

doi: 10.3788/gzxb20164508.0823002

# 基于半圆形与矩形谐振腔耦合结构的 Fano 共振

陈慧斌<sup>a,b,c</sup>, 张志东<sup>a,b</sup>, 闫树斌<sup>a,b</sup>, 焦国太<sup>c</sup>

(中北大学 a 电子测试技术国家重点实验室; b 仪器科学与动态测试教育部重点实验室; c 机电工程学院, 太原 030051)

**摘 要:**设计了一种基于金属-介质-金属波导的半圆形谐振腔与矩形谐振腔的耦合结构,采用有限元方法研究了该结构的传播特性.结果表明:透射光谱中产生一个类似 Fano 共振线型的共振谷,该 Fano 共振由半圆形谐振腔的宽谱共振和矩形谐振腔的窄谱共振相互耦合所导致.变化谐振腔的结构参量,发现该 Fano 共振谷位置依赖于矩形谐振腔的几何参量,而对两谐振腔相对位置的微小移动不敏感;同时,改变两谐振腔的并联方式,研究了两种衍生结构的传播特性,发现这些结构均可产生明显的 Fano 共振.此外,通过在谐振腔中填充不同折射率的介质材料,研究了三种结构基于 Fano 共振效应的折射率传感特性,其折射率敏感度最高达到 750 nm/RIU. 研究结果可为未来芯片上基于表面等离极化激元波导的高灵敏折射率传感器的设计提供理论依据.

**关键词:**表面等离激元; 纳米传感器; 有限元法; Fano 共振; 谐振腔; 波导

中图分类号: O436

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0823002-6

## Fano Resonance Based on a Rectangular Cavity Coupled with a Semi-circular Cavity

CHEN Hui-bin<sup>a,b,c</sup>, ZHANG Zhi-dong<sup>a,b</sup>, YAN Shu-bin<sup>a,b</sup>, JIAO Guo-tai<sup>c</sup>

(a Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory; b Key Laboratory of

Instrumentation Science and Dynamic Measurement (Ministry of Education);

c College of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** A plasmonic structure consisting of a metal-insulator-metal waveguide, a rectangular cavity and a semi-circular cavity was proposed to investigate the transmission properties by the finite-element method. Simulation results show that there is a sharp and asymmetric Fano profile in transmission spectrum, which is due to the interaction of the local discrete state and the continuous spectrum caused by the rectangular cavity and the semi-circular cavity, respectively. After changing the parameters of cavities, it was found that this Fano resonance position exhibits dependence on the parameters of the rectangular cavity, while is not sensitive to the tiny movement between the two resonators. Meanwhile, the propagation properties of two derivative structures were also studied by changing the mix of two resonators, and the transmission spectrums of these structures can exhibit a sharp and asymmetric Fano profile. In addition, the application of these structures in sensors was also studied by filled the cavities with different refractive index materials, the maximum sensitivity value of which is up to 750 nm/RIU. These studies will provide some theoretical basis for the future high sensitive microchip sensor based on surface plasmon polaritons waveguide.

**Key words:** Surface plasmon polaritons; Nanosensors; Finite element method; Fano resonance; Resonator; Waveguide

**OCIS Codes:** 230.4555; 250.5403; 240.6680; 280.4788

## 0 引言

表面等离极化激元 (Surface Plasmon Polaritons,

SPPs) 是金属表面自由电子与光子相互作用产生的沿着金属表面传播的电荷密度波, 其光场振幅在垂直界面方向以指数形式衰减. 因此, SPPs 只在金属和介质

**基金项目:** 国家自然科学基金 (No. 61275166)、中北大学自然科学基金 (No. 110246)、山西省高等院校中青年创新人才培养计划、中北大学杰出青年基金和中北大学研究生科技基金 (No. 20151207) 资助

**第一作者:** 陈慧斌 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳光子学. Email: Bin\_Shuang\_1017@163.com

**导师 (通讯作者):** 焦国太 (1965-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为机器人与传感器技术. Email: jgtx@nuc.edu.cn

**收稿日期:** 2016-04-13; **录用日期:** 2016-07-05

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

界面上传播,从而突破传统光学衍射极限<sup>[1-2]</sup>.由于SPPs具有更小的模式尺寸,故其非常有希望作为高密度光子集成回路的信息载体,实现纳米量级的光操纵、传输、处理及控制<sup>[3]</sup>.基于SPPs的波导结构已经得到广泛的研究,其中,金属-介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)波导因具有局域能力强、传播长度可接受的优点被用于设计各种光子学器件,如滤波器<sup>[4]</sup>、整流器<sup>[5]</sup>、二极管<sup>[6]</sup>、传感器<sup>[7]</sup>等.

