

## 激光与光电子学进展

## 类 H 型腔耦合 MIM 波导的 Fano 共振及传感特性

王鸣宇<sup>1</sup>, 栾润青<sup>1</sup>, 苏杨<sup>1</sup>, 张胜言<sup>1</sup>, 田赫<sup>1\*</sup>, 王金芳<sup>2</sup>, 李纪娜<sup>1</sup>, 刘星<sup>1</sup>, 刘雅洁<sup>1</sup><sup>1</sup>东北林业大学理学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;<sup>2</sup>上海新跃联汇电子科技有限公司, 上海 200233

**摘要** 提出了一种由对称的类 H 型谐振腔和独立枝节组成的表面等离子体金属-绝缘体-金属(MIM)波导结构。利用有限元分析法研究了该结构的 Fano 共振及其光学传感特性。结果表明,该结构可实现 Fano 共振,最大折射率灵敏度和品质因数分别为 1078.33 nm/RIU 和 1259.2。同时,研究了结构几何参数对 Fano 共振的影响,并进一步实现了 Fano 共振线型和波长的独立调节。所提出的等离子体 MIM 波导结构在集成光子器件和纳米光学传感领域具有潜在的应用前景。

**关键词** 表面光学; 表面等离子体激元; Fano 共振; 光学传感; 有限元分析法

中图分类号 TN252

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2124002

## Fano Resonance and Sensing Characteristics of MIM Waveguide with H-Type Cavity

Wang Mingyu<sup>1</sup>, Luan Runqing<sup>1</sup>, Su Yang<sup>1</sup>, Zhang Shengyan<sup>1</sup>, Tian He<sup>1\*</sup>, Wang Jinfang<sup>2</sup>, Li Jina<sup>1</sup>, Liu Xing<sup>1</sup>, Liu Yajie<sup>1</sup><sup>1</sup>College of Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;<sup>2</sup>Shanghai Xin Yue Lian Hui Electronic Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China

**Abstract** We propose a surface plasmon metal-insulator-metal (MIM) waveguide structure comprising a H-type resonator and an independent branch. The Fano resonance and optical sensing characteristics of the structure are examined by using finite element analysis. The findings reveal that the structure can achieve Fano resonance, and the maximum refractive index sensitivity and quality factor are 1078.33 nm/RIU and 1259.2, respectively. The effects of structural geometric factors on Fano resonance are examined, and independent changes of the Fano resonance line and wavelength are obtained. The suggested plasmonic MIM waveguide structure in this work has potential applications in integrated photonic devices and nano-optical sensors.

**Key words** surface optics; surface plasmon polaritons; Fano resonance; optical sensing; finite element method

## 1 引言

表面等离子体激元(SPPs)是一种沿金属介质表面产生的电磁波,起源于入射光子和金属表面自由电子的相互作用<sup>[1]</sup>。SPPs的激发,使光的传播可以由金属等导体材料控制<sup>[2]</sup>,且其沿着金属电介质表面传播,可以打破传统光学衍射极限的限制,具有极强的局域场增强效应,系统结构紧凑,可以对光信号实现纳米级的传输和处理<sup>[3-9]</sup>。基于SPPs的特点,我们可以在金属与介质组成的光波导结构中将光束束缚在亚波长的尺度,从而制作高度集成的纳米器件<sup>[10]</sup>。金属-绝缘体-

金属(MIM)结构是一种典型的表面等离子体激元波导,因此,基于MIM波导的SPPs器件有着克服衍射限制、光束缚性好、效率高、结构简单等优良特性,在光学集成方面受到了广泛的关注,并被设计成多种光电子器件<sup>[11-15]</sup>。MIM波导结构易于制造,首先通过化学气相沉积(CVD)方法在硅衬底上制备足够厚的Ag层,然后通过电子束蚀刻法在Ag层上进行蚀刻。

Fano共振最初在原子系统中被证明是由离散态和连续态之间的干涉引起的<sup>[16]</sup>,在光谱中具有尖锐不对称特性和强场增强特性,利用它可以得到很高的灵敏度(S)和品质因数(FOM),因此,Fano共振在传感

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-01; 录用日期: 2021-11-02

基金项目: 黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(202110225234)

