

多腔耦合波导可调五重 Fano 共振及传感特性研究

张潇蕾¹⁾²⁾ 贺雪晴^{1)2)3†}

1) (太原师范学院物理系, 山西 晋中 030619)

2) (太原师范学院计算与应用物理研究所, 山西 晋中 030619)

3) (太原师范学院智能优化计算与区块链技术山西省重点实验室, 山西 晋中 030619)

摘要

本文提出一种多腔耦合 MIM 波导结构, 与传统对称腔不同, 该结构由方形环腔(SRR)、半圆环腔(SSR)和开口半环腔(SSSR)双侧耦合直波导形成非对称构型。基于有限元法对该结构开展中红外波段光传输特性仿真分析, 通过优化谐振腔几何尺寸实现了多重 Fano 共振的选择性调控, 并阐明了腔间耦合强度与腔体本征频率的竞争效应是实现模式选择性调制的核心机理。传感性能结果表明, 该结构基于多重 Fano 共振效应具备优异的高灵敏折射率传感特性, 其最高灵敏度可达 3277.47 nm/RIU , FOM 为 135.23 RIU^{-1} , Q 值可达 143.25。在物质浓度检测应用中, 该结构可实现葡萄糖与甘油浓度的同步检测, 其灵敏度分别为 $0.39 \text{ nm} \cdot \text{L/g}$ 和 $0.37 \text{ nm} \cdot \text{L/g}$ 。本研究从理论上验证了多腔耦合 MIM 波导结构在多重 Fano 共振激发与多功能集成传感领域的应用潜力。

关键词: Fano 共振, 可调, 生物传感, 灵敏度, 品质因子

PACS: 07.07.Df, 42.25.Hz, 42.65.Pc

基金: 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11805141)、山西省基础研究计划 (批准号: 202203021222250、202303021211185)

† 通信作者.E-mail: hexq_1988@163.com

1 引言

法诺 (Fano) 共振是一种普遍存在的非对称共振现象, 由 Ugo Fano 于 1961 年在研究原子光电离过程中首次提出^[1]。此后, 研究人员在多种物理系统中研

究了这一现象，如原子分子物理^[2]、凝聚态体系中的量子点与量子线^[3,4]、光子晶体与光波导结构^[5,6]、等离激元结构^[7]与超材料^[8]等。特别地，在等离激元结构中，尤其是金属-介质-金属（MIM）波导系统，通过耦合谐振腔结构可激发离散与连续模式的干涉耦合，从而产生 Fano 共振。与传统对称洛伦兹共振不同，Fano 共振呈现尖锐且非对称谱线特征。这一独特谱线形态对周围环境参数的微小变化极为敏感，使其在折射率传感^[9,10]、光学开关^[11,12]、慢光效应及滤波器设计^[13,14]等领域展现出重要的应用前景。

在微纳光学与表面等离激元传感应用中，MIM 波导因其结构紧凑、易于集成且能产生明显 Fano 共振线型，成为非常典型的研究平台。Fano 共振尖锐非对称线型和高品质因子成为提升折射率传感性能的核心。传统单重 Fano 共振传感构型设计相对简单，如通过直波导侧耦合一个矩形腔^[15]，调节腔体尺寸和耦合距离获得一个高 Q 值 Fano 共振峰，可用于检测单一分析物浓度或折射率变化，但仅有一个传感通道，无法同时检测多个参数或区分混合样本。

通过集成多个谐振腔来激发多个离散态，如环形腔^[16]，同心三环跑道腔^[17]，多腔系统等^[18-23]，可以获得多个可分辨 Fano 共振峰，且共振峰均可独立响应周围介质折射率变化，为复杂生化环境中多参数同步检测提供了可行性。例如，2021 年，Liu 等人^[18]利用 MIM 波导耦合矩形腔和半环形腔实现了独立可调三重 Fano 共振，其灵敏度可达 1550.38 nm/RIU。2022 年，Liu 和 Tian 等人^[19]设计了 MIM 波导侧面耦合椭圆腔、半环形腔、半开口环形腔，实现了独立可调四重 Fano 共振。2023 年，Zhang 等人^[20]提出了一种 MIM 波导双侧耦合六角螺母型和方形环腔，实现了多重 Fano 共振，其灵敏度可达 998 nm/RIU。同年，Chen 等人^[21]提出了 MIM 波导单侧耦合圆盘腔以及同心环谐振腔，产生了五重 Fano

共振，其灵敏度达到 1250nm/RIU。2024 年，Ren 等人^[22]提出了一种 MIM 波导侧耦合环形腔和半环形腔，其灵敏度达到 2385 nm/RIU，可实现调味剂中糖含量与乙醇溶液浓度同时检测。2025 年，Ren 等人^[23]设计了纳米块增强型 MIM 波导双侧耦合椭圆环交叉腔和方型环腔结构，其灵敏度高达 3090nm/RIU。由此可见，通过设计谐振腔耦合系统以产生多个 Fano 共振峰，发展具备多通道探测能力、宽频段可调谐响应以及高集成度的片上集成光学传感、生化检测与环境监测器件，具有十分重要的实际应用价值。

本文提出一种基于多环谐振腔耦合 MIM 波导结构，利用有限元法计算了该结构的透射谱和共振峰处的磁场分布。该系统具有可调的五重 Fano 共振特性，且每个共振峰对周围介质折射率变化表现出高度敏感性，最高灵敏度可达 3277.474 nm/RIU，可用于同步检测葡萄糖与甘油浓度，其灵敏度分别为 0.39 nm·L/g 和 0.37 nm·L/g。该结构为开发下一代高性能、多通道、高集成度的光学传感芯片和多元分析系统提供了理论参考，在生物化学检测、环境监测等领域具有广阔的应用前景。

2 结构及原理

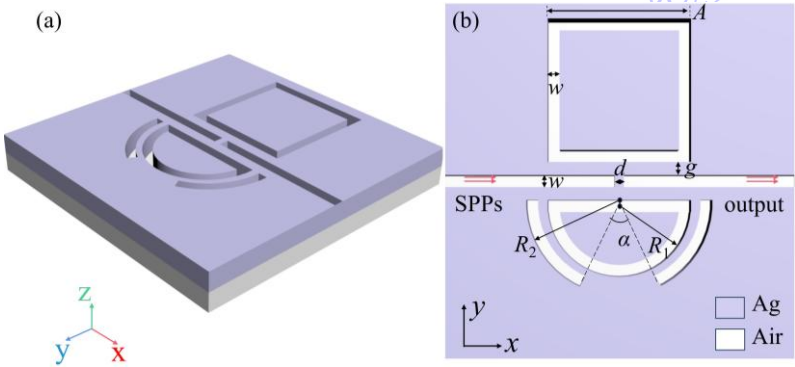


图 1 所提出的 MIM 波导结构模型图(a)三维结构示意图；(b)二维俯视截面图

Fig. 1. Schematic diagram of the proposed MIM waveguide structure(a) schematic of 3D model;
(b) 2D top-down cross-sectional view.

