

基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器

王梦梦^{1,2}, 韵力宇³, 王一飞^{1,2}, 杨啸宇^{1,2}, 文丰², 闫树斌^{1,2*}

¹中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;

²中北大学仪器与电子学院, 山西 太原 030051;

³中国人民武装警察部队指挥学院, 天津 300250

摘要 设计了一种基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器, 传感器由带存根谐振腔的直波导耦合开口方环谐振器组成。使用有限元分析法研究了该传感器结构的传输特性, 并分析了结构参数对系统传感特性的影响。计算结果表明该结构可以激发 Fano 共振, 且共振峰的位置和线型可以通过改变关键参数进行调节。通过调整结构参数, 该结构的灵敏度值可以达到 1125.7 nm/RIU, 品质因数为 30.01。该结构在光学集成电路方面具有潜在的应用前景, 尤其是在纳米生物传感器方面。

关键词 表面光学; 表面等离子体激元; 有限元分析法; 纳米传感器; Fano 共振; 波导

中图分类号 TN252

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.052401

Plasma Refractive Index Nanosensor Based on Fano Resonance

Wang Mengmeng^{1,2}, Yun Liyu³, Wang Yifei^{1,2}, Yang Xiaoyu^{1,2}, Wen Feng², Yan Shubin^{1,2*}

¹Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

²School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

³The people's Armed Police Command College China, Tianjin 300250, China

Abstract A plasma refractive index nanosensor based on Fano resonance is designed, which is composed of the metal-insulator-metal waveguide with a stub coupled with a split-square resonator. Analysis of transmission characteristics of the sensor's structure is performed using the finite element method, and the influences of the structural parameters on the sensing characteristics of the sensor are studied. The calculated results show that the structure can excite the Fano resonance, and the resonance peak wavelength and line type can be adjusted by changing the key parameters. By adjusting the structural parameters, the sensitivity of the structure is up to 1125.7 nm/RIU and the figure of merit is 30.01. The results indicate that the proposed structure can be applied to optical integrated circuits, especially in nanometer biosensors.

Key words optics at surfaces; surface plasmon polaritons; finite element method; nanosensors; Fano resonance; waveguide

OCIS codes 240.6680; 230.4555; 280.4788; 250.5403

1 引言

表面等离子体激元(SPPs)是由金属表面自由电子与入射光子相互作用形成的一种沿金属与电介质表面传播的电磁波,其强度在远离金属-介质表面处呈指数衰减^[1-2]。它打破了传统的光学衍射极限,可

以实现纳米尺度的光信息传输与处理^[3-4]。特别是基于 SPPs 的金属-绝缘体-金属(MIM)波导,具有较好的局域场增强特性和易于集成等优点,在高集成度光子电路中具有重要应用^[5-6]。研究人员已对许多基于 MIM 波导的等离子体器件展开研究,比如等离子体传感器^[7-10]、滤波器^[11-13]和等离子体波导调制器^[14]

收稿日期: 2019-05-05; 修回日期: 2019-06-06; 录用日期: 2019-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(61675185,61875250)、山西省归国人员择优项目、山西 1331 项目重点学科建设项目

* E-mail: yanshb@zjweu.edu.cn

等,这些器件基本上由波导和谐振器组成。

MIM 波导耦合谐振器可以产生特殊的光学效应,如 Fano 共振^[15-17]和电磁诱导透明^[18-19]等。某些条件下,Fano 共振也可以看作电磁感应透明(EIT)的一种经典类比^[20]。基于 Fano 共振的等离子体系统由于其尖锐不对称的谱线形状^[21-22]而具有成为一种高集成度的折射率传感器的很大潜力,其光谱的透射率可以从波峰急剧下降到波谷,这样的短波长变化可以提供一个超窄的透射峰,而峰值波长很容易被识别和跟踪,因此可以极大地提高传感分辨率^[23]。科研人员已经提出了许多基于 Fano 共振的等离子体传感器结构^[24-28],包括:带存根的 MIM 波导耦合方形谐振腔结构^[23],灵敏度值可以达到 938 nm/RIU;带挡板的 MIM 波导与 M 型腔耦合而成的对称型波导结构^[26],最大灵敏度值可以达到 780 nm/RIU;MIM 波导耦合双矩形腔的等离子体波导结构^[27],灵敏度值可以达到 596 nm/RIU。但是上述结构的灵敏度值都不是很高,因此有必要设计超高灵敏度的等离子体传感器。