随着纳米技术的发展,片上高灵敏检测技术将成为未来传感器的重要研究方向<sup>[8]</sup>.近年来,基于MIM波导耦合谐振腔所产生的,如Fano共振、等离子元诱导透明等光学现象对周围介质异常地敏感<sup>[9-10]</sup>.因此,借助这些新的光学现象设计易集成的片上高灵敏SPPs传感器成为国内外的研究热点<sup>[11-12]</sup>.其中,Fano共振是一种新奇的量子共振效应,其源于原子系统中一个分立的激发态能级与一个连续的激发态能级相互重叠并形成量子干涉,在特定的频段产生零吸收现象,进而在原子系统的光谱中呈现出非对称线型<sup>[13]</sup>,谱线的非对称程度可由非对称参量 $q$ 表征,其值等于连续态与分立态的激发概率之比<sup>[14]</sup>.通过合理的结构设计,窄线宽共振和宽线宽共振的相互干涉实现了基于MIM波导耦合谐振腔结构的Fano共振效应,且可以通过改变谐振腔材料和几何参量改变 $q$ 值<sup>[15]</sup>.片上高灵敏传感器正是利用Fano共振这种非对称线型共振峰(谷)对结构参量、周围介质环境微小变化的敏感性实现高灵敏的检测,同时优化谐振腔几何参量可以进一步提高传感器灵敏度<sup>[16]</sup>.基于这一原理,多个小组研究了波导耦合谐振腔结构的Fano共振效应和折射率传感性能,包括:波导与矩形谐振腔的对称结构<sup>[17]</sup>、波导与矩形谐振腔的非对称结构<sup>[18]</sup>、波导与圆环谐振腔结构<sup>[19]</sup>、波导中添加金属间隙与矩形的耦合结构<sup>[20]</sup>等,这些研究成果不仅帮助人们更好地理解Fano共振,同时为高灵敏传感器的实现提供了可行方案.

本文针对MIM波导与半圆形和矩形谐振腔并联组成的耦合结构,采用有限元方法研究了其传播特性和谐振腔中的共振模式分布,并通过改变半圆形谐振腔和矩形谐振腔的结构参量和它们之间的并联方式研究其传播特性及折射率敏感特性.

## 1 结构与计算方法

图1为设计的MIM波导、半圆谐振腔与矩形谐振腔的耦合结构示意图.利用矩形谐振腔的位置特征,将其命名为“上垂直耦合”结构.两谐振腔的竖直对称轴重合,耦合间距 $g=10$  nm.波导和矩形谐振腔的宽度 $w$ 均为50 nm,以保证波导中只有横向磁场的基模(TM<sub>0</sub> mode)传播<sup>[21]</sup>,半圆谐振腔半径记为 $R$ ,矩形谐振腔高度记为 $D$ .图1中白色部分表示波导和谐振腔,

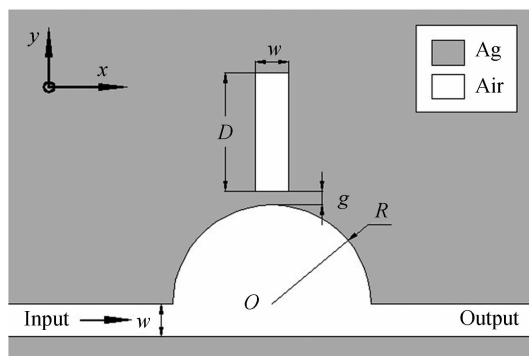


图1 上垂直耦合结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure placing the rectangular cavity above the semi-circular cavity vertically

填充介质为空气(介电常数为1).灰色部分表示金属银,其介电常数与入射光的频率有关,采用修正后的Debye-Drude模型描述<sup>[22-23]</sup>,即

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + (\epsilon_s - \epsilon_{\infty}) / (1 + i\omega\tau) + \sigma / i\omega\epsilon_0 \quad (1)$$

式中,无穷介电常数 $\epsilon_{\infty} = 3.8344$ ,静态介电常数 $\epsilon_s = -9530.5$ ,电导率 $\sigma = 1.1486 \times 10^{-7}$  S/m,弛豫时间 $\tau = 7.35 \times 10^{-15}$  s.应用基于有限元方法的COMSOL Multiphysics软件数值求解偏微分方程,从而获得不同入射光频率下波导耦合谐振腔结构的透射谱线,其透射率定义为

$$T = P_f / P_0 \quad (2)$$

式中, $P_0$ 为无谐振腔、左右直波导连通时从输出端透射的能流, $P_f$ 为有谐振腔时的透射能流.

