

# 双节 MIM 结构表面等离子体窄带光学滤波器

罗 昕<sup>1</sup> 邹喜华<sup>1</sup> 温坤华<sup>1</sup> 潘 炜<sup>1</sup> 闫连山<sup>1</sup> 李孝峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 西南交通大学信息光子与通信研究中心, 四川 成都 610031)  
(<sup>2</sup> 苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)

**摘要** 基于双节金属-绝缘体-金属(MIM)结构,设计了一种表面等离子体(SPs)型窄带光学滤波器。该滤波器有两块金属夹层,两夹层之间由一块金属薄膜分隔的两节绝缘介质层组成;每节绝缘介质层包含结构一致的 4 个周期,每个周期由一个高折射率绝缘介质和一个低折射率绝缘介质构成。光波进入到该波导结构同时激发出不同谐振波长下的长程表面等离子体(LRSPs)和短程表面等离子体(SRSPs),形成多个透射峰。在整个双节绝缘介质层中间处插入一块金属薄膜,不仅增大金属薄膜两端光波的耦合距离、压缩透射峰的 3 dB 信道带宽,而且能实现 LRSPs/SRSPs 共振波长的蓝移(红移),使特定波长处两者的透射峰发生重合,形成具有高对比度的窄带透射峰。有限时域差分法研究表明:在 1.3  $\mu\text{m}$  波长处获得 3 dB 信道带宽为 9.2 nm 的窄带透射峰,其峰-谷对比度为 37.2 dB;进一步将金属薄膜宽度增加到 55 nm,3 dB 信道带宽可降至 7.2 nm,峰-谷对比度升至 40.1 dB,获得了良好的窄带滤波性能。

**关键词** 表面光学;窄带滤波器;金属-绝缘体-金属型波导;表面等离子体

**中图分类号** TN713 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1123003

## Narrow-Band Filter of Surface Plasmon Based on Dual-Section Metal-Insulator-Metal Structure

Luo Xin<sup>1</sup> Zou Xihua<sup>1</sup> Wen Kunhua<sup>1</sup> Pan Wei<sup>1</sup> Yan Lianshan<sup>1</sup> Li Xiaofeng<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

<sup>2</sup> Institute of Modern Optical Technologies, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China

**Abstract** A narrow-band plasmonic filter based on dual-section metal-insulator-metal (MIM) structure is proposed, which consists of two metal layers and two insulator layer sections separated by a metal film. Each layer section contains four insulator periodic units structured by alternately stacking two insulators with different refractive indices. In the filter, both long range surface plasmons (LRSPs) and short range surface plasmons (SRSPs) at different resonant wavelengths are stimulated under the condition of light injection. Some transmission peaks are formed at a specific wavelength where the resonance condition for the LRSPs or SRSPs is satisfied. The insertion of a metal film into the two insulator layer sections enables us to increase the coupling distance of both ends of the metal film and to reduce the 3 dB bandwidth of transmission peak. At the same time, the resonance wavelength of LRSPs (SRSPs) will be blue-shifted (red-shifted), so that the transmission peaks of LRSPs and SRSPs overlap at a specific wavelength, resulting in the generation of a narrow-band transmission peak with high peak-to-notch contrast ratio. The transmission characteristics of the proposed filter are numerically investigated by using the finite-difference time-domain (FDTD) method. A transmission peak with a 3 dB bandwidth of 9.2 nm and a peak-to-notch contrast ratio about 37.2 dB is confirmed in the 1.3  $\mu\text{m}$  range. By further increasing the width of metal film to 55 nm, the 3 dB bandwidth can be reduced to 7.2 nm and the peak-to-notch contrast ratio can be increased to 40.1 dB. Therefore,

**收稿日期**: 2013-05-29; **收到修改稿日期**: 2013-07-02

**基金项目**: 教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0940)、国家自然科学基金(91233119)、教育部春晖计划(Z2011124)、成都市科技计划(12DXBY287JH-005)

**作者简介**: 罗 昕(1988—),男,硕士研究生,主要从事表面等离子体光学方面的研究。E-mail: lx8653070@126.com

**导师简介**: 邹喜华(1981—),男,副教授,博士生导师,主要从事微波光子学、微纳光电器件、光通信与信号处理等方面的研究。E-mail: zouxihua@swjtu.edu.cn(通信联系人)

excellent narrow-band filtering performance is obtained.