本文提出了一种基于 Fano 共振的等离子体折射率纳米传感器,该传感系统由带存根谐振腔的 MIM 波导、开口方环谐振器(SSR)组成。运用基于

有限元分析法(FEM)的 COMSOL 多物理场软件仿真分析传感系统的透射谱和磁场分布。在方环谐振器上引入由分裂造成的结构对称性破坏,可以激发新的共振模式(这是规则方环不能实现的),还可以通过改变分裂位置实现对共振模式的控制。系统的结构参数影响传感器的传输特性,因此进一步研究了 SSR 的分裂位置对传感特性及折射率灵敏度的影响。

2 结构模型与分析方法

由 SSR、带存根谐振腔的 MIM 波导组成的二维平面波导结构如图 1 所示。该结构在实验制备过程中,可以采用电子束曝光和剥离工艺制作。制作步骤为:1)衬底上镀一层金属层,衬底可以选用 SiO₂ 等非吸收性材料;2)利用电子束曝光和剥离工艺在金属层上刻蚀出上述波导结构。通过建立基于 FEM 的几何分析模型探究其光学响应特性。MIM 波导、SSR 的宽度 $w = 50$ nm,以确保仅支持基本横向磁模(TM₀)^[28]。通过在规则方环上引入一个分裂过程得到 SSR, l 为 SSR 分裂的宽度,分裂的方向由 x 轴和分裂中心之间的夹角 θ (这里是 0°)来定义,如图 1 所示。 a 和 b 分别为 SSR 的长度和宽度, d 和 h 分别为 MIM 波导中加入的存根宽度和高度, g 为耦合距离。

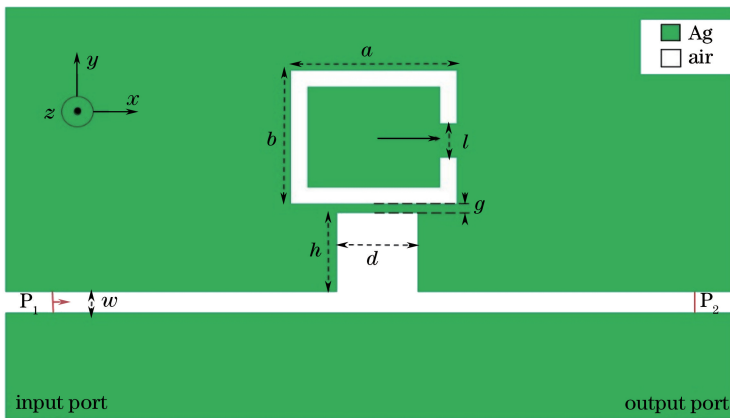


图 1 SSR、带存根的 MIM 波导组成的等离子体纳米传感器二维原理图

Fig. 1 2D schematic of plasma nanosensor composed of SSR and MIM waveguide with stub

为了分析耦合结构的光学响应特性,使用 COMSOL 软件建立几何分析模型。模拟中采用较细化的任意三角形进行网格剖分,设置了银的相对介电常数、空气的折射率等相关计算参量,并采用完美匹配层包裹整个结构,使面光源从入射端口自左向右平行入射,在输出端口监测输出,求解偏微分方程,进行仿真计算,得到耦合结构在不同入射光频率下的透射谱。透射率可以表示为 $T = (S_{21})^2$,其中 S_{21} 为输入端口 P₁ 到输出端口 P₂ 的透射系数。

空气的相对介电常数 $\epsilon_d = 1$,银的相对介电常数与入射光的频率有关,可以根据 Debye-Drude 色散模型^[29]获得:

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

式中: ϵ_0 为真空中的介电常数; ω 为真空中入射光波的角频率; ϵ_∞ 为无穷介电常数, $\epsilon_\infty = 3.8344$; ϵ_s 为静态介电常数, $\epsilon_s = -9530.5$; τ 为阻尼系数, $\tau = 7.35 \times 10^{-15}$ s; σ 为银的电导率, $\sigma = 1.1486 \times 10^7$ S/m。

