

引用格式: LIU Jiatang, LI Shilei, QI Yanan, et al. Fano Resonance and Sensing Characteristics of MDM Waveguide Lateral Coupled Resonator Based on Single Baffle[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052415

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): 1052415

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

刘加堂,李石磊,齐雅楠,陈帅

(山东理工大学 物理与光电工程学院, 淄博 255049)

摘 要:基于表面等离激元提出了一种含金属挡板的波导侧向耦合谐振腔系统。当入射光从波导的入射端进入到该结构时,谐振腔会形成较窄的离散带,金属挡板会产生较宽的连续态,较窄的离散态与较宽的连续态发生干涉时,形成两种不同模式的Fano共振谱线。采用时域有限差分法对该结构的传输特性进行了仿真计算,分别研究了结构的磁场分布、电场分布、透射特性和传感性能,根据磁场分布图和电场分布图可更好地解释Fano共振的形成机理。仿真数据分析结果表明,几何参数与介质折射率可以调节结构的传输性能。最后对结构的几何参数进行了优化处理,得到了在最优参数下,该结构产生的两个Fano共振的品质因数分别为 4.502×10^5 和 1.967×10^5 ,对应的灵敏度分别为800 nm/RIU和1400 nm/RIU,均达到了较高的数值,具有良好的传感性能。所设计的耦合结构可为提高微纳光学传感器的性能提供一种可行的途径。

关键词:表面等离激元;金属-介质-金属波导;Fano共振;品质因数;灵敏度

中图分类号:O436

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052415

0 引言

当入射光子照射到金属与介质的交界面时,在交界面处入射光子会和金属表面的自由电子发生相互作用,从而形成表面等离激元^[1](Surface Plasmon Polaritons, SPPs),表面等离激元具有克服衍射极限的能力,对电磁场能量具有局域增强效应,由此可以在亚波长尺度下实现对光的操作,使器件的小型化和集成化成为现实^[2-4]。

近年来,研究人员提出了各种各样的波导器件,其中金属-介质-金属(Metal-Dielectric-Metal, MDM)波导^[5-6]器件是应用最为广泛的一种,研究人员基于SPPs设计出了多种MDM的波导器件,如传感器^[7-8]、全光开关^[9]、滤波器^[10-11]、慢光设备^[12-16]。

由较窄的离散态与较宽的连续态相互耦合形成的Fano共振^[17]越来越受到人们的关注。CAO Tun等利用相变超材料在低功率下实现快速调谐双Fano共振^[18],提出了不对称等离子体纳米结构中的Fano共振——亚10 nm对映体的分离^[19],并且利用Fano增强的可见光区手性力对手性纳米颗粒进行横向分选^[20]。CHEN Jianfeng等提出了基于分环腔耦合MIM波导中多Fano共振的折射率传感^[21]。Fano共振谱是尖锐且不对称的共振谱线,对结构几何参数和介质折射率非常敏感^[22]。因此,研究人员将表面等离激元与Fano共振相结合,设计出了许多高灵敏度的折射率传感器,例如2018年塞尔维亚Novi Sad大学的研究人员JANKOVIC N等基于等腰三角形谐振腔提出了创新设计,使系统产生四重Fano共振效应^[23],最终得到该结构的最大品质因数(Figure of Merit, FOM)值达到 3.2×10^5 。张燕君等提出了含金属单挡板的直波导耦合

基金项目:国家自然科学基金(No. 12104261),山东省自然科学基金(No. ZR2020QA070)

第一作者:刘加堂,1508145535@qq.com

通讯作者:李石磊,lishilei@sdut.edu.cn

收稿日期:2023-07-07;录用日期:2023-09-13

<http://www.photon.ac.cn>

类云朵腔的结构^[24],得到该结构在第一种模式下的FOM值为 5.08×10^4 ,第二种模式下的FOM值为 3.56×10^5 ,第三种模式下的FOM值为 1.17×10^3 ,其对应的灵敏度分别为600 nm/RIU, 800 nm/RIU, 1 083 nm/RIU。赵亚萍等设计了含金属挡板的直波导耦合半圆环谐振空腔结构^[25],得到该结构在第一种模式下的FOM值为 3.05×10^5 ,灵敏度为800 nm/RIU,在第二种模式下的FOM值为 4.59×10^5 ,灵敏度为1 160 nm/RIU。张颖秋等设计了含双挡板直波导耦合一个侧边谐振腔的结构^[26],得到该结构的FOM值为 1.29×10^4 ,最大灵敏度为1 333.5 nm/RIU。尤鑫晨等设计了含金属挡板的直波导耦合H型谐振腔的结构^[27],最终得到该结构第一个Fano共振峰对应的灵敏度为750 nm/RIU,第二个Fano共振峰对应的灵敏度为1 360 nm/RIU。陈颖等提出了亚波长介质光栅/MDM波导/周期性光子晶体中双重Fano共振的形成及演变规律分析^[28],在最优条件下,共振A区(Fano Resonance a, FRa)和共振B区(Fano Resonance b, FRb)的FOM值可达460.0和 4.00×10^4 ,共振B区FRa和FRb的FOM值可达到269.2和 2.22×10^4 。LIU Feng等设计了一种基于内置椭圆环形腔的温度纳米传感器^[29],其FOM值最大为58.7,灵敏度最高为2 220 nm/RIU。祁云平等设计了基于Fano共振的金属—绝缘体—金属—石墨烯纳米管混合结构动态可调折射率传感器^[30],在最佳结构参数下,该系统的灵敏度可达1 250 nm/RIU,品质因数为42.4。

本文提出了基于单挡板的MDM波导侧向耦合谐振腔结构,通过时域有限差分法(Finite Difference Time-domain, FDTD)对该结构进行了数据仿真,具体研究了结构几何参数与介质折射率对结构的灵敏度和品质因数的影响。

1 模型构造与理论分析

1.1 模型构造

图1所示为本文提出的结构模型,含金属单挡板的MDM直波导侧向耦合谐振腔结构。其中金属挡板厚度设为 $t=25$ nm,为了确保只有横磁(TM)模在波导中传播,把波导宽度设为 $w=50$ nm, g 为谐振腔与直波导的耦合距离, R 为谐振腔圆的半径, a 为谐振腔内银(Ag)正方形的边长, k 为Ag正方形的拆分距离,整个结构对金属挡板的中线呈对称结构, R 、 a 、 k 、 g 的初始值分别设为 $R=300$ nm、 $a=190$ nm、 $k=10$ nm、 $g=15$ nm。图1中的灰色区域为Ag金属,其介电常数由JOHNSON P B的实验数据提供^[31],白色区域填充空气介质,其中空气介质的相对介电常数 $\epsilon_d=1$ 。

