比关系,

$$\Delta\lambda_{\mathrm{FSR}} = \frac{\lambda_0^2}{n_{\mathrm{g}} \cdot L} \tag{17}$$

式中, $\Delta\lambda_{\mathrm{FSR}}$ 表示微环的自由光谱范围。物理上相邻谐振峰的间距实际上会因群折射率 n_{g} 的增大而略微收缩。由此可见, 本文观察到的有效 FSR 从 12.11 nm 提升至 39.19 nm, 其物理本质并非源于色散诱导的峰间距改变, 而是源于侧壁光栅对相邻次级纵模的强力滤波作用。光栅作为带阻滤波器, 大幅增加了非目标纵模的散射损耗, 使其消光比降至探测极限以下, 从而在光谱上实现了侧模抑制效应, 重构了频谱并显著拓宽了传感探测范围。

3　相位单元和光栅辅助微环传感特性

3.1　相位单元和光栅辅助微环传感特性

为探究折射率传感性能, 仿真了器件在不同浓度甘油溶液包层下的传输谱线。选取纯水、20% 甘油溶液和 40% 甘油溶液作为包层, 不同包层条件下的微环传输谱线如图 8 所示。其中, 图 8(a)展示了无相位单元时微环的传输谱线, 表现出明显的侧模抑制效果, 谐振峰呈洛伦兹线型; 图 8(b)展示了有相位单元时微环的传输谱线, 同样具有显著的侧模抑制效果, 但谐振峰呈 Fano 线型。结果表明, 随着包层溶液浓度的增加, 微环有效折射率增大, 导致谐振波长发生红移, 且两种器件的谐振峰波长保持一致。

波长传感灵敏度 S_λ 的计算公式为:

$$S_\lambda = \Delta\lambda / \Delta n_{\mathrm{cl}} \tag{18}$$

式中, $\Delta\lambda$ 为谐振波长漂移量, Δn_{cl} 为包层折射率变化量。在纯水、20% 浓度甘油溶液和 40% 浓度甘油溶液环境下, 对应的折射率分别为 1.333、1.347 和 1.364。由图 8 可知, 不同包层环境下对应的谐振波长分别为 1 540.40 nm、1 541.49 nm 和 1 543.07 nm。根据式 (18) 计算可得, 器件的波长传感灵敏度分别为 81 nm/RIU 和 89 nm/RIU。

波长检测极限 δ_λ 的计算公式为:

$$\delta_\lambda = 0.02 / S_\lambda \tag{19}$$

式中, 0.02 nm 为波长解调系统的最小分辨率。计算得到器件的波长检测极限为 2.25×10^{-4} RIU。

为对比两种线型的强度传感性能, 在包层折射率分别为 1.333 和 1.334 的条件下, 对这两种器件

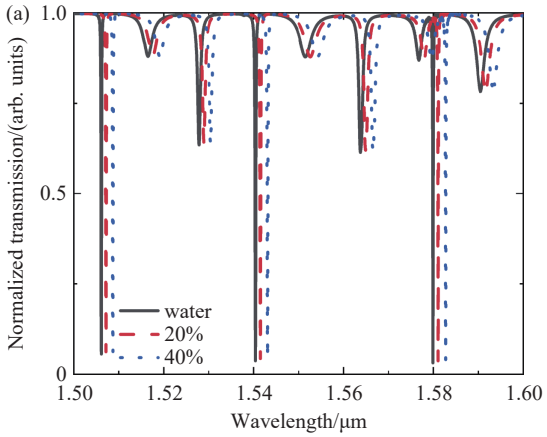

图 8　不同浓度溶液下器件的传输谱线。(a)无相位单元的光栅辅助型微环;(b)引入相位单元的光栅辅助型微环

Fig. 8 Transmission spectra of the microring resonators in solutions with different concentrations. (a) The microring resonator with a grating and without a phase unit; (b) the microring resonator with a phase unit and a grating

