

# 单挡板 MDM 波导耦合圆盘腔的 Fano 共振 双模式特性研究

韩帅涛<sup>1\*\*</sup>, 陈颖<sup>1\*</sup>, 邸远见<sup>1</sup>, 何磊<sup>1</sup>, 崔行宁<sup>1</sup>, 朱奇光<sup>2</sup>, 李少华<sup>3</sup>

<sup>1</sup>燕山大学电气工程学院测试计量技术与仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>2</sup>燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

<sup>3</sup>河北先河环保科技股份有限公司, 河北 石家庄 050000

**摘要** 基于表面等离子亚波长结构的传输特性与光子局域特性, 提出了一种单挡板金属-电介质-金属(MDM)波导耦合圆盘腔结构。由圆盘腔形成的两个孤立态与金属挡板形成的较宽的连续态干涉相消, 形成两种不同模式的 Fano 共振。结合耦合模理论分析了该结构形成 Fano 共振的传输特性, 用有限元分析法对结构进行模拟仿真, 定量分析了结构参数对折射率传感特性的影响。结果表明: 优化后的结构在两种模式下的优质因子分别为  $1.7 \times 10^5$  和  $1.36 \times 10^5$ , 折射率灵敏度分别为 710 nm/RIU 和 1105 nm/RIU, 可为解决传感器在折射率测量时的交叉敏感问题提供理论参考。

**关键词** 光学器件; 表面等离子; 波导; 圆盘腔; 单挡板

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1024002

## Fano Resonance Dual Mode Performance of Single Baffle Contained MDM Waveguide Coupled Disk Cavity

Han Shuaitao<sup>1\*\*</sup>, Chen Ying<sup>1\*</sup>, Di Yuanjian<sup>1</sup>, He Lei<sup>1</sup>,

Cui Xingning<sup>1</sup>, Zhu Qiguang<sup>2</sup>, Li Shaohua<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

<sup>3</sup> Hebei Sailhero Environmental Protection Hi-tech Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

**Abstract** We propose a single baffle metal-dielectric-metal (MDM) waveguide coupled disk cavity structure based on the transmission characteristics and photon local characteristics of the surface plasmonic sub-wavelength structures. Two discrete states are provided by the disk cavity, and a metal baffle is used to produce a continuous state. The discrete states coupled with the continuous state lead to two different modes of Fano resonance. Then, the transmission characteristics of the Fano resonance are analyzed with the coupled mode theory, and the finite element analysis is used to simulate. Moreover, the effects of the structural parameters on the refractive index sensing characteristics are quantitatively analyzed. The results show that, at the first mode, the figure of merit (FOM) and the refractive index sensitivity of the optimized structure can reach to  $1.7 \times 10^5$  and 710 nm/RIU, respectively. For the second mode, they can reach to  $1.36 \times 10^5$  and 1105 nm/RIU, respectively. The structure can provide a theoretical reference for solving the problem of cross-sensitivity of the sensor in refractive index measurement.

**Key words** optical devices; surface plasma; waveguide; disk cavity; single baffle

**OCIS codes** 230.7380; 250.5403

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-05-07; 录用日期: 2018-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61475133)、河北省自然科学基金(F2016203188, F2016203245)、河北省普通高等院校青年拔尖人才计划(BJ2014056)

\* E-mail: chenying@ysu.edu.cn; \*\* E-mail: 2350035697@qq.com

## 1 引 言

Fano 共振是凝聚态物理中共振过程和非共振过程之间的量子干涉,其共振线型表现为明显的不对称性以及结构参数和周围环境异常敏感<sup>[1]</sup>。基于表面等离子激元(SPPs)的 Fano 共振在纳米结构上的传播突破了原有原子物理学和经典光学理论的限制<sup>[2]</sup>,同时,其尖锐而非对称的消光光谱可以增大传感器的分辨率<sup>[3]</sup>,在传感领域具有较大的潜在应用价值,得到了科研人员广泛关注。在 SPPs 体系中发现的 Fano 共振效应在光开关、等离子体诱导透明、慢光<sup>[4]</sup>、传感<sup>[5]</sup>等方面均有广泛应用,其已成为纳米光子学研究的热点。

