

基于L形谐振腔MIM波导结构滤波特性的研究

庞绍芳^{1,2} 屈世显² 张永元¹ 解 忱¹ 郝丽梅¹

¹西安科技大学理学院, 陕西 西安 710054

²陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062

摘要 设计了一种基于表面等离子极化激元金属-介质-金属的L形谐振腔波导结构,并应用有限元方法研究了该结构的传输特性。数值计算结果表明,透射光谱中出现了明显的阻带,其滤波特性强烈地依赖于L形谐振腔结构的尺寸。相比于同尺度的水平放置的矩形谐振腔,L形谐振腔结构具有更高的品质因子,滤波效果更佳。随着L形谐振腔结构尺寸的增大,透射光谱发生红移;在L形谐振腔中充入折射率不同的介质,根据表面等离子极化激元共振对L形谐振腔内折射率变化敏感特性,通过探测透射光谱中共振波长来探测介质折射率,该结构可广泛用于传感器方面。

关键词 光学器件; 表面等离子极化激元; 有限元方法; 滤波器

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0623001

Filter Characteristic Research of MIM Waveguide Based on L Shaped Resonator

Pang Shaofang^{1,2} Qu Shixian² Zhang Yongyuan¹ Xie You¹ Hao Limei¹

¹College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

²School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China

Abstract A metal-insulator-metal (MIM) waveguide with L-shaped resonator is designed. The transmission properties of this resonator are numerically investigated by finite element method. The results show that the transmission properties of the L-shaped resonator depend on the length and the height of it. L-shaped cavity has better quality factor and better filtering effect compared with the horizontal rectangular cavity with the same size as L-shaped cavity. With the increase of the size of L-shaped cavity, spectrum exhibits a red shift. Filling the medium of different refractive index in L-shaped cavity, the MIM waveguide with L-shaped resonator allows a much more sensitive detection of small refractive index changes of the filled media inside L-shaped nano-cavity. It is easy to detect the refractive index of medium by detecting resonant wavelength in the transmission spectra, which reveals a potential sensors of the MIM waveguide with L-shaped nano-cavity.

Key words optical devices; surface plasmon polaritons; finite element method; filter

OCIS codes 230.5750; 230.7370; 230.7408

1 引 言

表面等离子极化激元(SPPs)是一种沿着金属-介质表面传播的电磁波,在垂直于金属表面方向上,振幅以指数形式衰减,由于SPPs具有这种独特的性质,故可以突破传统光学中的衍射极限。因此,SPPs广泛应用于亚波长结构的约束来引导光场,实现亚波长光学器件的集成^[1-7]。由于基于SPPs的金属-介质-金属(MIM)波导具有很好的模场限制效果和传播长度^[8],很多研究小组利用SPPs原理进行了一系列波导的研究,各种功能的基于MIM波导的光学元件相继提出,例如分路器^[9]、Y-形合成器^[10]、马赫-曾德尔干涉仪^[11]、多模干涉仪^[12]和滤波器^[13-15],已经在数值研究和实验方面获得验证和实现。

收稿日期: 2014-10-31; 收到修改稿日期: 2015-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(11304243)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JM8004)、西安科技大学培育基金项目(201242)

作者简介: 庞绍芳(1978—),女,博士,讲师,主要从事微纳光学和光子学方面的研究。E-mail: pangshaofang@126.com

亚波长光学器件中,滤波器可以实现带通或带阻波长选择功能,是通信过程中的重要器件^[16-18]。当SPPs波耦合到谐振腔后,只有在腔中形成共振的SPPs才能从腔中耦合到出射波导中。基于谐振腔的共振特性,研究者设计了多种滤波器结构,例如圆环形谐振腔滤波器^[19]、矩形谐振腔滤波器^[20]和直腔形谐振腔滤波器^[21]。

将矩形谐振腔平行地放置于直波导的上方,透射光谱的半峰全宽(FWHM)较大,滤波效果较差^[22]。相同尺度的矩形谐振腔垂直放置于直波导上方,随着耦合间距的微小变化,共振波长处的滤波效果变化非常敏感^[23]。基于此思路,本文设计了L形谐振腔MIM波导滤波器,并应用基于有限元算法的COMSOL Multiphysics软件研究了其滤波特性。数值模拟结果表明,L形谐振腔的滤波特性强烈地依赖于十字形结构的长度和高度。同时,在L形谐振腔中充入不同折射率的介质,由于SPPs对谐振腔内折射率变化很敏感^[24],L形谐振腔可用于灵敏探测器。

