

含矩形腔的 MIM 波导耦合 T 型腔结构 Fano 共振 传感特性研究

陈颖^{1*}, 许扬眉¹, 高新贝¹, 曹景刚¹, 谢进朝¹, 朱奇光², 李少华³

¹燕山大学电气工程学院测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

²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;

³河北先河环保科技股份有限公司, 河北 石家庄 050000

摘要 基于表面等离子激元在亚波长结构的传播特性,提出了一种含矩形腔的金属-介质-金属(MIM)波导与 T 型腔耦合的结构。T 型腔形成的较窄离散态与矩形腔形成的较宽连续态相互耦合,经过干涉相消形成 Fano 共振。采用耦合模理论,分析了 Fano 共振的形成机理;运用有限元分析法对该结构进行模拟仿真,分析结构参数对其折射率传感特性的影响。结果表明,经过结构参数的优化,其优质因子可达 6.04×10^4 ,灵敏度为 1120 nm/RIU,该研究结果可为光子回路的集成及纳米级传感器的设计提供理论参考。

关键词 表面光学; 表面等离子激元; 波导; 矩形腔; T 型腔; Fano 共振

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0113001

Fano Resonance Sensing Characteristics of MIM Waveguide Coupled T-Shaped Cavity Structure with Rectangular Cavity

Chen Ying^{1*}, Xu Yangmei¹, Gao Xinbei¹, Cao Jinggang¹, Xie Jinchao¹,
Zhu Qiguang², Li Shaohua³

¹Key Laboratory for Test/Masurement Technology and Instrument of Hebei Province, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

²Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

³Hebei Sailhero Environmental Protection Hi-tech Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050000, China

Abstract A T-shaped cavity coupled metal-insulator-metal (MIM) waveguide structure with a rectangle cavity is proposed based on the transmission characteristics of surface plasmon polaritons (SPPs) in a sub-wavelength structure. The Fano resonance occurs due to the destructive interference between the narrow discrete state formed by the T-shaped cavity and the broad continuous state formed by the rectangular cavity. The coupled mode theory (CMT) is adopted to analyze the formation mechanism of Fano resonance. The finite element method is used to simulate this structure and analyze the influences of structural parameters on its refractive index sensing characteristics. The results show that after the optimization of structural parameters, its figure of merit is 6.04×10^4 , and the sensitivity is 1120 nm/RIU. This research can provide a theoretical reference for the integration of photonic circuits and the design of nanoscale sensors in the future.

Key words surface optics; surface plasmon polaritons; waveguide; rectangular cavity; T-shaped cavity; Fano resonance

OCIS codes 240.6680; 240.6700; 230.7370; 230.4555; 130.6010

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-08-13; 录用日期: 2018-08-28

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)、中国博士后基金(2018M630279)、河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2018243)

* E-mail: chenying@ysu.edu.cn

1 引 言

表面等离子激元(SPPs)是电磁波与金属表面的自由电子相互作用而产生的一种集体振荡形式,可突破衍射极限,实现光的亚波长尺寸操控,为光子回路的集成提供了可能^[1-2]。金属-绝缘体-金属(MIM)波导具有传输距离远、损耗低、易于制备等优点,受到了国内外学者的广泛关注,目前已成为传感器领域的研究热点之一^[3]。各种基于 SPPs 的 MIM 波导结构已经被设计并制作出来,其中包含光分复用器^[4-5]、滤波器^[6]、光开关^[7]、布拉格发射器^[8]等。MIM 波导的金属表面所产生的 SPPs 对结构形态、属性、周围环境以及入射光的偏振态等十分敏感^[9],在生物传感器、光开关、纳米光刻技术等领域有着巨大的应用前景^[10]。

