

引用本文: 单义婷, 赵丽娟, 张智娟, 等. MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器[J]. 光通信技术, 2024, 48(1): 34–38.

MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器

单义婷¹, 赵丽娟^{1,2,3*}, 张智娟¹, 黄梓朦¹

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 华北电力大学 河北省电力物联网技术重点实验室, 河北 保定 071003;
3. 华北电力大学 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 为了进一步提高光学折射率传感器灵敏度, 设计了一种金属-介质-金属(MIM)波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器。首先, 理论分析了该传感结构的原理及关键性能指标; 然后, 使用有限元分析仿真软件构建了仿真结构, 研究其传感性能。仿真结果表明: 当 $a=540$ nm、 $b=340$ nm、 $g=10$ nm、 $l=70$ nm 时, 所设计的传感器的灵敏度可以达到 1 323 nm/RIU, 对应的品质因数可以达到 16。

关键词: 表面等离子体激元; 金属-介质-金属波导; 折射率传感器; 灵敏度; 有限元法

中图分类号: TN253; O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2024)01-0034-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2024.01.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Refractive index sensor with MIM waveguide structure coupled elliptical octagonal resonant cavity

SHAN Yiting¹, ZHAO Lijuan^{1,2,3*}, ZHANG Zhijuan¹, HUANG Zimeng¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Power Internet of Things Technology, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China;

3. Baoding Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Optical Communication Technology,
North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: In order to improve the sensitivity of optical index sensor, a metal-medium-metal (MIM) waveguide coupled elliptical eight shape cavity is designed. Firstly, the principle and key performance index of the sensor structure are analyzed theoretically. Then, the simulation structure is constructed by using finite element analysis simulation software to study its sensing performance. The simulation results show that when $a=540$ nm, $b=340$ nm, $g=10$ nm, $l=70$ nm, the sensitivity of the designed sensor can reach 1 323 nm/RIU, and the corresponding quality factor can reach 16.

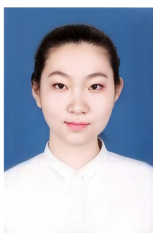
Key words: surface plasmon polaritons, metal-dielectric-metal waveguide, refractive index sensor, sensitivity, finite element method

收稿日期: 2023-11-01。

基金项目: 国家自然科学基金项目(62273146, 62171185)资助; 中央高校基本科研业务费专项资金(2021MS072)资助; 河北省自然科学基金项目(E2019S02177, E2020S02010)资助; 河北省省级科技计划(SZX-2020034)资助。

作者简介: 单义婷(1997—), 女, 辽宁鞍山人, 硕士研究生, 现就读于华北电力大学电子与通信工程学院信息与通信工程专业, 研究方向为光通信与光纤传感技术, 主要从事基于表面等离子体共振的光学传感器的研究与仿真验证工作, 曾获得华北电力大学二等学业奖学金 2 次, 三等学业奖学金 1 次。

* **通信作者:** 赵丽娟(1981—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为光纤通信与传感技术。



0 引言

表面等离子体激元(SPPs)是一种横磁极化电磁波, 由入射光子与金属表面的自由电子相互作用产生, 并沿着金属-介质界面传播。在亚波长尺度的 SPPs 产生于金属表面, 随着沿反应界面垂直距离的增加, 强度呈指数衰减, 能够克服衍射极限^[1-3]。而基于表面等离子体的金属-介质-金属(MIM)波导具有良好的亚波长约束、合适的传播长度、易于集成等优点^[4-7], 在光学传感领域拥有广阔的应用前景, 引起了研究者的关注。2018 年, WANG L 等人^[8]设计了一种 MIM 波导耦合 T 形谐振腔的折射率传感器, 该传感器灵敏度和对应的品质因数(FOM)较低, 分别仅为 680 nm/RIU、