2 结构和计算方法

图1为设计的L形谐振腔的结构示意图,该结构由一两端开口的MIM波导与L形谐振腔组成,其中L形谐振腔的高度和长度分别用 H 和 D 表示。为使得波导中只有横向磁场的基模(TM₀)传播,波导的宽度 d 固定为50 nm^[25-26]。直波导与L形谐振腔间的耦合距离为 w ,将 w 固定为 $w=10$ nm。在进行数值计算时,金属材料为银,银材料的介电常数取自实验结果^[27]。基于有限元算法的COMSOL Multiphysics仿真软件数值研究L型谐振腔的滤波特性。用透射率描述L型谐振腔结构的滤波特性,透射率 T 定义为通过波导出射端口的出射功率 P_{out} 与入射端口的入射功率 P_{in} 之比,即 $T=P_{out}/P_{in}$ 。进行数值模拟时, x,y 方向均采用完全匹配吸收层(PML)作为边界消除边界反射的能量, z 方向为周期性边界条件。网格剖分时,一般要求网格最大为入射光波长的1/5。

在波导结构中,横向磁场传播模式的电磁场满足方程^[28]

$$\tanh(\kappa d) = -\kappa(p\alpha_c + p\alpha_s)/(\kappa^2 + p\alpha_c p\alpha_s), \quad (1)$$

其中, κ 和 d 分别为波导中传播的电磁波波矢和波导宽度。如果MIM波导由同一种金属组成,则 $p = q$, $\alpha_c = \alpha_s$ 。(1)式中 $p = \epsilon_{in}/\epsilon_m$, $\alpha_c = [k_0^2(\epsilon_{in} - \epsilon_m) + \kappa]^2$,其中 ϵ_m 和 ϵ_{in} 分别表示金属和介质的介电常数。 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 为电磁波在自由空间中的波矢。求得(1)式中波矢 κ 后,波导的有效折射率 n_{eff} 可以表示为 $n_{eff} = [\epsilon_m + (\kappa/k_0)^2]^{1/2}$,则波导中传播SPPs的波长 $\lambda_{SPPs} = \lambda_0/\text{Re}(n_{eff})$, $\text{Re}(n_{eff})$ 为有效折射率的实部。

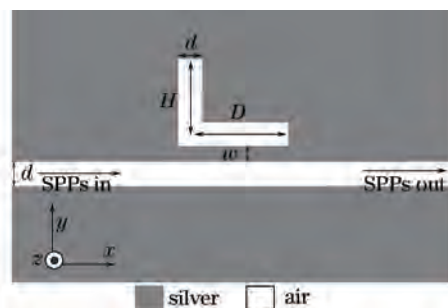


图1 L形谐振腔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of L-shaped cavity

3 结果与讨论

图2给出了当 $H=215$ nm, $D=175$ nm时L形谐振腔的透射光谱。从图中可以看出,在 $\lambda = 0.47$ μm 、 0.68 μm 和 1.17 μm 附近对应有三个传输低谷,分别如图中的模式1、模式2和模式3所示。低谷处 $\lambda=1.17$ μm 、 0.68 μm 和 0.47 μm 处的透射率均接近0,说明低谷处电磁波的能量不能通过L形谐振腔,其他波长的电磁波可以通过该波导结构,所以L形谐振腔类似于滤波器装置。另外,计算出L形谐振腔模式1处对应的半峰全宽仅为48 nm。图3为同尺度($H+D=390$ nm)的水平放置的矩形谐振腔透射光谱,其中, $w=10$ nm。从图3中可以看出,矩形谐振腔也具有一定的滤波特性,其长波长处对应的半峰全宽为143 nm。相比于同尺度的水平放置的矩形谐振腔,L形谐振腔结构具有更高的品质因子,滤波特性更好。