近年来,国内外学者已经对基于 MIM 波导设计的 Fano 共振传感结构进行了大量研究。吴敌等^[11]提出了一种带有支节的 MIM 直波导结构,并对慢光特性进行了研究,分析耦合间距、几何尺寸等参数对 Fano 共振峰的影响,结果表明该结构产生的 Fano 共振具有折射率传感的作用,其灵敏度约为 940 nm/RIU。Ren 等^[12]提出了一种带有缺口圆环的槽口 MIM 波导,分析折射率变化对 Fano 共振峰的影响。Yang 等^[13]提出了一种含金属挡板的金属-介质-金属(MDM)波导耦合方形腔结构,分析了方形腔摆放位置对 Fano 共振峰的影响及 Fano 共振形成的原因。已有的谐振腔研究主要集中在规则的矩形腔或者圆环腔,鲜有针对 T 型腔的研究,且上述研究都是通过改变谐振腔结构的某一参数来单一调节共振峰的位置,如果同一种结构既能实现共振峰位置的粗调,又实现共振峰位置的细调,其将会在纳米级折射率传感领域得到广泛的应用。

本文提出一种包含矩形腔 MIM 波导与 T 型腔

耦合的结构。当横磁(TM)波入射到波导结构时,将会在 MIM 界面上产生 SPPs,通过直波导进入矩形腔形成连续态,并在 T 型腔中形成离散态,两者在近场作用下相互耦合形成 Fano 共振。T 型腔由横腔和竖腔组成,且竖腔对共振峰漂移的灵敏程度大于横腔,利用这一特点可以实现对 Fano 共振峰的粗调和细调。结合耦合模理论对 Fano 共振的传输特性进行分析,并采用有限元分析法对结构进行模拟仿真,定量分析了耦合间距和横腔宽度对折射率传感特性的影响。

2 结构与建模

2.1 模型的建立

图 1(a)是包含矩形腔的 MIM 波导与 T 型腔耦合的结构示意图,其中,矩形腔位于直波导的中心位置,T 型腔位于矩形腔的正上方,为了增加耦合面积,矩形腔与 T 型腔横腔的宽度相同。运用法布里-珀罗(F-P)腔的特性对 T 型腔进行定性和定量分析,将 T 型腔等效成一对呈镜像对称的 L 型腔,其等效长度为 $L_{\text{neff}} = L_1/2 + H_2 + \omega/2$,其中 L_1 为 T 型腔的横腔宽度, H_2 为 T 型腔的竖腔高度, ω 为波导的宽度。在图 1(a)的结构示意图中,灰色部分和白色部分分别代表金属材料银(Ag)和非金属材料空气,且空气的折射率为 1。为了确保只有 TM 波在波导中传播,直波导的宽度、T 型腔的横腔宽度及竖腔高度均为 50 nm^[10]。结构参数 g 为矩形腔与 T 型腔之间的耦合距离,矩形腔的高度为 H_1 ,矩形腔的宽度和 T 型腔的横腔宽度均为 L_1 。Ag 的相对介电常数可用德鲁德(Drude)模型^[14]表示:

$$\epsilon_{\text{Ag}}(\omega) = \epsilon_{\infty} - \omega_{\text{p}}^2 / \omega(\omega + j\gamma), \quad (1)$$

式中:等离子振荡频率 $\omega_{\text{p}} = 1.38 \times 10^{16}$ rad/s;电子振荡频率 $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$ rad/s;无穷介电常数 $\epsilon_{\infty} = 3.7$; ω 为入射光的频率。