金属-电介质-金属(MDM)波导具有高约束、低损耗、传输距离长和易制造等特点<sup>[6]</sup>,在集成等离子器件设计上得到了广泛应用,其金属表面产生的 SPPs,对结构形态、属性、周围环境以及入射光的偏振态等相当敏感<sup>[7]</sup>。利用这些特性设计的传感器的灵敏度得到了极大提高,并且 SPPs 可以突破衍射极限。设计的 MDM 波导结构可以在纳米尺度上操控光的传播行为,为纳米器件的集成化和小型化提供可能<sup>[8]</sup>,成为 SPPs 设计的重要组成部分。Zhao 等<sup>[9]</sup>发现两组不同半径交错的银粒子晶格阵列在远场干涉下可以产生一种新型的 Fano 共振,并将两个阵列的反相集体共振称为“暗模式”,同相集体共振称为“亮模式”。该结构具有调制深度大和线宽窄的优点,在等离子激元传感器的设计中具有巨大的应用潜力。Wei 等<sup>[10]</sup>采用热压花模板剥离方法在低成本、超高灵敏度的聚合物薄膜上制备出了大面积的双层金纳米缝隙,并发现横向磁极化波在纳米晶体的透射光谱中产生了非常清晰且不对称的 Fano 共振,其半峰全宽仅为 3.88 nm,非常尖锐的共振峰导致了超高的灵敏度。Klimov 等<sup>[11]</sup>研究了穿孔金属膜覆盖的光子晶体的光学特性,并验证了 Fano 共振的存在;Klimov 等认为 Fano 共振源于光子晶体 Tamm 状态与波导模式之间的相互作用,在传输谱的宽峰中呈现出一个窄的波谷,这与 Tamm 状态有关;之后他们在此基础上提出了对环境折射率变化敏感的 Fano 共振传感器的设计方法。

近年来,利用 MDM 波导设计 Fano 共振传感结构的相关研究已有很多。例如:Zhang 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于波导谐振器系统电磁感应透明度(EIT)的等离子体折射率敏感纳米传感器,该传感器是由

一个齿形和一个矩形腔构成的 MDM 结构,其灵敏度、半峰全宽和优质因子(FOM)值分别为 733 nm/RIU,24.11 nm 和 695;Chen 等<sup>[13]</sup>提出了一种基于 Fano 共振及双槽 MDM 波导的小型折射率传感器,这种纳米传感器的灵敏度约为 1260 nm/RIU,FOM 值约为  $2.3 \times 10^4$ ;Yang 等<sup>[14]</sup>提出了一种由波导中的挡板和矩形腔构成的 MDM 波导结构,并研究了等离子体激元系统中双 Fano 共振的特性,结果表明多 Fano 共振系统在非线性和慢光及生物纳米传感设备上都具有重要应用。当多个 Fano 共振同时用于传感时,将会形成差动传感,从而可以有效消除一些外界环境因素的影响。可见,多 Fano 共振原理将会为纳米传感结构的设计提供新思路。

本文首先提出了单挡板 MDM 波导耦合圆盘腔结构。光在含有金属挡板的波导中传播形成较宽的连续态,而光进入圆盘腔中会形成两个较窄的孤立态,在近场作用下,两者耦合形成了两种模式的 Fano 共振。之后,结合耦合模理论(CMT)分析了这种连续态与孤立态耦合形成的 Fano 共振的传输特性。最后,采用基于有限元分析法的 COMSOL 软件进行仿真,定量分析了结构参数(圆盘腔的半径  $R$  以及波导与圆盘腔的耦合距离  $g$ )对结构传感特性、折射率灵敏度及 FOM 值的影响,进而对结构参数进行优化。

## 2 模型的建立与理论分析

## 2.1 结构模型的建立

所提出的单金属挡板 MDM 波导耦合圆盘腔结构如图 1 所示。其结构中的金属为 Ag,电介质层为空气,空气的折射率为 1。为确保只有 TM 模能够传播,波导的宽度  $w = 50 \text{ nm}$ <sup>[15]</sup>。

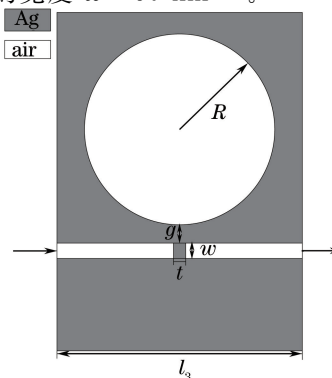


图 1 单挡板 MDM 波导耦合圆盘腔结构  
Fig. 1 Single baffle MDM waveguide coupled disk cavity structure

其结构参数  $g$  为波导与圆盘腔的耦合距离;  $t$  为金属挡板的厚度;  $R$  为圆盘腔的半径;  $l_3$  为整个波导结构的长度。Ag 的相对介电常数用德鲁德模型<sup>[16]</sup>表示为

$$\epsilon_m(\omega) = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / [\omega(\omega + i\gamma)], \quad (1)$$

