

引用本文:段佳毅,沈三民. 基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构的传感特性[J]. 光通信技术,2025,49(3):53-58.

基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构的传感特性

段佳毅, 沈三民 *

(中北大学 仪器与电子学院, 太原 030051)

摘要:为提高表面等离子激元(SPPs)波导的传感性能,提出了一种基于双挡板金属-电介质-金属(MDM)波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构。通过仿真分析,研究了矩形环长度 L_1 、矩形腔长度 l_1 、矩形腔中心移动距离 l_3 及耦合距离 g 等几何参数对传输透射谱的影响,并优化了各参数以获得最佳传感性能。仿真结果表明,在 $L_1=600$ nm, $l_1=260$ nm, $l_3=20$ nm, $g=14$ nm 时,该结构的 4 个 Fano 共振峰(FR)的折射率传感灵敏度分别为 1 623、1 223、2 740、2 486 nm/RIU,其中 FR₃ 和 FR₄ 表现出更高的灵敏度。

关键词:表面等离子激元;金属-电介质-金属波导;矩形环;矩形腔;Fano 共振

中图分类号:TN253;O436 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)03-0053-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.03.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Sensing characteristics of a rectangular ring structure based on dual-shield MDM waveguide sidewall coupling with a rectangular cavity

DUAN Jiayi, SHEN Sanmin*

(School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To enhance the sensing performance of surface plasmon polaritons (SPPs) waveguides, a rectangular ring structure based on dual-shield metal-dielectric-metal (MDM) waveguide sidewall coupling with a rectangular cavity is proposed. Through simulation analysis, the effects of geometric parameters such as the rectangular ring length L_1 , rectangular cavity length l_1 , the central displacement distance l_3 of the rectangular cavity, and the coupling distance g on the transmission spectrum were investigated, and the parameters are optimized to achieve optimal sensing performance. The simulation results indicate that when $L_1=600$ nm, $l_1=260$ nm, $l_3=20$ nm, and $g=14$ nm, the refractive index sensing sensitivities of the four Fano resonance (FR) peaks of this structure are 1 623 nm/RIU, 1 223 nm/RIU, 2 740 nm/RIU, and 2 486 nm/RIU, respectively, with FR₃ and FR₄ exhibiting higher sensitivity.

Key words: surface plasmon polaritons, metal-dielectric-metal waveguide, rectangular ring, rectangular cavity, Fano resonance

0 引言

表面等离子激元(SPPs)是金属表面上自由电子与入射光子相互作用产生的电子集体振荡现象,具有突破衍射极限的能力^[1-3]。金属-电介质-金属(MDM)波导对

收稿日期:2024-04-08。

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFB2009103)资助。

作者简介:段佳毅(1997—),女,硕士研究生,现就读于中北大学仪器与电子学院仪器仪表工程专业,研究方向为表面等离子激元技术及其在光学传感中的应用,主要从事基于表面等离子激元传感器的研究与仿真验证工作。

* **通信作者:**沈三民(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电子电路设计和光传感技术。



SPPs 有较强的束缚能力,可实现对亚波长结构中光的有效控制,为器件的小型化和集成化提供了可能^[4-5]。法诺(Fano)共振^[6-7]源于连续态与离散态的干涉效应,其透射谱线呈现尖锐且不对称的特征,对环境折射率变化具有高灵敏度,因此在传感^[8-9]、光开关^[10]及滤波^[11-12]等光学器件中展现出重要应用价值。

近年来,通过在 MDM 波导中引入谐振腔以激发 Fano 共振的研究备受关注。CHENG L 等人^[13]设计了侧向耦合 3 类谐振腔的 MDM 波导结构,实现了 5 个可独立调谐的 Fano 共振峰,其灵敏度达 1 900 nm/RIU。ZHAO B 等人^[14]提出双侧耦合环形谐振腔结构,优化后两腔的折射率灵敏度分别提升至 2 427 nm/RIU 和

段佳毅,沈三民: 基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构的传感特性

2 432 nm/RIU。刘加堂等人^[15]则开发了单挡板侧耦合圆形谐振腔结构,分析了双 Fano 共振峰的生成机制,并在最优参数下分别获得 800、1 400 nm/RIU 的折射率灵敏度。然而,现有结构的灵敏度仍存在提升空间。为此,本文提出一种基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构(下文简称为谐振腔),旨在进一步优化波导的传感特性。