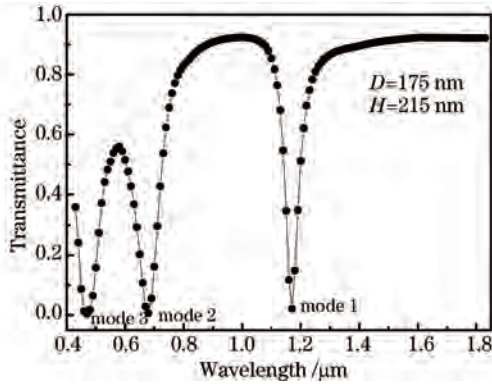


图2 L形谐振腔的透射光谱
Fig.2 Transmission spectra of L-shaped cavity

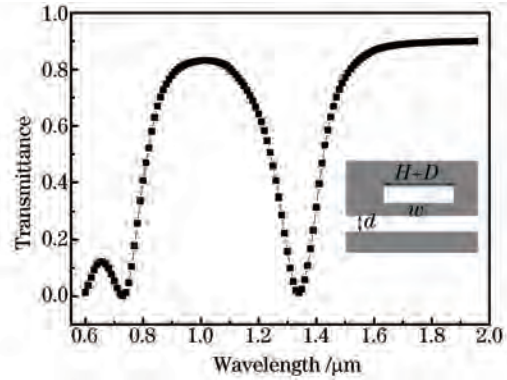


图3 与L形谐振腔尺度相同水平放置的矩形谐振腔透射光谱
Fig.3 Transmission spectra of horizontal rectangular cavity with the same size as the L-shaped cavity

为了研究L形谐振腔内的共振模式,分别计算当 $H=215\text{ nm}$, $D=175\text{ nm}$ 时,在低谷波长 $\lambda=1.17\text{ }\mu\text{m}$ 、 $0.68\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.47\text{ }\mu\text{m}$ 处的稳态磁场分布图。图4(a)为波长 $\lambda=1.17\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的稳态磁场分布图,从图4(a)中可以看出,在L形谐振腔的两端分布有强磁场。波长 $\lambda=0.68\text{ }\mu\text{m}$ 对应的稳态磁场分布图如图4(b)所示,强磁场主要分布在L形谐振腔结构的两端和拐角位置。图4(c)给出了波长 $\lambda=0.47\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的稳态磁场分布,除了在L形谐振腔的两端分布有强磁场外,在L形谐振腔的中间也分布有较强磁场。

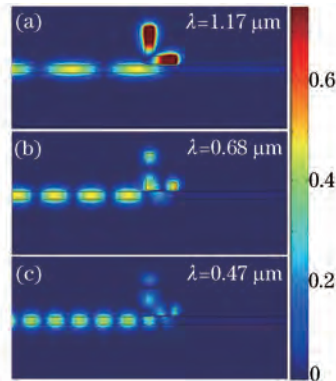


图4 L形谐振腔不同带阻波长处的稳态磁场分布图。(a) $\lambda = 1.17\text{ }\mu\text{m}$; (b) $\lambda = 0.68\text{ }\mu\text{m}$; (c) $\lambda = 0.47\text{ }\mu\text{m}$

Fig.4 Steady state distribution of L-shaped cavity with different stop-band wavelength. (a) $\lambda = 1.17\text{ }\mu\text{m}$; (b) $\lambda = 0.68\text{ }\mu\text{m}$; (c) $\lambda = 0.47\text{ }\mu\text{m}$

当SPPs耦合到L形谐振腔时,在腔内发生共振,在L形谐振腔内形成稳定驻波,需要满足共振条件: $\Delta\phi = \beta_m \cdot 2(H+D) + \phi_r = 2m\pi$,其中, ϕ_r 为L形谐振腔的右侧面和上面的光束反射形成的反射相位;正整数 m 为在L形谐振腔形成驻波的波腹数; β_m 为腔内形成的 m 阶共振模式对应的SPPs的传播常数。当波长 $\lambda=1.17\text{ }\mu\text{m}$ 时,由前文的算法求得 $\text{Re}(n_{\text{eff}})=1.396$,其对应的 $\lambda_{\text{SPP}}=0.838\text{ }\mu\text{m}$, $m=2(H+D)/\lambda_{\text{SPP}}=0.93$ 。考虑到反射相位,计算出 $\phi_r=0.14\pi$ 。在波长 $\lambda=0.68\text{ }\mu\text{m}$ 和 $0.47\text{ }\mu\text{m}$,其对应的 $m=1.65, 2.55$, ϕ_r 分别为 $0.71\pi, 0.91\pi$ 。考虑到反射相位的存在,恰好在谐振腔内形成共振,电磁波被限制在L形谐振腔内,故透射光谱中对应为低谷。