式中:  $\omega_p$  为等离子振荡频率,  $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$  rad/s;  $\gamma$  为碰撞频率,  $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$  rad/s;  $\epsilon_\infty$  为无穷介电常数,  $\epsilon_\infty = 3.7$ ;  $\omega$  为输入光的角频率。

## 2.2 理论分析

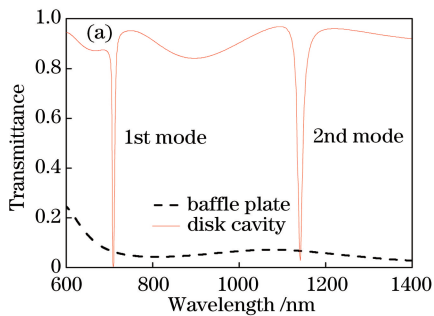
当入射光以 TM 波传播时, 在亚波长波导结构中的金属表面产生 SPPs, SPPs 可以突破衍射极限。对于所提出的结构, SPPs 在波导中传播时, 只有第一个和第二个模式出现在所计算的波长范围内, 参见图 2(b) 中的红线。为了解释双 Fano 共振产生的原因, 本研究结合 CMT 对所提的等离子体谐振结构进行分析。圆盘谐振腔内两个模式的谐振振幅分别用  $a_1$  和  $a_2$  表示,  $s_{+1}$  和  $s_{-1}$  分别表示输入端口中入射光和出射光的模场振幅,  $s_{+2}$  和  $s_{-2}$  分别表示输出端口中入射光和出射光的模场振幅。随着时间的演化, 系统的振幅方程可以表示为<sup>[17]</sup>

$$j\omega a_1 = \left( j\omega_1 - \frac{1}{\tau_{o1}} - \frac{1}{\tau_{e1}} \right) a_1 + k_1 (s_{+1} + s_{+2}), \quad (2)$$

$$j\omega a_2 = \left( j\omega_2 - \frac{1}{\tau_{o2}} - \frac{1}{\tau_{e2}} \right) a_2 + k_2 (s_{+1} - s_{+2}), \quad (3)$$

式中:  $\omega_i$  ( $i=1,2$ ) 为共振频率;  $1/\tau_{oi}$  ( $i=1,2$ ) 为腔的固有损耗率;  $1/\tau_{ei}$  ( $i=1,2$ ) 为腔振幅到波导的衰减率;  $k_1$  和  $k_2$  分别为波导中正向和反向传播模式的输入耦合系数。根据能量守恒<sup>[18]</sup>原理, 输出波可表示为

$$\begin{bmatrix} s_{-1} \\ s_{-2} \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} s_{+1} \\ s_{+2} \end{bmatrix} + \mathbf{k} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$



$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} r & jt \\ jt & r \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} -k_1^* & k_2^* \\ -k_1^* & -k_2^* \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中:  $r$ 、 $t$  分别为反射振幅系数和透射振幅系数, 且  $r^2 + t^2 = 1$ ;  $\mathbf{k}$  为输出波与输出端口耦合的耦合矩阵<sup>[17]</sup>;  $\mathbf{C}$  为散射矩阵<sup>[19]</sup>, 表示通过挡板的入射波和出射波之间的直接耦合。

根据能量守恒和时间反转对称性可知,  $k_1 = \sqrt{1/\tau_{e1}} \exp(j\theta_1)$ ,  $k_2 = \sqrt{1/\tau_{e2}} \exp(j\theta_2)$ 。其中:  $\theta_i$  ( $i=1,2$ ) 为相应的相位耦合系数;  $\tau_{e1}$  为第一种模式下腔振幅衰减率的倒数;  $\tau_{e2}$  为第二种模式下腔振幅衰减率的倒数。透射率的振幅定义为  $t(\omega) = s_{2-}/s_{1+}$ , 透射谱为

$$T(\omega) = |t(\omega)|^2 = \left| jt - \frac{1/\tau_{e1}}{j(\omega - \omega_1) + 1/\tau_{o1} + 1/\tau_{e1}} - \frac{1/\tau_{e2}}{j(\omega - \omega_2) + 1/\tau_{o2} + 1/\tau_{e2}} \right|^2. \quad (7)$$