8.68;同年,QIAO L 等人^[9]提出了由 M 型谐振腔及挡板组成的 MIM 波导结构,其灵敏度为 780 nm/RIU。2020 年,FANG Y 等人^[10]设计了一种多 Fano 共振 MIM 波导耦合谐振腔折射率传感器,实现了四通道的 Fano 共振曲线,灵敏度达到了 680 nm/RIU 和 1 940 nm/RIU;同年,YANG Q 等人^[11]设计了一种十字形腔 MIM 波导传感系统,通过改变结构参数,增加十字形腔体使该结构的灵敏度分别达到了 1 075 nm/RIU、1 100 nm/RIU。2021 年,广西师范大学的 ZHU J^[12]设计了一种利用 SPPs 和 U 型空腔单向耦合的 MIM 波导结构,实现了 825 nm/RIU 的折射率传感灵敏度,该结构在室温下可以准确地鉴别出 5 种食用植物油;同年,CHEN J 等人^[13]设计了双对称矩形短棒 MIM 共振结构,该结构由圆形裂环谐振腔和双对称矩形短棒波导构成,灵敏度可达 1 180 nm/RIU。2022 年,覃祖彬等人^[14]提出了一种 MIM 波导耦合矩形腔结构,实现了 2 个 Fano 模式的共振峰,灵敏度分别为 700 nm/RIU 和 1 200 nm/RIU。上述研究尽管提供了一些新颖的思路,但灵敏度较差。因此,本文提出一种 MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器,制备工艺简单且能够进一步提高灵敏度。

1 系统结构与工作原理

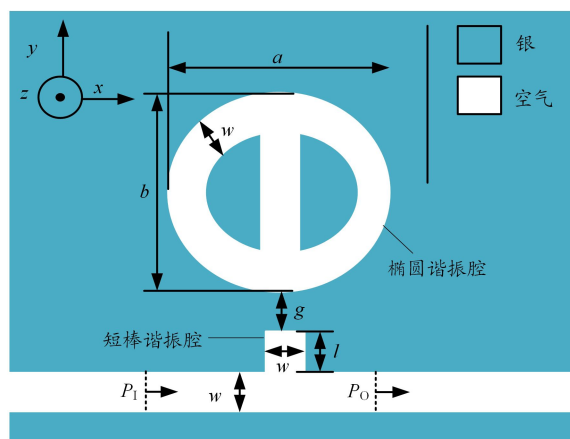
本文设计的 MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器的二维和三维结构图如图 1 所示。其中, a 、 b 分别为椭圆谐振腔的长度和宽度, g 为波导短棒谐振腔与椭圆谐振腔之间的耦合距离, l 为波导短棒谐振腔的高度,波导宽度 $w=50$ nm。该结构建立在二氧化硅基板上。与金相比,银的吸收损耗和欧姆损耗较低,保证了较强的场强,能更好地提高传输性能。因此,本文选择银作为 MIM 波导的金属材料。

本文使用 COMSOL 软件对该结构的模型进行模拟。入射光从输入端口 P_1 进入该结构并激发 SPPs, SPPs 通过主波导传输并耦合到短棒谐振腔和椭圆谐振腔,最后从输出端口 P_0 输出。该系统的透射率 $T=|P_0|^2/|P_1|^2$ 。

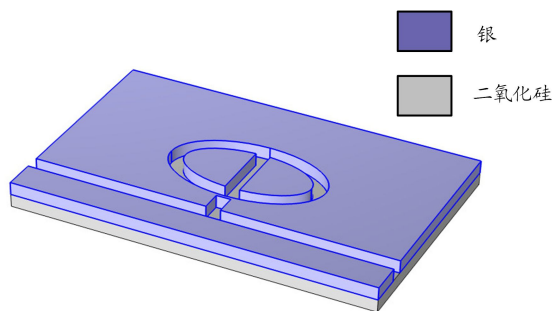
银的介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 由 Drude 色散模型^[15]得到

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

其中,无限频率处的介电常数 $\varepsilon_{\infty}=3.7$,电子碰撞频率 $\gamma=0.018$ eV,等离子体频率 $\omega_p=9.1$ eV, ω 是真空中入射光的角频率。利用此模型计算得到的介电常数在入射