1 模型的建立与理论分析

1.1 结构模型的建立

本文所提出的基于双挡板的 MDM 波导侧耦合谐振腔结构的二维示意图如图 1 所示。其中,紫色区域为电介质,填充材料为空气,相对介电常数 $\varepsilon_d=1$;灰色区域为金属银,其相对介电常数 $\varepsilon_a(\omega)$ 随光波频率变化,采用 Drude 模型^[16]计算表达式为

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

其中, $\varepsilon(\infty)$ 为入射波频率趋于无限大时银的相对介电常数, $\varepsilon(\infty)=3.7$; ω_p 为等离子振荡频率, $\omega_p=1.38 \times 10^{16}$ rad/s; γ 为自由电子碰撞频率, $\gamma=2.73 \times 10^{13}$ rad/s; ω 为入射光波角频率。

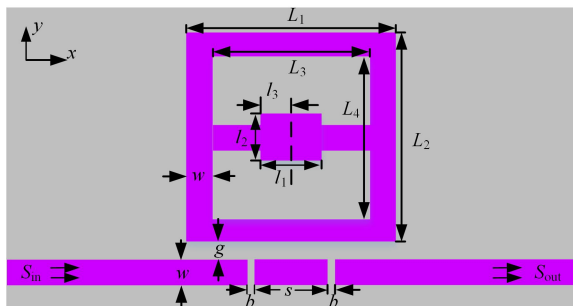


图 1 基于双挡板的 MDM 波导侧耦合谐振腔结构的二维示意图

为确保只有横磁波(TM₀)模式能够传播,本文将波导谐振腔结构宽度固定为 $w=50$ nm,并设置银挡板厚度 $b=10$ nm,长度 $s=100$ nm;矩形环外长 $L_1=600$ nm,内长 $L_3=500$ nm,外宽 $L_2=700$ nm,内宽 $L_4=600$ nm;矩形腔长 $l_1=200$ nm,宽 $l_2=100$ nm; l_3 表示矩形腔中心移动的距离。双挡板 MDM 波导和谐振腔结构的耦合距离 $g=12$ nm。2 个端口分别位于双挡板波导的两端, S_{in} 为输入端口, P_{in} 为入射光功率; S_{out} 为输出端口, P_{out} 为出射光功率,透射率通过公式 $T=P_{out}/P_{in}$ 计算。

1.2 理论分析

当入射光以 TM 模式传播时,在金属-介质交界处会激发出 SPPs。此时, SPPs 分为两部分,当相位匹配条

件满足时,结构发生共振。一部分能量进入谐振腔形成稳定的驻波场,另一部分沿波导向右传播。TM 模式可以用式(2)表示为

$$\tanh(k\omega) = \frac{-2kb_1 \sqrt{k_0^2 b_2 + k^2}}{k^2 + b_1^2 (k_0^2 b_2 + k^2)} \quad (2)$$

其中, k 为波导中的波矢, b_1 为介质介电常数与金属介电常数之比, b_2 为介质介电常数与金属介电常数之差, k_0 为自由空间波矢量($k_0=2\pi/\lambda$)。

谐振腔的有效长度和共振波长的关系^[17]为

$$\lambda = \frac{2\text{Re}(n_{\text{eff}})L_{\text{eff}}}{m - \varphi/\pi} \quad (3)$$

其中, n_{eff} 为谐振腔的有效折射率; $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为 n_{eff} 的实部, $\text{Re}(n_{\text{eff}}) = \sqrt{\varepsilon_m + (k/k_0)^2}$; ε_m 为金属介电常, m 为驻波的波数, $m=2L_{\text{eff}}/\lambda$; φ 为 SPPs 发生反射时引起的相位变化^[18]。

本文根据后续应用需求,确定波长范围为 1 200~2 900 nm,并分析了无挡板结构的 MDM 波导侧耦合谐振腔结构的传输透射谱曲线,发现在波长分别为 1 265、1 639、2 324、2 643 nm 处出现了 4 个透射率不同的极小值,这些极小值形成了离散态。这是由于谐振腔与 MDM 直波导发生耦合,在特定频率下(MDM 直波导频率与谐振腔内频率相等时),共振现象导致透射率急剧下降,从而形成谐振谷,使传输透射谱整体呈现离散态。