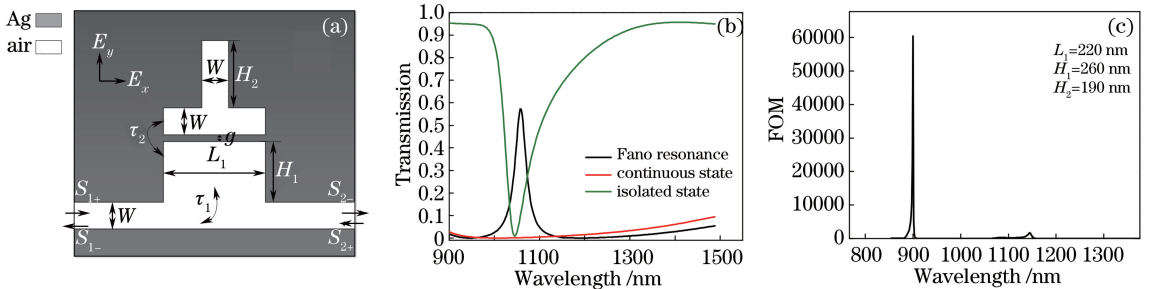


图 1 结构示意图及透射光谱图。(a)含 T 型腔的 MIM 波导结构;(b)透射光谱图;(c)优质因子(FOM)随波长的变化关系

Fig. 1 Structural diagram and transmission spectra. (a) T-shaped cavity coupled MIM waveguide structure; (b) transmission spectra; (c) FOM versus wavelength

TM 波在 MIM 光波导结构中的色散关系^[15]可以表示为

$$\epsilon_i k_2 + \epsilon_m k_1 \coth(-jk_1 \omega/2) = 0, \quad (2)$$

式中: $k_{1,2}^2 = \epsilon_{i,m} k_0^2 - (k_0 \text{Re } n_{\text{neff}})^2$ 为金属或介质的传播常数; $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为真空中的波数; $\text{Re } n_{\text{neff}}$ 为有效折射率的实部; ϵ_i 和 ϵ_m 分别为介质和金属的介电常数。仅含有矩形腔的 MIM 波导结构由于布拉格反射而产生连续态, 如图 1(b) 红色曲线所示, 而光波导直接耦合 T 型腔产生离散态, 如图 1(b) 绿色曲线所示; 亮暗两种模式相互耦合, 可形成 Fano 共振, 如图 1(b) 黑色曲线所示。根据驻波理论^[16], 可以得到有效长度 L_{neff} 与谐振波长 λ 的关系:

$$\lambda = 2L_{\text{neff}} \text{Re } n_{\text{neff}} / (m - \varphi/\pi), \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (3)$$

2.2 理论分析

当 TM 波入射到波导结构时, 将会在 MIM 的界面上产生 SPPs, 通过直波导能量可以直接耦合到矩形腔, 而 T 型腔中的能量可以通过矩形腔间接耦合进去, 其传输特性可用耦合模理论加以说明。 τ_0 为腔内的损失衰减率, τ_1 为光波导与矩形腔之间的耦合系数, τ_2 为 T 型腔与矩形腔之间的耦合系数; A_R 为矩形腔归一化后的振幅, A_T 为 T 型腔归一化后的振幅, 矩形腔和 T 型腔随时间的演化过程可表示为^[17]

$$j\omega A_R = (j\omega_R - \tau_0 - \tau_1 - \tau_2) A_R + \exp(j\theta) \times \sqrt{\tau_1} (S_{1+} + S_{2+}) - \exp(j\theta) \times \sqrt{\tau_2} A_T, \quad (4)$$

$$j\omega A_T = (j\omega_T - \tau_0 - \tau_2) A_T - \exp(j\theta) \times \sqrt{\tau_2} A_R, \quad (5)$$

式中: ω_R 和 ω_T 分别为矩形腔和 T 型腔的谐振频率; $S_{1+,2+}$ 和 $S_{1-,2-}$ (+, - 为两个波导模式的传播方向) 分别为波导中输入光和出射光的振幅, 由于输出端不存在反射现象, 故 $S_{2+} = 0$ 。根据能量守恒定律, 波导中的输入和输出关系可表示为

$$S_{2-} = S_{1+} + \exp(j\theta) \times \sqrt{\tau_1} A_R. \quad (6)$$

由于 τ_0 远远小于 τ_1 和 τ_2 , 故腔体内和直波导自身的损耗可忽略不计。将(4)~(6)式进行联立求解, 可以得出整个波导结构的透射率:

$$T = |S_{2-}/S_{1+}|^2 =$$

$$\left| \frac{j(\omega - \omega_R) + \tau_2 + \frac{\tau_2}{j(\omega - \omega_T) + \tau_2}}{j(\omega - \omega_R) + (\tau_2 + \tau_1) + \frac{\tau_2}{j(\omega - \omega_T) + \tau_2}} \right|^2. \quad (7)$$