通信作者: \*tianhe@nefu.edu.cn

器领域具有很强的应用性<sup>[17]</sup>。现有的基于 MIM 波导的 Fano 共振结构有: X 型 MIM 共振结构<sup>[18]</sup>、半环形共振腔结构<sup>[19]</sup>、双对称矩形 MIM 共振结构<sup>[20]</sup>、D 型 MIM 共振结构<sup>[21]</sup>、耦合 T 型空腔结构<sup>[22]</sup>、耦合开口方环共振腔结构<sup>[23]</sup>等。与传统的法布里-珀罗(FP)谐振腔所获得的对称的洛伦兹线型不同, Fano 共振具有独特的极尖锐型和非对称型特征, 对电介质环境更敏感, 因此, Fano 共振通常具有高灵敏度和高品质因数。此外, Fano 共振的实现将有助于提升纳米集成传感器件的处理能力, 如果光谱线的形状、共振波长可以独立调节, 则该 Fano 共振可以满足不同的传感需求或应用场所。但在一些现有结构中, 可被改变的结构参数较少且难以实现对 Fano 共振线型和波长的独立调节, 例如 T 型结构。基于此, 本文在 T 型结构的基础上, 设计了一种带有枝节的类 H 型 MIM 波导结构, 以实现 Fano 共振线型和波长的独立调节。首先, 利用有限元分析法(FEM)对该结构进行了数值模拟, 得到透射谱, 结构中的 Fano 共振是由类 H 型谐振腔中激发的亮模与竖直枝节中激发的暗模间的干涉产生的。然后, 通过分析电磁场分布和光谱曲线, 研究了基于 Fano 共振的传感性能, 并讨论了该结构几何参数对 Fano 共振的影响。

## 2 结构模型和理论方法

图 1 为本文提出的 MIM 波导结构图, 由独立枝节、类 H 型谐振腔和总线波导组成, 绿色和蓝色区域分别定义为银和空气, 类 H 型结构中横梁长度  $L_1 = 300 \text{ nm}$ , 中轴长度  $H_1 = 130 \text{ nm}$ , 中轴间距  $d = 50 \text{ nm}$ , 枝节长度  $H_2 = 100 \text{ nm}$ , 枝节宽度  $L_2 = 50 \text{ nm}$ 。类 H 型谐振腔与竖直枝节耦合, 耦合距离  $g = 10 \text{ nm}$ 。将类 H 型谐振腔的宽度和总线波导的宽度  $\omega$  设置为  $50 \text{ nm}$ , 以保证结构中只有基本横向磁模( $\text{TM}_0$ )存在和传播, 并假设该结构在  $z$  轴方向上足够长, 可以看作是一个二维结构<sup>[24]</sup>。

空气的相对介电常数  $\epsilon_i = 1.0$ , 银的相对介电常数

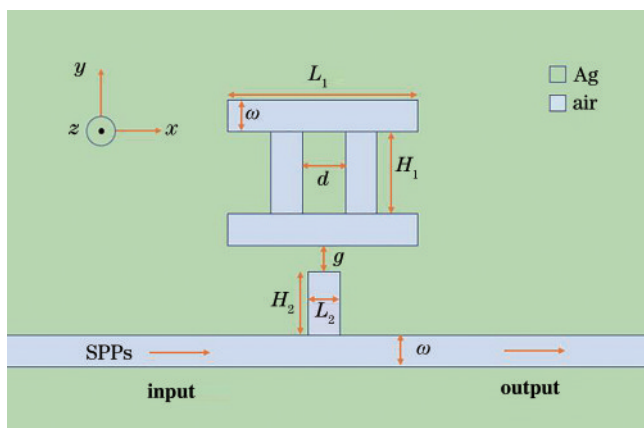


图 1 MIM 波导结构图

Fig. 1 MIM waveguide structure diagram

与入射光的频率有关, 由 Drude 模型<sup>[25-28]</sup>描述为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_{\infty} = 3.7$  为真空中的介电常数;  $\omega_p = 9.1 \text{ eV}$  为银的等离子体频率;  $\omega$  为入射波的角频率;  $\gamma = 0.018 \text{ eV}$  为电子碰撞频率。该波导结构通过化学气相沉积方法可以在硅衬底上制备出足够厚的 Ag 层<sup>[29]</sup>, 然后, 可以用电子束刻蚀的方法在 Ag 层上刻蚀带有枝节的总线波导。

MIM 波导结构中基横磁模色散方程<sup>[30]</sup>为

$$\epsilon_d k_m + \epsilon_m k_d \tanh\left(-\frac{ik_d \omega}{2}\right) = 0, \quad (2)$$

式中:  $k_{d,m} = \sqrt{\epsilon_{d,m} k_0^2 - \beta^2}$  分别为空气和银中的横向传播常数;  $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$  为传播常数;  $k_0 = 2\pi/\lambda$  为真空中波矢量;  $n_{\text{eff}}$  是模态有效指数;  $\lambda$  是入射光波长。