本文通过将 2 个厚度为 10 nm 的金属挡板与 MDM 波导组合实现双挡板 MDM 结构。具体传输过程如下: SPPs 在波导中传播,到达左侧第一块金属挡板边界时,部分能量被反射,剩余能量基于隧穿效应透过金属挡板继续向右传播;到达第二块金属挡板时,仅有少量能量能够穿过 2 块金属挡板到达另一端口。2 块金属挡板对波导中入射的 SPPs 能量起到了有效的反射作用,从而使传输透射谱表现为较宽的连续态,其透射率在整个波长范围内接近于零。

本文还将双挡板 MDM 结构波导与谐振腔结构进行侧耦合(完整结构)。在这种情况下,离散态与连续态叠加并发生干涉现象,在相应位置上产生了 4 个 Fano 共振峰。具体传输过程为: SPPs 在双挡板 MDM 波导中传播时,部分能量直接与谐振腔发生耦合,而剩余能量继续向前传播。当能量到达第一块金属挡板时,大部分能量被反射,仅有一小部分穿过挡板继续向右传播;反射的能量仍会与谐振腔耦合,其余部分则返回入射端口。到达第二块金属挡板时,传输过程

类似。这一过程使得更多 SPPs 能量耦合进入谐振腔内,在波长为 1 200~2 900 nm 时相位发生变化,最终形成 4 个 Fano 共振峰。为了便于描述,本文将这 4 个共振峰从左到右依次标记为 FR₁、FR₂、FR₃ 和 FR₄,如图 2 所示。

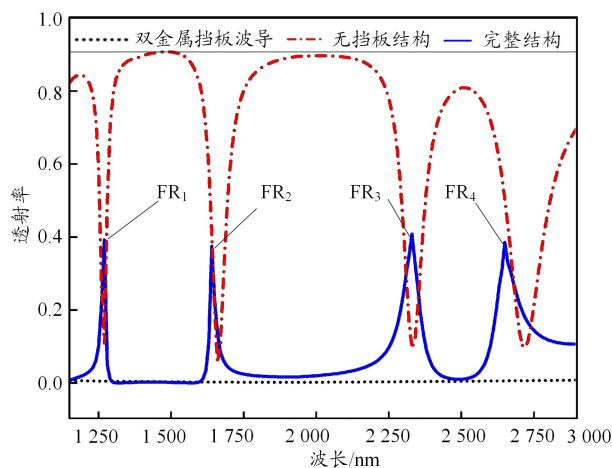


图 2 3 种不同结构的传输透射谱图

图 3 为 FR₁~FR₄ 对应的磁场强度分布图。从图 3(a) 可以看出,能量被分为左、中、右三部分,两侧能量同相,中间部分也与两侧同相,节点数为 6。而在图 3(c) 中,能量被分为上、中、下三部分,上下能量同相,节点数为 4。对于图 3(b),能量主要集中在矩形腔的 4 个角,且矩形腔内部几乎没有能量分布。这是由于矩形腔处于矩形环波节的位置所导致的,节点数为 4。至于图 3(d),能量主要分布在谐振腔的两侧,矩形腔内几乎无能量分布,节点数为 3。这表明,矩形腔对 FR₂ 和 FR₄ 的激发并无显著影响。

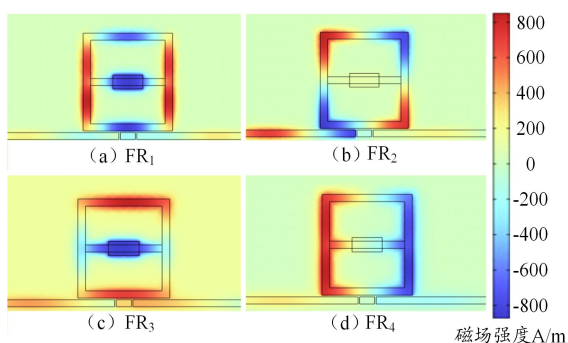


图 3 FR₁~FR₄ 所对应的磁场强度分布图

2 结构几何参数对传感特性的影响

2.1 折射率传感器特性指标

折射率传感器的性能通常用灵敏度 S 和品质因子(FOM)衡量。灵敏度 S 的计算公式为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (4)$$

其中, $\Delta\lambda$ 表示介质折射率改变引起中心波长的变化量, Δn 表示介质折射率的变化量。

M_{FOM} 表示单位折射率变化引起的透射率相对变化量,计算公式为

$$M_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T\Delta n} = \frac{(T(\omega, n) - T(\omega, n_0))}{T(\omega, n_0)\Delta n} \quad (5)$$

其中, $T(\omega, n_0)$ 为透射率的初始值, $T(\omega, n)$ 为外界环境变化后的折射率, T 为透射率变化的初始值, ΔT 为由折射率改变引起的透射率变化值。FOM 越大,传感性能越好^[19]。

