

双金属挡板金属-电介质-金属波导耦合方形腔的 Fano 共振传感特性

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

¹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;

²河北科技大学信息科学与工程学院, 河北 石家庄 050018;

³河北先河环保科技股份有限公司, 河北 石家庄 050000

摘要 基于表面等离激元在亚波长结构的传输特性,提出了一种含双金属挡板的金属-电介质-金属(MDM)波导耦合方形腔结构。法布里-珀罗(F-P)谐振腔产生的宽连续态与由方形谐振腔产生的窄离散态干涉相消,形成了 Fano 共振。基于耦合模理论,定性分析了该结构 Fano 共振的产生机理。利用有限元法对该结构进行了仿真,定量分析了结构参数对折射率传感特性的影响。结果表明,优化参数后该结构的折射率灵敏度高达 1080 nm/RIU,优质因子高达 7.35×10^5 。

关键词 表面光学; 表面等离极化激元; 波导; 双金属挡板; 方形腔; Fano 共振

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0213001

Fano Resonance Sensing Characteristics of Metal-Dielectric-Metal Waveguide Coupling Square Cavity with Bimetallic Baffle

Chen Ying¹, Cao Jinggang¹, Xu Yangmei¹, Gao Xinbei¹,

Xie Jinchao¹, Tang Xinliang^{2*}, Li Shaohua³

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

²School of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

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

Abstract A metal-dielectric-metal (MDM) waveguide-coupled square cavity structure with bimetallic baffle is proposed based on the transmission characteristics of surface plasmon polaritons in sub-wavelength structure. The Fano resonance is an asymmetric spectral line formed by the destructive interference between the wide continuous state generated by the Fabry-Perot (F-P) resonator and the narrow discrete state interference generated by the square cavity. Based on the coupled mode theory, the generation mechanism of the Fano resonance of the structure is qualitatively analyzed. The structure is simulated by finite element method, and the influence of structural parameters on the refractive index sensing characteristics is qualitatively analyzed. The results show that the refractive index sensitivity of the proposed structure reaches 1080 nm/RIU and the figure of merit reaches 7.35×10^5 after optimizing the parameters.

Key words optics at surfaces; surface plasmon polaritons; waveguide; bimetallic baffle; square cavity; Fano resonance

OCIS codes 240.6680; 140.4780; 230.4555; 130.6010

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-09-29; 录用日期: 2018-10-24

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

* E-mail: tangxinliang@hebest.edu.cn

1 引 言

表面等离子激元(SPPs)是金属表面自由电子与光波相互作用产生的电磁波,电磁波在金属和介质的界面上向前传播,在垂直于界面的方向上呈指数形式衰减^[1-2]。SPPs能突破衍射极限并在亚波长尺寸上实现对光的操控,为实现高度集成的纳米光子回路提供可能^[3]。金属-电介质-金属(MDM)波导能将SPPs束缚在介质层,且对光波有很强的局域作用,具有结构简单、易于制备、传输距离长及损耗低等优点^[4]。因此,利用MDM波导对SPPs传输特性进行操控,可实现光子器件的微型化和集成化^[5]。在MDM波导结构中产生的Fano共振效应对环境变化特别敏感,在纳米级光开关、慢光及高灵敏度传感等领域有着重要的应用价值^[6-8]。

MDM波导的较强的场局域能力及Fano共振的独特性质,使在MDM波导中实现Fano共振成为研究热点。Yang等^[9]设计了一种含单金属挡板的MDM波导耦合方形腔结构,单挡板形成的较宽的连续态与方形腔形成的离散态耦合形成Fano共振,其品质因子(FOM)为 1.7×10^5 ,该结构具有良好的传感性能。石悦等^[10]设计了一种含单金属挡板的耦合开口方形环结构,研究了方形腔的长度和开口的大小对Fano共振线型的影响及该结构的折射率灵敏特性,FOM最大为 1.31×10^5 。安厚霖等^[11]设计了一种含单金属挡板的MDM波导耦合T型腔结构,当T型腔倒置时,通过改变T型腔的长度和高度进行结构参数优化,FOM最大为 9.37×10^4 。目前,含单挡板的MDM波导研究已经比较成熟,相关的理论也已建立起来,利用单金属挡板对光