MIM 波导结构如图 1 所示，其中图 1(a)为该波导的三维（3D）结构示意图，

图1(b)为二维（2D）截面俯视图。MIM波导由金属Ag（紫色区域）和空气（白色区域）组成，MIM直波导上侧耦合方形环腔（square ring resonator, SRR），下侧耦合半圆环腔（semi-circular ring cavity, SSR）和开口半环腔（split semi-ring resonator, SSSR）。其中， R_1 是 SSR 谐振腔外径， R_2 是 SSSR 谐振腔外径， g 为谐振腔与 MIM 直波导之间的耦合距离，SRR、SSR 和 SSSR 谐振腔宽度以及 MIM 直波导宽度均为 $w=50\text{ nm}$ ，且 SSSR 的开口角度 $\alpha=50^\circ$ ，银挡板的厚度为 $d=10\text{ nm}$ 。在二维结构模型中，银的相对介电常数由 Drude 模型描述^[24]：

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_{\infty}-\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega+i\gamma)}, \quad (1)$$

其中 $\varepsilon_{\infty}=3.7$ ， $\omega_p=9.1\text{ eV}$ 是银的等离子体频率， ω 是入射波的角频率， $\gamma=0.018\text{ eV}$ 是电子碰撞的频率。

根据驻波原理，MIM 波导结构的共振波长可以描述为^[25]：

$$\lambda_m = \frac{2\text{Re}(n_{\text{eff}})L_{\text{eff}}}{m-\psi/2\pi}, m=1,2,3,\dots \quad (2)$$

其中 λ 是谐振波长， L_{eff} 是谐振器的有效长度， ψ 是由反射引起的相移， $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 是有效折射率实部， m 是谐振模式的阶数。值得注意的是公式(2)仅描述孤立 MIM 空腔内 SPP 纯驻波相长干涉的基础谐振条件，用于定性解释多阶分立共振。在研究折射率传感器性能时，灵敏度（ S ）是评估传感性能的重要指标，反映折射率变化与对应透射峰位移的比值，其计算公式为^[26]：

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (3)$$

其中， $\Delta\lambda$ 表示共振波长的变化， Δn 表示折射率的变化。

此外，品质因数（FOM）表征传感器性能，FOM 值越大，表明传感器的性能越好，该参数的计算公式为^[27]：

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (4)$$

其中， S 表示灵敏度， $FWHM$ 为半高全宽。

品质因子（ Q ）是能够代表传感器性能的另一个重要参数，可以描述共振线宽窄化程度，计算公式为^[27]：

$$Q = \frac{\lambda_m}{FWHM} \quad (5)$$

3 结果与讨论

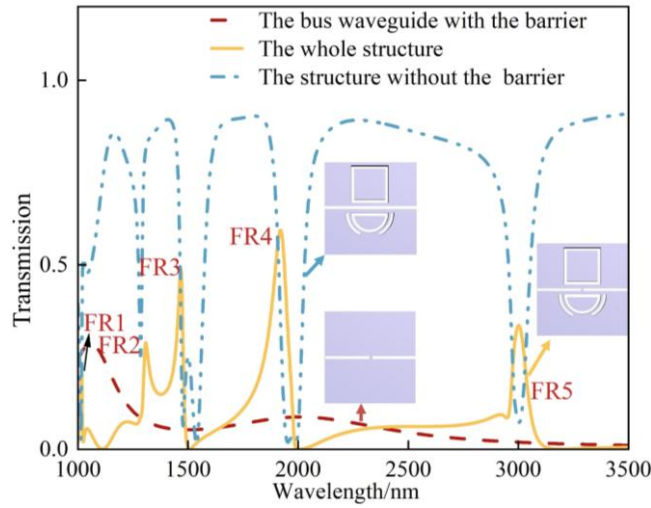


图 2 没有银挡板结构（蓝色线）、带有银挡板直波导（红色线）和整个结构（橙色线）的透射光谱

Fig. 2. Transmission spectra of the structure without the silver baffle (blue line), the bus waveguide with the silver baffle (red line), and the whole structure (orange line).

在仿真计算过程中，我们采用二维有限元法，在保证计算精度的前提下，显著减少仿真时间和计算资源。采用波动光学模块中的电磁波频域求解。在输入/输出端口处设置完美匹配层（PML）边界条件，同时在仿真区域的顶部和底部边界上设置散射边界条件，网格化过程基于收敛准则进行了自适应细化。最后，通过系统性参数扫描，定量分析了其透射谱以及磁场分布。本文中，谐振腔与 MIM 直波导宽度固定为 $w=50$ nm，银挡板厚度固定为 $d=10$ nm 以及 SSSR 的开口角度 $\alpha=50^\circ$ 。

首先，分析 MIM 波导结构的光学特性，分别计算无银挡板结构、带有银挡板的直波导以及完整结构的透射谱（如图 2 所示），其中波长范围为 1000 nm-3500 nm，系统结构参数设置为： $A=600$ nm， $g=15$ nm， $R_1=300$ nm 和 $R_2=390$ nm。图 2 中，带有银挡板直波导可产生一个宽带连续态，如红色虚线所示。于此同时，无银挡板的波导结构由于多个谐振腔模式与 MIM 直波导耦合，其透射谱在 1017 nm， 1308 nm， 1467 nm， 1921 nm 和 3004 nm 处存在 5 个分离的透射谷，这些可视为窄带离散态，如蓝色点线所示。在宽带连续态和窄带离散态相干叠加作用下，如橙色实线所示，在 $\lambda_1=1017$ nm， $\lambda_2=1308$ nm， $\lambda_3=1467$ nm， $\lambda_4=1921$ nm， $\lambda_5=3004$ nm 处观察到五个不同的 Fano 共振峰，分别标记为 FR1、FR2、FR3、FR4 和 FR5，完整结构可激发五重共振峰，证明其源于离散态与连续态的干涉。且全部共振峰均具有 Fano 共振特有的非对称线型。