2.2 参数化扫描分析

2.2.1 矩形环长度 L_1 的影响

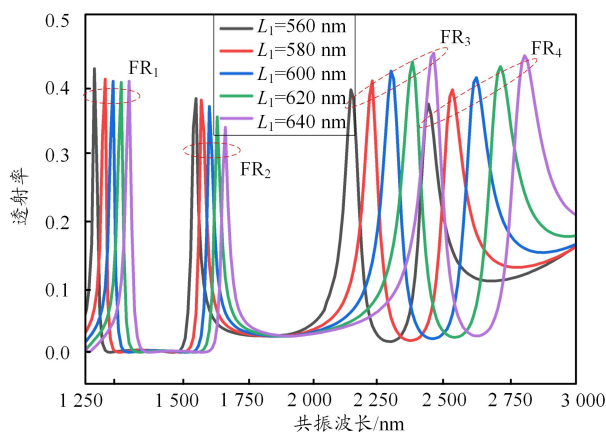
本文通过引入谐振腔,使相位发生急剧变化,从而在特定位置产生尖锐且不对称的 Fano 共振峰。根据式(3)可知,有效谐振腔长度与共振波长之间存在线性关系,因此谐振腔的几何参数变化会对共振峰的位置和透射率大小产生影响。通过调整结构参数,可以优化传感器性能,获得最佳结果。具体而言,在 $L_2=700$ nm, $l_1=200$ nm, $l_2=100$ nm, $g=12$ nm 的条件下,对 L_1 进行参数化扫描, L_1 以步长 20 nm 从 560 nm 变化到 640 nm,得到传输透射谱如图 4(a) 所示。可以看出, FR₁~FR₄ 均表现出不同程度的红移现象,其中 FR₃ 和 FR₄ 的红移最为显著。这一现象的原因在于,随着 L_1 的增加, L_{eff} 逐渐增大,导致 FR₁~FR₄ 整体红移;同时,随着谐振腔节点数的降低,共振峰的峰值红移更为明显。基于此特性,可通过调节 L_1 实现对整体特性的控制。

经过计算, FR₁~FR₄ 的波长红移量 $\Delta\lambda$ 与长度增量 ΔL_1 的比值分别为 1.53、1.44、3.76 和 4.51。本文进一步对结构的 FOM 进行计算,并绘制结果如图 4(b) 所示。可以看出, FR₁ 和 FR₄ 的 FOM 值随着矩形环宽度的增加而减小; FR₂ 在 L_1 为 600 nm 时出现峰值; FR₃ 的 FOM 值在整体过程中有增有减,但总体呈增加趋势。综合分析各项指标后,本文选取 $L_1=600$ nm 作为最优值。

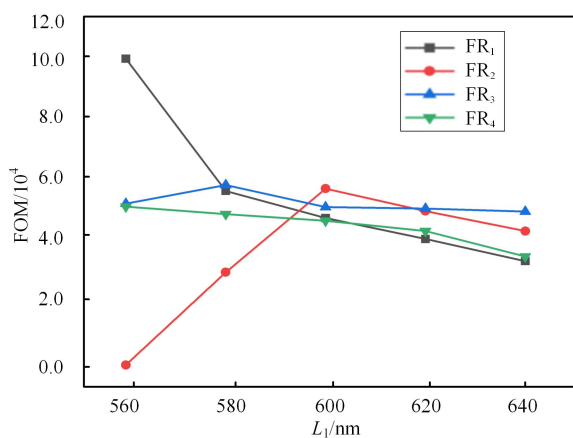
2.2.2 矩形腔长度 l_1 的影响

本文在其它结构参数保持不变的情况下,对 l_1 进行了参数化扫描, l_1 以步长 20 nm 从 200 nm 增加到 280 nm,得到的传输透射谱如图 5(a) 所示。可以看出,随着 l_1 的增大, FR₁ 和 FR₃ 共振峰的位置几乎保持不变,而 FR₂ 的共振峰出现完全重合现象; FR₄ 的共振峰