3 结果与讨论

模拟中,首先研究分裂在 MIM 波导环中的作用,并分别计算完整方环与 MIM 波导耦合的透射谱和 SSR 与 MIM 波导耦合的透射谱。SSR 的结构参数分别为: $a = 300 \text{ nm}$; $\theta = 0^\circ$; $b = 240 \text{ nm}$ 。耦合 SSR 和完整方环谐振器的透射光谱的比较如图 2 所示。与完整环相比,SSR 透射谱在波长 $\lambda = 805 \text{ nm}$ 处出现了新的共振模式。

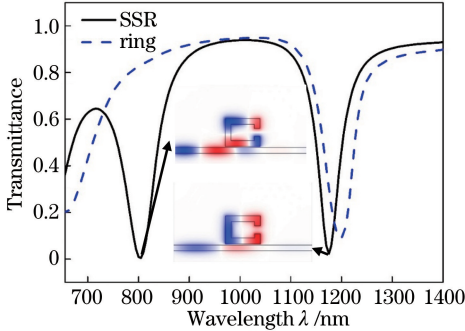


图 2 MIM 波导侧耦合完整方环和侧耦合 SSR 的透射谱
Fig. 2 Transmission spectra of the MIM waveguide side coupled complete square ring and side coupled SSR

为了理解传输特性,图 2 中插入了侧耦合 SSR 的波导结构在谐振波长处的磁场分布。如图 2 插图所示,磁场分布表现出不同的对称性。波长 $\lambda = 1175 \text{ nm}$ 时,磁场分布是关于开口呈轴对称的,场分布中有 2 个节点。波长 $\lambda = 805 \text{ nm}$ 时,磁场分布关于开口轴是不对称的,场分布中有 3 个节点。因此,根据磁场的对称性,可以将 SSR 的共振模式分为对称模式和非对称模式,这两个共振波谷分别对应 $m = 1$ 的对称模($\lambda = 1175 \text{ nm}$)和 $m' = 1$ 的非对称模($\lambda = 805 \text{ nm}$)^[30]。我们把新出现的共振模式归因于结构的对称性破坏。

如图 1 所示,在 MIM 波导中加入存根谐振腔,与 SSR 构成整个传感器系统。其中存根宽度和高度分别为 $d = 200 \text{ nm}$, $h = 220 \text{ nm}$,其他参数与图 2 的参数一致。当 $\theta = 0^\circ$ 时系统的透射谱如图 3 所示。由图中可以看到传感器系统(实线)在波长 $\lambda = 810 \text{ nm}$ 时,存在一个由波峰快速下降到波谷的尖锐非对称线型,这是典型的 Fano 共振现象,该现象由宽广连续态与窄带离散态相互作用形成。为了更好地说明 Fano 共振的形成原理,可以将该结构拆分为两种结构,一种是 MIM 波导侧耦合 SSR 而无存根的结构,另一种是 MIM 波导带有存根而无 SSR 的结构。点划线对应带存根的 MIM 波导的宽广连

续透射谱,斜率为负且具有较低的透射率;虚线对应 MIM 波导中仅耦合 SSR 的透射谱,在波长 $\lambda = 805 \text{ nm}$ 和 $\lambda = 1175 \text{ nm}$ 处具有较窄的透射倾角,可以看作离散态。波长 $\lambda = 810 \text{ nm}$ 处的 Fano 共振由 SSR 的 $m' = 1$ 非对称模耦合带存根的 MIM 波导模引起,可以将其表示为 Fano(1,1)^[23] 模。

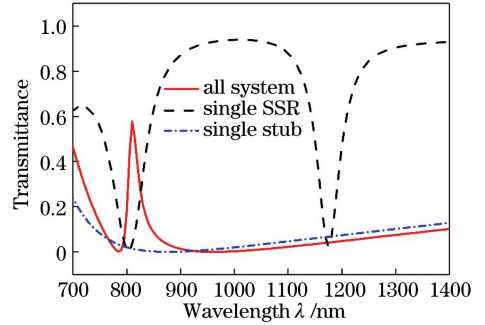


图 3 传感器系统、仅有存根的 MIM 波导、SSR 的透射光谱
Fig. 3 Transmission spectra of sensor system, MIM waveguide with stub, and SSR