可以看出, 当不含挡板时 ( $t=1, r=0$ ),  $1/\tau_{e1,2}$  和  $1/\tau_{o1,2}$  为常数, 其值远小于  $j(\omega - \omega_{1,2})$  ( $\omega \neq \omega_{1,2}$ ,  $\omega_{1,2}$  为第一种模式、第二种模式下的共振频率) 的绝对值, 此时将会得到相对较大的透射率。随着  $\omega$  变化, 且当  $\omega$  的值接近或等于  $\omega_{1,2}$  时, 透射谱将急剧下降, 形成两个狭窄的洛伦兹传输谱线。由图 2(a) 可以看出, 上述理论分析所得出的结论与 COMSOL 仿真得到的透射谱及文献<sup>[17]</sup>的结论一致。当波导中引入挡板后, 波导中的光波受到复杂的耦合作用, 其相位发生了明显的变化, 强烈的相位变化产生了 Fano 共振现象, 从而形成两个尖锐的非对称的波峰与两个零传输的波谷, 如图 2(b) 所示。

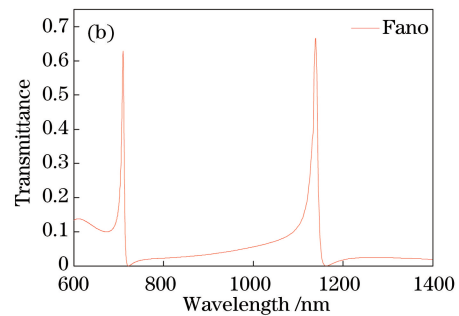


图 2 Fano 共振的形成过程。(a) 只有单挡板或圆盘腔时的透射谱;  
(b) 单挡板 MDM 波导耦合圆盘腔结构形成的 Fano 共振谱

Fig. 2 Fano resonance formation process. (a) Transmittance spectra when a single baffle or a disk is alone;  
(b) Fano resonance spectrum of single baffle MDM waveguide coupled disk cavity structure

为了进一步分析其内在机理,用 COMSOL 对耦合结构的稳态电场强度  $E_z$  分布进行仿真分析。图 3 所示分别是将入射光的频率调到与第一种模式共振波长的频率相等,以及将入射光的频率调到与第二种模式共振波长的频率相等时的仿真结果。当该结构不含挡板时,MDM 波导耦合圆盘腔结构在共振谷波长  $\lambda = 709 \text{ nm}$  和  $\lambda = 1141 \text{ nm}$  处的稳态电场强度分布如图 3(a)、(b)所示。从图 3(a)中可以看出,当波长  $\lambda = 709 \text{ nm}$  时,光波耦合进圆盘腔内,在圆盘腔内发生多次反射,最后反射出圆盘腔与直波导中的光波耦合。这是由于相位相反导致干涉相消,进而在透射光谱中表现为零传输现象。从

图 3(b)中可以看出,当波长  $\lambda = 1141 \text{ nm}$  时,光波耦合进圆盘腔内,并在圆盘腔内反射,最后反射出圆盘腔的光波与直波导中的光波耦合。这是因为相位相反而导致干涉相消,进而在透射光谱中表现为趋于零传输现象。由图 3(c)、(d)可见,当在 MDM 波导耦合圆盘腔结构中加入挡板后,相位发生剧烈变化,在波长  $\lambda = 721 \text{ nm}$  和  $\lambda = 1162 \text{ nm}$  处,光波在圆盘腔和含挡板的直波导中也出现了相反相位,进而干涉相消,出现零传输现象。由图 3(e)、(f)可知,在波长  $\lambda = 709 \text{ nm}$  和  $\lambda = 1139 \text{ nm}$  处,光波在圆盘腔和含挡板的直波导中也出现了同向相位,发生了干涉相长。