**Key words** optics at surfaces; narrow-band filter; metal-insulator-metal waveguide; surface plasmon

**OCIS codes** 240.6680; 230.7408; 230.7380

## 1 引 言

表面等离子体 (SPs) 或者表面等离子体激元 (SPPs)<sup>[1]</sup> 是局域在金属-电介质界面的一种特殊电磁场形式,它沿着金属表面传播且垂直于界面向两侧指数衰减。由于独特的表面传播特性,基于 SPs 的金属纳米结构能够将光局限在亚波长尺度内,因此在未来纳米集成光子回路或器件中具有重要应用<sup>[2]</sup>。目前,人们已经利用各种形状的金属结构来设计 SPs 波导,包括金属棒<sup>[3]</sup>、金属缝<sup>[4]</sup>、V 型槽<sup>[5]</sup> 以及楔型结构<sup>[6]</sup> 等。其中,金属缝或金属-绝缘体-金属 (MIM) 波导相对于其他波导结构具有一些独特的优势:它能够把表面等离子体波束缚在更小的范围内,有利于实现更高集成度的光子线路;结构简单,便于制作加工。虽然从功能器件的角度考虑,MIM 型波导器件存在损耗较高的问题,但与其他结构 SPs 波导型功能器件相比,MIM 型波导能够产生超高强度的电磁模式,而且使得光信号在传输过程中具有较低的弯曲辐射损耗<sup>[7]</sup>。因此近年来,MIM 型波导及器件的研制得到了广泛关注。

基于 MIM 结构器件的类型较多,常见的包括滤波器、反射器、分束器、环形器等<sup>[8-13]</sup>。具体到滤波器这一信号处理中不可或缺的器件,目前国内外有很多基于 MIM 型波导的 SPs 滤波器的报道,包括环形谐振腔滤波器<sup>[14]</sup>、锯齿形滤波器<sup>[15]</sup>、布拉格光栅滤波器<sup>[16]</sup>、波分复用 (WDM) 滤波器结构<sup>[17-18]</sup> 以及本课题组最近报道的高均匀性多信道梳状滤波器<sup>[19]</sup> 等。在 MIM 型波导的 SPs 窄带滤波器方面,国内外一些课题组已经开展了一系列研究,但目前报道的窄带信道带宽大多为 20 nm 量级及以上。例如,Tao 等<sup>[20]</sup> 设计了一种基于 MIM 型波导的非对称多锯齿形结构,在中心波长 1287 nm 处得到了 3 dB 信道带宽约为 70 nm 的透射峰,通过调节锯齿高度等参数还可以实现中心波长调谐。Zhu 等<sup>[21]</sup> 基于 MIM 型波导,通过往金属层中嵌入微腔,在中心波长 1.1  $\mu\text{m}$  处仿真得到 3 dB 信道带宽为 18 nm、对比度为 27.5 dB 的窄带透射峰,调节微腔的长度和宽度亦可以得到不同中心波长的反射峰。Diniz 等<sup>[22]</sup> 基于 MIM 型波导,通过级联具有一定倾斜角度的多个微腔,在小于 1  $\mu\text{m}$  的短波长范围内得到了窄带透射峰,对比度约为 20 dB。另一方面,

在光通信和光电信号处理应用中较多采用长波长、所需的滤波带宽大多为纳米量级及以下,同时为实现良好的滤波效果,需要较高的信道对比度。因此,如何在 SPs 滤波器中实现更窄的 3 dB 信道带宽和更高的信道对比度还需要进一步研究,这将有助于推动其在光通信、信号处理中的应用。