## 2 结果与讨论

### 2.1 上垂直耦合结构传播特性及其折射率传感

图2给出了MIM波导与半圆形谐振腔耦合后的透射谱线,该谱线没有呈现出陡峭的非对称线型.在半圆谐振腔正上方耦合一矩形谐振腔后,透射光谱在波长 $\lambda=670$  nm处产生了一个谐振谷,其为典型的Fano

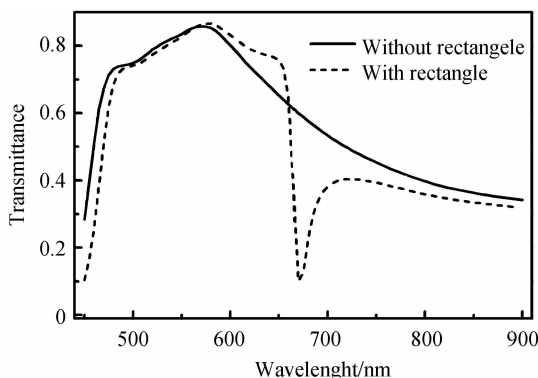


图2 图1结构中不存在矩形谐振腔和去掉矩形谐振腔透射谱线

Fig. 2 Transmission spectra of the structure (Fig. 1) with and without rectangular cavity

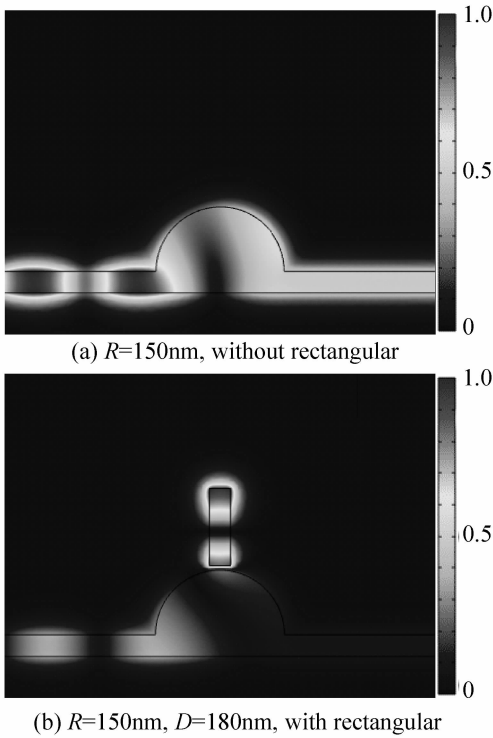
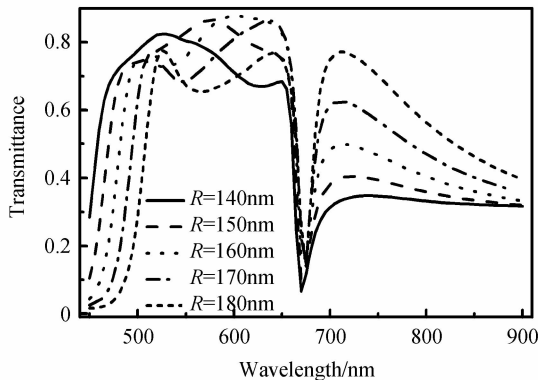


图 3  $\lambda=670\text{ nm}$  归一化磁场分布对比

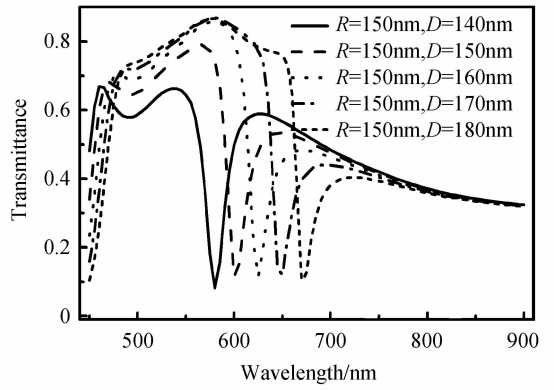
Fig. 3 The normalized magnetic field ( $|Hz|^2$ ) distributions at  $\lambda=670\text{ nm}$

共振线型. 为分析谱线发生变化的内部机理, 研究了两条谱线在  $\lambda=670\text{ nm}$  处的磁场分布, 如图 3. 对比磁场分布图可以发现, 该波长的光在耦合到矩形谐振腔后发生了明显的共振, 产生了明显的局域光场作用, 使得原本能够透射的光波被限制在矩形谐振腔内, 从而在透射端产生了一个谐振谷. 分析表明, 该 Fano 共振是由半圆形谐振腔产生的宽谱谐振和矩形腔产生的窄谱谐振耦合所导致.