的反射和透射作用可以产生连续态,在此基础上本文提出一种含双金属挡板的MDM波导。双金属挡板对光具有更强的局域作用,因此可以产生较宽的连续态,并且通过调节双金属挡板的距离可以调节连续态的位置,从而使法布里-珀罗(F-P)腔与方形腔耦合形成的Fano共振峰更陡峭、带宽更窄,即具有更高的FOM值。具有该特点的波导在超快光开关和高灵敏传感器方面有潜在应用。

本文设计了一种含双金属挡板的MDM波导耦合方形腔的结构,当TM波入射到MDM波导上时,在金属表面会产生SPPs,SPPs会在F-P腔中形成较宽的连续态。SPPs通过F-P腔耦合进入方形腔并发生谐振,产生一个较窄的离散态,连续态和离散态相互耦合产生Fano共振。基于耦合模理论定性分析该Fano共振现象产生机理。采用有限元方法对该结构进行仿真分析,定量分析结构参数对Fano共振传输特性的影响,实现对结构传感特性的调控。

2 结构模型与理论分析

2.1 结构模型

所提出的含双金属挡板的MDM波导耦合方形谐振腔的结构如图1(a)所示,其中,电介质为空气,空气的折射率为1,金属为银。为了确保MDM波导中只传播TM模式,将直波导 w 的宽度固定为 50 nm ^[12]。双金属挡板的厚度均为 d ,两挡板间形成的矩形腔可视作F-P腔,其长度为 L_1 ,与方形腔的耦合距离为 g ,方形腔的宽度和高度均为 l ,整个波导的长度为 L 。 $L_1 = 500 \text{ nm}$, $l = 650 \text{ nm}$, $g = 20 \text{ nm}$ 时的结构示意图和透射光谱图如图1所示。

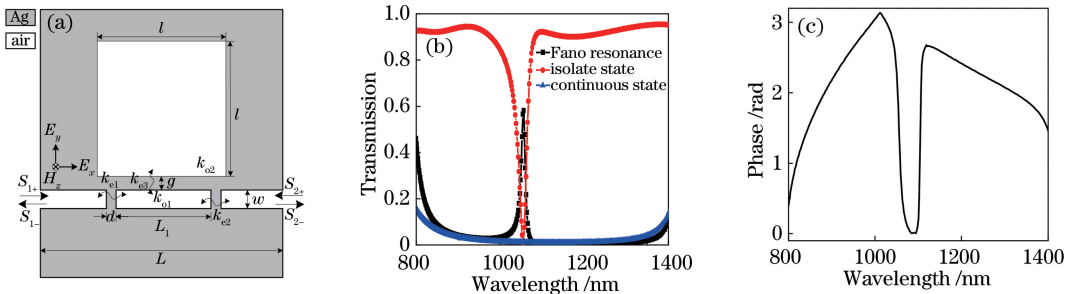


图1 含双金属挡板的MDM波导耦合方形谐振腔。(a)腔结构;(b)透射光谱;(c)相位图

Fig. 1 MDM waveguide coupled square cavity with bimetallic baffle. (a) Cavity structure; (b) transmission spectra; (c) phase diagram

Ag的介电常数可用Drude模型^[13]表示,表达式为

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

式中, ω 为入射光的频率,等离子振荡频率 $\omega_p = 1.38 \times 10^{16} \text{ Hz}$,无穷介电常数 $\epsilon_\infty = 3.7$,碰撞频率 $\gamma = 0.273 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。没有双金属挡板时,该透射