根据驻波理论, 当满足以下共振条件<sup>[31-33]</sup>时, 发生共振, 公式表示为

$$\lambda_{\text{FP}} = \frac{2\text{Re}(n_{\text{eff}})L_{\text{eff}}}{m - \varphi/2\pi}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

式中:  $L_{\text{eff}}$  是谐振腔的有效长度;  $m$  为谐振模式阶数;  $\varphi$  为 FP 面反射引起的相移;  $\text{Re}(n_{\text{eff}})$  为有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的实部。

## 3 分析与讨论

采用 FEM 法分析了 SPPs 的传播特性。在结构的顶部和底部, 设置了完美匹配层(PMLs)来吸收逃逸的波, 为了保证仿真区域得到较好地分割, 选取了精细的三角形网格, 最大三角形网格尺寸为  $15 \text{ nm}$ , 同时, 为了减小对运行内存和仿真运行时间的需求, 选择了二维波导结构, 并假设  $z$  方向的尺寸为无穷大。

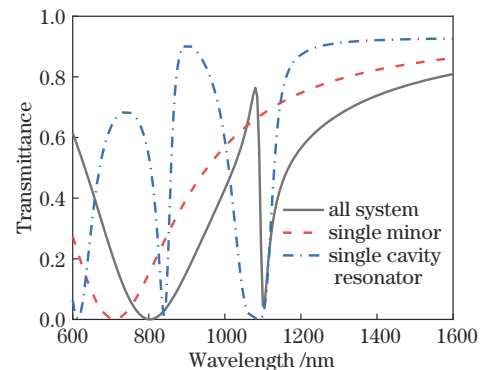


图 2 单个类 H 型谐振腔、单独竖直枝节和整个结构的透射光谱  
Fig. 2 Transmission spectra of a single H-type resonant cavity, a single vertical branch, and the whole system

图 2 给出了单个类 H 型谐振腔、单独竖直枝节波导以及整个结构的透射谱。众所周知, Fano 共振是由宽带的连续态和窄带的离散态之间的破坏性或重塑性干涉引起的。竖直枝节, 其传输光谱为红色线所示的

低而稳定的透射谱,支持宽带连续态(暗模式)。而单个类H型谐振腔,其传输光谱为蓝色线所示的若干洛伦兹样谷,支持窄带离散态(亮模式),由于连续态和离散态之间的相互作用,整个结构耦合形成了Fano共振,在波长为1080 nm处形成了波峰(FR)并且在其右侧波长为1100 nm处形成了波谷(FD)。

FR和FD沿z轴的磁场分布如图3所示。图3(a)

展示了FR在磁场中的场分布,在类H型谐振腔中FR的磁场围绕y轴对称,FR的磁场分布有两个节点,即谐振模阶 $m=1$ ,图3(b)展示了Fano共振的FD的场分布。从图3(a)和(b)对比可以看出:在FR时,大多数SPPs可以通过该结构传输到输出端口;在FD时,SPPs被限制在类H型谐振腔内。