为了研究L形谐振腔的尺寸对透射特性的影响,计算了不同高度和长度的L形谐振腔的透射光谱,图5给出了L形谐振腔 $D=175\text{ nm}$,高度分别为 $H=175\text{ nm}, 215\text{ nm}, 255\text{ nm}$ 时对应的透射光谱。从图5中明显可以看出,随着高度 H 的增加,透射光谱产生红移现象。图6给出L形谐振腔高度 H 保持不变,长度分别为 $D=175\text{ nm}, 215\text{ nm}, 255\text{ nm}$ 时的透射光谱。从图6中可以看出,随着长度 D 的增大,透射光谱发生红移现象。这主要是因为随着L形谐振腔的长度 D 和高度 H 的增加,耦合到L形谐振腔中的SPPs传播的距离随着增大,所以透射光谱发生红移。

为了研究波长对L形谐振腔中充入的介质折射率 n 的敏感特性,计算了L形谐振腔充入不同折射率的介质时的透射光谱,如图7(a)所示。其中, $L=175\text{ nm}, H=215\text{ nm}$ 。从图7(a)中可以看出,随着 n 的增大,透射光谱

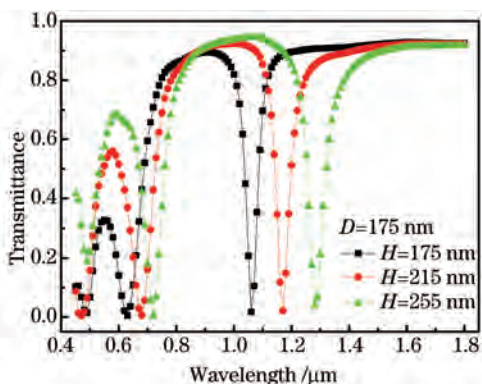


图5 长度 $D=175$ nm,不同高度 H 时 L形谐振腔的透射光谱
Fig.5 Transmission spectra of L-shaped cavity with different H ,

$D=175$ nm

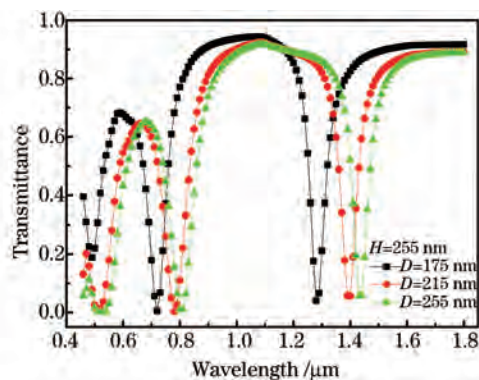


图6 高度 $H=255$ nm,不同长度 D 时 L形谐振腔的透射光谱
Fig.6 Transmission spectra of L-shaped cavity with different D ,