(a) 二维示意图



(b) 三维示意图

图 1 传感器二维和三维结构示意图

光波长为 800~2 000 nm 内与实验值^[16]相近。

MIM 波导中的横磁(TM)模式方程表示为

$$\tanh(kw)=\frac{-2kp\alpha_c}{k+p\alpha_c} \quad (2)$$

其中, k 为波导中的波矢,可以用迭代法计算得到。衰减常数 $\alpha_c=[k_0^2(\varepsilon_m-\varepsilon_m)+k]^2$,金属与介质相互作用的程度 $p=\varepsilon_m/\varepsilon_m$, ε_m 为介电常数, ε_m 为金属介电常数, m 为模式阶数, $m=(1,2,3,\dots)$,由 $m=2L/\lambda_{\text{spp}}$ 计算, L 为谐振腔的有效长度。自由空间中的波矢量 $k_0=2\pi/\lambda_0$ 。有效折射率的实部为 $\text{Re}(n_{\text{eff}})=[\varepsilon_m+(k/k_0)^2]^{1/2}$ 。

当相位匹配条件满足时,结构会发生共振。根据驻波理论,共振波长 λ_r ^[17-18]可表示为

$$\lambda_r=\frac{2L\text{Re}(n_{\text{eff}})}{m-\phi_{\text{ref}}/\pi} \quad (3)$$

其中, ϕ_{ref} 为 SPPs 反射在金属壁上的相移,SPPs 的波长 $\lambda_{\text{spp}}=\lambda_0/\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 。

本文设计的传感器结构的性能需要考虑灵敏度和 FOM 这 2 个关键的评价指标。灵敏度为共振波长的变化量与折射率的变化量之比($\Delta\lambda/\Delta n$),FOM 为灵敏度与半峰全宽(FWHM)之比^[19]。

2 仿真分析与参数优化

本文使用基于全矢量有限元法的 COMSOL 软件分别对传感器的耦合椭圆谐振腔的波导结构、带短棒谐振腔的波导结构和本文结构的传输特性进行仿真分析。初始结构参数设定为: $a=540\text{ nm}$ 、 $b=320\text{ nm}$ 、 $g=10\text{ nm}$ 、 $l=70\text{ nm}$ 。3 种不同结构的透射谱如图 2 所示。可以看出, 本文结构的透射谱线在 $\lambda=1\,062\text{ nm}$ (R_2) 和 $\lambda=1\,309\text{ nm}$ (R_1) 处产生 2 个非对称和尖锐的波谷, 这是因为该结构中宽的连续态和窄的离散态相互干涉形成的 Fano 共振现象^[20-21]。在 $1\,000\sim 1\,700\text{ nm}$ 的入射波长内, 带短棒谐振腔的波导结构具有宽阔连续的曲线形状并且透射率在 $0.6\sim 1.0$ 内变化; 同时, 来自入射端口的 SPPs 直接激励短棒谐振腔, 使该结构可以保持着较高的透射率, 从而形成一个宽的连续态。耦合椭圆谐振腔的波导结构的透射率在接近 R_1 和 R_2 的位置产生了明显的共振波谷现象。椭圆谐振腔的激励是由波导耦合产生的, 这种激励可以看作是一种窄的离散态分布。

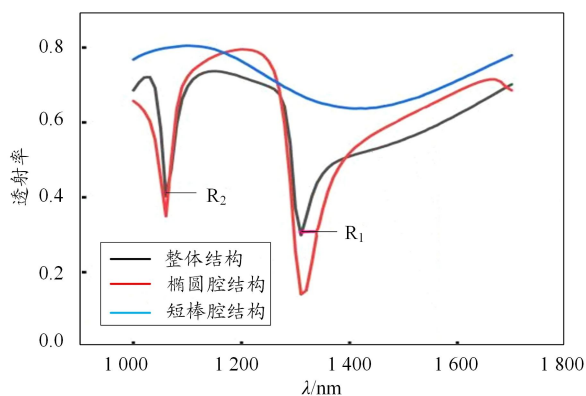


图 2 3 种结构的透射谱图

初始结构的磁场分布图如图 3 所示。可以看出, 波在 R_2 处磁场被分为 3 个部分, 两端的磁场分布同相; 在 R_1 处磁场被分为上下 2 个部分且反相。当入射光波长为 R_2 或 R_1 处对应的波长时, 磁场将集中分布在椭圆谐振腔中, 导致出射口的透射率较低, 说明 R_1 和 R_2 都受到了椭圆谐振腔的影响。但是, 可以通过磁场分布来区分 R_1 与 R_2 。