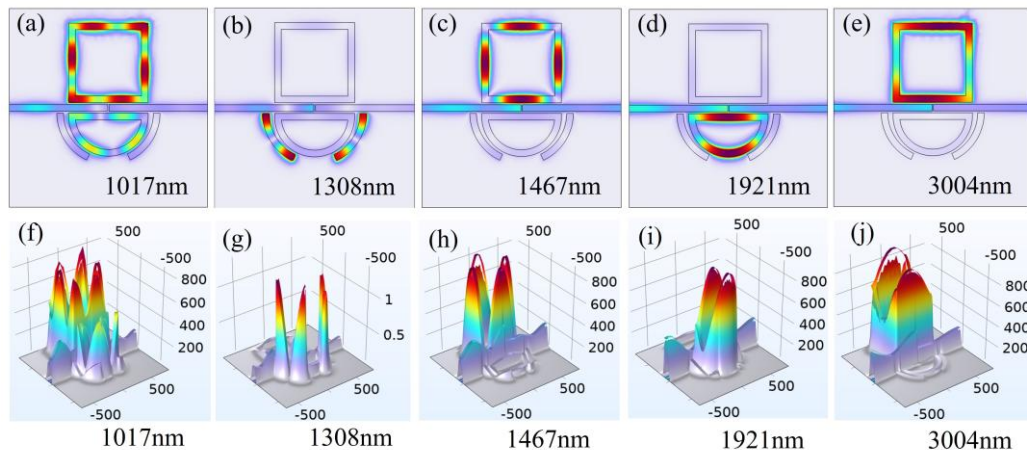


图 3 共振峰 FR1、FR2、FR3、FR4、FR5 处磁场分布(a)-(e)二维磁场分布；(f)-(j)三维磁场分布

Fig. 3. Magnetic field distributions for FR1, FR2, FR3, FR4 and FR5 (a)-(e) 2D magnetic field distributions; (f)-(j) 3D magnetic field distributions.

为进一步理解 Fano 共振机制，计算该结构在共振峰 FR1、FR2、FR3、FR4 和 FR5 处二维和三维磁场分布，结果如图 3 所示。由图可知，在共振波长 1017 nm、1467 nm 和 3004 nm 处，光场能量主要被束缚在 SRR 内（见图 3(a)、3(c)、

3(e))，表明 FR1、FR3 和 FR5 均对 SRR 敏感。在共振波长 1308 nm 处，光场能量主要被束缚在 SSSR 中（见图 3(b)）。共振波长 1921 nm 处，光场能量主要被束缚在 SSR 内（见图 3(d)）。结果表明 FR2 和 FR4 分别对 SSSR 和 SRR 敏感。

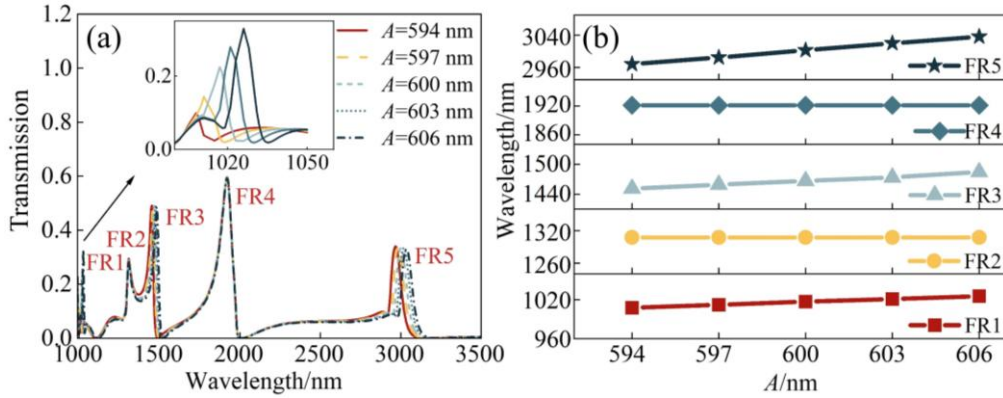


图 4 不同 SRR 边长 A 对共振波长的影响(a)透射谱；(b) A 与共振波长之间的关系
Fig. 4. Tuning resonance wavelengths by the side length A of the SRR(a) Transmission spectra;(b) Resonance wavelength correlation.

不同几何结构的谐振腔 SRR、SSR 以及 SSSR 对系统的光学特性影响显著。图 4(a)展现了 SRR 外径 A 对透射光谱的影响。当 A 从 594 nm 以步长 2 nm 增加到 600 nm，其他系统参数为 $g=15$ nm， $R_1=300$ nm， $R_2=390$ nm 时，可以观察到 FR1、FR3、FR5 的共振峰发生了明显红移，其中 FR1 从 1007nm 红移到 1025nm，FR3 从 1451 nm 红移到 1484nm，FR5 从 2966nm 红移到 3037nm，其偏移量分别为 18 nm，33 nm 和 71 nm，而 FR2 和 FR4 的偏移量小于 1nm，表明 SRR 外径 A 主导调控共振峰 FR1、FR3 和 FR5，对 FR2 与 FR4 影响微弱。其原因在于 A 增大直接导致 SRR 有效长度 L_{eff} 增加，进而共振波长增大。而 FR2 和 FR4 的能量主要局域在 SSR 和 SSSR 内，对 SRR 的尺寸变化不敏感，因此共振波长未发生明显偏移。FR1 的透射率的增强可归因于 A 变化引起的耦合模式效率增强。图 4(b)展示了 SRR 外径 A 与共振波长之间的近似线性关系。随着外径 A 增加，FR1，FR3 和 FR5 分别发生红移，但 FR2 和 FR4 保持不变。

图 5(a)展示了当 SSR 外径 R_1 从 291 nm 以步长 3 nm 增加到 303 nm 时的透射谱。当增大外径 R_1 时，各共振峰呈现差异化调制响应：主导调控 FR4 共振波长由 1845 nm 红移至 1949 nm，偏移量为 104 nm；FR2 共振波长由 1290 nm 红移至 1324 nm，偏移量达 34 nm；FR1 同步发生小幅红移，波长由 1012 nm 移至 1019 nm，仅偏移 7 nm，同时共振透射强度同步衰减。相比之下，FR3 与 FR5 几乎不受该参数调制，无明显波长漂移。其结果归因于 FR2 处光场能量主要被束缚在 SSSR 内（见图 3(b)），由于 SSR 与相邻 SSSR 之间产生近场耦合效应，导致有效折射率增大，进而导致共振峰发生红移。而在 FR4 和 FR1 处分别有大量和部分光场能量被束缚于 SSR 之中（见图 3(d)和 3(a)），随着 R_1 增大，有效长度 L_{eff} 增加，进而共振波长增大，同样表现为红移现象。图 5(b)展示 R_1 与相应共振波长的线性关系。