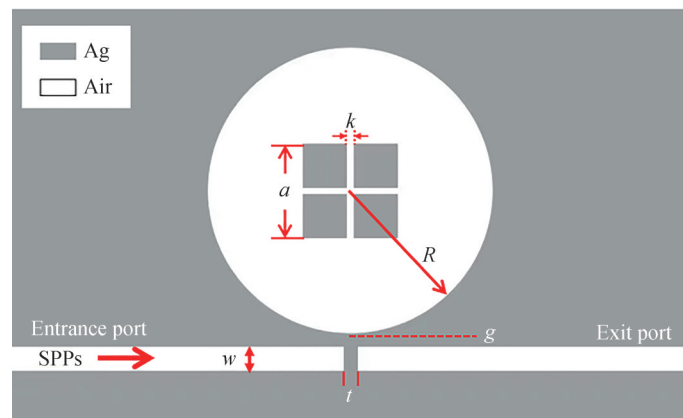


图1 本文提出的结构模型
Fig. 1 The proposed structural model

1.2 理论分析

通过解二维圆形腔中的亥姆霍兹(Helmholtz)方程,可以得到圆形腔的共振条件关系式为^[32-33]

$$\frac{k_d J_n'(k_d R)}{\epsilon_d J_n(k_d R)} = \frac{k_m H_n^{(1)'}(k_m R)}{\epsilon_m H_n^{(1)}(k_m R)} \quad (1)$$

式中, $k_d = k_0 \sqrt{\epsilon_d}$ 和 $k_m = k_0 \sqrt{\epsilon_m}$ 分别为圆形介质腔和金属中的波矢大小, R 为圆形腔的半径; ϵ_d 为介质的相对介电常数, ϵ_m 为金属的相对介电常数; J_n 和 J_n' 分别为 n 阶第一类Bessel函数及其导数; $H_n^{(1)}$ 和 $H_n^{(1)'}$ 分别为 n 阶

第一类 Hankel 函数及其导数。当 SPPs 波耦合进入到谐振腔中并在谐振腔内发生共振时,谐振腔内的能量就会得到显著的增强。

利用多模干涉耦合模理论(Multimode Interference Coupled Mode Theory, MICMT)可以解释该耦合系统所形成的 Fano 共振^[34]。MICMT 方程为

$$\frac{da_n}{dt} = \left(-j\omega_n - \frac{1}{\tau_{n0}} - \frac{1}{\tau_{n1}} - \frac{1}{\tau_{n2}} \right) a_n + \kappa_{n1} s_{n,1+} + \kappa_{n2} s_{n,2+} \quad (2)$$

$$s_{1-} = -s_{1+} + \sum_n \kappa_{n1}^* a_n, \quad \kappa_{n1} = \sqrt{\frac{2}{\tau_{n1}}} e^{j\theta_{n1}} \quad (3)$$

$$s_{2-} = -s_{2+} + \sum_n \kappa_{n2}^* a_n, \quad \kappa_{n2} = \sqrt{\frac{2}{\tau_{n2}}} e^{j(\theta_{n2} - \phi_n)} \quad (4)$$

式中, a_n 和 ω_n 分别为第 n 个模式的场振幅和共振频率; τ_{n0} 为谐振腔中第 n 个共振模式的内损耗衰减时间; τ_{n1} 和 τ_{n2} 分别表示波导与谐振腔中第 n 个共振模式之间的耦合衰减时间; κ_{n1} 和 κ_{n2} 分别表示波导与谐振腔中第 n 个共振模式的耦合系数; θ_{n1} 和 θ_{n2} 分别为谐振腔中第 n 个共振模式与波导 S_1 和 S_2 相耦合时的耦合相位; ϕ_n 为谐振腔中第 n 个共振模式在输出端的相位与输入端的相位之间的差值; $s_{i\pm}$ 为每个波导中的场振幅 ($i = 1, 2$, 从谐振腔中输出为(-)或输入为(+)); $s_{n,1+}$ 和 $s_{n,2+}$ 为每个波导中第 n 个模式的场振幅 ($i = 1, 2$, 从谐振腔中输出为(-)或输入为(+))。对于对称系统来说, $\tau_{n1} = \tau_{n2} = \tau_{n0}$ 。根据 MICMT 方程, 当 $s_{2+} = 0$ 时, 从波导 S_1 传输到波导 S_2 的复振幅透射系数可以表示为

$$t = \frac{s_{2-}}{s_{1+}} = \sum_n \frac{2e^{j\varphi_n}}{-j(\omega - \omega_n)\tau_n + 2 + \frac{\tau_n}{\tau_{n0}}} \quad (5)$$

则等离子体系统的相应的透射率为 $T = |t|^2$ 。

对图 1 所示结构通过 FDTD 软件数据仿真作出的透射谱线如图 2 所示, 其图 2(a) 中蓝色虚线为只有金属挡板、无侧向耦合谐振腔时所形成的透射率谱线, 此时谱线呈现较低的透射率, 这是由于引入金属挡板后大部分 SPPs 波被反射回来, 从而导致透射率较低, 此时形成的谱线是一个较宽的连续态谱线。红色实线为只有侧向耦合谐振腔、无金属挡板时所形成的透射率谱线, 此时会在 $\lambda = 741 \text{ nm}$ 、 $\lambda = 782 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 1416 \text{ nm}$ 处形成三个共振波谷, 但在 $\lambda = 741 \text{ nm}$ 处共振波谷的透射率仍然较大, 所以与连续态相互干涉时此波长处并未形成 Fano 共振, 因此, 本文所指的 Fano 共振仅是指 $\lambda = 782 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 1416 \text{ nm}$ 处的共振波谷参与干涉形成的 Fano 共振, 这时形成的谱线可以看作是在 $\lambda = 782 \text{ nm}$ 与 $\lambda = 1416 \text{ nm}$ 处形成两个较窄的离散态谱线。对于既含有金属挡板又含侧向耦合谐振腔所形成的透射率谱线如图 2(b) 所示, 此时谱线为金属挡板所产生