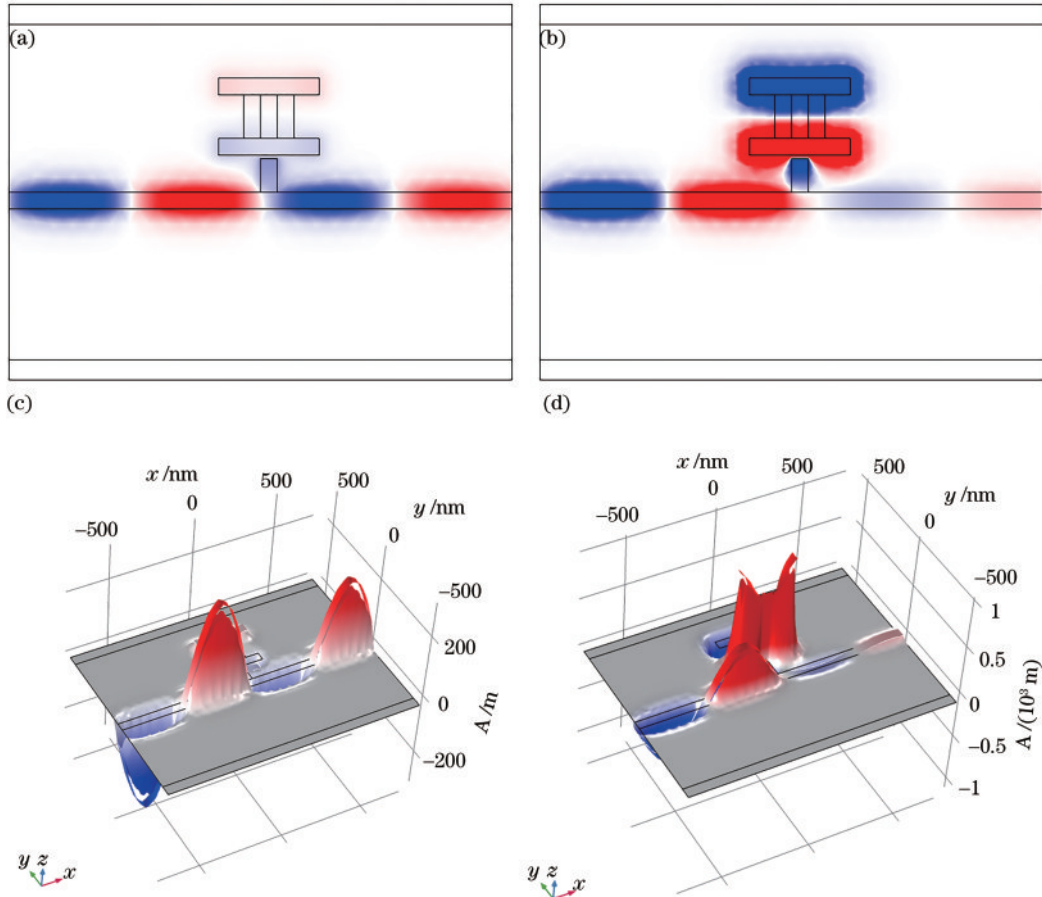


图3 Fano共振波峰和波谷沿z轴的磁场分布及其高度表达式。(a)波峰 $\lambda=1080\text{ nm}$ 处磁场分布;(b)波谷 $\lambda=1100\text{ nm}$ 处磁场分布;(c)波峰 $\lambda=1080\text{ nm}$ 处磁场图样高度表达式;(d)波谷 $\lambda=1100\text{ nm}$ 处磁场图样高度表达式

Fig. 3 Magnetic field distribution along the z-axis of Fano resonance peaks and valleys and their height expressions. (a) Magnetic field distribution at peak  $\lambda=1080\text{ nm}$ ; (b) magnetic field distribution at valley  $\lambda=1100\text{ nm}$ ; (c) magnetic field pattern height expression at peak  $\lambda=1080\text{ nm}$ ; (d) magnetic field pattern height expression at valley  $\lambda=1100\text{ nm}$

随着介质折射率的变化,Fano共振会受到很大的影响<sup>[34]</sup>,通过研究不同介质折射率 $n$ 所对应的透射谱,得到该结构的折射率传感特性。由于其尖锐的不对称轮廓,Fano共振在光学传感中有着广泛的潜在应用,灵敏度和品质因数是两个最重要的参数,通常用于评估传感器的传感性能,其定义式<sup>[35-36]</sup>为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad (4)$$

$$M_{\text{FOM}} = \frac{\Delta T}{T_0 \Delta n}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为共振波长的变化; $\Delta n$ 为介质的折射率变化; $\Delta T/T_0$ 为 $\Delta n$ 引起的相对强度变化。本文选择空气

作为介质来评价该结构的光学传感性能。

当介质折射率改变时,MIM波导结构的透射光谱如图4(a)所示,此时,折射率从1.00增加到1.08,步长为0.02,可以看出,Fano共振波长出现了明显的红移,共振波长与折射率的线性拟合关系如图4(b)所示,表明共振波长与折射率具有良好的线性关系,线性相关系数为0.99883。应该注意的是,拟合直线的斜率代表了折射率传感的灵敏度,因此,该结构的灵敏度为1078.33 nm/RIU。图4(c)为波导结构的FOM,在1100 nm波长处具有极低的透射率且透射率变化大,因此,该波长具有最大的FOM,达到1259.2,此处获得的FOM可为本结构作为强度调制型传感器提供参