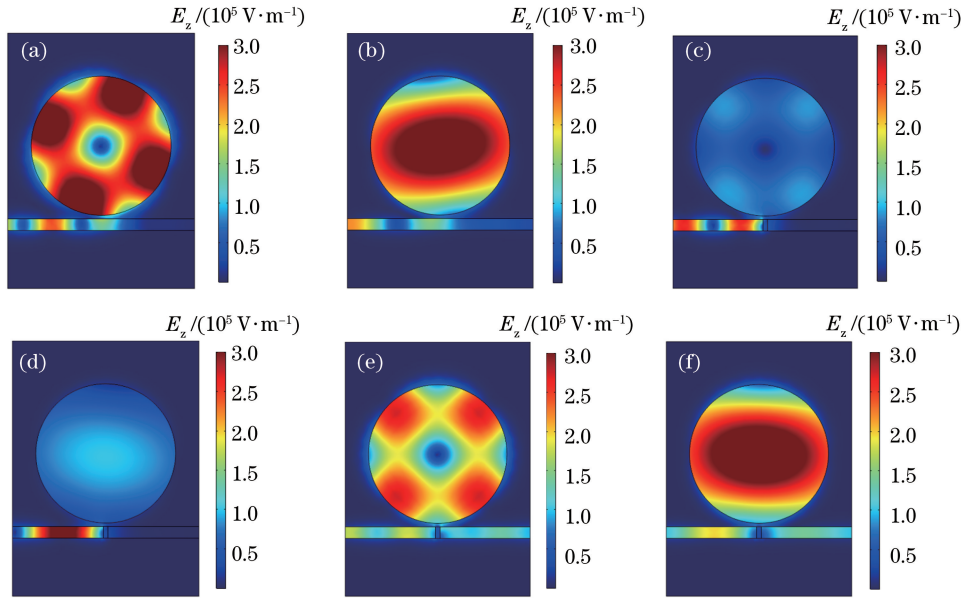


图 3  $E_z$  场分布。(a)不含挡板时, $\lambda = 709 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布;(b)不含挡板时, $\lambda = 1141 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布;(c)含挡板时, $\lambda = 721 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布;(d)含挡板时, $\lambda = 1162 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布;(e)含挡板时, $\lambda = 709 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布;(f)含挡板时, $\lambda = 1139 \text{ nm}$  处的  $E_z$  场分布

Fig. 3  $E_z$  field distributions. (a)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 709 \text{ nm}$  in the absence of baffle; (b)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 1141 \text{ nm}$  in the absence of baffle; (c)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 721 \text{ nm}$  after adding baffle; (d)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 1162 \text{ nm}$  after adding baffle; (e)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 709 \text{ nm}$  after adding baffle; (f)  $E_z$  field distribution at  $\lambda = 1139 \text{ nm}$  after adding baffle

### 3 结构的传感特性分析

由于 Fano 共振是一种非对称的峰,在实际测量过程中,通常通过在特定波长  $\lambda_0$  下测量待测物折射率变化  $dn$  引起的透射谱相对透射强度变化  $dT/T$  来测量波长漂移,其相对透射强度变化越快,越容易检测到透射谱的变化,可用 FOM 值来衡量<sup>[20]</sup>。FOM 值可定义为

$$\alpha_{\text{FOM}} = \left( \frac{dT/dn}{T} \right)_{\text{max}} = \left[ \frac{S_\lambda (dT/d\lambda)}{T} \right]_{\text{max}}, \quad (8)$$

式中: $T$  为透射系数; $S_\lambda$  为灵敏度, $S_\lambda = d\lambda/dn$ 。该波导结构在频率  $\omega$  下的 FOM 值可表示为<sup>[13]</sup>

$$\alpha_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T \Delta n} = \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{T(\omega, n_0) \Delta n}, \quad (9)$$

式中: $T(\omega, n_0)$  为结构初始状态下的透射系数; $T(\omega, n)$  为环境折射率变化后的透射系数;环境变化的折射率差  $\Delta n = n - n_0$  ( $n_0$  为环境未发生变化时的折射率)。FOM 体现了传感结构的灵敏度  $S_\lambda$  和分辨率  $dT/d\lambda$ 。由于 Fano 共振所形成的共振峰尖锐且共振峰透射系数陡降,故其分辨率变大,FOM



值增大,从而具有良好的传感性能。

### 3.1 结构参数 $R$ 对传感器 FOM 值的影响

对  $R$  进行参数化扫描,当  $g = 15 \text{ nm}$ 、 $t = 20 \text{ nm}$  时, $R$  对应的参数为  $288 \sim 322 \text{ nm}$ 。由图 4(a)可以看出:随着  $R$  增加,第一种模式和第二种模式的谐振峰都发生了红移,第二种模式的红移

较为明显,透射率也有所减小,第一种模式相对明显。由图 4(b)、(c)可以看出:随着  $R$  增加,第一种模式和第二种模式的 FOM 值均呈先增加后减小的趋势;当  $R = 310 \text{ nm}$  时,第一种模式的 FOM 值最大;当  $R = 300 \text{ nm}$  时,第二种模式的 FOM 值最大。