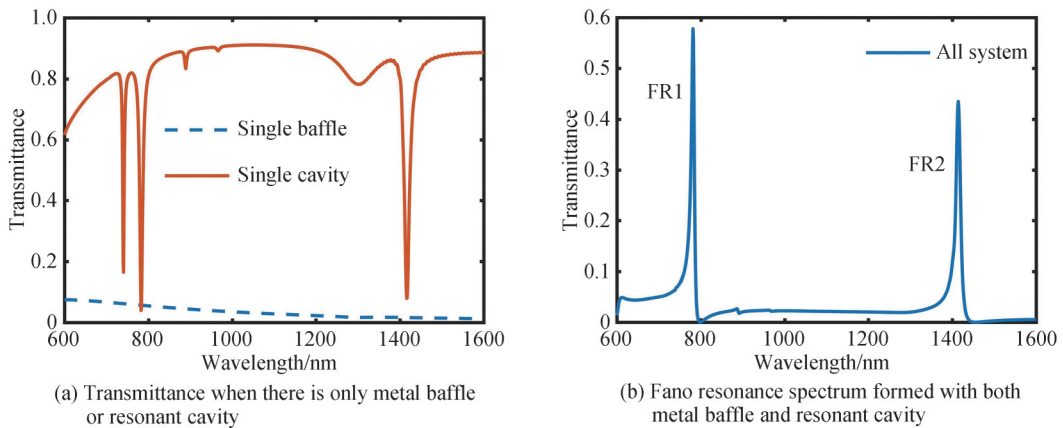


图 2 Fano 共振的形成过程

Fig. 2 Fano resonance formation process

的较宽连续态与谐振腔所产生的两个较窄离散态相互干涉产生的两个尖锐非对称的 Fano 共振峰,其 Fano 共振峰对应的波长分别为 $\lambda=781$ nm 和 $\lambda=1414$ nm,两个共振峰分别记为 FR1 和 FR2。

为了更好地解释 Fano 共振的形成机理,图 3 作出了共振峰及共振谷的磁场分布,图 3(a)、(c) 表示 $\lambda=781$ nm 和 $\lambda=1414$ nm 时 Fano 共振峰的磁场分布,这时的波长符合式(1)所表达的共振波长条件,大部分 SPPs 波会从入射波导耦合进谐振腔中,并在谐振腔内发生共振,因此大部分能量会聚集在谐振腔内,谐振腔中的能量得到显著提高。极少部分 SPPs 波会穿过金属挡板进入出射波导。当谐振腔内的共振能量再通过近场耦合到出射波导中时,会和穿过金属挡板的 SPPs 波因相位相同而发生干涉相长,因此会在波导出射端口测得较高的透射率,从而形成 Fano 共振峰。图 3(b)、(d) 表示 $\lambda=798$ nm 和 $\lambda=1456$ nm 时 Fano 共振谷的磁场分布,这时 SPPs 波的波长并不满足式(1)的共振波长条件,所以 SPPs 波在入射波导中传至金属挡板左侧时,被金属挡板反射回入射端,从而使 SPPs 波不能传到出射端口,大部分能量只会聚集在入射波导中,因此在出射端测得了极低的透射率。

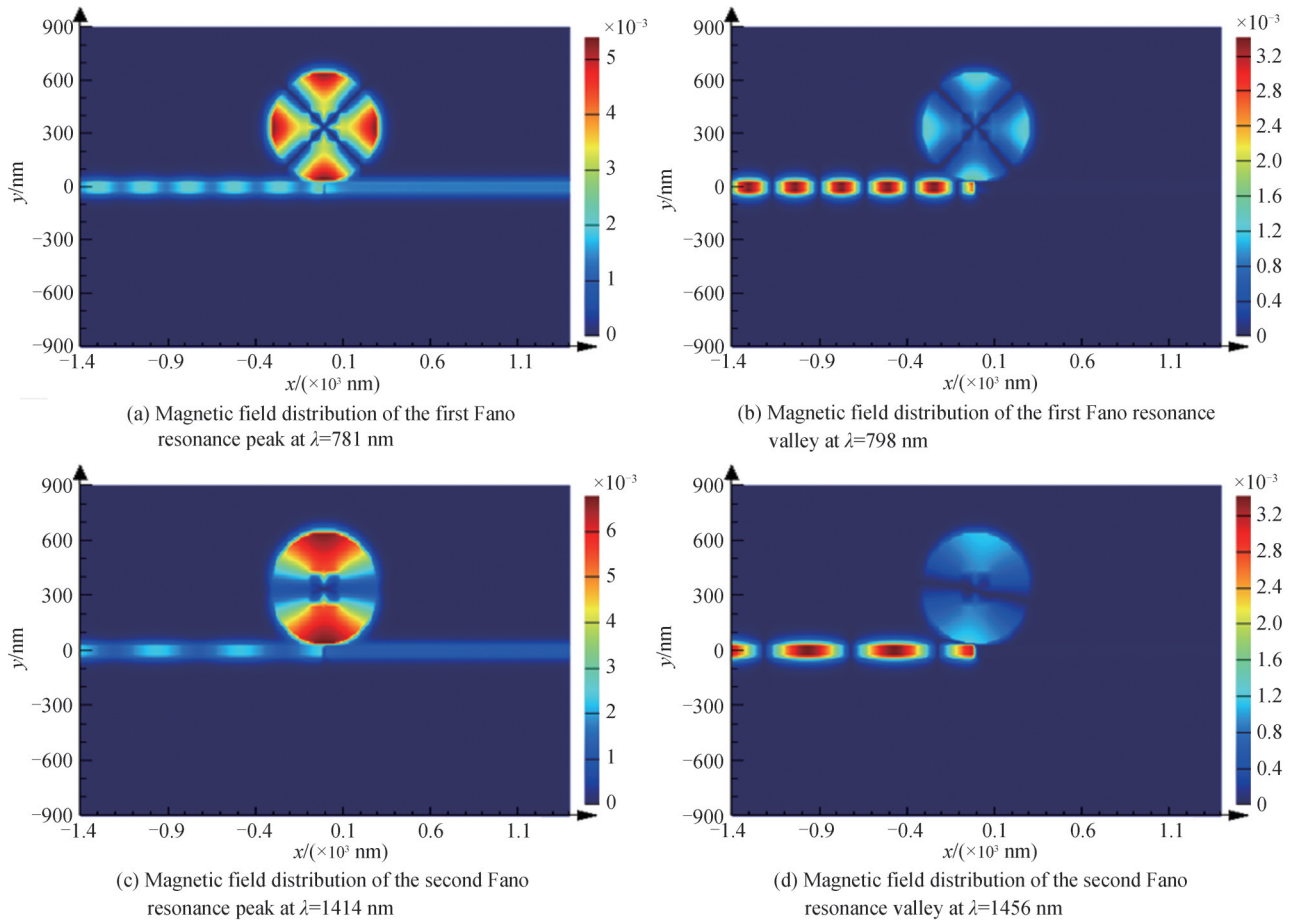


图 3 两个 Fano 共振在波峰和波谷处的磁场分布

Fig. 3 The magnetic field distribution of the two Fano resonances at the peak and valley