2.1 a 对传感器性能的影响

设折射率传感器的其它初始结构参数不变, a 在 $520\sim 560\text{ nm}$, 以 10 nm 为间隔变化, 其传输透射谱如图 4 所示。可以看出, 随着 a 的增加, R_1 、 R_2 都有明显的红移现象, 当 $a=540\text{ nm}$ 时传感性能最佳。除此之外, R_2 的透射率有一定的提高, R_1 的透射率没有明显的变化, 这说明 a 对 R_2 的影响更大。图 5 为 R_2 和 R_1 处传感器

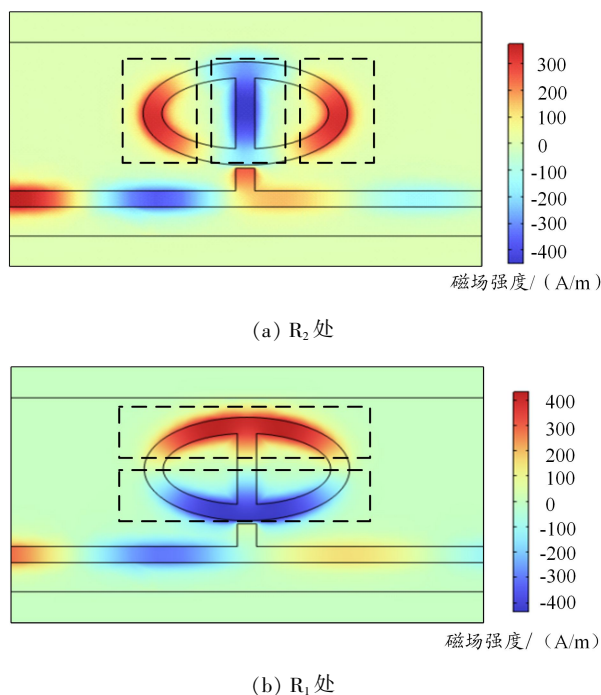


图 3 初始结构的磁场 Hz 分布

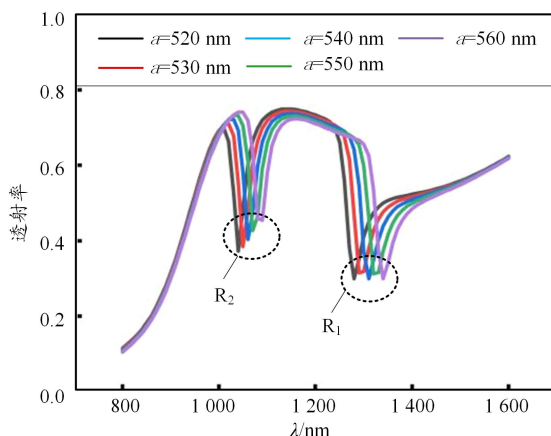
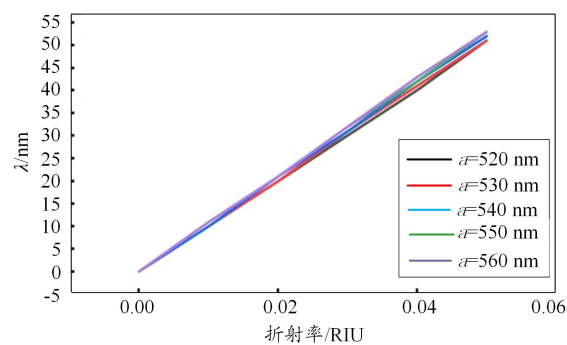
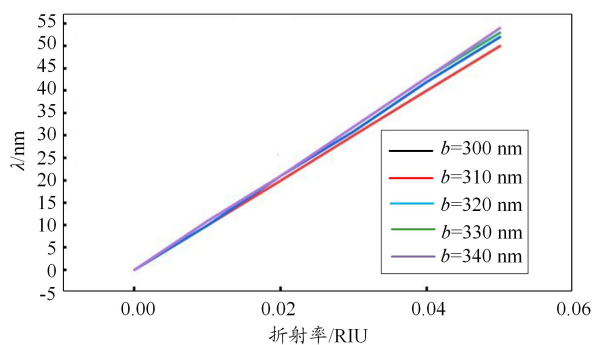
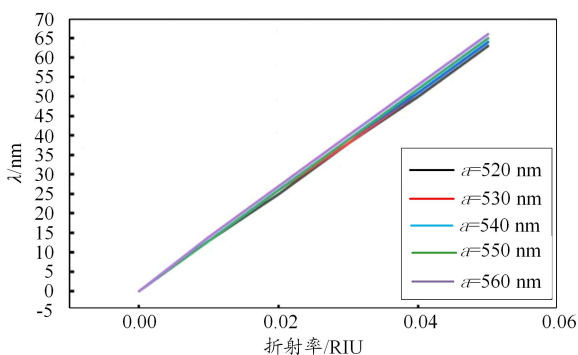
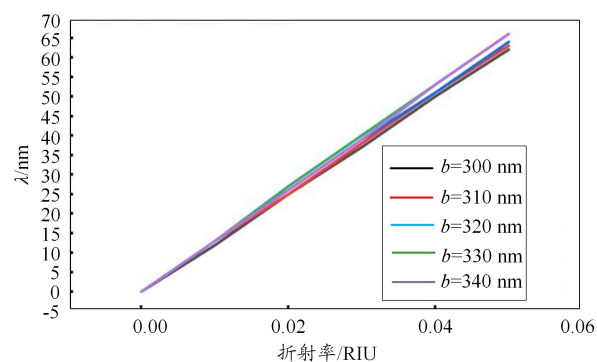
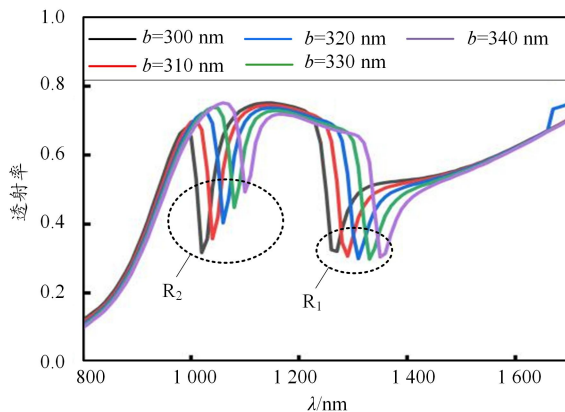