由(7)式可知: 当 $\tau_2 = 0$ (无 T 型腔) 时, 整个波导结构的透射率为 $T = \left| \frac{j(\omega - \omega_R)}{j(\omega - \omega_R) + \tau_1} \right|^2$, 因此当 $\omega = \omega_R$ 时, 在连续态的曲线上将会出现透射率为零的现象。当入射光的频率与 T 型腔的频率相等时, 可以得到类电磁诱导透明(EIT)效应, 如图 1(b) 黑色曲线所示, 其透射率为 $T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{j(\omega - \omega_R) + \tau_2 + 1}{j(\omega - \omega_R) + (\tau_2 + \tau_1) + 1} \right|^2$ 。当矩形的共振频率 ω_R 、T 型的共振频率 ω_T 与入射光的共振频率 ω 相互接近时, 其透射率为

$$T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{\tau_2 + 1}{(\tau_2 + \tau_1) + 1} \right|^2 = \left| 1 - \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2 + 1} \right|^2. \quad (8)$$

耦合间距的大小直接影响连续态与离散态的耦合效果, 即耦合间距越大, 矩形腔与 T 型腔的耦合系数越小, 进而影响整个系统的透射率, 由(8)式可以发现, 耦合间距与透射率呈负相关, 即耦合间距越小, τ_2 越大, 透射率越大。

为了更好地理解 SPPs 的传输机理, 采用 COMSOL 仿真软件对该结构的稳态磁场 $|H_z|$ 分布进行了仿真分析, 其结构参数和图 1(a) 所示参数相同。当 $\lambda = 945 \text{ nm}$ 时, 入射光的频率接近矩形腔的共振频率, 矩形腔的一部分能量会局域在矩形腔内, 另一部分在矩形腔的顶端反生反射和透射, 场分布如图 2(a) 所示, 反射的 SPPs 与直接入射到直波导的 SPPs 相位相差 π , 发生干涉相消, 使得透射谱在 $\lambda = 945 \text{ nm}$ 处形成第一个波谷。当 $\lambda = 1057 \text{ nm}$ 时, 入射光的频率接近 T 型腔的共振频率, T 型腔的磁场能量将会逐渐增强。如图 2(b) 所示, 磁场能量能被较好地局域在 T 型腔内, 从 T 型腔返回到矩形腔的 SPPs 与直接入射到直波导的 SPPs 相位相差 2π , 发生干涉相长, 使得透射谱在 $\lambda = 1057 \text{ nm}$ 处产生 Fano 共振峰, 形成类 EIT 效应。当 $\lambda = 1144 \text{ nm}$ 时, 入射光的频率远大于矩形腔的共振频率, 但是较接近于 T 型腔的共振频率, 故 T 型腔的一部分磁场能量透射到矩形腔, 矩形腔的场分布与波导中的磁场分量相反, 使得 SPPs 不能传输到输出端, 此时磁场能量分布如图 2(c) 所示, 这使得透射谱在 $\lambda = 1144 \text{ nm}$ 处出现第二个透射零点。