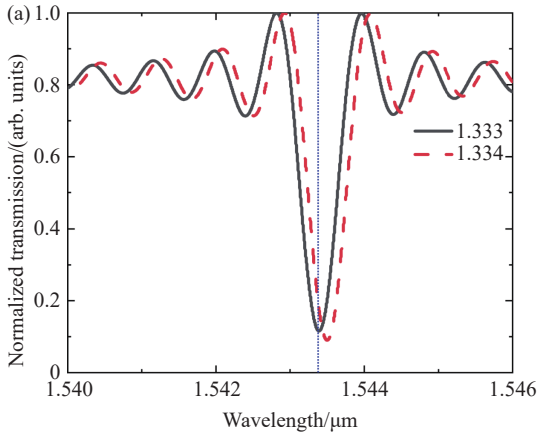

图 9　不同浓度溶液下器件的传输谱线。(a)无相位单元的光栅辅助型微环;(b)引入相位单元的光栅辅助型微环

Fig. 9 Transmission spectra of the microring resonators in solutions with different concentrations. (a) The microring resonator with a grating and without a phase unit; (b) the microring resonator with a phase unit and a grating

的传输谱线进行了仿真,结果如图 9 所示。

强度传感灵敏度 S_{I} 的计算公式为:

$$S_{\mathrm{I}}=\Delta I/\Delta n \tag{20}$$

式中,ΔI 为固定波长下的强度变化量,Δn 为包层折射率变化量。由图 9(a)可知,包层折射率分别为 1.333 和 1.334 时,固定波长 1543.38 nm 处的强度分别为 0.11754 和 0.19025,对应器件的强度传感灵敏度为 2.09×10^{3} dB/RIU。同样地,根据图 9(b)可得该 Fano 线型谐振峰的强度传感灵敏度为 7.11×10^{3} dB/RIU。

强度检测极限 δ_{I} 的计算公式为,

$$\delta_{\mathrm{I}}=0.001/S_{\mathrm{I}} \tag{21}$$

式中,0.001 为强度解调系统的最小分辨率。计算表明,这两种器件的强度检测极限分别为 4.78×10^{-7} RIU 和 1.41×10^{-7} RIU。与洛伦兹线型传感器相比,本文提出的 Fano 线型传感器将强度传感灵敏度提升了约 3.4 倍,检测极限降低了约 70.5%。

在强度传感分析中,工作波长的选定遵循灵敏度最大化原则。由于强度灵敏度本质上取决于光谱斜率,而 Fano 线型凭借其独特的非对称性,在谐振点附近呈现出极窄且陡峭的边缘梯度,因此本文将工作波长设定在该陡峭边缘的中心位置。此举旨在利用高透过率变化率,使待测折射率的微小波动能引发最大的光强变化反馈。

针对实际工程应用中环境变化可能导致工作点偏离最优斜率区的问题,本文提出的结构展现出良好的工作点可调性与稳定性。在实际传感系统中,可通过集成微加热器利用热光效应调节微环相位,或调节可调谐激光器的输出波长,将工作点实

时锁定在 Fano 线型的最陡峭处。这种主动锁定机制确保传感器始终运行于最高灵敏度区间, 从而在宽探测范围内维持稳定且极低的检测极限。

3.2 制造容差分析

在硅基集成工艺中, 加工误差不可避免。为此, 本文评估了刻蚀深度和周期对器件性能的影响, 如图 10 和 11 所示。仿真结果表明, 即便存在制造偏差(如刻蚀深度偏移或周期偏差), 尽管光谱出现一定的谐振漂移与细节劣化, 但器件的核心物理机制未受损害, 仍保留清晰的 Fano 共振边缘及高效的侧模抑制特性。这种稳健的工艺容差, 结合前文 2.1 节关于相位单元位置偏差对 Fano 激发包容性的讨论, 共同验证了该设计在实际纳米加工工艺中的高可行性。这不仅确保了器件在复杂制造环境下性能的一致性, 也为其向高精度传感应用的工程转化提供了重要依据。