为了更好地了解透射谱变化的内在机理,研究共振波谷和共振波峰处波导的磁场分布。等离子体波导耦合系统在波谷 $\lambda_{\text{dip}} = 785 \text{ nm}$ 和波峰 $\lambda_{\text{peak}} = 810 \text{ nm}$ 处磁场分布如图 4 所示。图 4(a) 中,在 MIM 波导的右侧有一个弱耦合,没有 SPPs 耦合进入波导右侧,开口方环谐振器的下部与存根之间存在明显的同相关系。而图 4(b) 中开口方环谐振器的下部与存根之间是反相关系。

随着介质折射率的变化,Fano 共振会受到很大的影响^[30]。通过计算不同介质折射率 n 下的系统透射谱来研究该结构的折射率传感特性。波导的结构参数与图 3 的参数相同,并将折射率从 1.24 增加到 1.39(间隔 0.03)。不同介质折射率下的透射谱如图 5(a) 所示,从图中可以看出透射谱中的 Fano 共振随着介质折射率的增加出现单调红移。共振峰的波长漂移($\Delta\lambda$)与折射率变化(Δn)的关系如图 5(b) 所示。灵敏度(S)和品质因数(F_{OM})是评估波导折射率传感器性能的两个重要参量,一般定义为

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n}, \quad (2)$$

$$F_{\text{OM}} = \frac{S}{F_{\text{WHM}}}, \quad (3)$$

式中: F_{WHM} 为波长的半峰全宽。

在图 5(b) 中利用线性拟合可以得到拟合线的斜率,即结构的灵敏度值为 771.42 nm/RIU , $F_{\text{OM}} = 20.79$ 。由图 5(b) 可知, $\Delta\lambda$ 与 Δn 存在良好的线性关系,这为折射率传感器的应用提供了可能性。

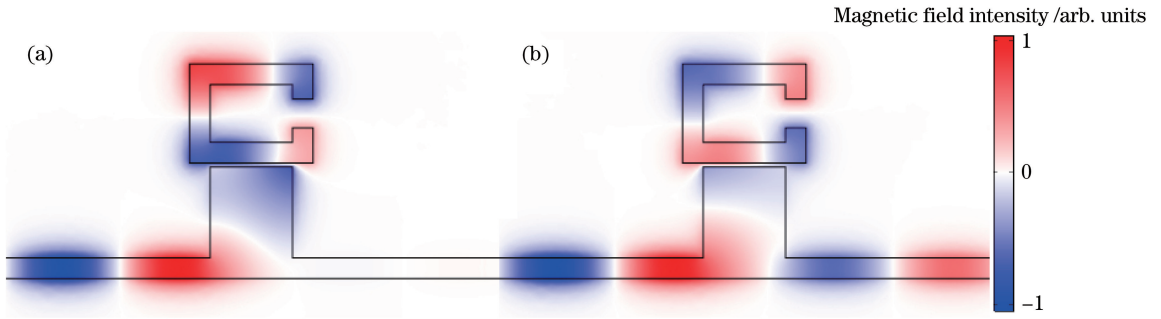


图 4 波导结构在不同波长下的磁场分布。(a) $\lambda_{\text{dip}}=785 \text{ nm}$;(b) $\lambda_{\text{peak}}=810 \text{ nm}$

Fig. 4 Magnetic field distributions of waveguide structures at different wavelengths. (a) $\lambda_{\text{dip}}=785 \text{ nm}$; (b) $\lambda_{\text{peak}}=810 \text{ nm}$