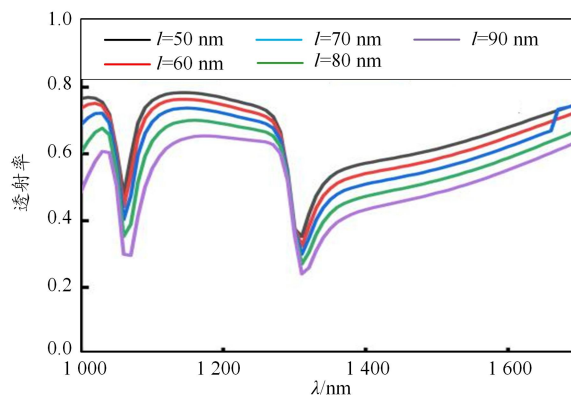


图 4 不同 a 下的传输透射谱

的灵敏度拟合曲线。根据计算可知, 在 R_2 处时, 传感器的最大、最小灵敏度分别为 $1\,063$ 、 $1\,014\text{ nm/RIU}$; 在 R_1 处时, 传感器的最大、最小灵敏度分别为 $1\,314$ 、 $1\,254\text{ nm/RIU}$ 。同时, 随着 a 值不断增大, R_1 处比 R_2 处传感器灵敏度的变化更明显, 因此 R_1 比 R_2 更适合作为传感探测波长。

2.2 b 对传感器性能的影响

设折射率传感器的其它初始结构参数不变, b 在 $300\sim 340\text{ nm}$, 以 10 nm 为间隔变化, 得到的传输透射谱如图 6 所示。可以看出, R_1 和 R_2 都有明显的红移现象, 这是由于谐振腔有效长度的变化所致。此外, 随着 b 值不断增大, R_2 的透射率出现了较大的提高, 而 R_1 变化不大。当 b 值变化时, R_1 、 R_2 处传感器的灵敏度拟合曲线如图 7 所示。根据计算可知, 在 R_2 处时, 传感器