为了研究谐振腔几何尺寸对该耦合结构传播特性的影响, 分别变化半圆谐振腔半径  $R$  和矩形谐振腔高度  $D$  以对比不同几何尺寸下结构的透射谱线. 图 4(a) 给出了  $D$  固定为  $180\text{ nm}$ ,  $R$  由  $140\text{ nm}$  增加到  $180\text{ nm}$  (间隔为  $10\text{ nm}$ ) 的透射谱线. 由图 4(a) 可以看出半圆谐振腔半径  $R$  的增大降低了谱线的非对称性; 谐振谷



(a) Different  $R$  with fixed  $D=180\text{ nm}$

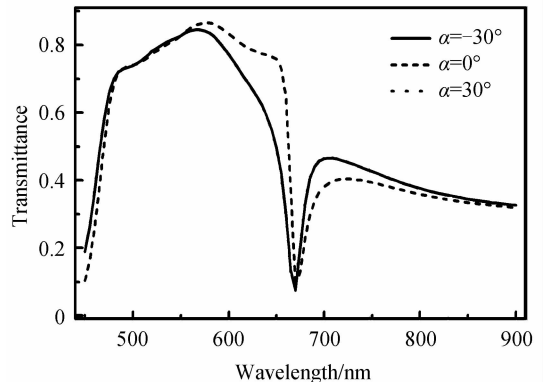


(b) Different  $D$  with fixed  $R=150\text{ nm}$

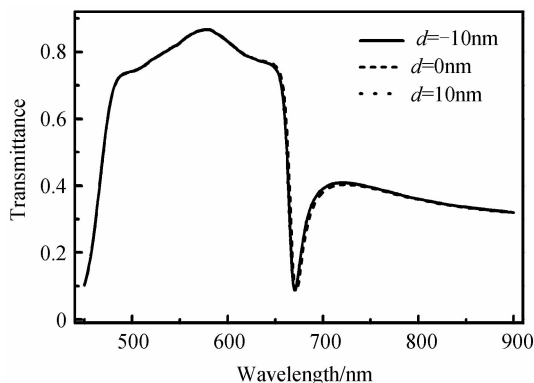
图 4 不同几何参量, 上垂直耦合结构透射谱线对比  
Fig. 4 Transmission spectra of the structure placing the rectangular cavity above the semi-circular cavity vertically with different geometric parameters

左侧波段保持着高透射率, 右侧波段透射率明显增加, 且 Fano 共振的谐振谷没有移动. 当固定  $R=150\text{ nm}$ , 改变矩形谐振腔的高度  $D$ , 获得了  $D$  由  $140\text{ nm}$  增加到  $180\text{ nm}$ , 每隔  $10\text{ nm}$  的透射谱线, 如图 4(b). 可以发现, 随着  $D$  的等间距增大, 谐振谷发生了等间距的红移. 该结构的 Fano 共振谷是由半圆谐振腔产生的宽谱谐振和矩形谐振腔产生的窄谱谐振干涉相消所导致, 其共振谷位置由窄谱谐振决定.  $D$  的增大导致了窄谱谐振波长的增加, 进而引起 Fano 共振谷的红移.

为了研究矩形谐振腔相对半圆谐振腔的微小位移对该结构传播特性的影响, 分别考虑两种情形: 1) 矩形谐振腔相对半圆谐振腔圆心  $O$  的旋转; 2) 矩形谐振腔相对半圆谐振腔的水平移动. 在情形 1) 条件下, 假定逆时针旋转为负, 顺时针旋转为正, 研究了旋转角度  $\alpha=-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$  的透射谱线. 图 5(a) 的谱线表明谐振谷的位置对矩形谐振腔相对圆心  $O$  的旋转并不敏感, 且由于该结构的对称性, 顺时针和逆时针在相同旋转角度的透射谱线重合; 在情形 2) 条件下, 假定偏离中心线左侧为负, 右侧为正, 图 5(b) 给出了偏移距离  $d=-10\text{ nm}, 0\text{ nm}, 10\text{ nm}$  的透射谱线. 可以看出, 左右移动下谐振谷位置基本不变, 而透射率略微增加. 这是因



(a) Rotary motion:  $\alpha=-30^\circ, 0^\circ, 30^\circ$



(b) Rotary motion:  $d=-10\text{nm}, 0\text{nm}, 10\text{nm}$

图5 矩形谐振腔相对半圆谐振腔的微小位移下的透射谱线  
Fig. 5 Transmission spectra of the optical system after the tiny displacement of two cavities

为矩形谐振腔的左右移动增大了两谐振腔的耦合间距,导致耦合进入矩形谐振腔的 SPPs 减少,透射的 SPPs 增加,进而表现为透射率的增加,而耦合间距并不影响 Fano 共振谷的位置。