如图 4 所示,这两个 Fano 共振的电场能量主要分布在中心正方形的拆分间距内及正方形周围,这与图 3 所示的磁场能量聚集区域有所不同,磁场能量主要集中在圆形腔的边缘附近。但从图 4 中可发现电场的透射情况与图 3 所示的磁场透射情况一致。

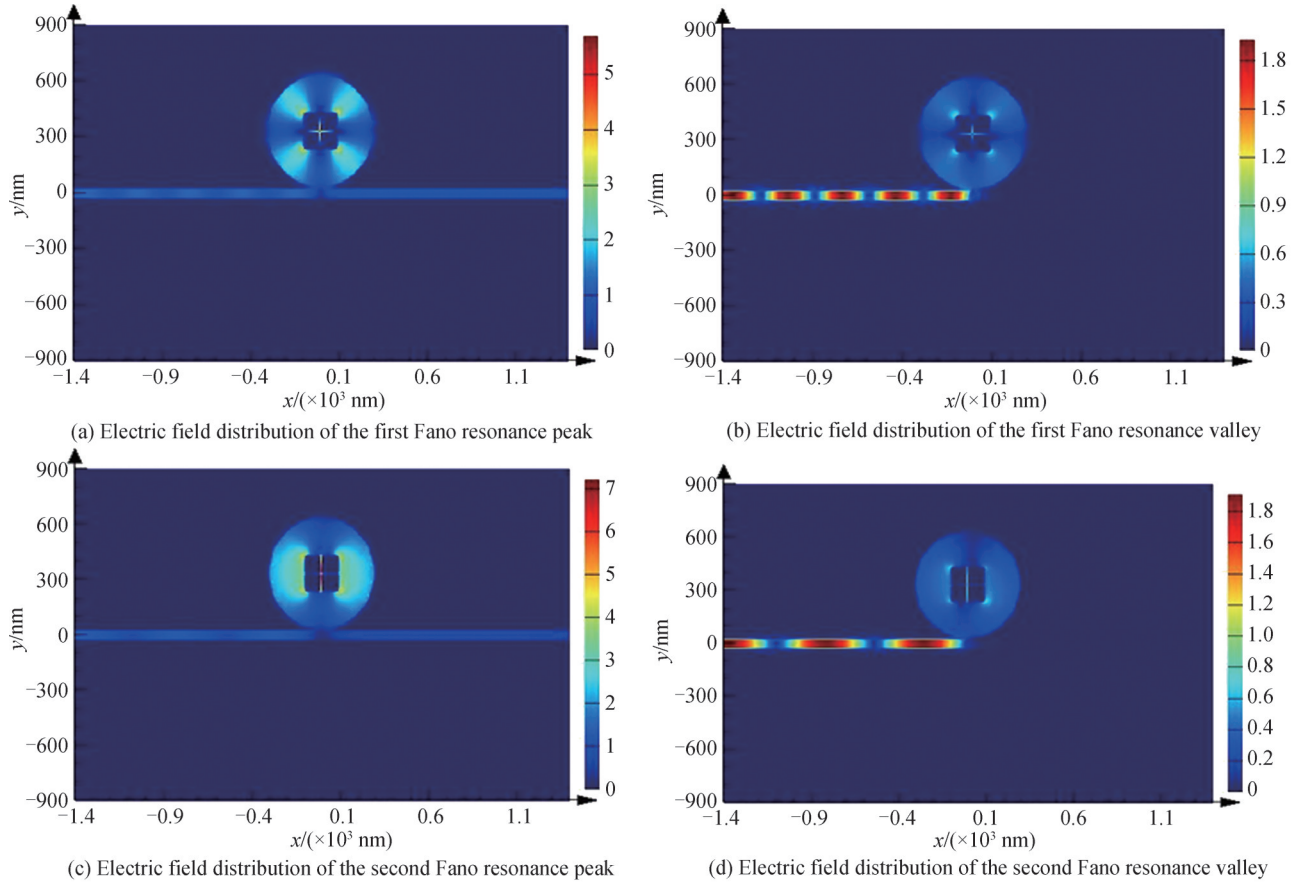


图4 两个Fano共振在波峰和波谷处的电场分布

Fig. 4 The electric field distribution of the two Fano resonances at the peak and valley

2 结构几何参数对传感性能的影响

一般使用灵敏度 S 与 FOM 值来衡量折射率传感器的性能。 $S^{[35]}$ 和 $FOM^{[36]}$ 的公式分别为

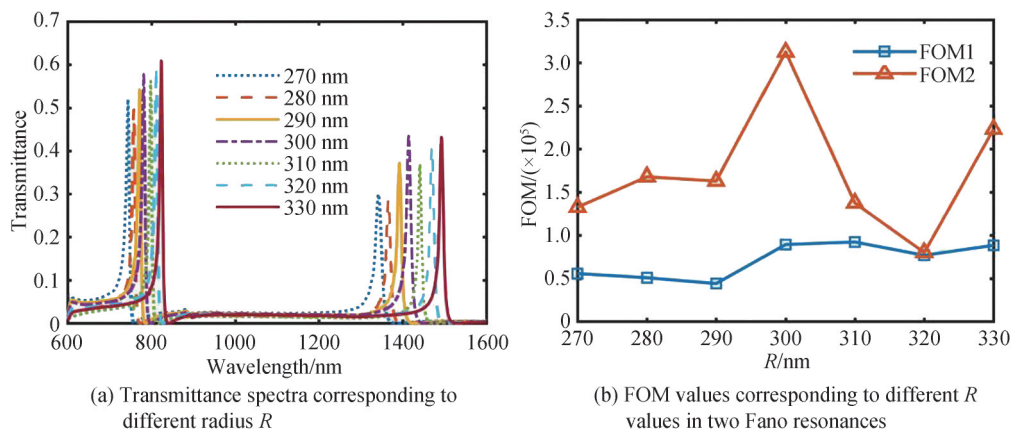
$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (6)$$

$$FOM = \frac{\Delta T}{T\Delta n} \quad (7)$$

式中,灵敏度 S 的单位为 nm/RIU , $\Delta\lambda$ 表示介质折射率变化前后共振峰波长的变化量, Δn 表示介质折射率的变化量, ΔT 表示介质折射率变化前后系统的透射率变化量, T 表示介质折射率变化前的系统透射率, FOM 是一个无量纲参数。