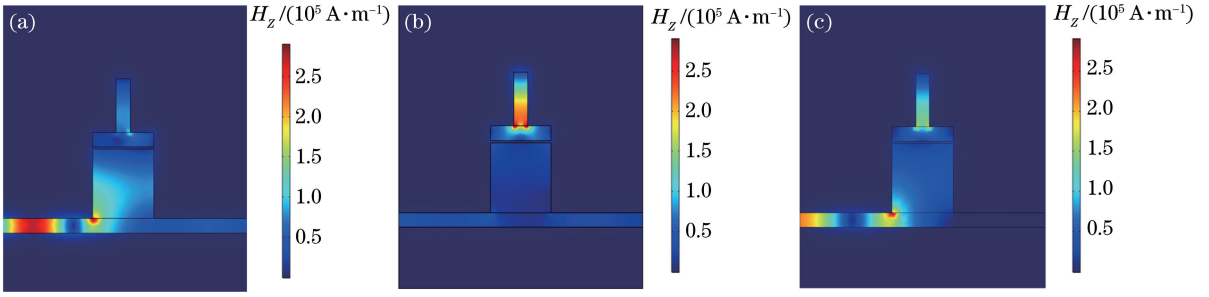


图 2 Fano 共振的波峰和波谷的 H_z 场分布。(a)第一个波谷;(b)第一个共振峰;(c)第二个波谷

Fig. 2 H_z field distributions of transmission peaks and troughs for Fano resonance.

(a) First transmission dip; (b) first transmission peak; (c) second transmission trough

3 T 型腔结构参数影响分析

Fano 共振是由较宽的连续态与较窄的离散态相互耦合而形成的非对称的洛伦兹曲线。该结构中,T 型腔结构为 Fano 共振提供离散态,其结构参数的改变必然对共振峰的位置产生一定的影响。为了进一步分析 T 型腔对其透射谱的具体影响,分别探究了横腔宽度 L_1 和竖腔高度 H_2 对共振峰位置

的影响。首先保持横腔宽度 $L_1 = 220$ nm 不变,竖腔高度 H_2 从 160 nm 增加到 200 nm (步长为 10 nm),其他参数和图 1(a)一致,图 3(a)所示为共振峰的位置随竖腔高度的变化关系;其次,保持竖腔高度 $H_2 = 180$ nm 不变,分析横腔宽度对共振峰位置的影响,横腔宽度 L_1 以步长 10 nm 从 210 nm 增加到 250 nm,图 3(b)所示为共振峰的位置随横腔宽度的变化关系。

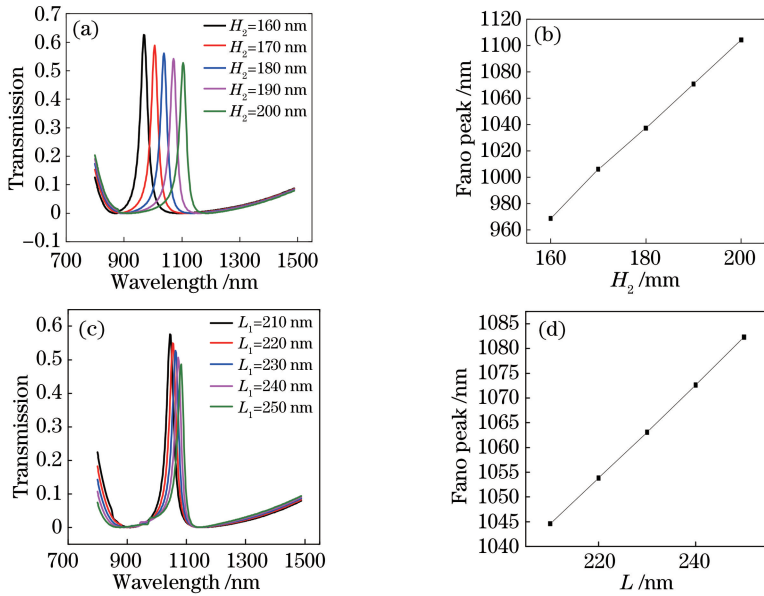


图 3 T 型腔结构参数的影响。(a)不同竖腔高度对应的透射谱;(b)不同横腔宽度对应的透射谱;

(c)竖腔高度与共振峰的变化关系;(d)横腔宽度与共振峰的变化关系

Fig. 3 Influences of structural parameters of T-shaped cavity. (a) Transmission spectra at different cavity heights;