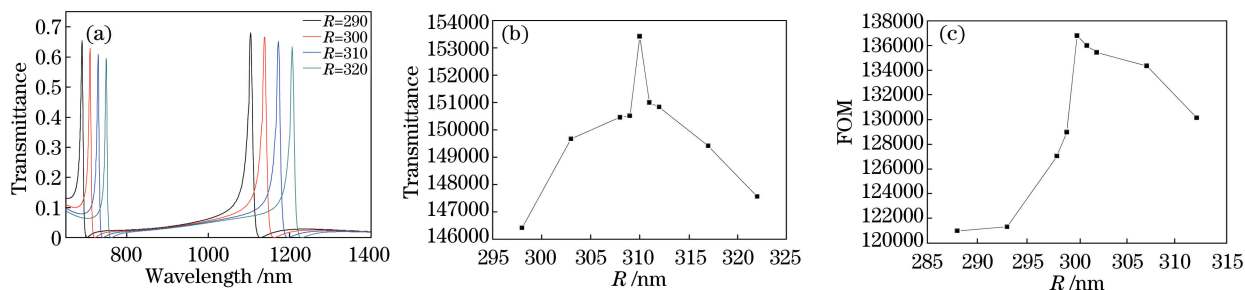


图 4 参数  $R$  对共振峰和 FOM 值的影响。(a)参数  $R$  对 Fano 共振峰的影响;

(b)第一种模式下,参数  $R$  对 FOM 值的影响;(c)第二种模式下,参数  $R$  对 FOM 值的影响

Fig. 4 Effects of parameter  $R$  on resonance peak and FOM value. (a) Effect of parameter  $R$  on Fano resonance peaks;

(b) effect of parameter  $R$  on FOM values at the first mode; (c) effect of parameter  $R$  on FOM values at the second mode

### 3.2 结构参数 $g$ 对传感器 FOM 值的影响

对  $g$  进行参数化扫描,当  $R = 300 \text{ nm}$ 、 $t = 20 \text{ nm}$  时,参数  $g$  为  $11 \sim 17 \text{ nm}$ 。由图 5(a)所示的参数  $g$  对 Fano 共振峰的影响可以看出,随着  $g$  增大,共振峰变窄,分辨率变高,但共振峰的透射率变

小。由图 5(b)所示的参数  $g$  对 FOM 值的影响可以看出:随着  $g$  增加,第一种模式和第二种模式下的 FOM 值均呈先增加后减小的趋势;在第一种模式下,当  $g = 13 \text{ nm}$  时,FOM 值最大;在第二种模式下,当  $g = 15 \text{ nm}$  时,FOM 值最大。

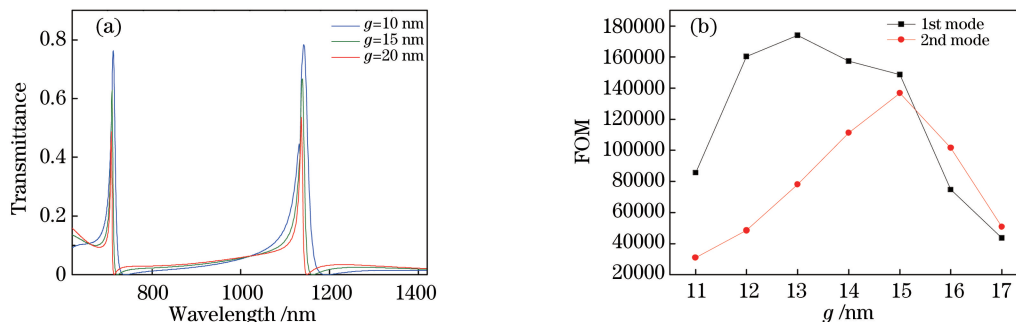


图 5 参数  $g$  对共振峰和 FOM 值的影响。(a)参数  $g$  对 Fano 共振峰的影响;(b)参数  $g$  对 FOM 值的影响

Fig. 5 Effects of parameter  $g$  on resonance peak and FOM values. (a) Effects of parameters  $g$  on Fano resonance peak;

(b) effects of parameter  $g$  on FOM values

### 3.3 优化结构参数后的传感性能

通过对  $R$  和  $g$  参数扫描可以看出:当  $R = 310 \text{ nm}$  和  $g = 13 \text{ nm}$  时,第一种模式下的 FOM 值得到最大优化;当  $R = 300 \text{ nm}$  和  $g = 15 \text{ nm}$  时,第二种模式下的 FOM 值得到最大优化。图 6(a)为第一种模式下参数最优时不同波长对应的 FOM 值,可以看出,FOM 值最大可达  $1.7 \times 10^5$ 。图 6(b)为第二种模式下参数最优时,不同波长对应的 FOM 值,可以看出,FOM 值最大可达  $1.36 \times 10^5$ 。