同时,作为目前纳米光波导的一个研究热点,多模式共振增强效应已经被国内外许多课题组引入到 SPs 波导器件设计中。例如,Zhang 等<sup>[23]</sup> 设计了基于 Nano-flags 的可调谐超窄带表面等离子体天线;Cetin 等<sup>[24]</sup> 通过将 Fano 共振环/盘表面等离子体纳米腔结构引入到导电基底上,设计了一种生物传感器。为在常用的通信波段实现更窄的 3 dB 信道带宽和更高的信道对比度,本文基于多模式共振增强效应原理,设计了一种基于双节 MIM 型波导的 SPs 型窄带滤波器。该滤波器由两块金属夹层、以及两夹层之间由一块金属薄膜分隔的两节绝缘介质层组成;每节绝缘介质层包含结构一致的 4 个周期,每个周期由一个高折射率绝缘介质和一个低折射率绝缘介质构成。在整个双节绝缘介质层中间处插入一块金属薄膜,不仅降低了透射峰的 3 dB 信道带宽,而且使特定波长处长程表面等离子体 (LRSPs) 和短程表面等离子体 (SRSPs) 的透射峰发生重合,形成具有高对比度的窄带透射峰。针对此 MIM 结构滤波器,采用有限时域差分法 (FDTD) 仿真得:在 1.3  $\mu\text{m}$  波长处获得 3 dB 信道带宽为 9.2 nm 的窄带透射峰,其峰-谷对比度为 37.2 dB。进一步将金属薄膜宽度增加到 55 nm,3 dB 信道带宽还可以降至 7.2 nm,峰-谷对比度升至 40.1 dB。

## 2 模型与理论

SPs 型窄带信道滤波器的结构如图 1 所示。在两块金属夹层之间,插入由一块金属薄膜隔离开的两节绝缘介质层。每节绝缘介质层包含 4 个由两种不同折射率绝缘介质(或称之为电介质)交替排列构成的周期结构,其高度( $z$  方向上)均为 45 nm;所述的 4 个周期结构一致,每个周期结构中包含一个高折射率绝缘介质 A 和一个低折射率绝缘介质 B。这里,两节绝缘介质层之间的金属薄膜长度远小于绝缘介质 A 或绝缘介质 B 的长度。

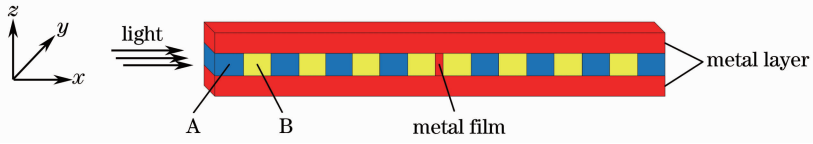


图 1 窄带信道滤波器结构图

Fig. 1 Schematic diagram of the narrow-band channel filter

光波进入到该波导结构中, 激发出 LRSPs 和 SRSPs; 特定波长的 LRSPs 或 SRSPs 满足共振条件, 形成多个透射峰。通过往整个绝缘介质层中间插入一块金属薄膜, LRSPs 和 SRSPs 的波矢会发生改变。LRSPs 和 SRSPs 的波矢大小分别为<sup>[25]</sup>

$$\mathbf{k}_{\text{LRSPs}} \approx \mathbf{k}_0 \sqrt{\epsilon_d + \left(\frac{dk_0 \epsilon_d}{2}\right)^2 \left[1 - \left(\frac{\epsilon_d}{\epsilon_m}\right)^2\right]}, \quad (1)$$

$$\mathbf{k}_{\text{SRSPs}} \approx \mathbf{k}_0 \sqrt{\epsilon_d + \left(\frac{2\epsilon_0}{dk_0 \epsilon_m}\right)^2}, \quad (2)$$

其中  $\mathbf{k}_{\text{LRSPs}}$  和  $\mathbf{k}_{\text{SRSPs}}$  分别是 LRSPs 和 SRSPs 的波矢,  $\mathbf{k}_0$  是真空中波矢,  $d$  是  $x$  方向上金属薄膜的宽度, 介于几纳米到几十纳米之间,  $\epsilon_0$  是真空的介电常数,  $\epsilon_d$  是介质的介电常数,  $\epsilon_m$  是金属的介电常数。