段佳毅, 沈三民: 基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构的传感特性



(a) 不同 L_1 产生的透射谱线



(b) $FR_1 \sim FR_4$ 的 FOM 值随 L_1 的变化规律

图 4 L_1 对传输透射谱线和 FOM 的影响

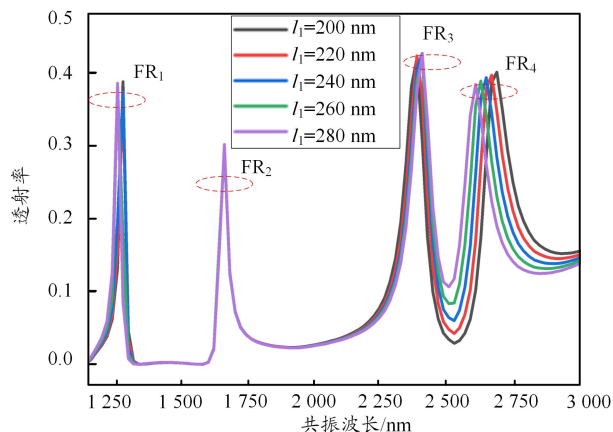
则表现出蓝移现象,其波长红移量 $\Delta\lambda$ 与长度增量 ΔL_1 的比值为 1.42。这表明,矩形腔长度的变化对 FR_1 、 FR_2 和 FR_3 的影响较小。

进一步分析可知,矩形腔位于矩形环内部的连接通道上,当矩形环长度增加时,仅会使连接通道加粗。结合图 3 中磁场强度分布图的分析结果可以看出,大部分能量仍然集中于矩形腔中心,未发生显著改变,因此调整 l_1 并不能有效增加 L_{eff} 。而对于 FR_4 而言,随着 l_1 的增大,有效折射率逐渐减小,导致 L_{eff} 减少,从而引发蓝移现象。基于此特性,可以通过调节 l_1 来单独控制 FR_4 共振峰实现调谐。

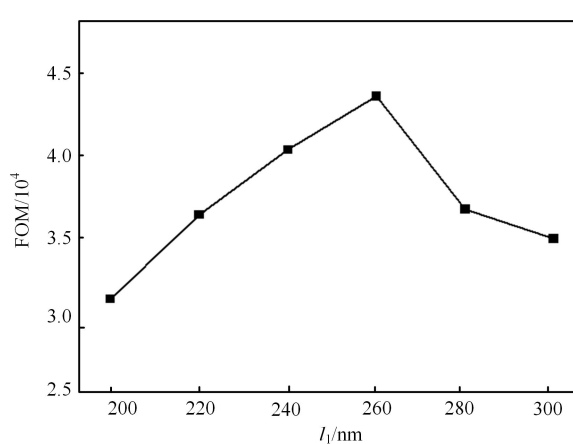
由于 $FR_1 \sim FR_3$ 的中心波长位置几乎不发生变化,本文仅对 FR_4 共振峰的 FOM 进行了计算,并绘制结果如图 5(b)所示。可以看出, FR_4 的 FOM 值呈现先单调递增后递减的趋势,在 $l_1=260$ nm 处取得最大值。综合分析后,本文选取 $l_1=260$ nm 作为最优值。

2.2.3 矩形腔中心移动距离 l_3 的影响

本文对 L_1 和 l_1 进行参数化扫描后,进一步探讨结



(a) 不同 l_1 产生的透射谱线

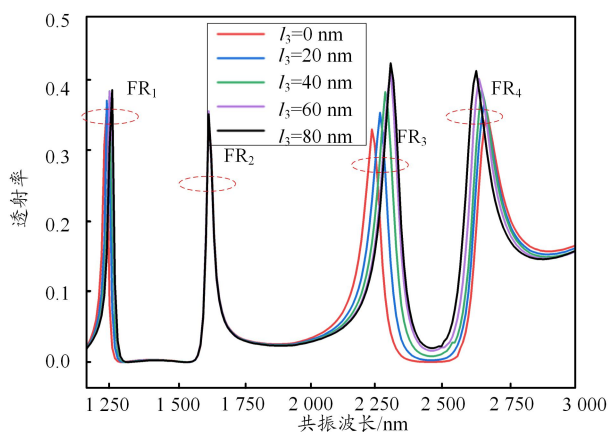
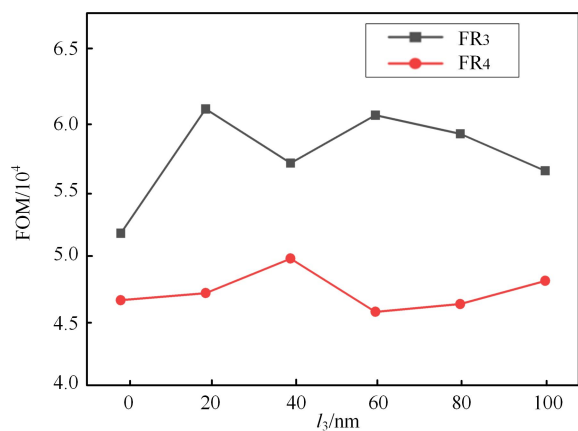