$H=255$ nm

发生红移。这是因为随着介质折射率的增大,耦合到 L形谐振腔的 SPPs 传输的光程增大,所以光谱发生红移现象。相对短波长处的红移量长波长处更明显。图 7(b)给出了透射光谱中三种共振模式对应波长随着介质折射率 n 的变化曲线。从图 7(b)可以看出,共振波长与折射率 n 呈线性关系,且随着介质折射率 n 的增加,共振波长均向长波长方向移动。当介质折射率 n 从 1.0 变化到 1.3,共振模式 1 的共振波长移动了 $0.35 \mu\text{m}$,共振模式 2,3 的共振波长分别移动了 $0.19 \mu\text{m}$, $0.08 \mu\text{m}$ 。传感器的灵敏度可以定义为 $d\lambda/dn$, 对应共振模式 1, 2, 3 的灵敏度分别为 1166.7 nm/RIU , 633.3 nm/RIU , 266.7 nm/RIU , 即对应图 7(b)中的斜率 $k_1=1.17$, $k_2=0.63$ 和 $k_3=0.27$ 。根据图 7(b)给出的透射光谱中三种共振模式对应波长与介质折射率 n 的线性关系,可以通过探测透射光谱中共振波长来探测介质折射率。因为 SPPs 共振对 L形谐振腔内折射率的变化很敏感,所以,当 L形谐振腔中充入不同折射率的介质时,通过探测透射光谱中的共振波长来测量介质的折射率。另外,与 Zhang Z D 等^[29]提出的圆形谐振腔的金属-介质-金属波导结构对介质的灵敏度进行对比,L形谐振腔的 MIM 波导结构作为传感器,灵敏度较高,更适用于传感器方面。

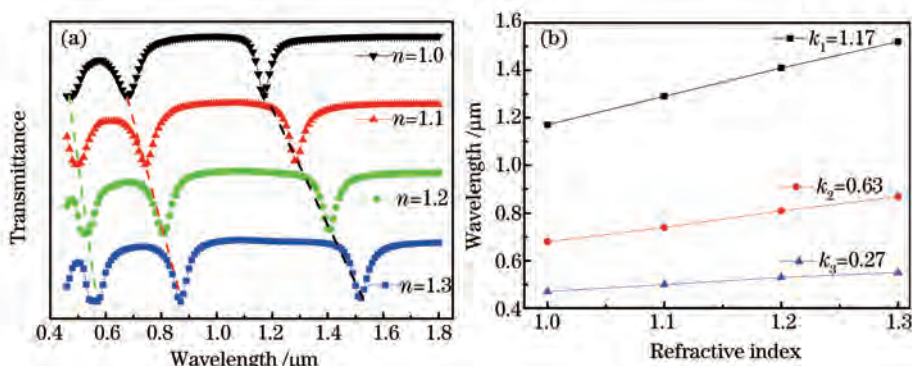


图 7 L形谐振腔中充入不同折射率的介质。(a) 透射光谱;
(b) 共振波长与介质折射率关系曲线

Fig.7 L-shaped cavity filled by different refractive indexes. (a) Transmission spectra;
(b) relation curves of resonant wavelength and refractive index

4 结 论

研究了基于 SPPs 的 L形谐振腔的 MIM 波导结构的传输特性,应用有限元方法数值研究了 L形谐振腔的滤波特性。研究表明,L形谐振腔的结构尺寸会影响滤波特性。当 L形谐振腔的长度和高度增加时,透射曲线发生红移。在 L形谐振腔中充入不同折射率的介质,随着介质折射率的增大透射光谱发生红移现象,可以通过探测透射光谱中共振波长来探测介质折射率。这些结果对设计简单结构滤波器,有一定的指导意义。