谱曲线在波长 $\lambda = 1054 \text{ nm}$ 处出现明显的损耗,此时光波都被局域在方形腔内,谱线上产生一个尖锐的波谷,如图 1(b)中红色曲线所示。没有方形腔时,形成的连续态比较宽,并在 $\lambda = 1127 \text{ nm}$ 处有一个波谷,如图 1(b)中蓝色曲线所示。含 F-P 腔的 MDM 波导耦合方形腔结构时,在原来较宽的连续态区域上会产生窄的非对称 Fano 共振线型,如图 1(b)中的黑色曲线所示。因此,该结构既实现了 Fano 共振效应,也实现了类电磁诱导透明效应^[14]。由驻波理论可以确定 F-P 腔和方形腔的共振条件,也可以得到有效折射率 n_{eff} 和共振波长 λ 的关系,关系式为^[15]

$$\lambda = \frac{2\text{Re}(n_{\text{eff}})D}{m - \psi/\pi}, \quad (m = 0, 1, 2, 3 \dots), \quad (2)$$

式中: D 为谐振腔的有效长度; ψ 为由于双金属挡板反射附加的相位移; m 为共振阶数; n_{eff} 为波导结构的有效折射率, $\text{Re}(n_{\text{eff}})$ 为 n_{eff} 的实部, $\text{Re}(n_{\text{eff}}) = \sqrt{[\epsilon_m + (k/k_0)^2]}$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 为自由空间波矢大小,波数 k 可用色散关系公式表示^[16]:

$$\tanh(k\tau) = \frac{-2k \frac{\epsilon_d}{\epsilon_m} \sqrt{k_0^2(\epsilon_d - \epsilon_m) + k^2}}{k^2 + \frac{\epsilon_d^2}{\epsilon_m} [k_0^2(\epsilon_d - \epsilon_m) + k^2]}, \quad (3)$$

式中 ϵ_d 和 ϵ_m 分别为介质和金属的相对介电常数。当 SPPs 由 F-P 腔耦合进入到方形腔,且满足 F-P 腔的共振条件时,腔内会形成驻波,方形腔内的电磁场明显增强^[17]。

2.2 理论分析

当入射光以 TM 模式传播时, SPPs 在亚波长波导结构的金属与电介质交界处被激发,突破衍射极限,激发的 SPPs 在波导中沿 X 轴方向传播,沿 Y 轴方向呈指数衰减。信号光可以通过直波导、F-P 腔和方形腔的相互耦合,实现传输。因此,本研究基于时域耦合模理论对该结构产生的 Fano 共振现象进行分析^[18]。设 F-P 谐振腔归一化后的振幅为 A , 方形腔归一化后的振幅为 B , F-P 谐振腔和方形谐振腔随时间演化的光模场振幅可以表示为

$$\frac{dA}{dt} = (j\omega_A - k_{o1}^2 - k_{e1}^2 - k_{e2}^2 - k_{e3}^2)A + k_{e1}S_{1+} + k_{e2}S_{2+} + k_{e3}B = i\omega A, \quad (4)$$

$$\frac{dB}{dt} = (j\omega_B - k_{o2}^2 - k_{e3}^2)B + k_{e3}A = i\omega B, \quad (5)$$

式中: ω_A 和 ω_B 分别为 F-P 腔和方形腔的谐振频率; k_{o1} 和 k_{o2} 分别为 F-P 谐振腔和方形腔的内部衰减损耗系数; k_{e1} 和 k_{e2} 分别为 F-P 谐振腔与 MDM 左右直波导层的耦合系数; k_{e3} 为 F-P 谐振腔与方形腔的耦合系数; S_{1+} , S_{1-} , S_{2+} 和 S_{2-} 分别表示端口的入射光和出射光的模场振幅,其输出端口不存在反射,故 $S_{2+} = 0$ 。由能量守恒原理,可得到该结构中输入端和输出端的光模场振幅为

$$S_{1-} = S_{1+} + k_{e1}A, \quad (6)$$

$$S_{2-} = S_{2+} + k_{e2}A. \quad (7)$$

(4)~(7)式联立可以求得含 F-P 腔的 MDM 波导耦合方形腔结构的透射率 T 的表达式为

$$T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{k_{e1}k_{e2}[i(\omega - \omega_B) + k_{o2}^2 + k_{e3}^2]}{[i(\omega - \omega_A) + k_{o1}^2 + k_{e1}^2 + k_{e2}^2 + k_{e3}^2][i(\omega - \omega_B) + k_{o2}^2 + k_{e3}^2] - k_{e3}^2} \right|^2. \quad (8)$$