对优化后的结构进行传感特性分析,结果如图

7 所示,可以看出,随着环境折射率  $n$  增大,Fano 共振峰发生红移,并且其共振波长  $\lambda$  与环境折射率  $n$  具有良好的线性关系。通过计算得到第一种模式下的灵敏度  $S_\lambda$  为  $710 \text{ nm/RIU}$ ,第二种模式下的灵敏度  $S_\lambda$  为  $1105 \text{ nm/RIU}$ 。通过分析发现,两种模式都具有较好的折射率传感特性,但单从灵敏度的角度来说,第二种模式的传感效果更佳。

综上所述可知,结构参数  $R$  和  $g$  对结构的传感性能具有调节作用,通过优化  $R$  和  $g$  可以得到良好的传感性能。

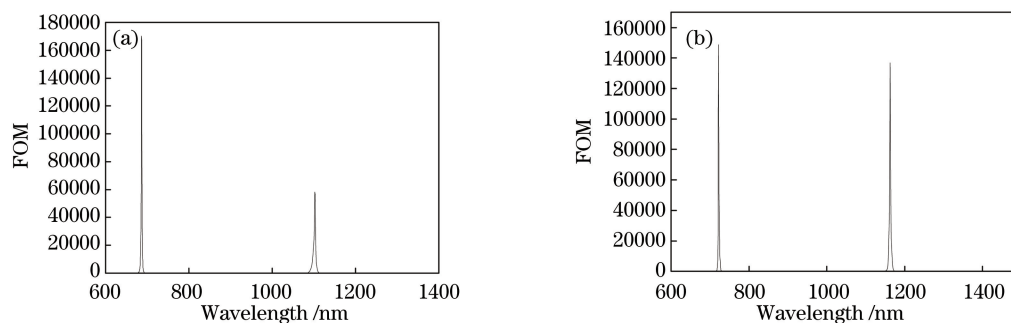


图 6 参数最优时,不同波长对应的 FOM 值。(a)第一种模式;(b)第二种模式

Fig. 6 FOM values at different wavelengths when parameters are optimal. (a) The first mode; (b) the second mode

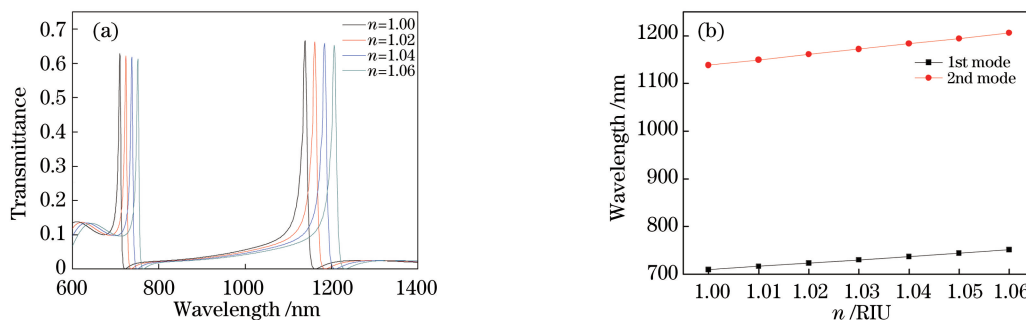


图 7 环境折射率  $n$  与共振波长  $\lambda$  的关系。(a)不同环境折射率  $n$  下的透射谱;(b)环境折射率  $n$  与共振波长  $\lambda$  的线性关系

Fig. 7 Relationship between environmental refractive index  $n$  and resonant wavelength  $\lambda$ . (a) Transmission spectra at different environmental refractive indices  $n$ ; (b) linear relationship between environmental refractive index  $n$  and resonant wavelength  $\lambda$

## 4 结 论

提出了一种单挡板 MDM 波导耦合圆盘腔结构,当有入射光照射在 MDM 波导结构上时,金属表面会产生 SPPs,其可突破衍射极限,在波导中传播。SPPs 可透过金属挡板形成较宽的连续态。同时,光信号进入圆盘腔中形成两个较窄的孤立态谐振谷,在近场作用下,其与连续态耦合形成两种不同模式的 Fano 共振峰。Fano 共振对结构参数和环境折射率十分敏感,改变环境折射率会使 Fano 共振波长发生红移,从而实现传感。通过调节结构参数  $R$  和  $g$ ,定量分析了传感性能,进而优化结构参数。当  $R=310\text{ nm}$ 、 $g=13\text{ nm}$  时,第一种模式下的结构参数处于最优,其 FOM 值可高达  $1.7 \times 10^5$ ,折射率灵敏度  $S_\lambda=710\text{ nm/RIU}$ ;当  $R=300\text{ nm}$ 、 $g=15\text{ nm}$  时,第二个模式下的结构参数处于最优,其 FOM 值可高达  $1.36 \times 10^5$ ,折射率灵敏度  $S_\lambda=1105\text{ nm/RIU}$ 。两种模式均具有较好的传感特性,因此该波导结构可为折射率传感以及差动式传感器的设计提供理论参考。