(b) Transmission spectra at different cavity widths; (c) relationship between cavity height and resonance peak;

(d) relationship between cavity width and resonance peak

由图 3(a)、(b)可知,随着两腔长度的增加, Fano 共振峰和第一个波谷均发生了红移,且共振峰有下降的趋势。由图 3(c)、(d)可知,两腔长度与共振峰位置呈近似正比的关系。故无论横腔宽度还是竖腔高度的变化,都能使共振波长与其呈线性关系

地红移,这一现象与(3)式的驻波理论吻合,这是因为这两个参数的增加都会使其等效长度增加,同时由(3)式可知,共振波长与等效长度呈线性关系。但是对比图 3(c)和图 3(d)可以发现,T 型腔的横腔宽度和竖腔高度对共振波长漂移量的灵敏度不同(斜率

不同),且竖腔的灵敏程度大于横腔,这是因为其等效长度 $L_{\text{neff}} = H_2 + L_1/2 + w/2$ 中,横腔宽度与竖腔高度增加相同的量,但有效长度相应的增量却明显不同,这也是竖腔灵敏程度大于横腔的最主要原因。利用横腔及竖腔对共振波长灵敏程度不同这一特性,可以灵活地对 Fano 共振峰的位置进行粗调和细调。

4 结构传感特性分析

灵敏度是评价纳米级折射率传感器的一个重要性能指标,该指标反映的是折射率的改变量与共振

峰漂移量的比值,其表达式为

$$S = \Delta\lambda / \Delta n, \quad (9)$$

式中: Δn 为环境改变所引起的折射率差值; $\Delta\lambda$ 为共振波长的漂移量。图 4(a)所示为不同环境折射率条件下的透射谱,步长为 0.01,其他参数和图 1(a)一致,其共振波长随着环境折射率的增加而发生红移,这与驻波理论一致。图 4(b)所示为有效折射率与共振波长的变化关系,可以看出两者呈近似线性的关系,同时由 (9) 式得出其灵敏度大约为 1120 nm/RIU,实现了折射率传感的功能。

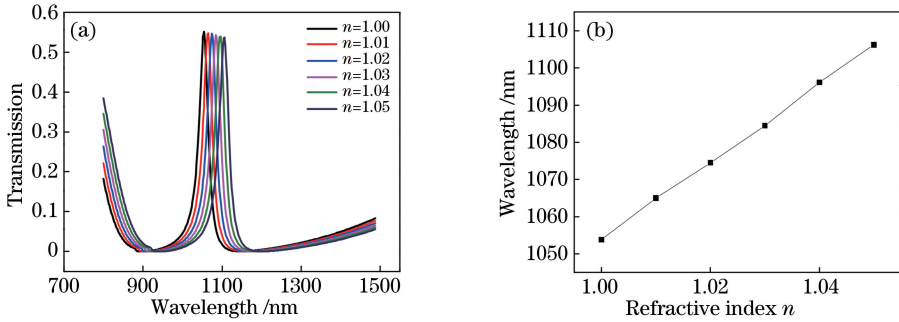


图 4 环境折射率对传感特性的影响。(a)不同环境折射率对应的透射曲线;(b)环境折射率与共振峰波长的变化关系
Fig. 4 Influence of refractive index on sensing characteristics. (a) Transmission spectra at different refractive indexes; (b) resonance peak wavelength versus refractive index

FOM 是表征纳米级折射率传感器的另一个重要参数,其定义为在特定波长 λ_0 下,根据待测物体折射率变化 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,透射谱的变化越容易被检测到^[18]。FOM 可定义为

$$V_{\text{FOM}} = \left(\frac{dT/dn}{T} \right)_{\text{max}} = \left[\frac{S_{\lambda} (dT/d\lambda)}{T} \right]_{\text{max}}. \quad (10)$$

在特定频率 ω 下的 FOM 值可以表示为

$$V_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T \Delta n} = \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{T(\omega, n_0) \Delta n}, \quad (11)$$