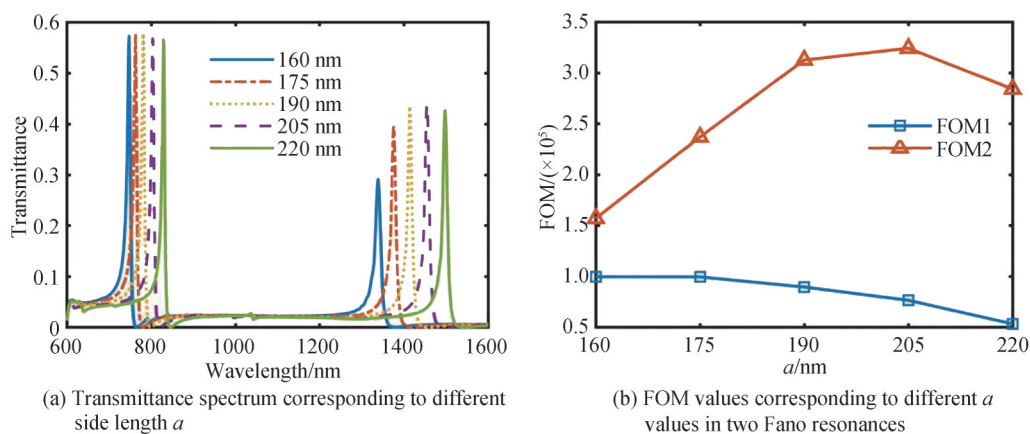
2.1 圆半径对系统传感性能的影响

当谐振腔中心 Ag 正方形的边长 $a=190 \text{ nm}$, 拆分距离 $k=10 \text{ nm}$, 耦合距离 $g=15 \text{ nm}$ 时, 对谐振腔的圆半径 R 从 270 nm 至 330 nm 进行参数化扫描, 得到圆半径 $R=270, 280, 290, 300, 310, 320, 330 \text{ nm}$ 时 Fano 共振峰透射率曲线如图 5(a) 所示。可以看到, 随着 R 的增大, FR1 和 FR2 的透射率均有增有减, 但总体来讲透射率为增大的趋势, 其共振峰均发生明显红移, 这与式(1)所对应的规律一致, 当 R 增大时谐振腔的共振波长 λ 也会增加, 因此共振峰发生红移现象。如图 5(b) 所示为圆半径 $R=270, 280, 290, 300, 310, 320, 330 \text{ nm}$ 时系统 FOM 的取值, 对两个 Fano 共振的 FOM 值总体考虑, 可将圆半径 R 的最优值取为 300 nm 。

图5 不同圆半径 R 对透射率和FOM的影响Fig. 5 Influence of different circle radius R on transmittance and FOM

2.2 Ag正方形的边长对系统传感性能的影响

当圆半径 $R=300$ nm, 拆分距离 $k=10$ nm, 耦合距离 $g=15$ nm 时, 对谐振腔中 Ag 正方形边长 a 从 160 nm 到 220 nm 进行参数化扫描, 得到 Ag 正方形边长 $a=160, 175, 190, 205, 220$ nm 时 Fano 共振峰透射率曲线如图 6(a) 所示。可以看出, 随着 a 的增大, 两个共振峰均发生红移, 这与式(1)所表示的规律一致, 因为当 Ag 正方形边长 a 增大时, 谐振腔的共振波长也会增加, 因此共振峰发生红移现象。随着 Ag 正方形边长 a 的增大, FR1 所对应的透射率几乎不变, 而 FR2 所对应的透射率整体呈现增加趋势。图 6(b) 为 Ag 正方形边长 $a=160, 175, 190, 205, 220$ nm 时系统 FOM 的取值, 从图中可以看到第一个 Fano 共振的 FOM 值呈现单调递减趋势, 第二个 Fano 共振的 FOM 值呈现先增大后减小的趋势, 所以同时兼顾这两个 Fano 共振的 FOM 值可以将 Ag 正方形边长 a 的最优值定为 190 nm。

图6 不同边长 a 对透射率和FOM的影响Fig. 6 Influence of different side length a on transmittance and FOM

2.3 拆分距离对系统传感性能的影响

当圆半径 $R=300$ nm, Ag 正方形边长 $a=190$ nm, 耦合距离 $g=15$ nm 时, 对拆分距离 k 从 6 nm 至 14 nm 进行参数化扫描, 得到拆分距离 $k=6, 8, 10, 12, 14$ nm 时 Fano 共振峰透射率曲线如图 7(a) 所示。可以看出, 随着 k 值的增大, FR1 的位置几乎没有移动, FR2 的位置发生蓝移并且透射率大小几乎不变。因此可以通过调节拆分距离的大小来单独调节第二个 Fano 共振的左右移动。图 7(b) 为拆分距离 $k=6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14$ nm 时系统 FOM 的取值, 综合两种模式来看, 可将拆分距离 k 的最优值定为 10 nm。