(a) R_2 处(a) R_2 处(b) R_1 处(b) R_1 处图5 a 值变化时, R_2 和 R_1 处传感器的灵敏度拟合曲线图7 b 值变化时, R_2 和 R_1 处传感器的灵敏度拟合曲线图6 不同 b 下的传输透射谱图8 不同 l 下的传输透射谱

的最大、最小灵敏度分别为 1 077、1 000 nm/RIU; 在 R_1 时, 传感器的最大、最小灵敏度分别为 1 323、1 246 nm/RIU。由此可知, R_2 、 R_1 处传感器的灵敏度变化较大, 说明 b 值是本文结构的重要影响参数, 可将其进行调整以满足不同性能需求。当 $b=340$ nm, 在 R_1 处时传感器的灵敏度达到 1 323 nm/RIU, FOM 为 16。

2.3 l 和 g 对传感器性能的影响

设折射率传感器的其它初始结构参数不变, l 在 50~90 nm 变化时, 得到的传输透射谱如图 8 所示。可以看出, 随着 l 增大, 透射率和共振波长发生了微小变

化。通过分析其 FWHM 和灵敏度可知, 随着 l 的增长, 此传感器结构的 2 个性能指标仍变化微小。这说明 l 对该结构的传感性能影响不大。当 $l=70$ nm 时传感性能最佳。

不同 g 时的透射谱和 FWHM 如图 9 所示。可以看出, g 的增大使传输透射谱发生了显著变化, 随着 g 的增大, 透射率急速提高。主要原因是 g 的增大使 SPPs 耦合进入椭圆谐振腔的难度增加, 从而使更多的 SPPs 从出射口输出, 提高了透射率。此外, g 的增大也影响 FWHM, 由于透射率过高会干扰波谷位置的判断, 导致

单义婷, 赵丽娟, 张智娟, 等: MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器

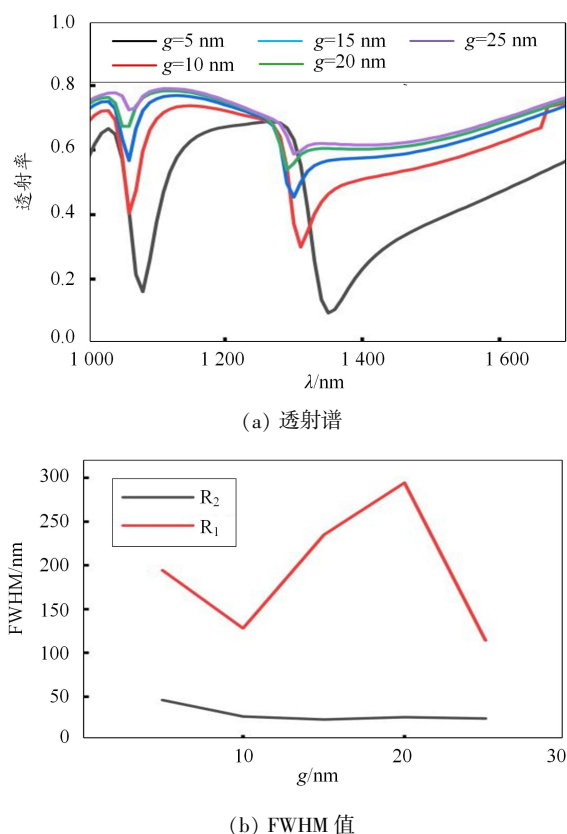


图9 不同 g 下的透射谱和 FWHM 值

传感性能变差;FWHM 值越小 FOM 越大, 传感性能则越好。综合分析可知, 当 $g=10$ nm 时, 此结构的透射率和 FWHM 都较为合适。因此, 本文选择 $g=10$ nm 进行传感。

3 结束语

本文设计了一种 MIM 波导结构耦合椭圆八字形谐振腔的折射率传感器。首先介绍系统原理, 然后使用 COMSOL 软件对 3 种结构的传感器进行仿真分析并优化重要参数。仿真结果表明: 当 $a=540$ nm、 $b=340$ nm、 $g=10$ nm、 $l=70$ nm 时, 传感器性能最佳, 灵敏度达到了 1 323 nm/RIU, FOM 为 16。与近年报道的其它传感结构相比, 本文设计的折射率传感器灵敏度高、性能良好、尺寸小且易集成, 其谐振腔中所需填充的待测溶液体积较小, 具有制造简易的优势, 在未来的高密度集成光电路方向有广阔的应用前景。

参考文献:

[1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon sub-wavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(52): 824–830.
[2] GRAMOTNEV D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83–91.