(b) FR_4 的 FOM 值随 l_1 的变化规律

图 5 l_1 对传输透射谱线和 FOM 的影响

构不对称性的影响。在保持其它结构参数不变的情况下,将矩形腔中心位置设定为 0,并对 l_3 进行参数化扫描, l_3 分别向左右两侧以步长为 20 nm 从 -100 nm 变化到 100 nm,得到的传输透射谱如图 6(a)所示。可以看出,随着 l_3 的改变, $FR_1 \sim FR_4$ 在左右移动相同距离时,传输透射谱线完全重叠。例如,当矩形腔向左移动 100 nm 和向右移动 100 nm 时,其传输透射谱完全一致。为避免冗余,本文仅分析矩形腔向右侧移动所对应的传输透射谱。结果显示, FR_1 仅发生轻微蓝移, FR_2 的中心波长保持不变; FR_3 和 FR_4 分别发生红移和蓝移,波长红移量 $\Delta\lambda$ 与移动增量 Δl_3 的比值分别为 1.25 和 0.575。

结合图 3 中磁场强度分布图进行分析可知, FR_1 的矩形腔位于连接通道上, l_3 的改变无法使 L_{eff} 发生显著变化,因此 FR_1 仅出现轻微蓝移。 FR_2 的矩形腔内无能量分布且处于波节位置,这使得 l_3 的改变对磁场分布无明显影响,导致 FR_2 的中心波长保持不变。对于 FR_3 而言,由于矩形腔的特殊结构,大部分能量固定于矩形腔内,随着 l_3 的改变,能量随矩形腔位置移动,从

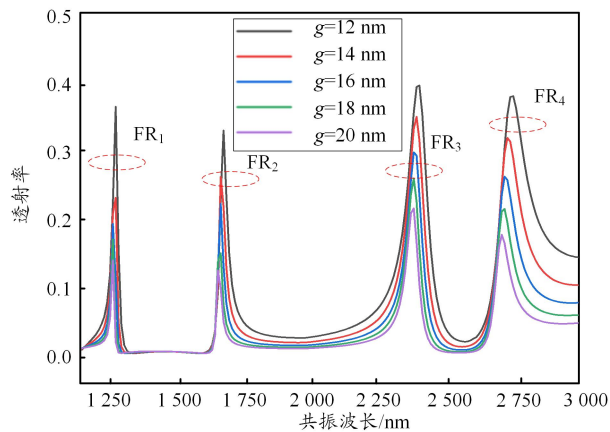
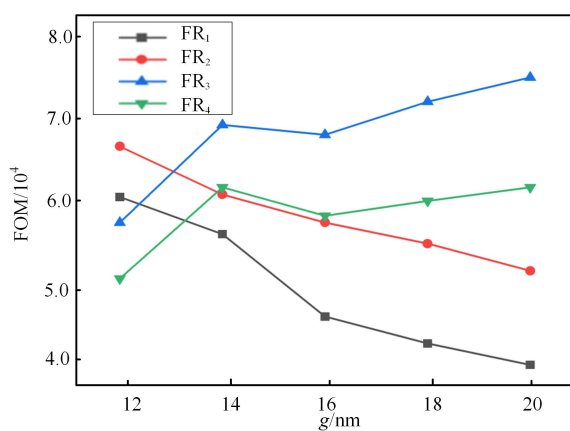
(a) 不同 l_3 产生的透射谱线(b) FR_3 和 FR_4 的 FOM 值随 l_3 的变化规律图 6 l_3 对传输透射谱线和 FOM 的影响

而导致 L_{eff} 增加,最终引发红移现象。而 FR_4 的磁场分布图显示矩形腔内无能量分布,随着 l_3 的改变,能量分布发生变化且有效折射率降低,导致 L_{eff} 减小,进而产生蓝移。

根据对 l_1 参数的分析,通过调节 l_3 可同时实现 FR_3 和 FR_4 的共振频率调谐;而通过调整 l_1 ,可独立调谐 FR_4 的共振特性。为优化器件性能,本文计算了 FR_3 和 FR_4 的 FOM,结果如图 6(b)所示。可以看出,当 l_3 设定为 20 nm 时, FR_3 的 FOM 达到最大值,因此本文选取 $l_3=20$ nm 作为最优解。