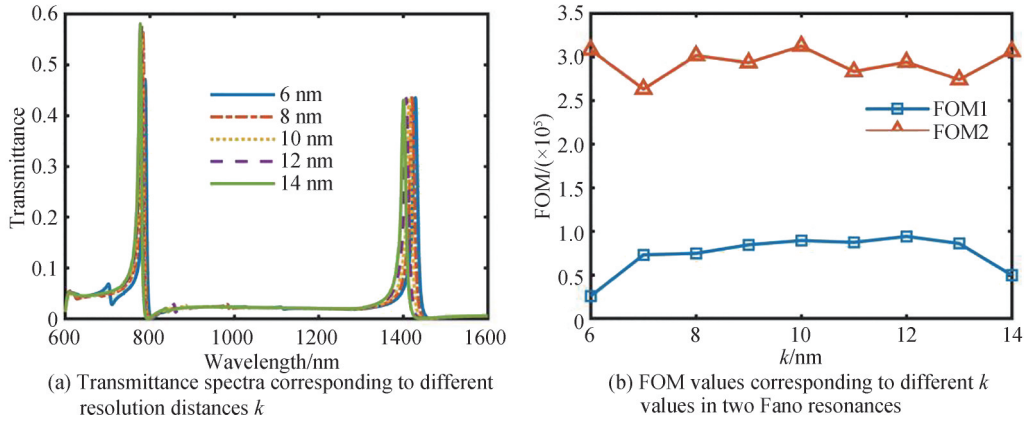

 图7 不同拆分距离 k 对透射率和 FOM 的影响

 Fig. 7 Influence of different resolution distance k on transmittance and FOM

2.4 耦合距离对系统传感性能的影响

当圆半径 $R=300$ nm, Ag 正方形边长 $a=190$ nm, 拆分距离 $k=10$ nm 时, 对耦合距离 g 从 6 nm 到 16 nm 进行参数化扫描, 得到耦合距离 $g=10, 15, 20$ nm 时, Fano 共振峰透射率曲线如图 8(a) 所示, 从图中能够得出, 随着 g 值的增大, 两个 Fano 共振峰的位置几乎没变化, 两个共振峰的透射率呈减小的趋势, 这时因为耦合距离变小, 波导中的能量能够更加容易地耦合进谐振腔内, 从而增大谐振腔内的共振能量, 因此在出射端口测得的透射率会增大。图 8(b) 为耦合距离 $g=6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16$ nm 时系统的 FOM 值, 第一个 Fano 共振的 FOM 值在 6~10 nm 呈增大趋势, 10~16 nm 呈减小趋势, 第二个 Fano 共振的 FOM 值在 6~11 nm 呈增大趋势, 11~16 nm 呈减小趋势, 因此综合两种模式来看将耦合距离 g 定为 10 nm。

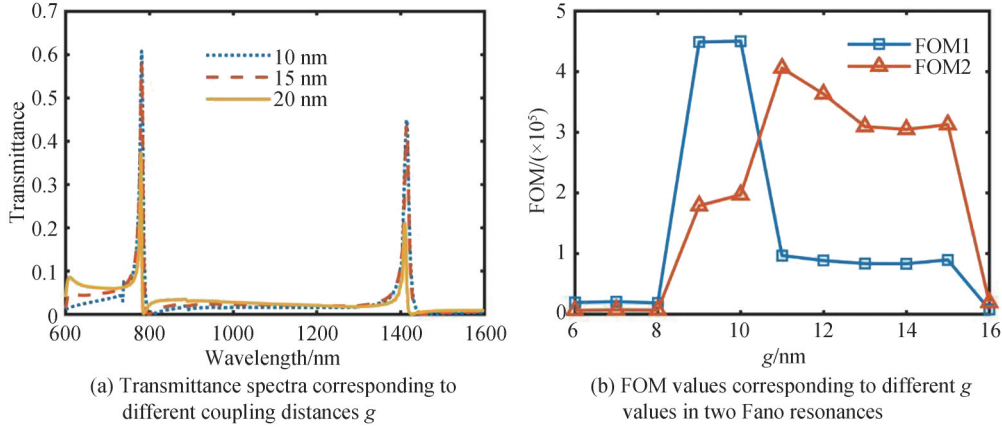

 图8 不同耦合距离 g 对透射率和 FOM 的影响

 Fig. 8 Influence of different coupling distance g on transmittance and FOM

3 系统传感性能分析

对系统结构参数进行优化处理后, 综合两个 Fano 共振的 FOM 值, 可将结构参数 $R=300$ nm, $a=190$ nm, $k=10$ nm, $g=10$ nm 定为最优参数, 在此参数下, 介质折射率 n 取不同值时, 波长与透射率的关系如图 9(a) 所示。可以看出, 随着介质折射率的增大, 两个 Fano 共振峰均发生红移, 透射率峰值均有略微增大。图 9(b) 为最优参数下, 两个 Fano 共振的共振波长随介质折射率 n 的变化图像, 可以看到, 两个 Fano 共振的共振波长与介质折射率均具有良好的线性关系。根据灵敏度计算公式可以计算出第一个 Fano 共振的灵敏度 $S_1=800$ nm/RIU, 第二个 Fano 共振的灵敏度 $S_2=1400$ nm/RIU。图 9(c) 为在最优参数下, 该系统的 FOM 值与波长的关系, 可以看到第一个 Fano 共振的 FOM 值可高达 4.502×10^5 , 第二个 Fano 共振的 FOM 值为 1.967×10^5 。

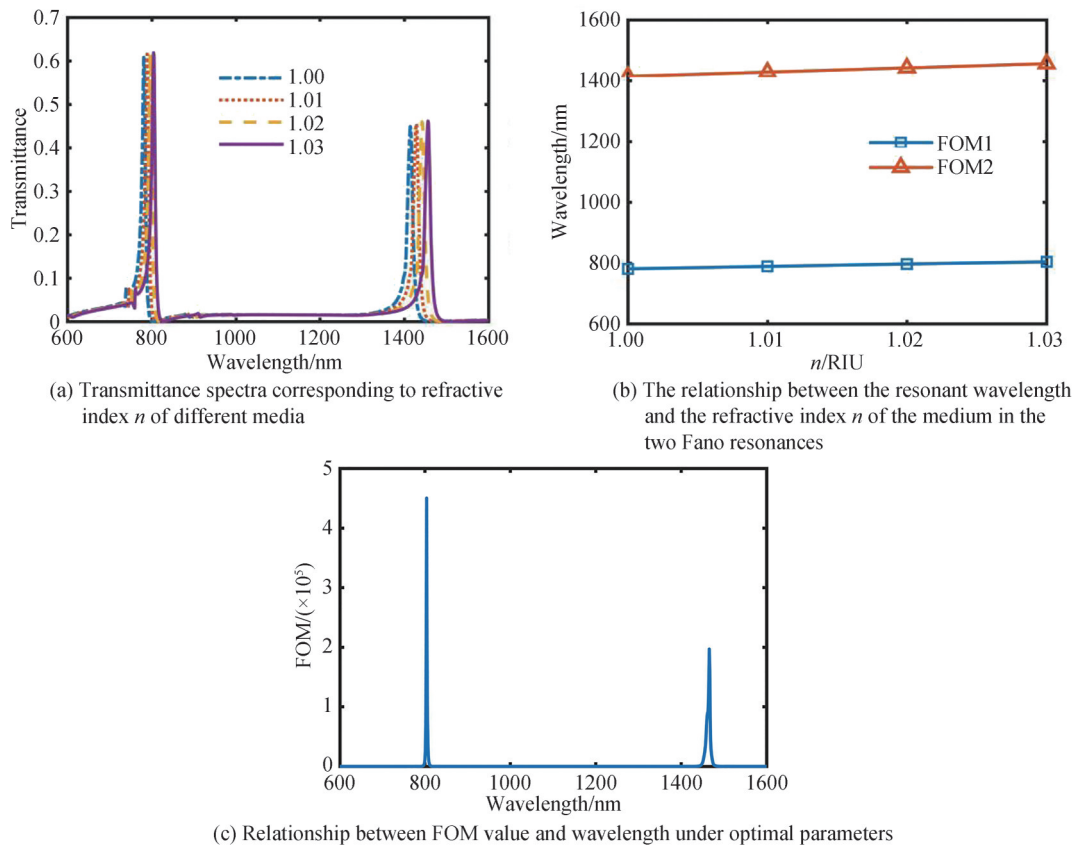


图9 系统传感性能特点

Fig. 9 System sensing performance characteristics

综上所述,该结构的几何参数 R 、 a 、 k 、 g 以及介质折射率都会影响结构的传输性能,通过改变结构几何参数的大小,可以得到系统的最优参数。在最优参数下,该结构表现出良好的传感性能。