由(8)式可以得到仅含 F-P 腔的 MDM 波导结构的透射率 T 的表达式为 $T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{k_{e1}k_{e2}}{[i(\omega - \omega_A) + k_{o1}^2 + k_{e1}^2 + k_{e2}^2]} \right|^2$ 。因此,当 $\omega = \omega_A$ 时,光波在 F-P 腔内发生谐振,连续态的透射谱线上会出现一个波峰。不含 F-P 腔的 MDM 波导耦合方形腔结构的透射率 T 的表达式为 $T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{i(\omega - \omega_B) + k_{o2}^2}{i(\omega - \omega_B) + k_{o2}^2 + k_{e4}^2} \right|^2$, 其中, k_{e4} 为 MDM 波导与方形腔的耦合系数。因此,当 $\omega = \omega_B$ 时,光波在方形腔内发生谐振,方形腔中存在着较强的磁场分布,离散态的透射谱线上会出现一个尖锐的波谷,如

图 1(b)中的红色曲线所示。对于含 F-P 腔的 MDM 波导耦合方形腔结构,当入射光的频率 ω 、F-P 腔的共振频率 ω_A 和方形腔的共振频率 ω_B 相等时,透射谱线会表现为明显的非对称 Fano 共振线型,耦合系数 k_{e3} 随方形腔与 F-P 腔的耦合间距 g 的增大而减小,因此耦合间距 g 越大,透射率越低。当 F-P 腔的共振频率 ω_A 和方形腔的共振频率 ω_B 相互接近时, Fano 共振峰出现在 $\omega = \omega_B$ 处,磁场分布如图 2(c)所示,(8)式可表示为

$$T = \left| \frac{S_{2-}}{S_{1+}} \right|^2 = \left| \frac{k_{e1}k_{e2}(k_{o2}^2 + k_{e3}^2)}{[i(\omega_B - \omega_A) + k_{o1}^2 + k_{e1}^2 + k_{e2}^2 + k_{e3}^2](k_{o2}^2 + k_{e3}^2) - k_{e3}^2} \right|^2. \quad (9)$$

为了更好地理解所提出结构的传输特性,利用 COMSOL 软件对该结构的稳态磁场分布进行仿真分析,仿真结果如图 2 所示。图 2(a)为含 F-P 腔的 MDM 波导结构在共振谷波长 $\lambda = 1127$ nm 处的稳态磁场分布,可以看出当 $\lambda = 1127$ nm 时,只有很少的光波被耦合进 F-P 腔,大部分光波会被 F-P 腔的挡板反射,反射到直波导的光波与直波导中传播的光波相位相反,从而发生干涉相消,在透射光谱中表现为零传输现象,形成共振谷。对于含 F-P 腔的 MDM 波导耦合方形腔结构,当 $\lambda = 967$ nm 和 $\lambda = 1104$ nm 时,少量的光波被耦合进 F-P 腔和方形腔,

如图 1(c)所示,从 F-P 腔和方形腔反射回来的光波与直波导中传播的光波相位差为 π ,即相位相反,会发生干涉相消,使得 SPPs 被限制在 F-P 腔的左侧,不能传播到 MDM 波导的另一端,透射率基本为零,磁场分布如图 2(b)和 2(d)所示。当 $\lambda = 1055$ nm 时,入射光同时满足 F-P 腔和方形腔的共振条件,在 F-P 腔和方形腔都存在着较强的磁场分布,如图 1(c)所示,从 F-P 腔和方形腔反射回来的光波与直波导中传播的光波相位差为 0,即相位相同,F-P 腔和方形腔两个激发途径均发生了干涉增强,发生 Fano 共振,透射率约为 0.6,磁场分布如图 2(c)所示。