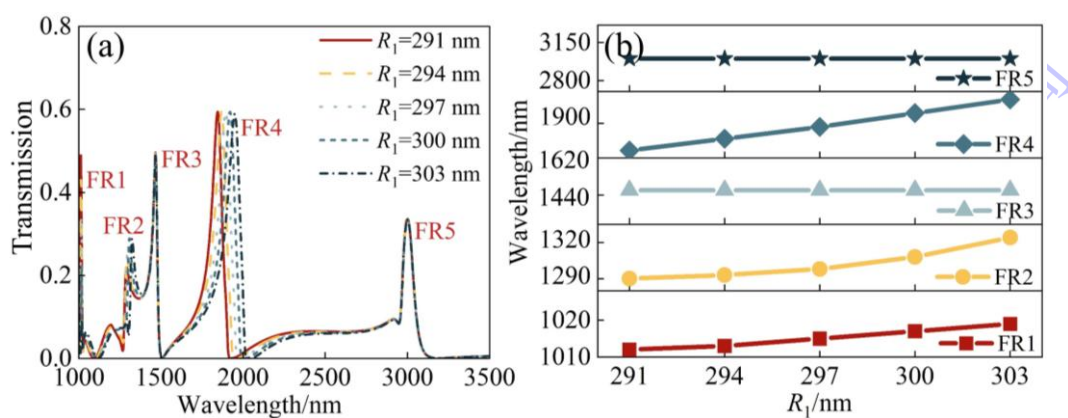


图 5 不同 SSR 外径 R_1 对共振波长的影响(a)透射谱；(b) R_1 与共振波长之间的关系

Fig. 5. The influence of different SSR outer radius R_1 on the resonant wavelength.(a)

Transmission spectra; (b) Resonance wavelength correlation.

图 6(a)展示了当 SSSR 外径 R_2 从 384 nm 以步长 3 nm 增加到 399 nm 时的透射谱。增大 SSSR 外径 R_2 时，FR2 和 FR4 共振波长表现出截然不同的调制响应。其中，FR4 随 R_2 单调蓝移，共振波长由 1940 nm 蓝移至 1906nm。FR2 表现为先蓝移、后红移的非单调变化，波长先由 1335 nm 蓝移至 1309 nm，随后

反向红移至 1320 nm。FR1、FR3、FR5 的共振位置几乎无漂移，对参数 R_2 的几何调制作用不敏感。FR2 共振位置主要由腔间耦合强度与单腔本征频率共同调控。增大 R_2 时存在两种竞争物理效应：一是腔体尺寸扩张提升等效腔长与有效折射率，使 SSSR 本征波长红移；二是耦合强度增强引起两腔电场重叠变化引发双模杂化排斥，驱使共振峰相互远离、产生蓝移。在小 R_2 区间，模式重叠快速提升，耦合强度增强引起的蓝移效果占主导，FR2 蓝移； R_2 (>390nm)持续增大后，尺寸增大引起的红移效果占据主导，FR2 反向红移，由此形成先蓝后红的非单调变化。对 FR4 而言，SSR 尺寸无变化，因此不存在腔体尺寸扩张引起的红移，只存在腔间耦合强度主导蓝移；FR1、FR3、FR5 与 SSSR 模式电场重叠极低，不受该参数明显调制。图 6(b)是 R_2 与各个共振波长之间的关系。

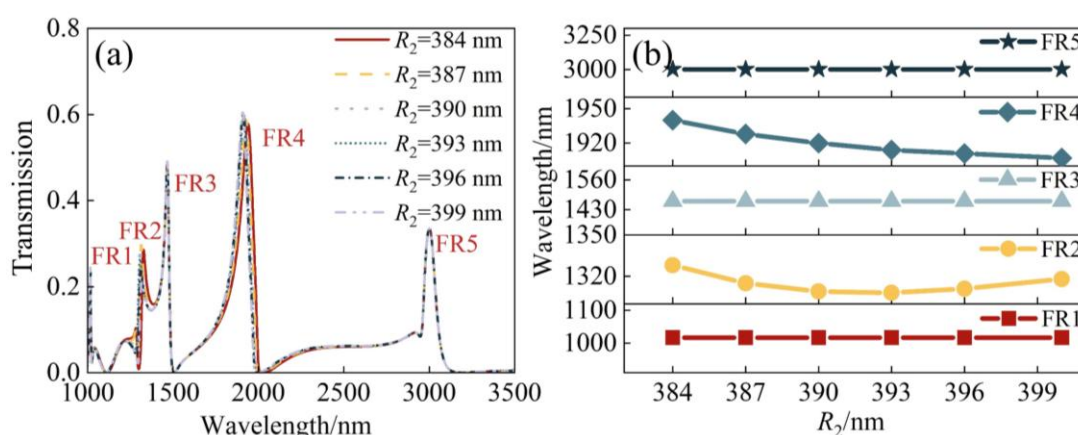


图 6 不同 SSSR 外径 R_2 对共振波长的影响(a)透射谱；(b) R_2 与共振波长之间的关系

Fig. 6. The influence of different SSSR outer radius R_2 on the resonant wavelength(a)

Transmission spectra; (b) Resonance wavelength correlation.

本文分析了 SRR、SSR 与 SSSR 几何构型对该 MIM 结构光学响应特性的调制规律：调节 SRR 边长可同步调控 FR1、FR3 与 FR5 共振模式，而改变 SSR、SSSR 外半径仅能对 FR2、FR4 实现选择性调控。该结果表明体系内五重 Fano 共振峰可依托各自主控几何参数完成选择性调控。因此，仅通过优化谐振腔结构尺寸即可灵活调谐多重 Fano 共振，在多通道光学传感领域具备潜在应用价值。

图 7 展示了谐振腔与直波导之间的耦合距离 g 对五个 Fano 共振峰的影响。

从图 7(a)观察到, g 从 11 nm 以 2 nm 的步长增加到 19 nm, FR1、FR2、FR3、FR4、FR5 的共振波长都发生了轻微蓝移。根据耦合模理论, 耦合距离 g 减小, 谐振腔和直波导之间耦合效应增强。不同的 Fano 共振峰的偏移幅度差异反映了各模式对耦合强度变化的敏感度不同, 这与特定的场分布和 FOM、Q 值密切相关, 进而影响传感性能。