基于传播特性,将这一结构应用于折射率传感器. 传感器灵敏度定义为每单位折射率变化引起的共振谷(峰)波长的移动. 该结构的共振谷位置由矩形谐振腔的窄谱共振决定,在不改变矩形谐振腔宽度条件下,窄谱共振波长由矩形谐振腔参量  $D$  唯一决定,即参量  $D$  决定了传感器的灵敏度. 图 6 给出了  $R=150\text{ nm}$ ,  $D$  由  $140\text{ nm}$  增加到  $180\text{ nm}$ (间隔  $10\text{ nm}$ ) 的灵敏度变化. 由图 6 可以看出,随着  $D$  的增大传感器灵敏度逐渐增加,且二者基本呈线性关系.  $D$  的增大可进一步提高灵敏度,但会导致谐振谷右侧透射率的减小,这将不利于实际应用中 对 噪 音 干 扰 的 抵 抗. 选 择 结 构 参 量  $R=150\text{ nm}$  和  $D=180\text{ nm}$  来研究折射率变化对透射谱线的影响. 图 7 给出了在矩形谐振腔内折射率  $n=1.00\sim 1.20$ (间隔为  $0.05$ ) 的透射谱线,随着折射率的增大,透射谱线发生了等间距的红移. 计算表明,该尺寸下的灵敏度为  $625\text{ nm}/\text{RIU}$ . 品质因子 (Figure of Merit,

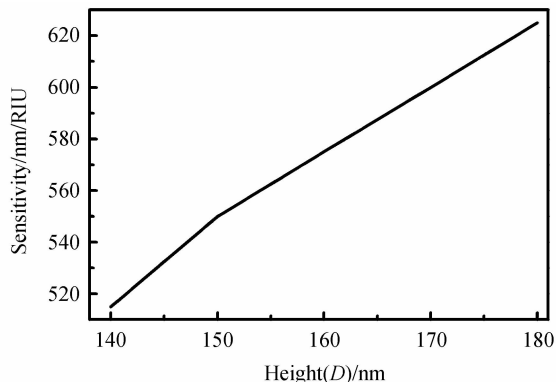


图 6 灵敏度随参量  $D$  的变化曲线

Fig. 6 The curve of sensitivity with the change of the structure parameter  $D$

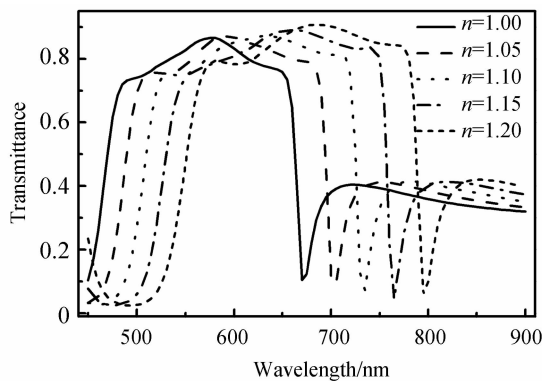


图 7  $R=150\text{ nm}, D=180\text{ nm}$ , 不同折射率  $n$  的透射谱线  
Fig. 7 The transmission spectrum for different refractive indexes  $n$ , when  $R=150\text{ nm}, D=180\text{ nm}$

FOM)是传感器另一重要性能参量,其定义为<sup>[24]</sup>

$$\text{FOM} = \Delta T / (T \Delta n) \quad (3)$$

式中  $T$  为透射率,计算表明该尺寸下最大 FOM 值为 302.

## 2.2 上水平耦合结构传播特性及其折射率传感

通过改变两谐振腔的相对位置及耦合模式,研究了 MIM 波导、半圆谐振腔和矩形谐振腔的两种衍生结构的传播特性. 如图 8,矩形谐振腔水平放置于半圆谐振腔正上方,将这一结构命名为“上水平耦合”,矩形谐振腔长度记为  $L$ . 图 9 给出了  $R=150\text{ nm}$ ,  $L$  由

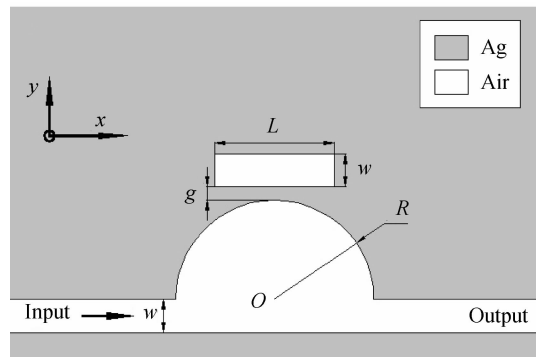


图 8 上水平耦合结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the structure placing the rectangular cavity above the semi-circular cavity horizontally