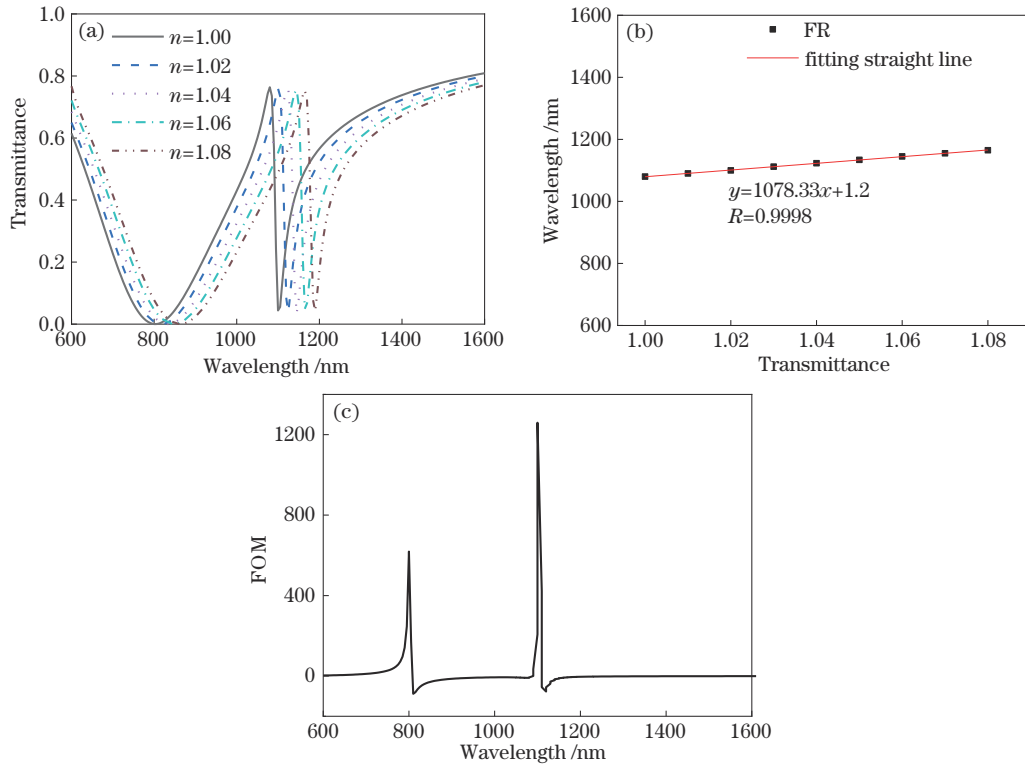


图4 传感器结构在不同折射率下的性能变化。(a)折射率随波长变化;(b)灵敏度;(c)品质因数

Fig. 4 Performance change of sensor system under different refractive indices. (a) Refractive index with wavelength; (b) sensitivity; (c) quality factor

考。需要注意的是,本文的MIM波导结构在实际测量介质折射率时,需将待测介质(如各种气体或液体)充入类H型谐振腔内,进一步通过对介质折射率的测量,间接得到其他参量,如乙醇温度、葡萄糖溶液浓度、血型等。

MIM波导结构中的Fano共振是由总线波导中激发的宽带连续态与H型谐振腔中激发的窄带离散态间的相互作用而产生的,因此,Fano共振特性由结构的几何参数决定,下面进一步探讨结构的主要几何参数对Fano共振的影响,参数包括:类H型谐振腔的中轴长度、枝节宽度和耦合距离。

当改变类H型谐振腔的中轴长度时,结构的光谱如图5(a)所示,此时,中轴长度从130 nm增加到230 nm,步长为20 nm,其他参数不变。随着中轴长度的增大,Fano共振的透射率逐渐增加,这是因为谐振腔的中轴长度越长,谐振腔的有效长度就越长。同时,随着中轴长度的增大,Fano共振产生了明显的红移。图5(b)为中轴长度 $H_1$ 与Fano共振波长的线性拟合关系,二者表现出良好的线性关系,线性相关系数高达0.99998。

枝节宽度对Fano共振的影响,如图5(c)所示,此时,枝节宽度从50 nm增加到80 nm,步长为5 nm,其他参数不变。由图5(c)可知,Fano共振的共振波长几乎没有改变,而随着枝节宽度的增大,Fano共振的谱线形状变得尖锐,且更对称并逐渐接近洛伦兹线型。