- 1 Falk A L, Koppens F H L, Yu C L, *et al.*. Near-field electrical detection of optical plasmons and single-plasmon sources[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(7): 475-479.
- 2 Barnes W L, Dereux A, Ebbesen T W. Surface plasmon subwavelength optics[J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824-830.
- 3 Bozhevolnyi S I, Volkov V S, Devaux E, *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators[J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 508-511.
- 4 Wang Wentao, Liu Jianjun, Hong Zhi. Multiband terahertz filter based on three nested closed rings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0323001.
王文涛, 刘建军, 洪 治. 基于三个方形封闭谐振环的多频带太赫兹滤波器[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0323001.
- 5 Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(10): 1013002.
恽斌峰, 胡国华, 崔一平. 高品质因子聚合物波导微环谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2011, 31(10): 1013002.
- 6 Zhang Zhidong, Zhao Yanan, Lu Dong, *et al.*. Numerical investigation of the metal-insulator-metal waveguide filter based on the arc-shaped resonator[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 61(18): 187301.
张志东, 赵亚男, 卢 东, 等. 基于圆弧谐振腔的金属介质金属波导滤波器的数值研究[J]. *物理学报*, 2012, 61(18): 187301.
- 7 Sun Xianming, Liu Wangqiang, Wang Haihua, *et al.*. Study on resonant models in two-layer micro-sphere cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0529001.
孙贤明, 刘万强, 王海华, 等. 双层微球腔谐振模式研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0529001.
- 8 Dionne J A, Sweatlock L A, Atwater H A. Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization [J]. *Phys Rev B*, 2006, 73(3): 035407.
- 9 Veronis G, Fan S. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(13): 131102.
- 10 Gao Hongtao, Shi Haofei, Wang Changtao, *et al.*. Surface plasmon polariton propagation and combination in Y-shaped metallic channels [J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10795-10800.
- 11 Han Z H, Liu L, Forsberg E. Ultra-compact directional couplers and Mach - Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons [J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 690-695.
- 12 Han Zhonghua, He Sailing. Multimode interference effect in plasmonic subwavelength waveguides and an ultra-compact power splitter [J]. *Opt Commun*, 2007, 278(1): 199-203.
- 13 Hosseini A, Massoud Y. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry[J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(18): 181102.
- 14 Wang Guoxi, Lu Hua, Liu Xueming, *et al.*. Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on MIM plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. *Opt Express*, 2011, 19(4): 3513-3518.
- 15 Lin Xianshi, Huang Xuguang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. *Opt Lett*, 2008, 33(23): 2874-2876.
- 16 Lu Hua, Wang Guoxi, Liu Xueming. Manipulation of light in MIM plasmonic waveguide systems[J]. *Chinese Sci Bull*, 2013, 58(30): 3607-3616.
- 17 Peng Xiao, Li Hongjiang, Wu Caini, *et al.*. Research on transmission characteristics of aperture-coupled square-ring resonator based filter[J]. *Opt Commun*, 2013, 294: 368-371.
- 18 Liu Ye, Zhou Fei, Yao Bo, *et al.*. High-extinction-ratio and low-insertion-loss plasmonic filter with coherent coupled nano-cavity array in a MIM waveguide[J]. *Plasmonics*, 2013, 8(2): 1035-1041.
- 19 Wang Tongbiao, Wen Xiewen, Yin Chengping, *et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator[J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 24096-240101.
- 20 Yun Binfeng, Hu Guohua, Cui Yiping. Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metal - insulator - metal waveguide[J]. 2010, *J Phys D: Appl Phys*, 43(38): 385102.
- 21 Guo Yinghui, Yan Lianshan, Pan Wei, *et al.*. A plasmonic splitter based on slot cavity[J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 13831-13838.
- 22 Chen Li, Lu Ping, Tian Ming, *et al.*. A subwavelength MIM waveguide filter with single-cavity and multi-cavity structures[J]. *Optik*, 2013, 124(18): 3701-3704.
- 23 Liu Ye, Zhon Fei, Yao Bo, *et al.*. High-extinction ratio and low insertion loss plasmonic filter with coherent coupled nano-cavity array in a MIM waveguide[J]. *Plasmonics*, 2014, 8(2): 1035-1041.
- 24 Jiang Yongxiang, Liu Binghong, Zhu Xiaosong, *et al.*. Study of silver coated hollow-core fiber surface plasmon resonance sensor[J]. *Acta*

- Optica Sinica, 2014, 34(2): 0223004.
- 蒋永翔, 刘炳红, 朱晓松, 等. 镀银空心光纤表面等离子体共振传感器的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0223004.
- 25 Kekatpure R D, Hryciw A C, Barnard E S, *et al.*. Solving dielectric and plasmonic waveguide dispersion relations on a pocket calculator [J]. Opt Express, 2009, 17(26): 24112–24129.
- 26 Liu Jianlong, Fang Guangyu, Zhao Haifa, *et al.*. Plasmon flow control at gap waveguide junctions using square ring resonators[J]. J Phys D: Appl Phys, 2010, 43(5): 055103.
- 27 Johnson P B, Christy R W. Optical constants of the noble metals[J]. Phys Rev B, 1972, 6(12): 4370 – 4379.
- 28 Kim K Y, Cho Y K, Tae H S, *et al.*. Light transmission along dispersive plasmonic gap and its subwavelength guidance characteristics [J]. Opt Express, 2006, 14(1): 320–330.
- 29 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.

栏目编辑: 韩 峰