2.2.4 耦合距离 g 的影响

本文研究了 g 对双挡板 MDM 波导与谐振腔之间耦合的影响。在设定折射率传感器的其它结构参数保持不变的情况下,改变 g ,使其以步长 2 nm 从 12 nm 变化到 20 nm,得到的传输透射谱如图 7(a)所示。可以看出,随着 g 的增加, $FR_1 \sim FR_4$ 的透射率均显著减小,而共振峰的中心波长位置几乎保持不变,但出现不同程度的蓝移现象。这表明,随着 g 的增大,波导与谐振腔之间的共振强度减弱,从而可以通过调节 g 实

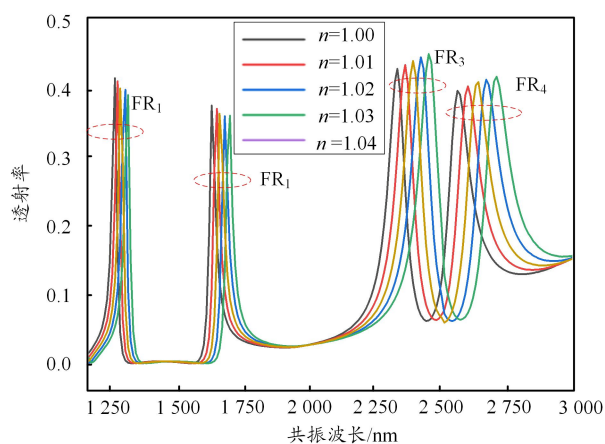
(a) 不同 g 产生的透射谱线(b) $FR_1 \sim FR_4$ 的 FOM 值随 g 的变化规律图 7 g 对传输透射谱线和 FOM 的影响

现对整体结构特性的控制。为进一步优化性能,本文对结构的 FOM 进行了计算,结果如图 7(b)所示。可以看出,当 g 增大时, FR_1 和 FR_2 的 FOM 不断下降;而 FR_3 和 FR_4 的 FOM 整体呈增大趋势。综合分析各项指标后,本文选取 $g=14$ nm 作为最优值,以实现整体结构性能的最佳平衡。

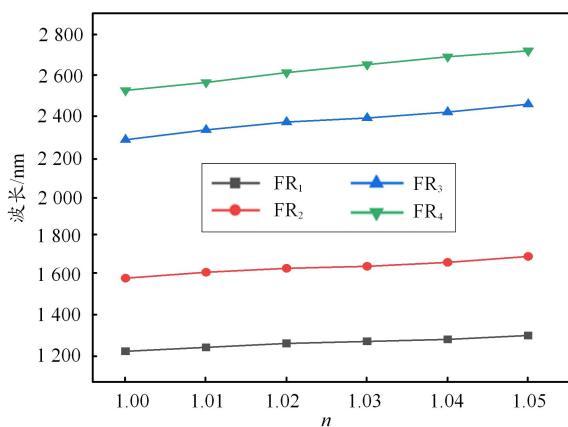
3 传感灵敏度分析

本文通过对结构参数的全面参数化扫描及综合分析,得到了各参数的最优值。在 $L_1=600$ nm, $L_2=700$ nm, $l_1=260$ nm, $l_2=100$ nm, $l_3=20$ nm, $g=14$ nm 的条件下,研究了双挡板 MDM 波导和谐振腔内填充物介质折射率 n 对传输透射谱的影响。其中, n 以步长 0.01 从 1.00 变化到 1.04,得到的传输透射谱线如图 8(a)所示。可以看出,随着介质折射率 n 的增大, $FR_1 \sim FR_4$ 均表现出不同程度的红移现象。这是由于 n 的增加导致有效折射率增大,从而引起 L_{eff} 的增加,最终使 Fano 共振峰表现为红移。从图 8(b)可以看出, $FR_1 \sim FR_4$ 的共振波长均呈现随折射率 n 值增加而显著红移的趋势。为量化评

段佳毅, 沈三民: 基于双挡板 MDM 波导侧耦合含矩形腔的矩形环结构的传感特性



(a) 不同 n 产生的透射谱线



(b) n 与共振波长的关系

图 8 n 对传输透射谱线和共振波长的影响

估折射率传感性能, 本文通过线性回归方法计算各拟合曲线斜率, 得到 $FR_1 \sim FR_4$ 的灵敏度参数分别为 1 623、1 223、2 740、2 486 nm/RIU。这表明, 在所研究的结构中, FR_3 和 FR_4 具有更高的折射率传感灵敏度, 展现出优异的传感性能。