## 参 考 文 献

- [1] Li L X, Liang Y Z, Lu M D, *et al.* Fano resonances in thin metallic grating for refractive index sensing with high figure of merit[J]. *Plasmonics*, 2016, 11 (1): 139-149.
- [2] Luk'yanchuk B, Zheludev N I, Maier S A, *et al.* The Fano resonance in plasmonic nanostructures and metamaterials[J]. *Nature Materials*, 2010, 9(9): 707-715.
- [3] Wang G C, Shen A, Zhao C Y, *et al.* Fano-resonance-based ultra-high-resolution ratio-metric wavelength monitor on silicon [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(3): 544-547.
- [4] Chen Y, Luo P, Tian Y N, *et al.* Fano resonance slow light characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupled ring cavity with metallic double-slit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0924002. 陈颖, 罗佩, 田亚宁, 等. 含金属双缝的金属-电介质-金属波导耦合环形腔 Fano 共振慢光特性研究 [J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0924002.
- [5] Fang J W, Zhang M, Zhang F, *et al.* Plasmonic sensor based on Fano resonance[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(2): 221-225, 239.

- 方佳文, 张明, 张飞, 等. 基于 Fano 共振的等离子体共振传感器 [J]. 光电工程, 2017, 44(2): 221-225, 239.
- [6] Zhao H, Song Q, Sun H L, *et al.* Study on transmission characteristics of a hybrid triangle wedge surface plasmonic polaritons waveguide with subwavelength mode confinement [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091301.
- 赵海, 宋卿, 孙海丽, 等. 一种具有亚波长模式限制的三角楔形混合表面等离子激元波导传输特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091301.
- [7] Zhan Y H, Lei D Y, Li X F, *et al.* Plasmonic Fano resonances in nanohole quadruplers for ultra-sensitive refractive index sensing[J]. Nanoscale, 2014, 6(9): 4705-4715.
- [8] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 83-91.
- [9] Zhao W, Ju D Q, Jiang Y Y. Sharp Fano resonance within bi-periodic silver particle array and its application as plasmonic sensor with ultra-high figure of merit[J]. Plasmonics, 2015, 10(2): 469-474.
- [10] Wei P W, Lee K L. Tunable Fano resonance in two-layer gold nanoslit array and its application for highly sensitive biosensors[C]. JSAP-OSA Joint Symposia, 2014: 18a\_C4\_3.
- [11] Klimov V V, Pavlov A A, Treshin I V, *et al.* Fano resonances in a photonic crystal covered with a perforated gold film and its application to bio-sensing [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(28): 285101.
- [12] Zhang Z D, Wang R B, Zhang Z Y, *et al.* Electromagnetically induced transparency and refractive index sensing for a plasmonic waveguide with a stub coupled ring resonator[J]. Plasmonics, 2017, 12(4): 1007-1013.
- [13] Chen Z, Yu L, Wang L L, *et al.* A refractive index nanosensor based on Fano resonance in the plasmonic waveguide system [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(16): 1695-1698.
- [14] Yang J H, Song X K, Chen Z, *et al.* Tunable multi-fano resonances in MDM-based side-coupled resonator system and its application in nanosensor [J]. Plasmonics, 2016, 12(6): 1665-1672.
- [15] Peng B, Özdemir S K, Chen W J, *et al.* What is and what is not electromagnetically induced transparency in whispering-gallery microcavities [J]. Nature Communications, 2014, 5: 5082.
- [16] Yang Y R, Guan J F. Numerical study of plasmonic filter based on metal-insulator-metal waveguide [J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(5): 057301.
- 杨韵茹, 关建飞. 基于金属-电介质-金属波导结构的等离子体滤波器的数值研究 [J]. 物理学报, 2016, 65(5): 057301.
- [17] Manolatu C, Khan M J, Fan S, *et al.* Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(9): 1322-1331.
- [18] Suh W, Wang Z, Fan S H. Temporal coupled-mode theory and the presence of non-orthogonal modes in lossless multimode cavities [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2004, 40(10): 1511-1518.
- [19] Bertolotti M. Waves and fields in optoelectronics[J]. Optical Acta, 1985, 32(7): 748.
- [20] Becker J, Trügler A, Jakab A, *et al.* The optimal aspect ratio of gold nanorods for plasmonic bio-sensing[J]. Plasmonics, 2010, 5(2): 161-167.