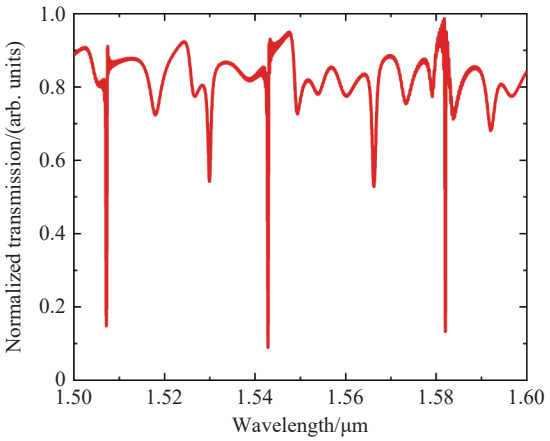

图 10 刻蚀深度为 110 nm 时微环的传输谱线

Fig. 10 Transmission spectrum of the microring resonator at an etching depth of 110 nm

3.3 温度交叉敏感性讨论

在实际工程应用中, 硅基传感器的性能不可避免地受环境温度波动影响。硅具有显著的热光效应, 其热光系数约为 1.86×10^{-4} K^{-1}。该效应会导致材料折射率随温度变化, 进而引起谐振波长漂移。为定量评估温度对器件谐振特性及传感精度的影响, 进行了变温仿真分析, 结果如图 12 所示。当温度从 300 K 升至 305 K 时, 目标波长从 1540.40 nm 漂移至 1540.84 nm, 计算得出器件的温度灵敏度为 0.09 nm·K^{-1}。为保障复杂工况下的测量精度, 工

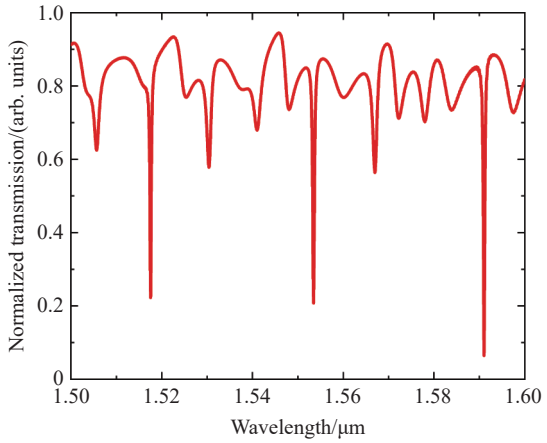

图 11 周期为 610 nm 时微环的传输谱线

Fig. 11 Transmission spectrum of the microring resonator with a period of 610 nm

程上常采用两类成熟的温度补偿方案: 一是差分传感架构, 即在同一芯片上集成结构一致且密封隔离的参考微环, 通过解调传感与参考谐振峰的相对波长偏移, 实时抵消环境温度引起的漂移; 二是引入片上温控模块, 利用集成微加热器稳定控制器件工作温度。本文重点研究利用 Fano 共振效应提升器件的本征传感性能。在实际部署中, 结合上述差分补偿或精密温控技术, 可有效抑制温度交叉干扰, 充分发挥该器件低检测极限和高灵敏度的优势。

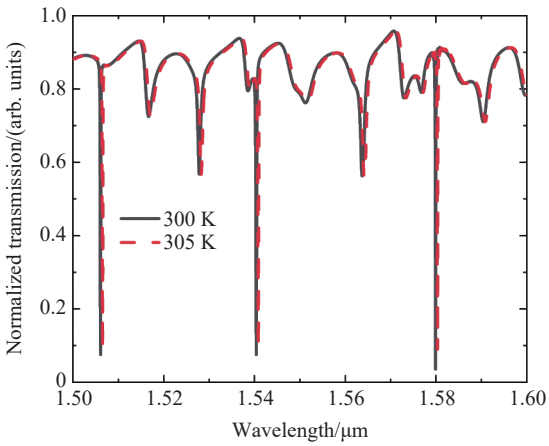

图 12 不同环境温度下微环的传输谱线

Fig. 12 Transmission spectra of the microring resonator at different temperatures