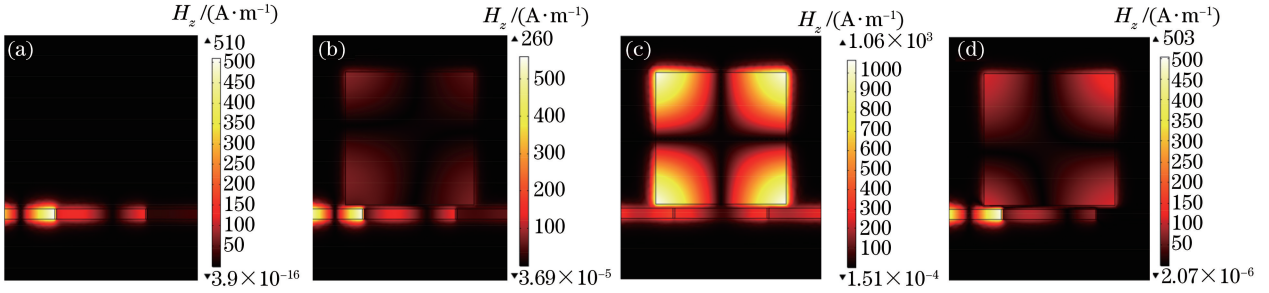


图 2 稳态磁场分布。(a)含 F-P 腔的 MDM 波导结构在共振谷的稳态磁场分布;(b) Fano 共振第一个波谷处的稳态磁场分布;(c) Fano 共振峰处的稳态磁场分布;(d) Fano 共振第二个波谷处的稳态磁场分布

Fig. 2 Distributions of steady magnetic field. (a) Distribution of steady magnetic field of MDM waveguide with F-P cavity structure in transmission dip; (b) distribution of steady magnetic field at first transmission dip of Fano resonance; (c) distribution of steady magnetic field at transmission peak of Fano resonance; (d) distribution of steady magnetic field at second transmission dip of Fano resonance

3 传感特性分析

灵敏度是折射率传感器最直观的性能评价指标,定义其为共振峰位置的改变量与单位折射率 (RIU) 改变量的比值。传感器灵敏度的表达式为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad (10)$$

式中, Δn 表示折射率的变化量, $\Delta\lambda$ 表示共振峰的偏移量。

FOM 是评价折射率传感器的另外一个重要指标,是一个无量纲的参数,其定义为在某一特定波长下,用待测物折射率变化 dn 导致的传感器探测透射光谱的相对强度变化 dT/T 来测量波长漂移。FOM 表达式为^[19]

$$V_{\text{FOM}} = \left(\frac{dT/dn}{T} \right)_{\text{max}} = \left[\frac{S_{\lambda}(dT/d\lambda)}{T} \right]_{\text{max}}. \quad (11)$$

在特定频率 ω 下的 FOM 的表达式为

$$V_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T \Delta n} = \frac{T(\omega, n) - T(\omega, n_0)}{T(\omega, n_0) \Delta n}, \quad (12)$$

式中: $T(\omega, n_0)$ 为透射率的初始值; $T(\omega, n)$ 为环境变化后的透射率; $\Delta n = n - n_0$, 为环境变化导致的折射率的差值。FOM 体现了折射率传感器的灵敏度 S 、透射率 T 和分辨率 dT/dn 之间的关系, Fano 共振峰越尖锐, 其分辨率 dT/dn 越高, 从而 FOM 值增大, 传感性能越好。

3.1 结构参数 L_1 对传感特性的影响

从 460 nm 到 580 nm 对参数 L_1 进行参数化扫描, 步长为 20 nm, 其中 $l = 650$ nm, $g = 20$ nm。如图 3(a)所示, 随着 L_1 的增大, F-P 腔对光波的局域作用增强, 导致透射率减小。如图 3(b)所示, 随着 L_1 的增大, FOM 先增大后减小。采用数学二分法对 L_1 进行进一步扫描, 计算出对应的 FOM 值, 可以得到, 当 $L_1 = 566$ nm 时, FOM 最大, 由 (12) 式计算得到 FOM 为 7.18×10^5 , 如图 3(c)所示。