式中: $T(\omega, n_0)$ 为透射系数的初始值; $T(\omega, n)$ 为环境折射率变化后的透射系数; $\Delta n = n - n_0$ 为环境改变所引起的折射率差值。由于 Fano 效应对环境、结构参数变换异常敏感,故该结构具有良好的传感特性。

4.1 耦合间距 g 对结构传感特性的影响

一般来说,耦合间距对结构中的连续态和离散态的耦合效果起到关键作用。选取 $H_1 = 240$ nm, $H_2 = 185$ nm, $L_1 = 230$ nm, 对耦合间距 g 从 8 nm 增加到 13 nm 进行参数优化,步长为 1 nm。不同耦合间距对应的透射谱如图 5(a)所示。随着耦合间

距的增加,共振峰有下降的趋势,且发生了蓝移,两者之间的耦合作用逐渐减小,该现象与(8)式的结论完全一致。图 5(b)所示为耦合间距对传感特性的影响,不难发现,随着耦合间距的增加,FOM 呈递减趋势。综上所述,当 $g = 8$ nm 时,FOM 值最大。

4.2 结构参数 L_1 对传感特性的研究

对参数 L_1 从 210 nm 增加到 250 nm 进行优化,步长为 10 nm。不同 L_1 对应的透射谱如图 5(c)所示,随着参数 L_1 的增加,共振峰和第一个波谷均发生红移,但第一个波谷的变换速率先快后慢,因此在特定的 L_1 下会存在 FOM 的最大值。图 5(d)所示为参数 L_1 对传感特性的影响,不难发现,随着参数 L_1 的增加,FOM 呈先增大后减小的趋势,当 $L_1 = 220$ nm 时,FOM 值最大。

通过优化参数 g 和 L_1 发现,当 $g = 8$ nm, $L_1 = 220$ nm 时,FOM 具有最优值。利用优化后的参数构建光波导结构,分析其传感特性。由(8)式得到优化后结构的 FOM 高达 6.04×10^4 ,如图 1(c)所示,与优化前的图 5(b)和图 5(d)相比,传感特性得到了很大提高。综上所述,结构参数 L_1 与 g 对折射率传感特性有一定的调节作用,通过优化参数,可以得到良好的传感特性。

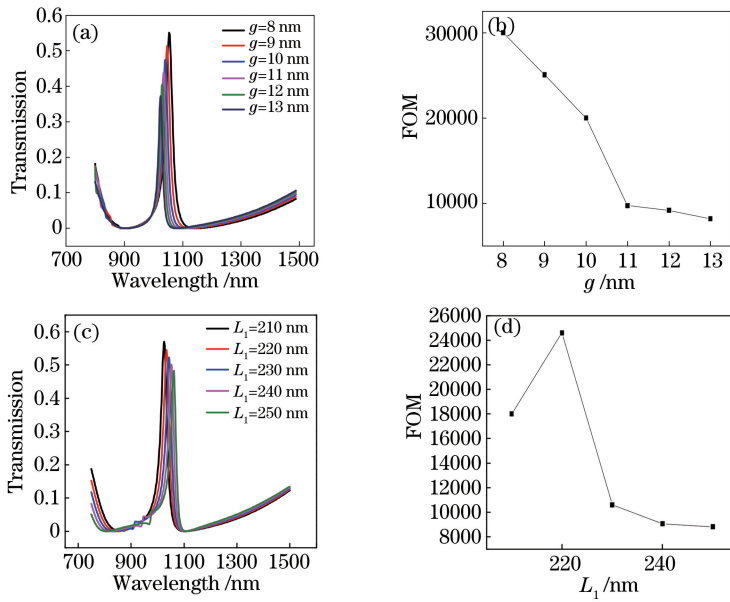


图 5 参数对传感特性的影响。(a)耦合间距 g 对 Fano 共振峰的影响;(b)耦合间距 g 对 FOM 的影响;
(c)参数 L_1 对 Fano 共振峰的影响;(d)参数 L_1 对 FOM 的影响