4 结束语

本文设计了一种基于双挡板的 MDM 波导侧耦合谐振腔结构, 通过仿真分析 MDM 波导与谐振腔之间的耦合过程, 揭示了 4 个共振峰的产生机理。同时, 本文分别研究了 L_1 、 l_1 、 l_3 和 g 对传输透射谱的影响, 并通过计算 FOM 确定了各参数的最优值。综合分析结果表明, 在以下几何参数条件下: $L_1=600$ nm, $L_2=700$ nm, $l_1=260$ nm, $l_2=100$ nm, $l_3=20$ nm, $g=14$ nm, 该结构的传感性能达到最佳状态, 4 个共振峰的折射率传感灵敏度分别为 1 623、1 223、2 740、2 486 nm/RIU。

本文的研究成果为设计集成化、多通道折射率传感器提供了重要的理论参考和技术支持, 具有潜在的应用价值。

参考文献:

- [1] GRAMOTNEV D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83–91.
- [2] FU H, LI S, WANG Y, et al. Independently tunable ultrasharp double fano resonances in coupled plasmonic resonator system [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1–1.
- [3] 王强, 陈泳竹. 表面等离子体激元的原理与应用 [J]. 材料研究与应用, 2024, 18(1): 81–94.
- [4] CHEN F, ZHANG H F, SUN L H, et al. Temperature tunable Fano resonance based on ring resonator side coupled with a MIM waveguide [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 116: 293–299.
- [5] 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 and Nanostructures, 2020, 117: 113798–113798.
- [6] AKRAM M J, GHAFOR F, KHAN M M, et al. Control of Fano resonances and slow light using Bose-Einstein condensates in a nanocavity [J]. Physical Review A, 2017, 95(2): 023810–1–023810–10.
- [7] 娄小伟, 崔锦江, 董宁宁, 等. 基于眼型谐振腔的 Fano 谐振曲线尖锐度的分析 [J]. 光子学报, 2015, 44(1): 64–69.
- [8] CHENG L, WANG Z, HE X, et al. Plasmonic nanosensor based on multiple independently tunable Fano resonances [J]. Beilstein Journal of Nanotechnology, 2019, 10(1): 2527–2537.
- [9] ZHAO B, CHEN C, LIU H, et al. Narrow-spectrum enhanced multiparameter gas sensor based on Fano resonance in an asymmetric MDM waveguide [J]. Optics & Laser Technology, 2022, 150: 107941–1–107941–5.
- [10] SUSHMITA, PAUL, MINA R, et al. Simultaneous switching at multiple wavelengths using plasmon induced transparency and Fano resonance [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(9): 739–742.
- [11] LAN S, RODRIGUES S P, TAGHINEJAD M, et al. Dark plasmonic modes in diatomic gratings for plasmoelectronics [J]. Laser & Photonics Reviews, 2017, 11(2): 1600312–1–1600312–23.
- [12] 张兴娇, 曾礼丽, 文如泉, 等. 基于表面等离子体激元的多通道滤波器设计 [J]. 量子电子学报, 2023, 40(6): 983–991.
- [13] CHENG L, WANG Z, HE X, et al. Plasmonic nanosensor based on independently tunable multiple Fano resonances [J]. 2019, 10(1): 2527–2537.
- [14] ZHAO B, LIU H, ZHANG X, et al. High-Sensitive multi-gas detection based on MDM waveguide with symmetric dual side-coupled ring-resonators [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 18: 20841–20849.
- [15] 刘加堂, 李石磊, 齐雅楠, 等. 基于单挡板的 MDM 波导侧向耦合谐振腔的 Fano 共振及传感特性 [J]. 光子学报, 2023, 52(10): 177–187.
- [16] SMITH N V. Classical generalization of the drude formula for the optical conductivity [J]. Physical Review B, 2001, 64(15): 155106–1–155106–6.
- [17] 曹景刚. 基于 MDM 波导表面等离激元的 Fano 共振传感特性研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [18] ZHANG Z D, MA L J, GAO F, et al. Plasmonically induced reflection in metal-insulator-metal waveguides with two silver baffles coupled square ring resonator [J]. Chinese Physics B, 2017, 26(12): 124212–1–124212–6.
- [19] 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, 2020.