[3] YIN Y, QIU T, LI J, et al. Plasmonic nano-lasers[J]. Nano Energy, 2012, 1(1): 25–41.
[4] PITARKE J M, SILKIN V M, CHULKOV E V, et al. Theory of surface plasmons and surface-plasmon polaritons[J]. Reports on Progress in Physics, 2007, 70(1): 1–87.
[5] EBBESEN T W, GENET C, BOZHEVOLNYI S I. Surface-plasmon circuitry[J]. Physics Today, 2008, 61(5): 44–50.
[6] KAZANSKIY N L, KHONINA S N, BUTT M A. Plasmonic sensors based on metal-insulator-metal waveguides for refractive index sensing applications: a brief review [J]. Physica E-Low-Dimensional Systems & Nanostructures, 2020, 117: 113798–1–113798–10.
[7] FUKUDA M, OKAHISA S, TONOOKA Y, et al. Feasibility of plasmonic Circuits in Nanophotonics[J]. IEEE Access, 2020, 8: 142495–142506.
[8] WANG L, ZENG Y P, WANG Z Y, et al. A refractive index sensor based on an analogy T shaped metal-insulator-metal waveguide [J]. Optik, 2018, 172: 1199–1204.
[9] QIAO L, ZHANG G, WANG Z, et al. Study on the fano resonance of coupling M-type cavity based on surface plasmon polaritons [J]. Optics Communications, 2019, 433: 144–149.
[10] FANG Y, WEN K, LI Z, et al. Plasmonic refractive index sensor with multi-channel Fano resonances based on MIM waveguides [J]. Modern Physics Letters B, 2020, 34(16): 2050173–1–2050173–10.
[11] YANG Q, LIU X, GUO F, et al. Multiple Fano resonance in MIM waveguide system with cross-shaped cavity [J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2020, 220: 165163–1–165163–7.
[12] ZHU J, WU C. Optical refractive index sensor with Fano resonance based on original MIM waveguide structure [J]. Results in Physics, 2021, 21: 103858–1–103858–8.
[13] CHEN J, LI J, LIU X, et al. Fano resonance in a MIM waveguide with double symmetric rectangular stubs and its sensing characteristics[J]. Optics Communications, 2021, 482(1): 126563–126569.
[14] 覃祖彬, 肖功利, 周嗣童, 等. MIM 波导内嵌金属板结构 Fano 共振传感特性[J]. 半导体光电, 2023, 44(1): 76–80.
[15] LU H, LIU X, MAO D, et al. Induced transparency in nanoscale plasmonic resonator systems[J]. Optics Letters, 2011, 36(16): 3233–3235.
[16] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals [J]. Physical Review, 1972, 6(12): 4370–43799.
[17] CHEN L, LIU Y, YU Z, et al. Numerical analysis of a near-infrared plasmonic refractive index sensor with high figure of merit based on a fillet cavity[J]. Optics Express, 2016, 24(9): 9975–9983.
[18] ZHU J H, WANG Q J, SHUM P, et al. A simple nanometric plasmonic narrow-band filter structure based on metal-insulator-metal waveguide [J]. Nanotechnology IEEE Transactions on Nanotechnology, 2011, 10(6): 1371–1376.
[19] MAYER K M, HAFNER J H. Localized surface plasmon resonance sensors[J]. Chemical Reviews, 2011, 111(6): 3828–3857.
[20] MIROSHNICHENKO A E, FLACH S, KIVSHAR Y S. Fano resonances in nanoscale structures [J]. Reviews of Modern Physics, 2010, 82(3): 2257–2298.
[21] 孔翔鸿. 基于超材料的边界模式和 Fano 共振现象研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.