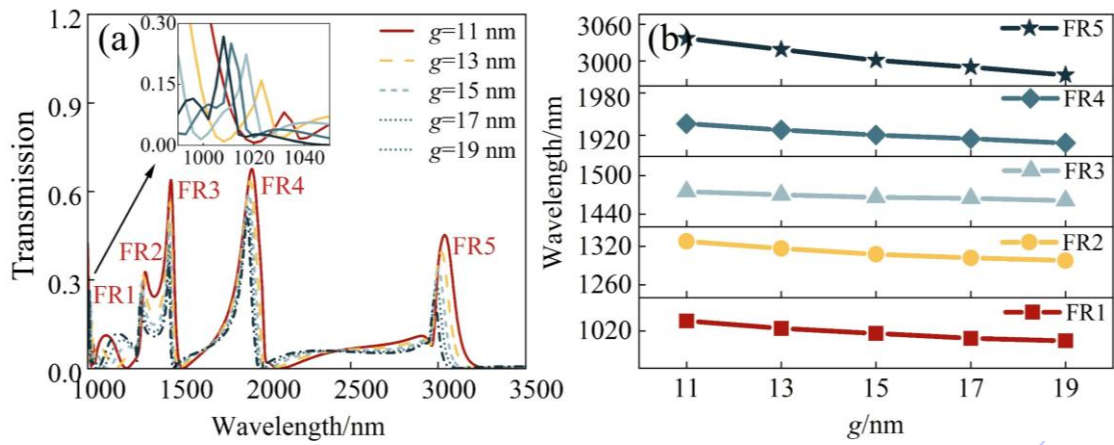


图 7 耦合距离 g 对共振波长的影响(a)透射谱; (b) g 与共振波长之间的关系

Fig. 7. The influence of different coupling distance g on the resonant wavelength(a) Transmission spectra, (b) Resonance wavelength correlation.

在以上分析结果的基础上, 进一步研究 MIM 波导结构的折射率传感特性。

图 8(a)展示了金属区域和直波导折射率保持不变, 仅改变 SRR、SSR 和 SSSR 谐振腔内填充分析物折射率 (n 从 1.00 以步长 0.02 增加到 1.10) 时的透射谱, 其他系统结构参数为 $A=600$ nm, $g=15$ nm, $R_1=300$ nm 和 $R_2=390$ nm。从图中可以看到折射率 n 增加导致 FR1、FR2、FR3、FR4 和 FR5 共振峰均产生红移。图 8(b)是折射率与共振波长的线性拟合, 线性度达到 0.996。很显然, FR5 处的共振峰偏移量最大, 其灵敏度最大可达 3277.474 nm/RIU。其原因是该结构有效折射率随着分析物折射率增大而增加, 从而共振波长增大。而各共振峰灵敏度的差异源于其电磁场局域强度与分布区域, FR5 处光场更局域。图 8(c)-8(d)展示

了不同折射率下的 FOM 值和 Q 值。表明该结构在实现高灵敏度传感的同时，保持了尖锐的共振线型，有利于提高检测精度。

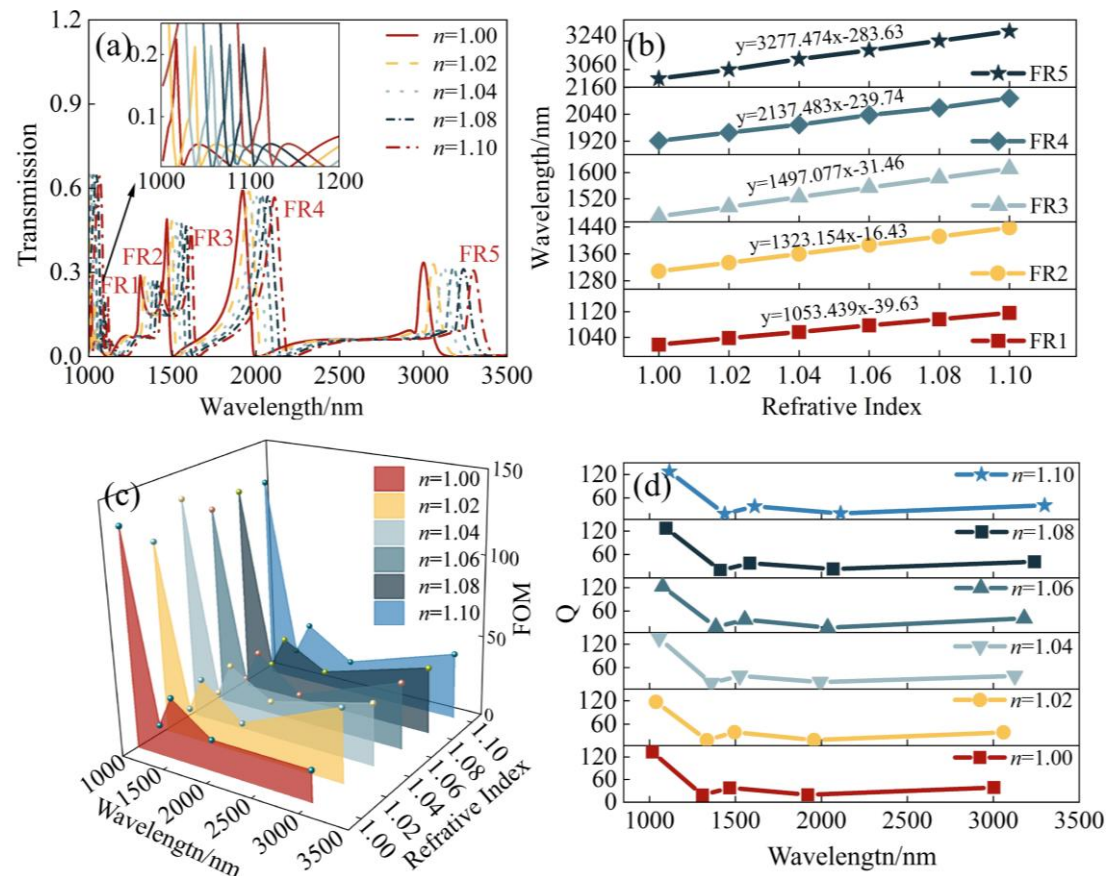


图 8 改变谐振腔折射率时，所提出 MIM 波导结构传感特性(a)透射光谱；(b)RI 与共振波长；(c)-(d) FOM 和 Q 值

Fig. 8. The refractive index sensing characteristics of the proposed MIM waveguide structure when the refractive index of the resonant cavity is changed (a) Transmission spectra; (b) Resonance wavelength correlation; (c)-(d) FOM and Q