3.4 与国内外同类工作对比分析

为定量评估本研究设计的性能优势, 表 1 将本文提出的相位单元和光栅辅助型微环传感器与近年来报道的其他高性能硅基微环传感器的关键指

表 1　本工作与近年国内外代表性硅基微环传感器性能对比

Table 1 Performance comparison of this work and state-of-the-art MRR sensors in recent years

参考文献	技术路线	微环结构	S/(nm/RIU)	δ_λ或δ_I/RIU	$\Delta\lambda_{FSR}$/nm	R/μm
[21]	色散法	跑道型亚波长光栅波导微环	444	4.5×10^{-4}	240	10
[20]	游标法	双微环级联	3 000	2×10^{-3}	61.8	10
[23]	侧模抑制	双槽微环	563	3.7×10^{-6}	72.62	6.72
本文	侧模抑制和Fano	内壁光栅和相位单元	89	1.4×10^{-7}	39.19	10

标进行了对比。

色散工程法虽然具备极广的理论量程，但往往受限于复杂的包络谱拟合算法，难以满足高帧率实时监测的需求；游标法虽能提供极高的灵敏度，但其级联多环的架构显著增加了器件尺寸，且多环间的相位精准对准与热稳定性调控极大地提升了封装与外围电路的复杂度；传统的侧模抑制方案虽能有效扩展量程，但检测极限受限于对称洛伦兹线型的平缓边缘。相比之下，本研究通过在单一微环内实现功能解耦调控，不仅在极小的足迹内兼顾了高精度与宽量程，更凭借其结构极简、无需复杂后处理算法、集成度高等优势，为高性能片上生化分析提供了一种兼具探测深度与精度的理想传感平台。

4　结论

本文提出了一种集成相位单元与辅助光栅的微环传感器，实现了具备侧模抑制特性的 Fano 线型谱线，将 FSR 扩大至原来的 3 倍，从而使探测范围拓宽 3 倍。同时，得益于陡峭的 Fano 线型谐振峰，该器件的强度传感灵敏度高达 7.11×10^{3} dB/RIU，检测极限低至 1.41×10^{-7} RIU，性能明显优于基于洛伦兹线型的微环传感器。本研究可为硅基光学传感器在结构优化与工程应用层面的研发提供重要依据。

参考文献：

[1] 朱葳, 郭丽君, 崔健, 等. 基于一维光子晶体阵列的混合集成低功耗光开关设计与仿真 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(2): 99-104.
Zhu Wei, GUO Lijun, Cui Jian, et al. Design and simulation of hybrid integrated low-power optical switch based on one-dimensional photonic crystal array[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2025, 31(2): 99-104.

[2] 张玉, 蔡林莹, 吕业刚. 基于 Sb_2S_3 和 Sb_2Se_3 相变材料的非易失性可调光开关及其性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2022, 28(2): 121-126.
Zhang Yu, Cai Linying, Lyu Yegang. Nonvolatiletunable optical switches based on Sb2 S3 and Sb2 Se3 phase change materials and their properties[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2022, 28(2): 121-126.

[3] 陈飞, 邹志清, 周洪波, 等. 一种硅基集成 PCR 微芯片的传热数值分析 [J]. 功能材料与器件学报, 2005, 11(4): 471-475.
Chen Fei, Zou Zhiqing, Zhou Hongbo, et al. Numerical simulation of heat transfer for an integrated PCR microchip[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2005, 11(4): 471-475.

[4] 田锋, 朱建中, 张国雄, 等. 微腔阵列式多功能生物传感器 [J]. 功能材料与器件学报, 2001, 7(4): 369-372.
Tian Feng, Zhu Jianzhong, Zhang Guoxiong, et al. Micromachined biosensors based on containment array[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2001, 7(4): 369-372.

[5] Tan Ying, Dai Daoxin. Silicon microring resonators[J]. Journal of Optics, 2018, 20(5): 054004.