此 MIM 结构滤波器的滤波物理机制如下。在(1)式中, 当金属薄膜宽度  $d$  增加时,  $\mathbf{k}_{\text{LRSPs}}$  随之增大, LRSPs 波长变短。在(2)式中, 当金属薄膜宽度  $d$  增加时,  $\mathbf{k}_{\text{SRSPs}}$  随之减小, SRSPs 波长变长。当  $d$  达到某定值时,  $\mathbf{k}_{\text{LRSPs}} = \mathbf{k}_{\text{SRSPs}}$ , LRSPs 和 SRSPs 波长相等, 即在相邻位置 LRSPs 和 SRSPs 所产生的透射峰会发生重合。而且由于插入金属薄膜后, 金属薄膜两端光波的耦合距离随着金属薄膜宽度  $d$  增加而增加, 导致所形成的透射峰的半峰全宽也随之减小<sup>[26-27]</sup>。因此, 通过选择合适的结构参数, 可以获得高对比度的窄带透射峰。

### 3 仿真结果与分析

为验证滤波器的结构设计和理论模型, 采用二维 FDTD 对其性能进行研究。这里, 选择银作为金属层, 其介电常数采用 Drude 模型<sup>[28]</sup>来描述:

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \omega_p^2 / (\omega_0^2 + i\omega_0 \gamma), \quad (3)$$

式中  $\epsilon_\infty = 3.7$ ,  $\omega_p = 1.38 \times 10^{16}$  Hz,  $\gamma = 2.73 \times 10^{13}$  Hz,  $\omega_0$  为入射光频率。

峰-谷对比度定义为信道波峰功率与波谷功率之比:

$$R = 10 \lg(T_{\text{peak}} / T_{\text{notch}}). \quad (4)$$

式中  $T_{\text{peak}}$  和  $T_{\text{notch}}$  分别表示信道峰值功率和波谷功率。

通过优化结构参数, 选取绝缘介质 A 的折射率

$n_A = 2.13$  (氧化锆), 绝缘介质 B 的折射率  $n_B = 1.9$  (钙钛硅酸盐), 金属薄膜宽度  $d = 40$  nm, 绝缘介质 A 宽度  $d_A$  和绝缘介质 B 宽度  $d_B$  相等且为 150 nm。此时, 应用 FDTD 算法获得的滤波响应如图 2 所示。

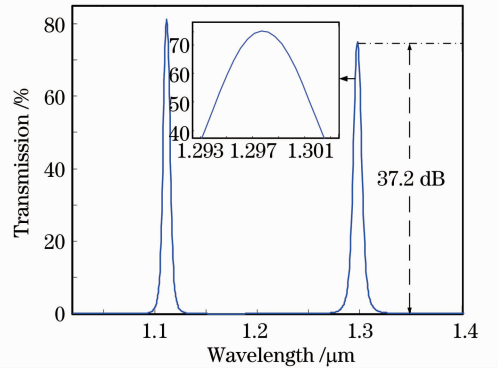


图 2 MIM 滤波器的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra for the MIM filter

从图 2 中可以看出, 在波长 1~1.4 μm 范围内, 得到了两个窄带透射峰。其中, 在中心波长 1.3 μm 处的窄带透射峰, 其 3 dB 信道带宽为 9.2 nm, 对比度为 37.2 dB。

为体现本滤波器在窄带带宽和对比度上的优势, 对比了没有插入金属薄膜时的情况: 当其他参数不变时, 获得的滤波响应如图 3 所示。对比图 2 和图 3, 可以发现, 在相同波长范围内, 当插入金属薄膜后, 在相同的波长区间内所获得的透射峰个数减半。如前所述, 这是由于相邻位置 LRSPs 和 SRSPs 所产

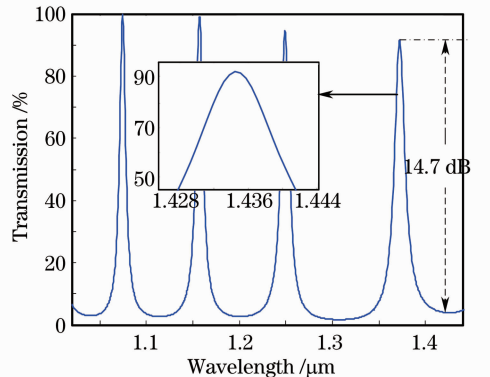


图 3 无金属薄膜的 MIM 滤波器的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra for the MIM filter without metal film