Fig. 5 Influences of parameters on sensing characteristics. (a) Influence of coupling distance g on Fano resonance peak;
(b) FOM versus coupling distance g ; (c) influence of parameter L_1 on Fano resonance peak; (d) FOM versus parameter L_1

5 结 论

提出了一种包含矩形腔的 MIM 波导与 T 型腔耦合的紧凑型光波导结构。TM 波入射到波导结构,将会在 MIM 的界面上产生 SPPs, SPPs 在矩形腔形成了连续态;同时,光信号进入 T 型腔,并形成较窄的离散态;在近场作用下,连续态和离散态相互耦合形成 Fano 共振。Fano 共振峰对环境折射率的改变异常敏感,从而具有折射率传感特性。Fano 共振峰位置的漂移量可以通过调节 T 型腔的竖腔高度和横腔宽度来实现,其传输特性可结合耦合模理论进行分析论证。通过优化结构参数 g 和 L_1 ,可以得到较为理想的传感特性。当 $g = 8$ nm, $L_1 = 220$ nm 时, FOM 为 6.04×10^4 , 折射率灵敏度为 1120 nm/RIU, 其结构特点在高灵敏度传感方面有着巨大的应用前景。所设计的结构可实现光子回路的集成化和小型化,为纳米级折射率传感提供了理论依据。

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] Lu H, Gong Y K, Mao D, *et al.* Strong plasmonic confinement and optical force in phosphorene pairs

[J]. *Optics Express*, 2017, 25(5): 5255-5263.
[3] Geng X M, Wang T J, Yang D Q, *et al.* Tunable plasmonic wavelength demultiplexing device using coupled resonator system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-8.
[4] Ren H, Li X, Zhang Q, *et al.* On-chip noninterference angular momentum multiplexing of broadband light[J]. *Science*, 2016, 352(6287): 805-809.
[5] Hu F F, Yi H X, Zhou Z P. Wavelength demultiplexing structure based on arrayed plasmonic slot cavities[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1500-1502.
[6] Yang Y R, Guan J F. Numerical study of plasma filters based on metal-dielectric-metal waveguide structures[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.
[7] Lu H, Liu X M, Wang L R, *et al.* Ultrafast all-optical switching in nanoplasmonic waveguide with Kerr nonlinear resonator[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 2910-2915
[8] Liu J Q, Wang L L, He M D, *et al.* A wide bandgap plasmonic Bragg reflector[J]. *Optics Express*, 2008, 16(7): 4888-4894.
[9] 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.
- [10] 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.
- [11] Wu D, Yin J, Tian J P, *et al.* Fano resonance characteristics of MIM waveguides with T-cavities[J]. *Journal of Quantum Optics*, 2018, 24(1): 55-66.
吴敌, 殷俊, 田晋平, 等. 带有 T 型腔的 MIM 波导的法诺共振特性研究[J]. *量子光学学报*, 2018, 24(1): 55-66.
- [12] Ren X B, Ren K, Cai Y X. Tunable compact nanosensor based on Fano resonance in a plasmonic waveguide system [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(31): H1-H9.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Wen K, Hu Y, Chen L, *et al.* A compact and high-efficiency dichroic plasmonic splitter based on asymmetric T-shape waveguide [J]. *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2015, 13:120-126.
- [16] Chen Z, Chen J, Yu L, *et al.* Sharp trapped resonances by exciting the anti-symmetric waveguide mode in a metal-insulator-metal resonator [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 131-137.
- [17] Lu H, Yue Z Q, Zhao J L. Multiple plasmonically induced transparency for chip-scale bandpass filters in metallic nanowaveguides [J]. *Optics Communications*, 2018, 414: 16-21.
- [18] Fu H X, Li S L, Wang Y L, *et al.* Independently tunable ultrasharp double fano resonances in coupled plasmonic resonator system [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 1-9.