$180\text{ nm}$ 增加到  $220\text{ nm}$ (间隔为  $10\text{ nm}$ ) 的透射谱线. 随着  $L$  的增大谐振谷发生了等间距的红移,其与上垂直耦合结构参量  $D$  的增大引起谱线红移的原因相同. 图 10(a)、(b)分别是  $R=150\text{ nm}, L=180\text{ nm}$  尺寸下,波长  $\lambda=635\text{ nm}$ (共振谷)和  $\lambda=650\text{ nm}$ (共振峰)的磁场分布. 可以看出,共振谷到共振峰的波长变化下,透射光强发生了明显增加,表现出 Fano 共振透射谱线的陡峭特性. 对比分析可知,该结构的 Fano 共振产生机理与上垂直耦合结构完全相同. 计算表明,其对折射率变化的灵敏度为  $600\text{ nm}/\text{RIU}$ .

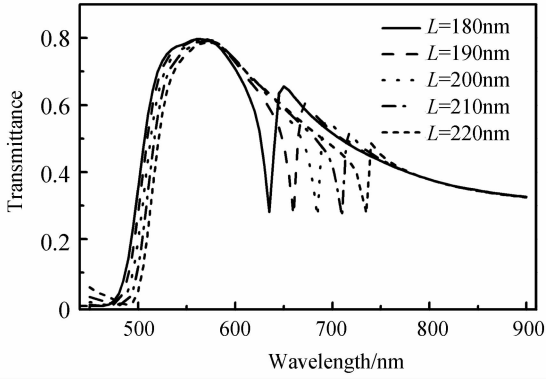


图 9  $R=150\text{ nm}$  不同参量  $L$ ,透射谱线对比  
Fig. 9 Transmission spectra of the optical system for different  $L$  with  $R=150\text{ nm}$

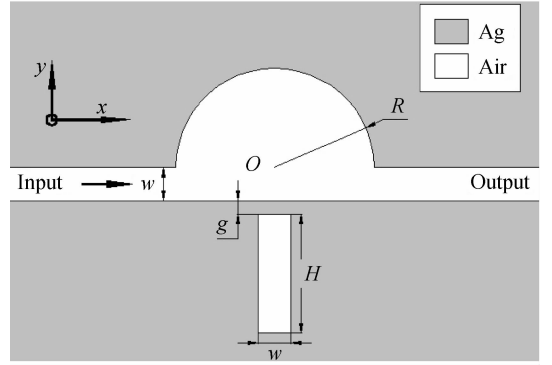
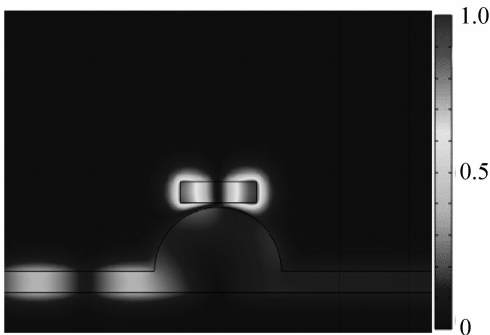
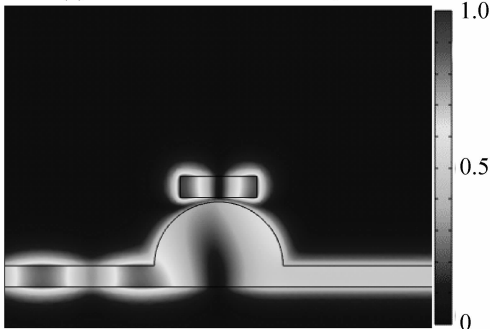


图 11 下垂直耦合结构示意图  
Fig. 11 Schematic diagram of the structure placing the rectangular cavity under the semi-circular cavity vertically



(a)  $\lambda=635\text{ nm}$  with  $R=150\text{ nm}$ ,  $L=180\text{ nm}$



(b)  $\lambda=650\text{ nm}$  with  $R=150\text{ nm}$ ,  $H=180\text{ nm}$

图 10  $\lambda=635\text{ nm}$  和  $650\text{ nm}$  的磁场分布  
Fig. 10 The normalized magnetic field ( $|Hz|^2$ ) distributions at  $\lambda=635\text{ nm}$  and  $\lambda=650\text{ nm}$