3.2 结构参数 l 对传感特性的影响

对参数 l 从 620 nm 到 680 nm 进行参数化扫描, 步长为 10 nm, 其中 $L_1 = 566$ nm, $g = 20$ nm。如图 4(a)所示, 随着 l 的增加, 共振波长发生红移,

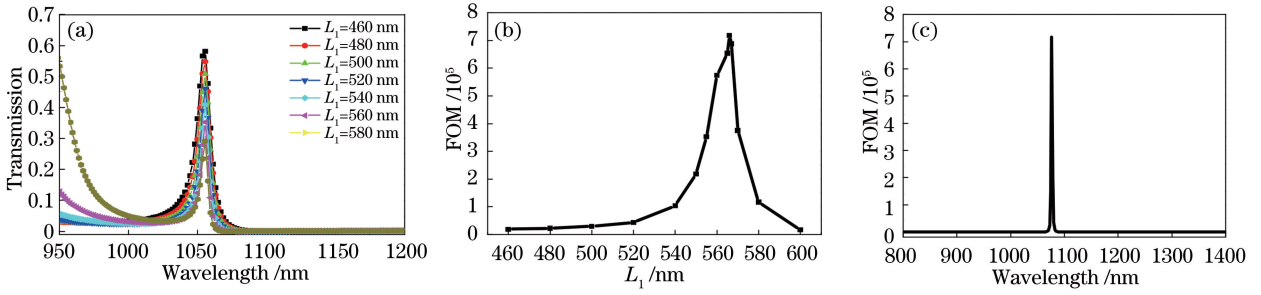


图3 L_1 对传感特性的影响。(a) L_1 对 Fano 共振线型的影响;(b) L_1 对 FOM 值的影响;(c) L_1 对应的 FOM 最大值
Fig. 3 Influence of L_1 on sensing characteristics. (a) Influence of L_1 on Fano resonance line shape;
(b) influence of L_1 on FOM; (c) maximum FOM corresponding to L_1

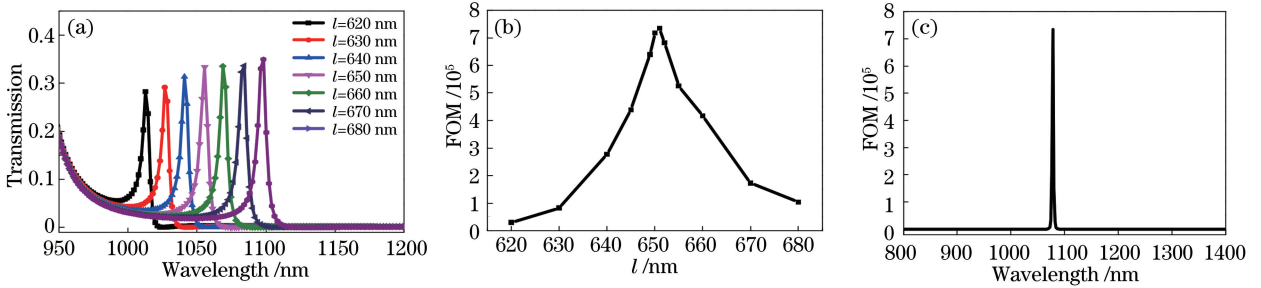


图4 l 对传感特性的影响。(a) l 对 Fano 共振线型的影响;(b) l 对 FOM 值的影响;(c) l 对应的 FOM 最大值
Fig. 4 Influence of l on sensing characteristics. (a) Influence of l on Fano resonance line shape;
(b) influence of l on FOM; (c) maximum FOM corresponding to l

该现象可由(2)式解释。随着 l 的增加,方形腔与直波导和 F-P 腔的耦合面积增加,光波经过直波导和 F-P 腔与方形腔的耦合作用增强,因此透射率增加。如图 4(b) 所示,随着 l 的增加,FOM 先增大后减小。采用数学二分法对 l 进行进一步扫描,计算出对应的 FOM,可以得到,当 $l=651$ nm 时,FOM 取最大值(7.35×10^5),如图 4(c) 所示。