图5(d)为枝节宽度与Fano共振波长的线性拟合关系,拟合直线的斜率几乎为0,说明Fano共振波长几乎不随枝节宽度 $L_2$ 的变化而变化。

本文所提到的类H型腔耦合MIM波导结构是一种表面等离子光波导结构,因此耦合距离对两个共振模式之间的耦合强度有较大影响。图5(e)所示为耦合距离 $g$ 的变化对传输谱线的影响,这里取类H型结构中横梁长度 $L_1=300$  nm,中轴长度 $H_1=130$  nm,中轴间距 $d=50$  nm,枝节长度 $H_2=100$  nm,枝节宽度 $L_2=50$  nm。从图5(e)可以看出:Fano共振峰与其左侧的谷发生蓝移,而右侧的谷发生红移,且Fano共振特性逐渐减弱;Fano峰值传输率逐渐降低,右侧传输谷上移,而当 $g$ 较大时,其Fano特性会完全消失。图5(f)所示为右侧传输率谷值波长随耦合距离 $g$ 的变化关系。图5(g)所示为 $\Delta T=|T_{\text{Peak}}-T_{\text{Right}}|$ 与 $\Delta\lambda=|\lambda_{\text{Peak}}-\lambda_{\text{Right}}|$ 随耦合距离 $g$ 的变化关系,可以清晰直观地看出Fano共振窗口从开到关的状态,其中 $T_{\text{Peak}}$ 和 $\lambda_{\text{Peak}}$ 分别表示Fano共振峰值传输率与峰值波长, $T_{\text{Right}}$ 和 $\lambda_{\text{Right}}$ 为右侧谷值传输率与谷值波长。可以看出,当 $g=10$  nm时,其值分别约为0.7196和23 nm,表示此时谱线的Fano特性较为明显,且在23 nm的波长变化过程中,传输率在极大值和极小值之间完成跳变,该特性或将在集成纳米光开关领域有着潜在的应用前景。当 $g=30$  nm时, $T$ 和 $\lambda$ 分别为0.2429和4 nm,此时的Fano窗口临近关闭状态。即当Fano共振的亮暗模式