### 2.3 下垂直耦合结构传播特性及其折射率传感

图 11 为矩形谐振腔竖直放置于半圆谐振腔正下方结构示意图,将这一结构命名为“下垂直耦合”,矩形谐振腔的高度记为  $H$ . 固定  $R=150\text{ nm}$ ,  $H$  由  $190\text{ nm}$  增加到  $230\text{ nm}$ (间隔  $10\text{ nm}$ ), 相应的透射谱线如图 12. 可以看出,  $H$  的增加导致了谐振谷等间距的红移, 其红移原因与上垂直耦合结构参量  $D$  和上水平耦合结构参量  $L$  的增加导致谐振谷红移的原因相同. 图 13(a)、(b)分别为结构尺寸  $R=150\text{ nm}$ ,  $H=230\text{ nm}$  时, 波长  $\lambda=790\text{ nm}$  和  $800\text{ nm}$  的磁场分布, 其谐振谷磁场分布与图 3(b)、图 10(a)相似, 都在矩形谐振腔中产生了明显的共振, 在透射谱线中产生了谐振谷, 该尺寸下折射率灵敏度为  $750\text{ nm}/\text{RIU}$ .

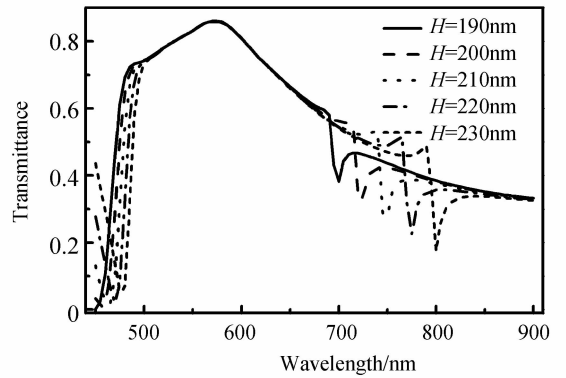
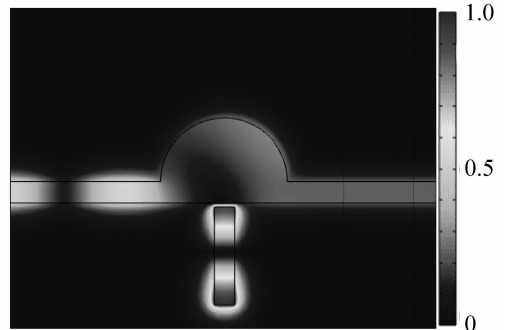
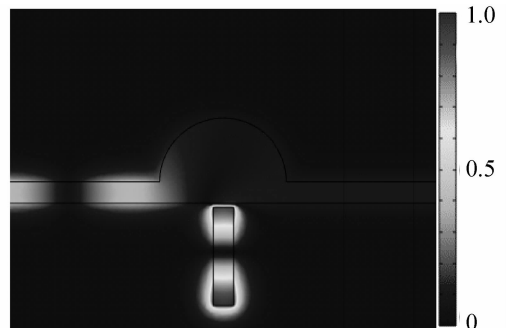


图 12  $R=150\text{ nm}$  不同参量  $H$ ,透射谱线对比  
Fig. 12 Transmission spectra of the optical system for different  $H$  with  $R=150\text{ nm}$



(a)  $\lambda=790\text{ nm}$  with  $R=150\text{ nm}$ ,  $H=230\text{ nm}$



(b)  $\lambda=800\text{ nm}$  with  $R=150\text{ nm}$ ,  $H=230\text{ nm}$

图 13  $\lambda=790\text{ nm}$  和  $800\text{ nm}$  的磁场分布  
Fig. 13 The normalized magnetic field ( $|Hz|^2$ ) distributions at  $\lambda=790\text{ nm}$  and  $\lambda=800\text{ nm}$

### 3 结论

本文应用有限元方法研究了基于 MIM 波导的半圆形与矩形谐振腔耦合后的透射特性. 结果发现, 上垂直耦合结构产生了明显的 Fano 共振, 对其传播特性的研究表明, 谐振谷的位置依赖于矩形谐振腔的几何参量, 而对两谐振腔相对位置的微小变化不敏感, 这种特性大大降低了微纳加工要求. 同时, 研究了另外两种衍生结构的传播特性. 这些结构均可产生明显的 Fano 共振, 其产生机理基本一致, 使得采用矩形谐振腔和半圆谐振腔的耦合获得 Fano 共振的结构布置方式更加灵活. 此外, 这些结构产生的 Fano 共振对周围介质折射率的变化极其敏感, 在兼顾高灵敏度和抗噪音性能下, 优化参量后器件的最高灵敏度达 750 nm/RIU. 研究结果对设计更加简单、高效、易加工的片上高灵敏微纳传感器有指导意义.