3.3 结构参数 g 对传感特性的影响

对参数 g 从 14~24 nm 进行参数化扫描,步长为 2 nm,其中 $l=651$ nm, $L_1=566$ nm。如图 5(a) 所示,随着 g 的增加,SPPs 通过 F-P 腔与方形腔的耦合损耗增加,耦合系数 k_{c3} 减小,Fano 共振峰发生微小的蓝移,透射率明显降低,该现象与耦合模理论描述一致。如图 5(b) 所示,随着 g 的增加,FOM 先增大后减小。对 g 从 14 nm 到 24 nm 进行参数化扫描,步长为 1 nm,计算出对应的 FOM,可得当 $g=20$ nm 时,FOM 值最大,如图 4(c) 所示。

通过对结构参数 l, L_1 和 g 进行优化可以得到,当结构参数 $L_1=566$ nm, $l=651$ nm, $g=20$ nm 时,其 FOM 得到最大程度的优化。在该结构参数下对环境折射率的变化进行分析,对环境折射率 n 从 1.00 到 1.05 进行参数化扫描,步长为 0.01,如图 5(c) 所示,可以看出随着 n 的增大,共振波长发

生红移,这与(2)式描述一致。图 5(d) 为共振波长和环境折射率的拟合曲线,两者具有很好的线性关系,由(10)式可得传感器的灵敏度约为 1080 nm/RIU。

4 结 论

设计了一种含双金属挡板的 MDM 波导耦合方形腔的 Fano 共振结构。当光波入射到 MDM 波导,在金属表面会产生 SPPs, SPPs 在 F-P 腔中形成较宽的连续态,同时耦合进入方形腔的 SPPs 与光波发生谐振,产生一个较窄的离散态,两者相互耦合形成 Fano 共振。并用耦合模理论定性分析了该 Fano 共振现象的产生机理。该结构对环境折射率的变化十分敏感,改变环境折射率,Fano 共振峰会发生明显的漂移,从而实现传感测量。通过改变 F-P 腔的长度 L_1 、方形谐振腔的长度 l 和耦合间距 g 可以实现对 Fano 共振峰的位置、透射率和带宽的有效调控,且在较大的调控范围内都有着较好的传感特性。通过优化结构参数可以得到,当 $l=651$ nm, $L_1=566$ nm 和 $g=20$ nm 时,折射率灵敏度为 1080 nm/RIU, FOM 高达 7.35×10^5 。因此,该结构在超快光开关、高灵敏传感器和慢光器件的高度集成领域有潜在应用。

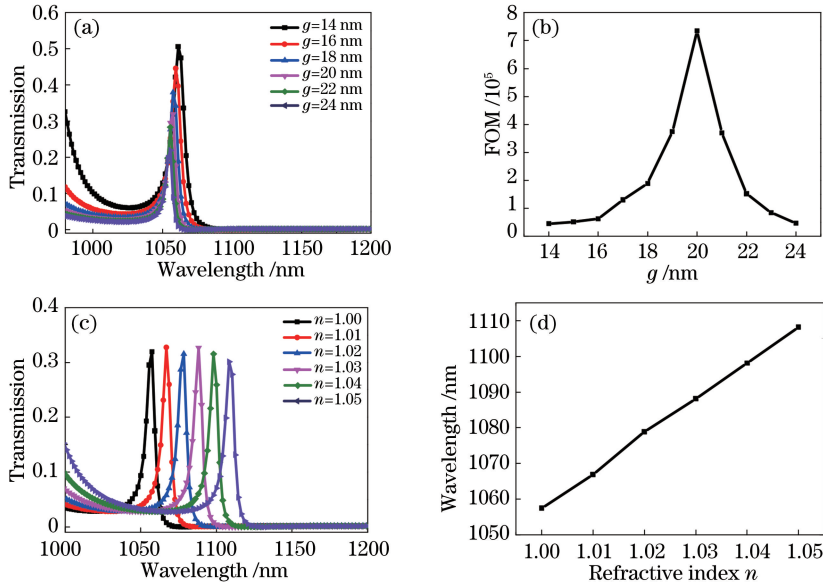


图 5 g 和 n 对传感特性的影响。(a) g 对 Fano 共振线型的影响;(b) g 对 FOM 值的影响;
(c) n 对 Fano 共振峰的影响;(d) 共振波长与环境折射率的拟合曲线