4 结论

本文提出了基于单挡板的MDM直波导侧向耦合谐振腔结构。当入射光以TM模式进入该结构时,会在金属与介质界面处激发出SPPs波,SPPs波在MDM直波导传输,当结构中只有金属挡板没有谐振腔,此时结构会产生宽广的连续态谱线,当结构中只有谐振腔没有金属挡板,此时结构会产生较窄的离散态谱线。当连续态与离散态相互干涉时会产生Fano共振谱线。通过改变几何参数 R 、 a 、 k 、 g 可以有效调节和优化结构的传感性能,得到 $R=300$ nm, $a=190$ nm, $k=10$ nm, $g=10$ nm为该结构的最优参数。在最优几何参数下,第一个Fano共振的灵敏度为800 nm/RIU,对应的FOM值可高达 4.502×10^5 ,第二个Fano共振的灵敏度为1400 nm/RIU,对应的FOM值为 1.967×10^5 ,因此所提出的两种模式的Fano共振均具有较高的品质因数和灵敏度,同时具有较好的传感性能。该结构可为提高微纳光学传感器的性能提供一种思路。

参考文献

- [1] GALVEZ F, DELVALLE J, GOMEZ A, et al. Plasmonic nanodevice with magnetic functionalities: fabrication and characterization[J]. Optical Materials Express, 2016, 6(10): 3086-3096.
- [2] SHEN X R, WANG Y K, CHEN Q S, et al. Detuned square ring resonators for multiple plasmon-induced transparencies in metal-insulator-metal waveguide[J]. Applied Physics Express, 2015, 8(11): 112201.
- [3] ZAFAR R, SALIM M. Enhanced figure of merit in Fano resonance-based plasmonic refractive index sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(11): 6313-6317.
- [4] APARNA U, MRUTHYUNJAYA H S, SATHISH KUMAR M. Plasmonic wavelength demultiplexer with mode conversion capabilities[J]. Plasmonics, 2018, 13(2): 511-517.
- [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.
- [6] WANG S L, LIU Y H, ZHAO D Y, et al. Optofluidic Fano resonance photonic crystal refractometric sensors[J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(9): 091105.
- [7] LU H, LIU X M, MAO D, et al. Plasmonic nanosensor based on Fano resonance in waveguide-coupled resonators[J]. Optics Letters, 2012, 37(18): 3780-3782.
- [8] WU C, KHANIKAEV A B, ADATO R, et al. Fano-resonant asymmetric metamaterials for ultrasensitive spectroscopy and identification of molecular monolayers[J]. Nature Materials, 2012, 11(1): 69-75.
- [9] LU H, LIU X, WANG L, et al. Ultrafast all-optical switching in nanoplasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator[J]. Optics Express, 2011, 19(4): 2910-2915.
- [10] KEYSER U F. Enhancing nanopore sensing with DNA nanotechnology[J]. Nature Nanotechnology, 2016, 11(2): 106-108.
- [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.
- [12] HUANG Y, MIN C, TAO S, et al. Design of compact Mach-Zehnder interferometer-based slow-light-enhanced plasmonic waveguide sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(11): 2796-2803.
- [13] CHEN M, FAN F, YANG L, et al. Tunable terahertz amplifier based on slow light edge mode in graphene plasmonic crystal[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2016, 53(1): 1-6.
- [14] WEI Z, LI X, ZHONG N, et al. Analogue electromagnetically induced transparency based on low-loss metamaterial and its application in nanosensor and slow-light device[J]. Plasmonics, 2017, 12(3): 641-647.
- [15] YAN S, ZHU X, FRANDSEN L H, et al. Slow-light-enhanced energy efficiency for graphene microheaters on silicon photonic crystal waveguides[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 1-8.
- [16] 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.
- [17] LOU Xiaowei, CUI Jinjiang, DONG Ningning, et al. Analysis of sharpness Fano resonance line based on eye-like resonator[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0113002.
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): 0113002.
- [18] CAO T, WEI C W, SIMPSON R E, et al. Fast tuning of double Fano resonance using a phase-change metamaterial under low power intensity[J]. Scientific Reports, 2014, 4(1): 4463.
- [19] CAO T, MAO L B, QIU Y M, et al. Fano resonance in asymmetric plasmonic nanostructure: separation of sub-10nm enantiomers[J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(3): 1801172.
- [20] CAO T, QIU Y M. Lateral sorting of chiral nanoparticles using Fano-enhanced chiral force in visible region[J]. Nanoscale, 2018, 10(2): 566-574.
- [21] CHEN J F, YANG H, FANG Z Y, et al. Refractive index sensing based on multiple fano resonances in a split-ring cavity-coupled MIM waveguide[J]. Photonics, 2021, 8(11): 472.
- [22] YU S, PIAO X, HONG J, et al. Progress toward high-Q perfect absorption: a Fano antilaser[J]. Physical Review A, 2015, 92(1): 011802.
- [23] JANKOVIC N, CSELYUSZKA N. Multiple Fano-like MIM plasmonic structure based on triangular resonator for refractive index sensing[J]. Sensors, 2018, 18(1): 287-295.
- [24] ZHANG Yanjun, WANG Huji, ZHANG Longtu, et al. Multi-Fano resonant sensing characteristics of MIM waveguide coupled with cloud like cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(5): 0524002.
张燕君, 王护吉, 张龙图, 等. MIM波导耦合类云朵腔的多Fano共振传感特性研究[J]. 光学学报, 2022, 42(5): 0524002.
- [25] ZHAO Yaping, ZHANG Guanmao, REN Panpan, et al. Dual Fano resonance characteristics of coupled semi-circular resonant cavity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 131301.
赵亚萍, 张冠茂, 任盼盼, 等. 耦合半圆环谐振空腔的双重Fano共振特性[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 131301.
- [26] ZHANG Yingqiu, LIU Xing, WU Qiaohua, et al. Study on the sensing and slow-light characteristics of Fano resonance in MIM waveguide with double baffles[J]. Natural Science Journal of Harbin Normal University, 2021, 37(5): 30-36.
张颖秋, 刘星, 吴乔华, 等. 含双挡板MIM波导的Fano共振传感及慢光特性研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2021, 37(5): 30-36.
- [27] YOU Xinchun, GUAN Jianfei. Double Fano resonances based on coupled H-shaped cavity[J]. Study on Optical Communications, 2021, (6): 57-61.
尤鑫晨, 关建飞. 基于耦合H型谐振腔的双重Fano共振研究[J]. 光通信研究, 2021, (6): 57-61.
- [28] CHEN Ying, ZHOU Jian, DING Zhixin, et al. Analysis of formation and evolution of double Fano resonances in sub-wavelength dielectric grating/MDM waveguide/periodic photonic crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(3): 034202.