#### 参考文献

- [1] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 824-830.
- [2] GRAMOTNEV D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 83-91.
- [3] JIANG Ya-lan, WANG Ji-cheng, WANG Yue-ke, et al. A MIM surface plasmon T-splitter based on a stub structure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0923002.  
蒋亚兰, 王继成, 王跃科, 等. 一种带有支节的 MIM 型表面等离子体 T 型分束器[J]. *光子学报*, 2014, **43**(9): 0923002.
- [4] ZHANG Zhong-yue, WANG Jian-dong, ZHAO Ya-nan, et al. Numerical investigation of a branch-shaped filter based on metal-insulator-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2011, **6**(4): 773-778.
- [5] XU Yi, WANG Xiao-meng, DENG Hai-dong, et al. Tunable all-optical plasmonic rectifier in nanoscale metal - insulator - metal waveguides[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(20): 5846-5849.
- [6] FAN Cai-rong, SHI Feng-hua, CHEN Yi-hang, et al. Tunable all-optical plasmonic diode based on Fano resonance in nonlinear waveguide coupled with cavities[J]. *Optics Letters*, 2015, **40**(11): 2449-2452.
- [7] WU Tie-sheng, LIU Yu-min, YU Zhong-yuan, et al. The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(7): 7669-7677.
- [8] TONG Lian-ming, WEI Hong, ZHANG Shun-ping, et al. Recent advances in plasmonic sensors[J]. *Sensors*, 2014, **14**(5): 7959-7973.
- [9] PIAO X, YU S, PARK N. Control of Fano asymmetry in plasmon induced transparency and its application to plasmonic waveguide modulator[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(17): 18994-18999.
- [10] LU Hua, LIU Xue-ming, MAO Dong, et al. Induced transparency in nanoscale plasmonic resonator systems[J].

- Optics Letters*, 2011, **36**(16): 3233-3235.
- [11] ZHANG Shun-ping, BAO Kui, HALAS N J, et al. Substrate-induced Fano resonances of a plasmonic nanocube: a route to increased-sensitivity localized surface plasmon resonance sensors revealed[J]. *Nano Letters*, 2011, **11**(4): 1657-1663.
- [12] LU Hua, LIU Xue-ming, MAO Dong, et al. Plasmonic nanosensor based on Fano resonance in waveguide-coupled resonators[J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(18): 3780-3782.
- [13] 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.
- [14] GALLINET B, MARTIN O J. Relation between near field and far field properties of plasmonic Fano resonances[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(22): 22167-22175.
- [15] MIROSHNICHENKO A E, FLACH S, KIVSHAR Y S. Fano resonances in nanoscale structures[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, **82**(3): 2257-2298.
- [16] LOU Xiao-wei, CUI Jin-jiang, DONG Ning-ning, 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.
- [17] CHEN Zong-qiang, QI Ji-wei, CHEN Jing, et al. Fano resonance based on multimode interference in symmetric plasmonic structures and its applications in plasmonic nanosensors[J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(5): 1219-1233.
- [18] QI Ji-wei, CHEN Zong-qiang, CHEN Jing, et al. Independently tunable double Fano resonances in asymmetric MIM waveguide structure[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(12): 14688-14695.
- [19] YAN Shu-bin, LUO Liang, XUE Chen-yang, et al. A refractive index sensor based on a metal-insulator-metal waveguide-coupled ring resonator[J]. *Sensors*, 2015, **15**(11): 29183-29191.
- [20] CHEN Zhao, SONG Xiao-kang, DUAN Gao-yan, et al. Multiple Fano resonances control in MIM side-coupled cavities systems[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, **7**(3): 1-10.
- [21] KEKATPURE R D, HRYCIW A C, BARNARD E S, et al. Solving dielectric and plasmonic waveguide dispersion relations on a pocket calculator[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 24112-24129.
- [22] GAI Hong-feng, WANG Jia, TIAN Qian. Modified Debye model parameters of metals applicable for broadband calculations[J]. *Applied Optics*, 2007, **46**(12): 2229-2233.
- [23] ZHOU Ji, HE Zhi-hong, YU Xiao-jun, et al. Optical transmission and electrical modulation for silicone semiconductor with multi-field effect[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(1): 63-73.  
周吉, 贺志宏, 于孝军, 等. 硅基半导体多场耦合下的光传输及电调控特性分析[J]. *发光学报*, 2016, **37**(1): 63-73.
- [24] CHEN Jian-jun, LI Zhi, ZOU Yu-jiao, et al. Coupled-resonator-induced fano resonances for plasmonic sensing with ultra-high figure of merits[J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(4): 1627-1631.

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No. 61275166), the Natural Science Research Foundation of North University of China (No. 110246), Program for the Top Young and Middle-aged Innovative Talents of Higher Learning Institutions of Shan'xi, and the North University of China Science Fund for Distinguished Young Scholars, Graduate Science & Technology Foundation of North University of China (No. 20151207)