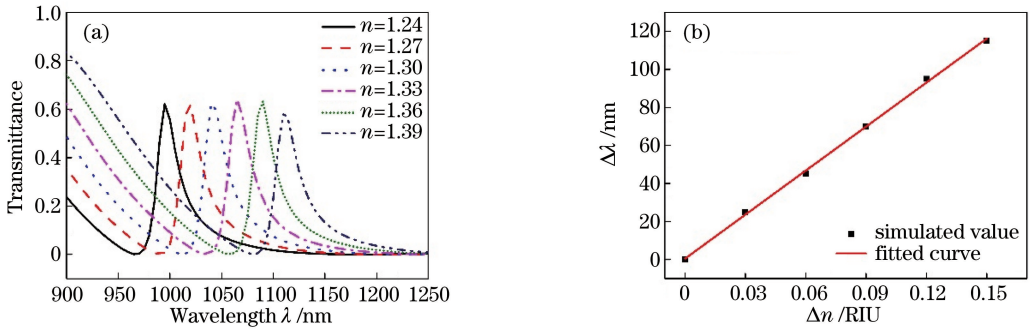


图 5 传感器系统在不同折射率下的性能曲线。(a)透射谱;(b)Fano 共振峰移与折射率变化的关系

Fig. 5 Performance curves of sensor at different refractive indices. (a) Transmission spectra;

(b) Fano resonant peak shift versus change in refractive index

讨论 SSR 取向角对传感系统谐振特性的影响。分别计算取向角 $\theta=0^\circ, 90^\circ, -90^\circ$ 时传感器系统的透射谱,如图 6 所示。除取向角外,其他参数与图 3 的参数相同。从图 6(a)中可以观察到 Fano 共振的共振波长随取向角的不同而发生变化,这是由于在不同的取向角下,孤立的 SSR 产生的透射谱在两种模式下的透射率会发生改变,影响 MIM 波导与

SSR 的耦合强度。上述结果表明,通过改变取向角 θ 的大小可以控制 Fano 共振的位置。与规则环系统相比,侧耦合 SSR 的传感器系统可以更灵活地控制谐振。Fano 共振 $\Delta\lambda$ 随 Δn 的变化如图 6(b) 所示,在 $\theta=90^\circ$ 时,最大灵敏度值可以达到 1125.7 nm/RIU , F_{OM} 为 30.01。在 $\theta=-90^\circ$ 时,灵敏度值为 1108.57 nm/RIU ,最大的 F_{OM} 可以达到为 39.23。

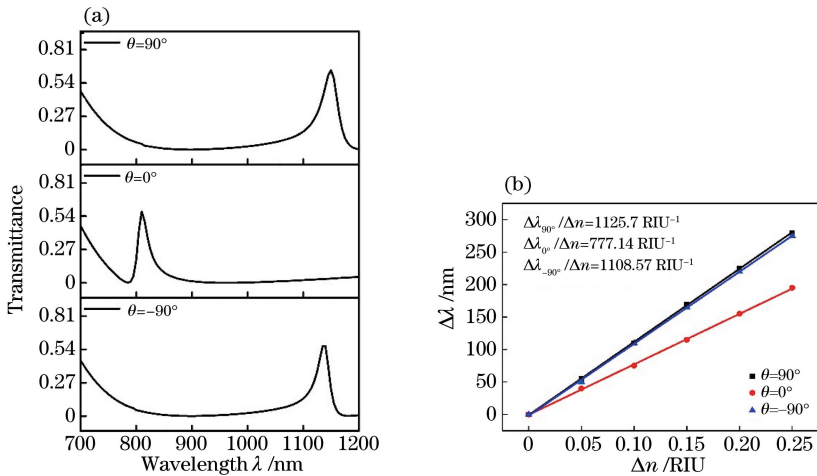


图 6 不同 SSR 取向角下传感系统的性能曲线。(a)透射谱;(b) Fano 共振峰移与折射率变化的关系

Fig. 6 Performance curves of sensor at different orientation angles. (a) Transmission spectra;

(b) Fano resonant peak shift versus change in refractive index

4 结 论

提出了一种由带存根谐振腔的 MIM 波导和 SSR 组成的等离子体折射率传感系统,并采用有限元分析法进行分析计算。结果表明,该波导结构可以激发 Fano 共振,通过改变 SSR 的取向角大小,可以灵活地调整 Fano 共振的位置。所设计的传感器性能优良,通过优化几何参数,传感器的灵敏度值可以达到 $1125.7 \text{ nm}/\text{RIU}$, F_{OM} 为 30.01。该研究可以为芯片内等离子体纳米折射率传感器提供一种新的参考方案。