生的透射峰发生重合所致;更为重要的是重合后的透射峰 3 dB 信道带宽明显减小,对比度显著增加。

为了进一步研究该滤波器的滤波特性,将金属薄膜宽度由 40 nm 减小到 27 nm 或由 40 nm 增加到 55 nm,分别得到了如图 4 和图 5 所示的滤波响应曲线。

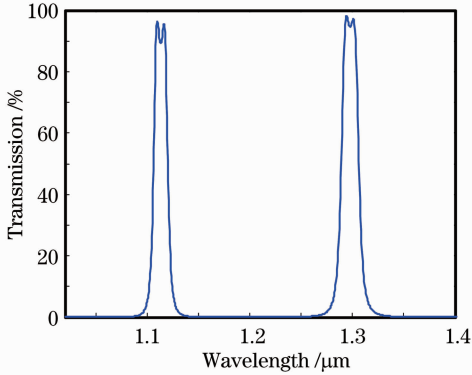


图 4  $n_A = 2.13, n_B = 1.9, d_A = d_B = 150 \text{ nm}, d = 27 \text{ nm}$  时的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra for  $n_A = 2.13, n_B = 1.9, d_A = d_B = 150 \text{ nm}, d = 27 \text{ nm}$

对比图 2、图 4 和图 5,不难发现,当金属薄膜宽度为 27 nm 时,透射峰出现了分裂,这正是由于相邻 LRSPs 和 SRSPs 所产生的透射峰尚未完全重合所致。此时金属薄膜宽度不够宽,不足以使相邻 LRSPs 和 SRSPs 所产生的透射峰的波矢相等,从而不能完全重合,出现了如图 4 所示的劈裂峰。将金

属薄膜宽度增加到 55 nm,透射峰的 3 dB 信道带宽进一步减小到 7.2 nm,这是由于金属薄膜两端光波的耦合距离增大所致。

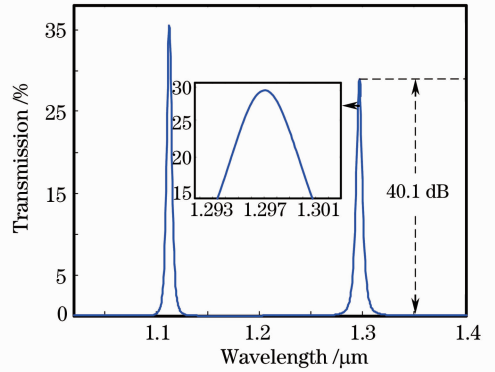


图 5  $n_A = 2.13, n_B = 1.9, d_A = d_B = 150 \text{ nm}, d = 55 \text{ nm}$  时的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra for  $n_A = 2.13, n_B = 1.9, d_A = d_B = 150 \text{ nm}, d = 55 \text{ nm}$

为了更深入地揭示透射峰值与 3 dB 信道带宽和对比度之间的变化关系,分别分析了透射峰值、3 dB 信道带宽和对比度随着金属薄膜宽度增加的变化趋势,如图 6 所示。从图 6(a)中可知:随着金属薄膜宽度的增加,透射峰值明显减小,这是因为该波导结构所受到的损耗也随之增大所致;而在图 6(b)和(c)中,随着金属薄膜宽度的增加,3 dB 信道带宽不断减小,对比度逐渐增大。因此可以发现在该滤波器中,透射峰值与 3 dB 信道带宽和对比度之间存在着制约和折中关系。