为了评估本文提出的 MIM 波导结构传感性能，本文与近年来报道的典型 MIM 波导 Fano 共振传感结构进行了对比，其结果汇总于表 1。本文设计的多环谐振腔耦合 MIM 波导结构在红外波段可激发五个尖锐且不对称的 Fano 共振峰，且通过调控各谐振腔的几何尺寸，可实现以主控参数为主导的共振峰选择性调控。在折射率传感方面，该结构的灵敏度可达 3277.47 nm/RIU ，FOM 为 135.23 RIU^{-1} ，Q 值为 143.25 。相比文献^[21]中侧边耦合圆盘-同心环谐振体系（可生成同

等数量 Fano 共振峰), 灵敏度提升约 1.6 倍; 相比文献^[23]中由椭圆环交叉腔与带隙方形框架构成、可激发三重 Fano 共振的复合传感结构, 灵敏度提升约 19%。

本文提出的多腔耦合 MIM 波导结构中五个 Fano 共振峰 Q 值及灵敏度差异化分布为多种传感场景下的灵活应用提供了可能, FR1 的高 Q 值使其适合需要高分辨率和高检测精度的传感应用, FR5 的高灵敏度使其在宽范围监测中具有优势。

因此, 在生物传感、多参量同步检测等应用场景中具备重要的理论参考价值。

表 1 本文提出的结构与其他相关结构性能对比

Table 1. Performance comparison of the structure proposed in this paper with other related structures.

Reference	Waveguide Structure	$S/(\text{nm}/\text{RIU})$	FOM/RIU ⁻¹
[18]	MIM waveguide coupled with a semi-ring cavity	1550.38	/
[19]	MIM waveguide coupled with ring cavities	1048.6	/
[20]	MIM waveguide coupled hexagonal nut and square ring resonators	998	49016
[21]	MIM waveguide coupled with concentric-ring resonator	1250	138.9
[22]	MIM waveguide coupled with double coupled cavities	2385	31886
[23]	MIM waveguide coupled with nanoblocks	3090	/
This work	MIM waveguide coupled with multi-cavity	3277.474	135.23

该波导结构拥有出色的折射率传感响应能力, 可对不同类型生物溶液开展精准识别与同步探测。通过选用高灵敏度谐振峰作为特征响应信号, 结合多通道区域分别注入待测样品的测试方式, 能够高效完成多元生物液样本的同步传感分析, 在生化微量检测与生物流体分析领域具备良好的应用潜力。本文选取葡萄糖溶液、甘油溶液两类生物样品进行同步检测, 在 SRR 和 SSR 中分别填充

葡萄糖溶液和甘油。选取灵敏度较大的 FR4 和 FR5 作为基准检测峰。这里，葡萄糖溶液的折射率被描述为^[28]：

$$n_{\text{glucose}} = 0.00011889 * C + 1.33230545, \quad (6)$$

其中， C 为葡萄糖溶液浓度，公式(6)描述了葡萄糖浓度与折射率之间的线性关系。甘油的折射率与浓度的描述如下^[29]：

$$n_{\text{glycerol}} = 0.1297889 * C_p + 1.3408, \quad (7)$$

其中， C_p 为甘油溶液的浓度，公式(7)描述了甘油浓度与折射率之间的线性关系。

为了更好地说明该结构同步传感性能，图 9(a)-9(b)分别展示了仅在 SSR 中填充甘油溶液和仅在 SRR 中填充葡萄糖溶液时的透射谱，甘油以步长 50 g/L 从 200 g/L 减少到 0 g/L，其对应的折射率从 1.36139 减少到 1.32459，FR4 的共振波长随浓度的减小而蓝移，而 FR5 的共振波长不变，如图 9(a)所示。而葡萄糖溶液浓度以 0 g/L 以步长 50 g/L 增加到 200 g/L，其对应的折射率从 1.33230545 增加到 1.35608345，FR5 的共振波长发生红移，而 FR4 未发生偏移，如图 9(b)所示。图 9(c)-9(d)展示了同时在 SSR 中填充甘油溶液时和在 SRR 中填充葡萄糖溶液时的透射谱。与单组分测试结果一致，FR4 和 FR5 分别发生蓝移和红移。图 9(e)-9(f)是共振波长与溶液浓度的线性关系，其线性度分别达到了 0.99981 和 0.99939。根据灵敏度定义（公式(3)），得到葡萄糖溶液和甘油的灵敏度分别为 0.39 nm·L/g 和 0.37 nm·L/g。因此，该多腔耦合 MIM 波导结构充分利用不同 Fano 共振峰的空间局域特性，具备低串扰多参数同步传感潜力。