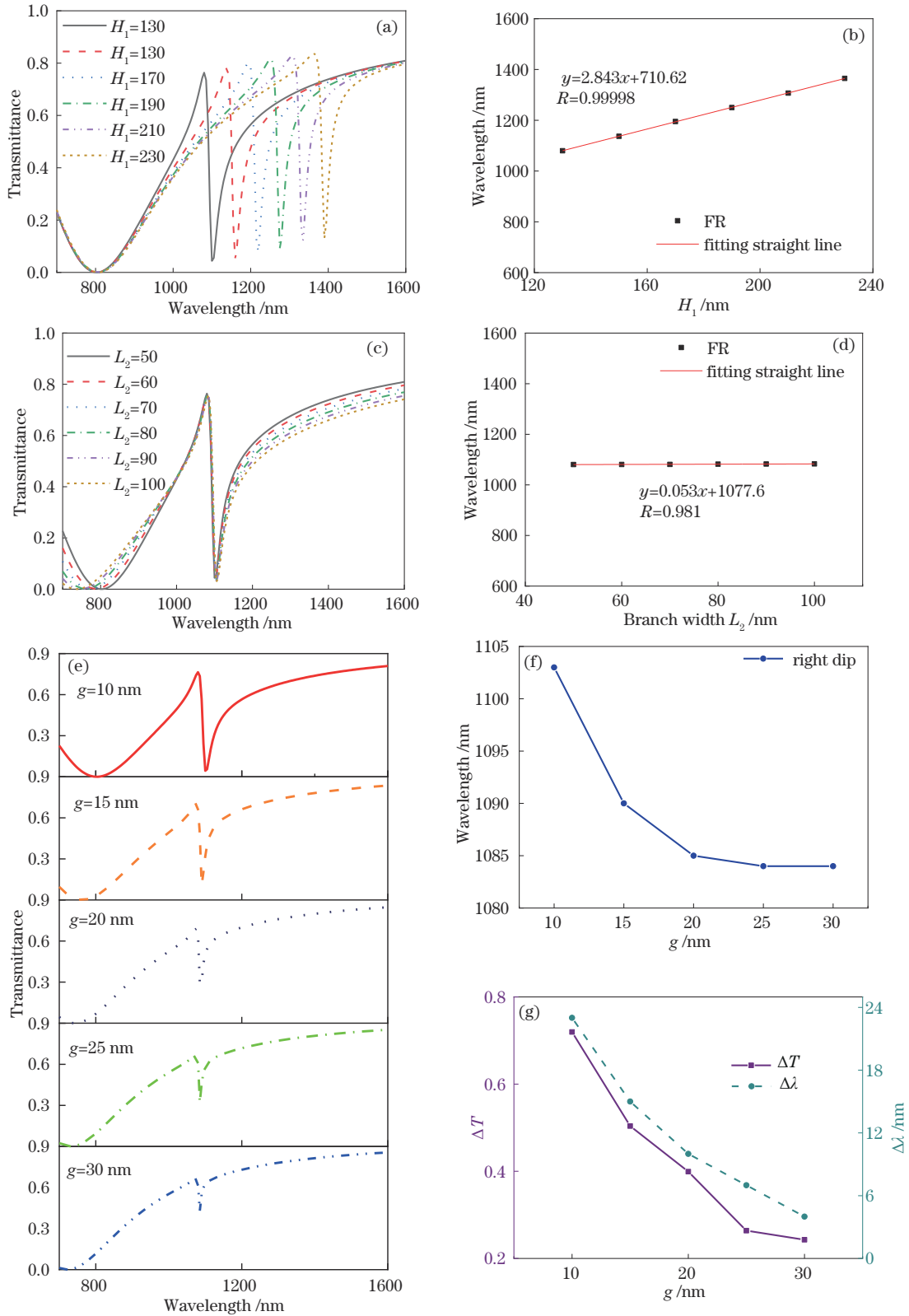


图 5 结构的几何参数对 Fano 共振的影响。(a) Fano 共振峰移与中轴长度变化的关系;(b) 中轴长度与 Fano 共振波长的线性拟合关系;(c) Fano 共振线型与枝节宽度变化的关系;(d) 枝节宽度与 Fano 共振波长的线性拟合关系;(e) 传输谱随耦合距离  $g$  的变化关系;(f) 右侧谷值波长随耦合距离  $g$  的变化关系;(g) 参数  $\Delta T$  和  $\Delta\lambda$  随耦合距离  $g$  的变化关系

Fig. 5 Influence of geometric parameters on Fano resonance of the system. (a) Relationship between peak shift of Fano resonance and variation of axial length; (b) linear fitting relationship between axial length and Fano resonance wavelength; (c) relationship between Fano resonance line type and variation of branch width; (d) linear fitting relationship between branch width and Fano resonance wavelength; (e) relationship between transmission spectrum and coupling distance  $g$ ; (f) relationship between right valley wavelength and coupling distance  $g$ ; (g) variation of parameters  $\Delta T$  and  $\Delta\lambda$  with coupling distance  $g$

相差太大时,暗模式无法被有效激发,因而无法形成有效的 Fano 共振<sup>[37]</sup>。

综上所述,类 H 型谐振腔的中轴长度主要影响 Fano 共振波长和透射率,枝节宽度主要影响 Fano 共振的谱线线型,因此,Fano 共振的波长和线型可以通过分别改变类 H 型谐振腔的中轴长度和枝节宽度实现独立调节。耦合距离  $g$  则会对 Fano 共振窗口的开闭产生较大影响。