[6] Uchida Y, Arakawa T, Higo A, et al. Silicon microring resonator biosensor for detection of nucleocapsid protein of SARS-CoV-2[J]. Sensors, 2024, 24(10): 3250.

[7] Steglich P, Rabus D G, Sada C, et al. Silicon photonic microring resonators for chemical and biological sensing: a tutorial[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 22(11): 10089-10105.

[8] Shi Bingyao, Chen Xiao, Cai Yuanyuan, et al. Compact slot microring resonator for sensitive and label-free optical sensing[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6467.

[9] Cicek K, Eryürek M, Kiraz A. Single-slot hybrid microring resonator hydrogen sensor[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(7): 1465-1470.

[10] Xiao Huifu, Wu Xiaosuo, Liu Zilong, et al. Tunable Fano resonance in mutually coupled micro-ring resonators[J].

Applied Physics Letters, 2017, 111(9): 091901.

[11] Zhou Xudong, Yuan Mingrui, Qin Shijing, et al. Tunable Fano and EIT-like resonances based on two cascaded micro-ring resonators[J]. Optics Letters, 2025, 50(8): 2719-2722.

[12] Shi Enze, Chen Guang, Lu Lidan, et al. Fano resonance Mach-Zehnder modulator based on a single arm coupled with a photonic crystal nanobeam cavity for silicon photonics[J]. Sensors, 2025, 25(10): 3240.

[13] Chen Shuhuang, Zhou Gangqiang, Zhou Linjie, et al. High-linearity Fano resonance modulator using a microring-assisted Mach-Zehnder structure[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(13): 3395-3403.

[14] Peng Fangcao, Wang Zhuoran, Yuan Guohui, et al. High-sensitivity refractive index sensing based on Fano resonances in a photonic crystal cavity-coupled microring resonator[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-8.

[15] Li Xinyu, Xiong Xinzhe, Song Yan, et al. High-performance refractive index sensing based on Fano resonances in a subwavelength grating waveguide microring resonator[J]. Journal of Lightwave Technology, 2025, 43(15): 7407-7414.

[16] Zhang Weifeng, Li Wangzhe, Yao Jianping. Optically tunable Fano resonance in a grating-based Fabry-Perot cavity-coupled microring resonator on a silicon chip[J]. Optics Letters, 2016, 41(11): 2474-2477.

[17] Gu Linpeng, Fang Liang, Fang Hanlin, et al. Fano resonance lineshapes in a waveguide-microring structure enabled by an air-hole[J]. APL Photonics, 2020, 5: 016108.

[18] Li Hongpeng, Lu Lidan, Chen Guang, et al. Fano resonance thermo-optic modulator based on double T-bus waveguides-coupled micro-ring resonator[J]. Photonics, 2024, 11(3): 255.

[19] Yang Fan, Zhang Wenjia, Jiang Yue, et al. Highly sensitive integrated photonic sensor and interrogator using cascaded silicon microring resonators[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 3055-3061.

[20] Chang Yuhua, Dong Bowei, Ma Yiming, et al. Vernier effect-based tunable mid-infrared sensor using silicon-on-insulator cascaded rings[J]. Optics Express, 2020, 28(5): 6251.

[21] Sun Shibo, Xiong Xinzhe, Liang Jiawei, et al. Envelope spectrum of the subwavelength grating slot waveguide microring resonator for high-sensitivity and wide-range refractive index sensing applications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(15): 5390-5398.

[22] Sun Shibo, Xiong Xinzhe, Chang Meiyu, et al. Dispersion-engineered subwavelength grating microring resonator for high-sensitivity and wide-range on-chip sensing[J]. Photonics Research, 2025, 13(12): 3362-3373.

[23] Cheng Weiqing, Sun Xiao, Ye Shengwei, et al. Double slot micro ring resonators with inner wall angular gratings as ultra-sensitive biochemical sensors[J]. Optics Express, 2023, 31(12): 20034-20048.