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] Haddouche I, Cherbi L. Comparison of finite element and transfer matrix methods for numerical investigation of surface plasmon waveguides [J]. *Optics Communications*, 2017, 382: 132-137.
- [3] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I. Plasmonics beyond the diffraction limit [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 83-91.
- [4] Yin Y, Qiu T, Li J, et al. Plasmonic nano-lasers [J]. *Nano Energy*, 2012, 1(1): 25-41.
- [5] Xiao G L, Xu J L, Yang H Y, et al. A plasmon multi-channel wavelength-division multiplexer constructed with a nanodisk structure embedded in a rectangular metal block [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(12): 1206006.
肖功利, 徐俊林, 杨宏艳, 等. 内嵌矩形金属块纳米圆盘结构等离子体多通道波分复用器研究 [J]. *光学学报*, 2018, 38(12): 1206006.
- [6] 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.
- [7] 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.
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.
- [8] 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.
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.
- [9] Sarkaleh A, Lahijani B, Saberhari H, et al. Optical ring resonators: a platform for biological sensing applications [J]. *Journal of Medical Signals & Sensors*, 2017, 7(3): 185-191.
- [10] Tsigaridas G N. A study on refractive index sensors based on optical micro-ring resonators [J]. *Photonic Sensors*, 2017, 7(3): 217-225.
- [11] Zhang Z, Shi F H, Chen Y H. Tunable multichannel plasmonic filter based on coupling-induced mode splitting [J]. *Plasmonics*, 2015, 10(1): 139-144.
- [12] 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.
- [13] Ma F S, Lee C. Optical nanofilters based on meta-atom side-coupled plasmonics metal-insulator-metal waveguides [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(17): 2876-2880.
- [14] Veronis G, Fan S H. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(13): 131102.
- [15] Zhang Z D, Wang H Y, Zhang Z Y. Fano resonance in a gear-shaped nanocavity of the metal-insulator-metal waveguide [J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 797-801.
- [16] Piao X J, Yu S, Koo S, et al. Fano-type spectral asymmetry and its control for plasmonic metal-insulator-metal stub structures [J]. *Optics Express*, 2011, 19(11): 10907-10912.
- [17] Yu S, Piao X J, Hong J, et al. Progress toward high-Q perfect absorption: a Fano antilaser [J]. *Physical Review A*, 2015, 92(1): 011802.
- [18] Yan X C, Wang T, Han X, et al. High sensitivity nanoplasmonic sensor based on plasmon-induced transparency in a graphene nanoribbon waveguide coupled with detuned graphene square-nanoring resonators [J]. *Plasmonics*, 2017, 12(5): 1449-1455.
- [19] Piao X J, 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.
- [20] Peng B, Özdemir Ş K, Chen W, et al. What is and what is not electromagnetically induced transparency in whispering-gallery microcavities [J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5082.
- [21] Chen Z, Yu L, Wang L, et al. Sharp asymmetric line shapes in a plasmonic waveguide system and its application in nanosensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(15): 3250-3253.
- [22] Ma S B, Liu Q, Qian X C, et al. Controllability study of surface plasmon resonance spectra of aluminium nanoparticles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0931001.
马守宝, 刘琼, 钱晓晨, 等. 铝纳米颗粒表面等离子体共振峰可控性研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0931001.
- [23] 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.
- [24] Chen Z, Wang W H, Cui L N, et al. Spectral splitting based on electromagnetically induced transparency in plasmonic waveguide resonator system[J]. *Plasmonics*, 2015, 10(3): 721-727.
- [25] Wen K H, Hu Y H, Chen L, et al. Single/dual Fano resonance based on plasmonic metal-dielectric-metal waveguide[J]. *Plasmonics*, 2016, 11(1): 315-321.
- [26] Qiao L T, Zhang G M, Wang Z S, et al. Study on the Fano resonance of coupling M-type cavity based on surface plasmon polaritons [J]. *Optics Communications*, 2019, 433: 144-149.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Gai H F, Wang J, Tian Q. Modified Debye model parameters of metals applicable for broadband calculations[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(12): 2229-2233.
- [30] 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.