Fig. 5 Influence of g and n on sensing characteristics. (a) Influence of g on Fano resonance line shape; (b) influence of g on FOM; (c) influence of n on Fano resonance peak; (d) fitting curve between resonant wavelength and refractive index

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] Zhang Z D, Luo L, Xue C Y, *et al.* Fano resonance based on metal-insulator-metal waveguide-coupled double rectangular cavities for plasmonic nanosensors [J]. Sensors, 2016, 16(5): 642.
- [3] Ni G X, McLeod A S, Sun Z, *et al.* Fundamental limits to graphene plasmonics [J]. Nature, 2018, 557(7706): 530-533.
- [4] Zhu J, Xu W J, Xu Z J, *et al.* Surface plasmon polariton mode in the metal-insulator-metal waveguide [J]. Optik, 2017, 134: 187-193.
- [5] Owen R C, Murphy K S, Hoke K G, *et al.* Detection of guided-wave plasmon polariton modes in a high-index dielectric MIM structure [J]. Journal of Applied Physics, 2017, 122(12): 123101.
- [6] Khatir M, Granpayeh N. An ultra compact and high speed magneto-optic surface plasmon switch [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(7): 1045-1054.
- [7] 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.
- [8] Tang Y, Zhang Z D, Wang R B, *et al.* Refractive index sensor based on fano resonances in metal-insulator-metal waveguides coupled with resonators [J]. Sensors, 2017, 17(4): 784.
- [9] 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, 2017, 12(6): 1665-1672.
- [10] Shi Y, Zhang G M, An H L, *et al.* Controllable Fano resonance based on coupled square split-ring resonance cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 191-199. 石悦, 张冠茂, 安厚霖, 等. 基于耦合开口方环共振空腔的可控法诺共振研究 [J]. 光子学报, 2017, 46(4): 191-199.
- [11] An H L, Zhang G M, Hu N, *et al.* Phenomenon of multiple Fano resonances based on coupled T-type cavity [J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(11): 1113003. 安厚霖, 张冠茂, 胡南, 等. 基于耦合 T 型空腔的多重法诺共振现象 [J]. 光子学报, 2016, 45(11): 1113003.
- [12] Chen Y, Luo P, Liu X F, *et al.* Sensing performance analysis on Fano resonance of metallic double-baffle contained MDM waveguide coupled ring resonator [J]. Optics & Laser Technology, 2018, 101: 273-278.
- [13] Yun B F, Hu G H, Zhang R H, *et al.* Fano

- resonances in a plasmonic waveguide system composed of stub coupled with a square cavity resonator [J]. *Journal of Optics*, 2016, 18(5): 055002.
- [14] Huang B, Meng H Y, Wang Q H, *et al.* Plasmonic-induced transparency and slow-light effect based on stub waveguide with nanodisk resonator [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(2): 543-550.
- [15] Zhang Y Y, Li S L, Chen Z, *et al.* Ultra-high sensitivity plasmonic nanosensor based on multiple fano resonance in the MDM side-coupled cavities [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(4): 1099-1105.
- [16] Wang S W, Li Y, Xu Q J, *et al.* A MIM filter based on a side-coupled crossbeam square-ring resonator [J]. *Plasmonics*, 2016, 11(5): 1291-1296.
- [17] Zhang X Y, Wang L L, Chen Z, *et al.* The line shape of double-sided tooth-disk waveguide filters based on plasmon-induced transparency [J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(5): 054209.
- [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.
- [19] Wen K H, Hu Y H, Chen L, *et al.* Fano resonance based on end-coupled cascaded-ring MIM waveguides structure [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(6): 1875-1880.