- 陈颖, 周健, 丁志欣, 等. 亚波长介质光栅/MDM波导/周期性光子晶体中双重Fano共振的形成及演变规律分析[J]. 物理学报, 2022, 71(3): 034202.
- [29] LIU F, YAN S, SHEN L, et al. A nanoscale sensor based on a toroidal cavity with a built-in elliptical ring structure for temperature sensing application[J]. *Nanomaterials*, 2022, 12(19): 3396.
- [30] QI Yunping, JIA Yingjun, ZHANG Ting, et al. Dynamically tunable refractive index sensor based on Fano resonance with metal-insulator-metal-graphene nanotube hybrid structure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(17): 178101.
祁云平, 贾迎君, 张婷, 等. 基于Fano共振的金属-绝缘体-金属-石墨烯纳米管混合结构动态可调折射率传感器[J]. 物理学报, 2022, 71(17): 178101.
- [31] JOHNSON P B, CHRISTY R W. Optical constants of the noble metals[J]. *Physical Review B*, 1972, 6(12): 4370.
- [32] LI S, WANG Y, JIAO R, et al. Fano resonances based on multimode and degenerate mode interference in plasmonic resonator system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3525-3533.
- [33] QIU S L, LI Y P. Q-factor instability and its explanation in the staircased FDTD simulation of high-Q circular cavity[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2009, 26(9): 1664-1674.
- [34] LI S, WANG Y, JIAO R, et al. Fano resonances based on multimode and degenerate mode interference in plasmonic resonator system[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): 3525-3533.
- [35] CAO T, ZHANG L. Enhancement of Fano resonance in metal/dielectric/metal metamaterials at optical regime[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19228-19239.
- [36] CHEN Z, CHEN J, YU L, et al. Sharp trapped resonances by exciting the antisymmetric waveguide mode in a metal-insulator-metal resonator[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 131-137.

Fano Resonance and Sensing Characteristics of MDM Waveguide Lateral Coupled Resonator Based on Single Baffle

LIU Jiatang, LI Shilei, QI Yanan, CHEN Shuai

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: Traditional optical devices have certain limitations, due to the diffraction limit, the development of optical devices is limited, making the optical devices bulky and not conducive to miniaturization. Optical devices can transmit and process information within the sub wavelength range, effectively addressing the issue. Metal-dielectric-metal waveguide can regulate the light propagation signal in the subwavelength range, and surface plasmon polariton has the characteristic of breaking the diffraction limit, making it possible to further miniaturize optical devices. Based on surface plasmon polaritons, a waveguide side coupled resonator system with metal baffles is proposed. When incident light enters the structure from the incident end of the waveguide, a narrow discrete band is formed in the resonant cavity, and a metal baffle generates a wider continuous state. When the narrower discrete state interferes with the wider continuous state, two different modes of Fano resonance lines are formed. In this paper, the finite difference time-domain method is used to simulate the transmission characteristics of the structure. The magnetic field distribution, electric field distribution, transmission characteristics, and sensing performance of the structure are studied separately. Based on the magnetic field distribution and electric field distribution, the formation mechanism of Fano resonance can be better explained. According to the analysis of simulation data, the geometric parameters of the structure and the refractive index of the medium can adjust the transmission performance of the structure. The geometric parameters of the structure are optimized. Firstly, when the side length of the Ag square is $a=190$ nm, the separation distance is $k=10$ nm, the coupling distance is $g=15$ nm, and the circular radius R of the structure is parameterized in steps of 10 nm from 270 nm to 330 nm, the quality factors at different R are calculated. Considering the overall quality factors of these two Fano resonances, the optimal value of the circular radius of the structure is taken as 300 nm. Secondly, when the circular radius $R=300$ nm, the separation distance $k=10$ nm, the coupling distance $g=15$ nm, and the Ag square side length a of and the structure is parameterized in steps of 15 nm from 160 nm to 220 nm, the quality factors at different a are calculated. In order to simultaneously consider the quality factors of these two Fano resonances, the optimal Ag square side length a of the structure is set at 190 nm. Thirdly, when the circular radius $R=300$ nm, the Ag square side length $a=190$ nm, the

coupling distance $g=15$ nm, and the resolution distance k of the structure is parameterized and scanned in steps of 1 nm from 6 nm to 14 nm, the quality factors at different k are calculated, and the two Fano resonances are combined. Therefore, the optimal resolution distance k of the structure is chosen as 10 nm. Fourthly, when the circular radius $R=300$ nm, the Ag square side length $a=190$ nm, the separation distance $k=10$ nm, and the coupling distance g of the structure is parameterized in steps of 1 nm from 6 nm to 16 nm, the quality factors at different g are calculated. Overall, considering the quality factors of these two Fano resonances, the optimal coupling distance g of the structure is determined to be 10 nm. Under the optimal parameters, the figure of merit of the two Fano resonances FR1 and FR2 generated by this structure are 4.502×10^5 and 1.967×10^5 , the corresponding sensitivities are 800 nm/RIU and 1 400 nm/RIU, respectively, the quality factor and sensitivity of the two Fano resonances have reached high values, both of which have good sensing performance. The designed coupling structure can provide a feasible way to improve the performance of micro/nano optical sensors.

Key words: Surface plasmon polaritons; Metal-dielectric-metal waveguide; Fano resonance; Figure of merit; Sensitivity

OCIS Codes: 240.6680; 230.7370; 260.5740; 280.4788; 250.5403