## 4 结 论

本文提出了一种由独立枝节、类 H 型谐振腔和总线波导组成的 MIM 波导结构,结构中的 Fano 共振是由类 H 型谐振腔中的窄带离散态和垂直枝节中的宽带连续态间的干涉而产生的,可以在可见光和近红外波长范围内产生尖锐的 Fano 共振。该结构的最大折射率灵敏度为 1078.33 nm/RIU,共振波长与折射率的线性相关系数大于 0.998,最大 FOM 约为 1259.2。同时,Fano 共振波长可由类 H 型谐振腔的中轴长度独立调节,而 Fano 共振线型可由枝节宽度独立调节,使得该结构易于适应不同的传感需求,该波导结构在纳米级光学传感及集成光子器件领域有潜在的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Galvez F, del Valle J, Gomez A, et al. Plasmonic nanodevice with magnetic functionalities: fabrication and characterization[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(10): 3086-3096.
- [2] Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- [3] Luo X, Zou X H, Li X F, et al. High-uniformity multichannel plasmonic filter using linearly lengthened insulators in metal-insulator-metal waveguide[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1585-1587.
- [4] 王梦梦, 韵力宇, 王一飞, 等. 基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(5): 052401.  
Wang M M, Yun L Y, Wang Y F, et al. Plasma refractive index nanosensor based on Fano resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(5): 052401.
- [5] 向天宇, 雷涛, 沈钊阳, 等. 基于平面环偶极子超材料的 Fano 共振[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(9): 0916001.  
Xiang T Y, Lei T, Shen Z Y, et al. Fano resonances in planar toroidal metamaterials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(9): 0916001.
- [6] 赵静, 王加贤, 邱伟彬, 等. 基于 Fano 共振的石墨烯超材料传感特性研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(5): 0524001.  
Zhao J, Wang J X, Qiu W B, et al. Investigation of sensing characteristic of graphene metamaterial based on Fano resonance[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(5): 0524001.
- [7] Wen K H, Hu Y H, Chen L, et al. Fano resonance with ultra-high figure of merits based on plasmonic metal-insulator-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 27-32.
- [8] 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.
- [9] Tang D L, Wang C T, Zhao Z Y, et al. Ultrabroadband superoscillatory lens composed by plasmonic metasurfaces for subdiffraction light focusing[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 713-719.
- [10] Stern L, Grajower M, Levy U. Fano resonances and all-optical switching in a resonantly coupled plasmonic-atomic system[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 4865.
- [11] Xu T, Wu Y K, Luo X A, et al. Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 59.
- [12] 崔丹凤, 谢成峰, 刘耀英, 等. 四环谐振腔结构中耦合诱导透明特性研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(5): 0523002.  
Cui D F, Xie C F, Liu Y Y, et al. Research on coupled resonator induced transparency in fourth-order microring resonator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(5): 0523002.
- [13] Veronis G, Fan S H. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(13): 131102.
- [14] Moharrami F, Abrishamian M S. Plasmonic multi-channel filters with separately tunable pass-bands[J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(7): 075001.
- [15] 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.
- [16] Fano U. Effects of configuration interaction on intensities and phase shifts[J]. *Physical Review*, 1961, 124(6): 1866-1878.
- [17] Limonov M F, Rybin M V, Poddubny A N, et al. Fano resonances in photonics[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(9): 543-554.
- [18] Li J N, Chen J F, Liu X, et al. Optical sensing based on multimode Fano resonances in metal-insulator-metal waveguide systems with X-shaped resonant cavities[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(18): 5312-5319.
- [19] Liu X, Li J N, Chen J F, et al. Independently tunable triple Fano resonances based on MIM waveguide structure with a semi-ring cavity and its sensing characteristics[J]. *Optics Express*, 2021, 29(13): 20829-20838.
- [20] Chen J F, Li J A, Liu X, et al. Fano resonance in a MIM waveguide with double symmetric rectangular stubs and its sensing characteristics[J]. *Optics Communications*, 2021, 482: 126563.
- [21] Liu X, Li J N, Chen J F, et al. Fano resonance based on D-shaped waveguide structure and its application for human hemoglobin detection[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(21): 6424-6430.
- [22] 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.  
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.
- [23] 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): 0413002.
- 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): 0413002.
- [24] Liu Q, Bibbó L, Albin S, et al. Plasmonic waveguide design for the enhanced forward stimulated Brillouin scattering in diamond[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 88.
- [25] Zhu J, Li N. MIM waveguide structure consisting of a semicircular resonant cavity coupled with a key-shaped resonant cavity[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 19978-19987.
- [26] 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.
- [27] 陈颖, 许扬眉, 高新贝, 等. 含矩形腔的 MIM 波导耦合 T 型腔结构 Fano 共振传感特性研究[J]. *中国激光*, 2019, 46(1): 0113001.
- Chen Y, Xu Y M, Gao X B, et al. Fano Resonance Sensing Characteristics of MIM waveguide coupled T-shaped cavity structure with rectangular cavity[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(1): 0113001.
- [28] 陈颖, 曹景刚, 许扬眉, 等. 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[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0213001.
- Chen Y, Cao J G, Xu Y M, et al. Fano resonance sensing characteristics of metal-dielectric-metal waveguide coupling square cavity with bimetallic baffle[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0213001.
- [29] Wang Q, Ouyang Z B, Lin M, et al. Independently tunable Fano resonances based on the coupled hetero-cavities in a plasmonic MIM system[J]. *Materials*, 2018, 11(9): 1675.
- [30] Wen K H, Hu Y H, Chen L, et al. Tunable multimode plasmonic filter based on side-coupled ring-groove joint resonator[J]. *Plasmonics*, 2017, 12(2): 427-431.
- [31] Zhang Q, Huang X G, Lin X S, et al. A subwavelength coupler-type MIM optical filter[J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7533-7539.
- [32] Hu F F, Yi H X, Zhou Z P. Band-pass plasmonic slot filter with band selection and spectrally splitting capabilities[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4848-4855.
- [33] 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.
- [34] 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.
- Zhang Y J, Wang H J, Zhang L T, et al. Multi-fano resonant sensing characteristics of MIM waveguide coupled with cloud like cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 0524002.
- [35] Feng J, Siu V S, Roelke A, et al. Nanoscale plasmonic interferometers for multispectral, high-throughput biochemical sensing[J]. *Nano Letters*, 2012, 12(2): 602-609.
- [36] 陈颖, 高新贝, 许扬眉, 等. 光子晶体纳米梁侧耦合孔径啁啾光子晶体纳米梁腔结构的 Fano 共振传感机理[J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1123002.
- Chen Y, Gao X B, Xu Y M, et al. Fano resonance-sensing mechanism of photonic crystal nanobeam side-coupling aperture chirped photonic crystal nanobeam cavity structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1123002.
- [37] Wang T, Zhang Y S, Hong Z, et al. Analogue of electromagnetically induced transparency in integrated plasmonics with radiative and subradiant resonators[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21529-21534.