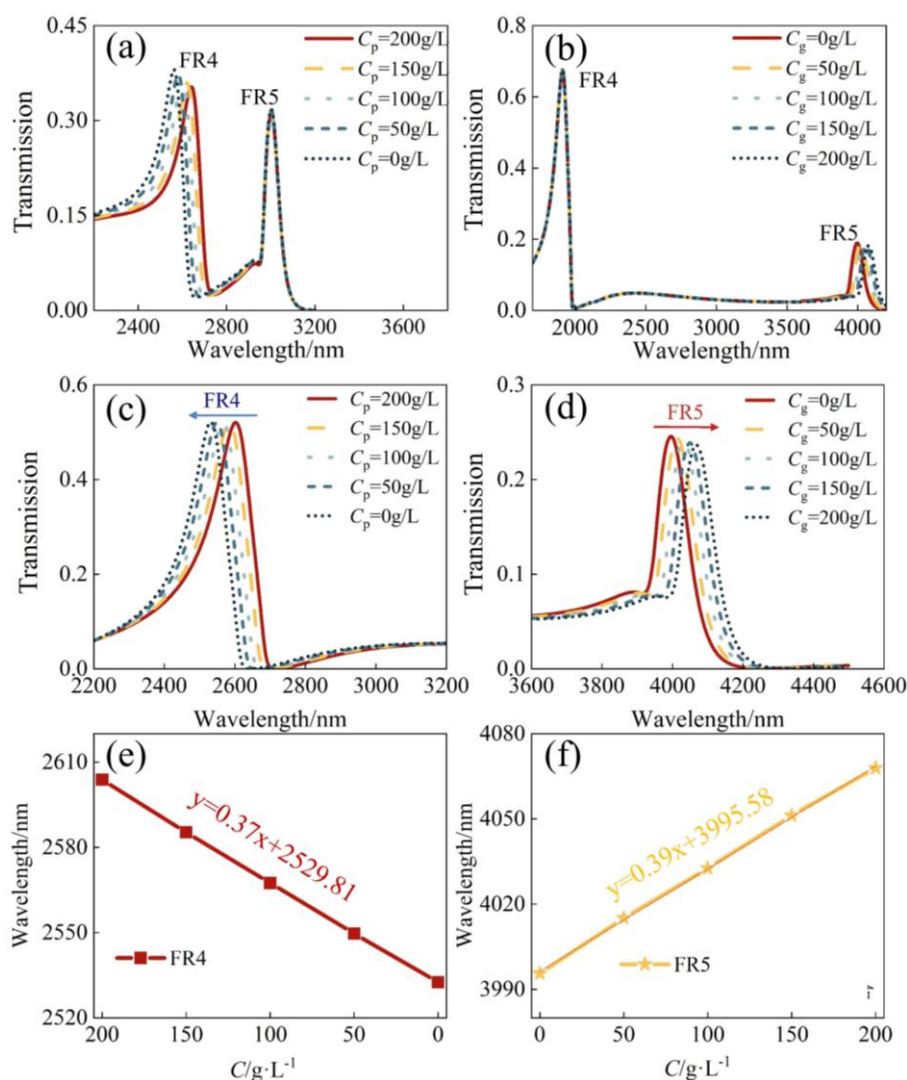


图 9 葡萄糖和甘油溶液单组对照与同步检测的透射光谱(a)仅在 SSR 中填充甘油溶液；(b) 仅在 SRR 中填充葡萄糖溶液；(c)同步检测甘油溶液透射谱；(d)同步检测葡萄糖溶液透射谱；(e)甘油溶液浓度与共振波长 FR4 的关系；(f)葡萄糖浓度与共振波长 FR5 的关系

Fig. 9. Transmission spectra of single-component control and simultaneous detection for glucose and glycerol solutions: (a) Transmission spectra with only SSR filled with glycerol solution; (b) Transmission spectra with only SRR filled with glucose solution; (c) Transmission spectra of glycerol solution; (d) Transmission spectra of glucose solution; (e) Resonance wavelength FR4 correlation for glycerol; (f) Resonance wavelength FR5 correlation for glucose.

4 应用前景与挑战

尽管上述结果表明该结构在折射率传感和生物检测方面具有良好性能，但在加工极限，液相吸收，选择性填充以及材料稳定性方面仍具挑战。在加工极

限方面，目前主流电子束光刻的量产精度为 10nm-20nm^[30]，15nm 的耦合距离已接近量产极限，因此，可适当增大耦合距离以降低加工难度，采用金-银合金或者金膜来代替纯银，在保证传感性能的同时提升薄膜的连续性和稳定性^[31]。在液相检测方面，通过在腔体内部引入纳米凸起等局域场增强结构，放大 Fano 共振局域电场，补偿水体吸收带来的信号损耗^[32]。为实现片上集成器件多谐振腔选择性填充，于器件顶层键合 PDMS 微流控芯片^[33]，设计两条物理隔离、互不连通的独立微流道，分别对准 SRR、SSR 谐振腔并配备独立进样口。检测时采用两台微量注射泵分别通入葡萄糖、甘油溶液，依靠微坝阻隔流体，完成各腔室分区填充。在材料稳定性方面，由于银作为金属材料，在空气中极易氧化和硫化，长期稳定性不足。为抑制银的氧化硫化，可采用超薄 SiO₂钝化层^[34]进行物理隔离，其厚度非常薄，对局域等离激元场的干扰可忽略。综上，本文的研究内容为后续实验研究提供理论参考。

5 结 论

本文提出一种基于 SRR、SSR 和 SSSR 的多腔耦合 MIM 波导结构，采用有限元数值模拟方法系统探究了该 MIM 波导结构的光场传输特性。通过构建三种不同几何构型谐振腔的非对称耦合结构，成功在中红外波段激发出五重 Fano 共振效应，并依托各结构对应的主控参数，实现了对多共振模式的选择性调控；其中，SSSR 半径对 FR2 的调谐出现先蓝移后红移的非单调行为，揭示了腔间耦合强度变化与腔体本征频率之间的竞争机制。结果表明，得益于多重可调 Fano 共振的独特光学特性，该器件具备优异的折射率传感性能，其传感灵敏度最高可达 3277.47 nm/RIU，FOM 可达 135.23 RIU⁻¹，Q 值可达 143.25。此外，利用

各 Fano 共振峰对腔体环境介质变化的差异化响应特性，该结构可有效实现葡萄糖与甘油的同步浓度检测，对应的检测灵敏度分别为 $0.39 \text{ nm}\cdot\text{L/g}$ 与 $0.37 \text{ nm}\cdot\text{L/g}$ 。该多腔耦合 MIM 波导结构利用多重 Fano 共振调控特性为后续高性能、多参量、多功能集成传感实验研究提供了理论参考。

参考文献

- [1] Fano U 1961 *Phys. Rev.* **124** 1866
- [2] Li M J, Fang H, Li X M, Yuan X C 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 057302-1
(in Chinese) [李梦君, 方晖, 李小明, 袁小聪 2016 物理学报 **65** 057302-1]
- [3] Hong Y, Fu Z G, Chen Z W Y, Chi F, Wang Z, Zhang W, Zhang P 2025 *Phys. Rev. B* **111** 155423
- [4] Vargiamidis V, Fessatidis V, Horing N J, Sawamura M 2010 *Physica E* **42** 1107
- [5] Peng Z X, Li B X, Deng C S 2025 *Opt. Laser Technol.* **181** 111617
- [6] Mohamed Z E A, Elshahat S, Abd-Elnaiem A M, Almokhtar M 2023 *Opt. Quantum Electron.* **55** 943
- [7] Chen Z, Ma X X, Li T, Wang Y L 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 080701 (in Chinese) [陈召, 马昕新, 李童, 王艺霖 2024 物理学报 **73** 080701]
- [8] Zhang Y, Zong C, Guo J X, Zhang H, Chen J 2025 *Acta Opt. Sin.* **45** 0926001-1 (in Chinese) [张炎, 宗诚, 郭憬璇, 张昊, 谌静 2025 光学学报 **45** 0926001-1]
- [9] Jha S K, Varshney G, Kumar R 2024 *IEEE Trans. Nanotechnol.* **23** 352

- [10] Qi Y P, Jia Y J, Zhang T, Ding J H, Wei J W, Wang X X 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 178101 (in Chinese) [祁云平, 贾迎君, 张婷, 丁京徽, 尉净雯, 王向贤 2022 物理学报 **71** 178101]
- [11] Pooretemad S, Pav M, Ghattan Kashani Z, Granpayeh N 2023 *Appl. Opt.* **62** 4123
- [12] Qi J, Chen Z, Chen J, Li Y, Qiang W, Xu J, Sun Q 2014 *Opt. Express* **22** 14688
- [13] Zhu J, Li N 2020 *Opt. Express* **28** 19978
- [14] Li Y, Huang J, Chen F 2023 *Plasmonics* **18** 1825
- [15] Rakhshani M R 2019 *Opt. Quantum Electron.* **51** 287
- [16] Chen F, Zhang H, Sun L, Li J, Yu C 2019 *Opt. Laser Technol.* **116** 293
- [17] Rakhshani M R 2019 *J. Opt. Soc. Am. B* **36** 2834
- [18] Liu X, Li J, Chen J, Rohimah S, Tian H, Wang J 2021 *Opt. Express* **29** 20829
- [19] Liu Y, Tian H, Zhang X, Wang M, Hao Y 2022 *Appl. Opt.* **61** 10548
- [20] Zhang J, Chen T, Chen H, Wang X, Yang H, Qi Y, Tang C, Yu J 2023 *Phys. Scr.* **98** 075519
- [21] Chen F, Yang W X 2023 *J. Opt. Soc. Am. B* **40** 736
- [22] Ren Y, Sun Y, Qu D, Li C 2024 *Appl. Opt.* **63** 5324
- [23] Ren Y, Qin F, Qu D, Sun Y, Li C 2025 *Opt. Commun.* **583** 131798
- [24] Vial A, Grimault A S, Macías D, Barchiesi D, De La Chapelle M L 2005 *Phys. Rev. B* **71** 085416

- [25] Zhang Z, Luo L, Xue C, Zhang W, Yan S 2016 *Sensors* **16** 642
- [26] Fang Y, Wen K, Qin Y, Li Z, Wu B 2019 *Opt. Commun.* **452** 12
- [27] Jiang L Y, Yi Y T, Yi Z, Yang H, Li Z Y, Su J, Zhou Z G, Chen X F, Yi Y G 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 128101 (in Chinese) [蒋黎英, 易颖婷, 易早, 杨华, 李治友, 苏炬, 周自刚, 陈喜芳, 易有根 2021 物理学报 **70** 128101]
- [28] Xu D, Yan S, Yang X, Su H, Wu X, Hua E 2020 *IEEE Sensors J.* **21** 4442
- [29] Sun Y, Qu D, Ren Y, Li C 2024 *Physica E* **161** 115971
- [30] Cui Z 2009 *Micro-Nano Fabrication Technology and Its Applications* (2nd ed.) (Beijing: Higher Education Press) p358 (in Chinese) [崔铮 2009 微纳米加工技术及其应用 (第二版) (北京: 高等教育出版社) 第 358 页]
- [31] Zhang Z, Liu J, Lu D F, Qi Z M 2014 *Acta Phys.-Chim. Sin.* **30** 1771 (in Chinese) [张喆, 刘杰, 逯丹凤, 祁志美 2014 物理化学学报 **30** 1771]
- [32] Huang D C, Wang J, Ding Q X, Xu B Z, Wang X, Yang K 2023 *ACS Appl. Nano Mater.* **6** 16856
- [33] Cai H, Liu L, Fu Y, Liu L, Miao G, Zeng X, Cui W, Zhao S, Qiu X and Zhang L 2025 *IEEE Sens. J* **25** 24165
- [34] Zhang X, Zhu Y, Yang X, Wang S, Shen J, Lin B, Li C 2013 *Nanoscale* **5** 3359

Study on Multi-Cavity Coupled Waveguide Tunable Quintuple Fano Resonance and Sensing Characteristics

Xiaolei Zhang^{1) 2)} Xueqing He^{1) 2) 3)†}

1)(Department of Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi, 030619, China)

2)(Institute of Computational and Applied Physics, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi, 030619, China)

3)(Shanxi Key Laboratory for Intelligent Optimization Computing and Blockchain Technology, Taiyuan Normal University, Jinzhong, Shanxi 030619, China)

Abstract

Fano resonance, originating from destructive and constructive interference between discrete states and a continuum, exhibits unique asymmetric line shapes, ultra-narrow spectral linewidths, and high sensitivity to the refractive index of the surrounding medium, thus showing great potential in high-performance sensors and optical switches. However, achieving selectivity tuning of multiple Fano resonances in a single device remains a key challenge in this field. Here, we propose an asymmetric multi-cavity coupled metal-insulator-metal (MIM) waveguide structure composed of a bus waveguide coupled with a square ring resonator (SRR), a semi-ring resonator (SSR), and a split semi-ring resonator (SSSR). The transmission characteristics of the structure are systematically investigated using the finite-element

method. Five Fano resonance peaks are excited in the mid-infrared region (1000–3500 nm) via near-field coupling interference between the discrete states supported by the individual resonators and the continuum provided by the bus waveguide. And relying on the main control parameters corresponding to each structure, selective regulation of multiple resonance modes has been achieved. Among them, the tuning of FR2 by the SSSR radius shows a non-monotonic behavior of first blue shift and then red shift, revealing the competition mechanism between the variation of inter-cavity coupling strength and the intrinsic frequency of the cavity. In sensing applications, the structure achieves a maximum refractive index sensitivity of 3277.474 nm/RIU, a FOM of 135.23 RIU⁻¹ and a Q value of 143.25, which is competitive among reported MIM waveguide structures with multiple Fano resonances. Moreover, exploiting the differential responses of distinct resonance peaks to refractive index variations in different cavities, simultaneous detection of glucose and glycerol solutions is demonstrated in a single device, with concentration sensitivities of 0.39 nm·L/g and 0.37 nm·L/g, respectively. This multi-cavity coupled MIM waveguide structure utilizes the resonance regulation characteristics of multiple Fano to provide a theoretical reference for subsequent high-performance, multi-parameter, and multi-functional integrated sensing experimental research.

Keywords: Fano resonance, tunable, biosensing, sensitivity, figure of merit

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11805141), Project supported by the Shanxi Provincial Research Foundation for Basic Research, China (Grant No. 202203021222250、202303021211185).

† Corresponding author. E-mail: hexq_1988@163.com

录用稿件，非最终出版稿