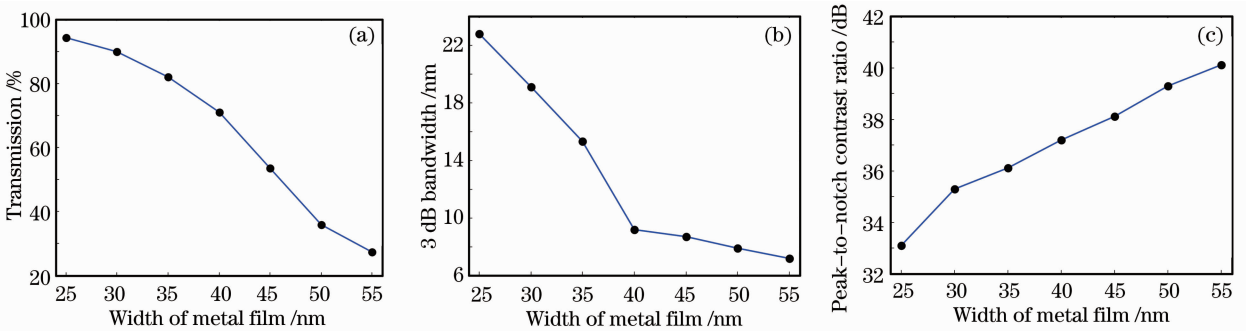


图 6 (a)透射峰值、(b) 3 dB 信道带宽和(c)对比度与金属薄膜宽度之间的对应关系曲线  
Fig. 6 Dependences of (a) transmission peak, (b) 3 dB bandwidth and (c) peak-to-notch contrast ratio on the width of metal film

## 4 结 论

设计了基于双节 MIM 型波导的表面等离子体滤波器,能够实现常用通信波段的窄带滤波功能。通过选择合适的参数可以在 1.3 μm 波段获得 3 dB 信道带宽为 9.2 nm,信道对比度为 37.2 dB 的窄带透

射峰。若进一步将金属薄膜宽度增加到 55 nm,还可以获得更小的 3 dB 信道带宽(7.2 nm),信道对比度高达 40.1 dB。因此,所设计的滤波器可以在常用通信波段处得到高对比度的窄带滤波信道,这与已报道的同类滤波器相比存在明显优势。

## 参 考 文 献

- 1 H T Liu, P Lalanne. Microscopic theory of the extraordinary optical transmission [J]. *Nature*, 2008, 452(6762): 728–731.
- 2 R Soref. The past, present, and future of silicon photonics [J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2006, 12(6): 1678–1687.
- 3 A Ono, J Kato, S Kawata. Subwavelength optical imaging through a metallic nanorod array [J]. *Phys Rev Lett*, 2005, 95(26): 267407.
- 4 K Tanaka, M Tanaka. Simulations of nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguide [J]. *Appl Phys Lett*, 2003, 82(8): 1158–1160.
- 5 D F P Pile, D K Gramotnev. Single-mode subwavelength waveguide with channel plasmon-polaritons in triangular grooves on a metal surface [J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(26): 6323–6325.
- 6 T Yatsui, M Kourogi, M Ohtsu. Plasmon waveguide for optical far/near-field conversion [J]. *Appl Phys Lett*, 2001, 85(27): 4583–4585.
- 7 X Y Zhang, A Hu, J Z Wen, *et al.*. Numerical analysis of deep sub-wavelength integrated plasmonic devices based on semiconductor-insulator-metal strip waveguides [J]. *Opt Express*, 2010, 18(18): 18945–18959.
- 8 Y K Gong, X M Liu, L R Wang. High-channel-count plasmonic filter with the metal-insulator-metal Fibonacci-sequence gratings [J]. *Opt Lett*, 2010, 35(3): 285–287.
- 9 Shang Kefeng, Yan Lianshan, Guo Yinghui. Study on surface plasmonic filter with cascaded slot cavities [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2012, 33(6): 813–816.  
商科峰, 闫连山, 郭迎辉. 级联槽型腔表面等离子体滤波器[J]. *半导体光电*, 2012, 33(6): 813–816.
- 10 B Wang, G P Wang. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(1): 013107.
- 11 Zhao Huawei, Huang Xuguang, Su Hui. A novel Y-branch waveguide based on surface plasmon polaritons [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9): 1649–1652.  
赵华伟, 黄旭光, 苏 辉. 基于表面等离子波子的新型 Y 分支波导 [J]. *光学学报*, 2007, 27(9): 1649–1652.
- 12 Li Juan, Wang Bingyan, Xue Wenrui. Propagation properties of Y-splitters based on MIM surface plasmonic waveguides [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0124002.  
李 娟, 王冰艳, 薛文瑞. 基于 MIM 型表面等离子体光波导的 Y 形分束器的传输特性研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0124002.
- 13 K H Wen, L S Yan, W Pan, *et al.*. A four-port plasmonic quasi-circulator based on metal-insulator-metal waveguides [J]. *Opt Express*, 2012, 20(27): 28025–28032.
- 14 A Hosseini, Y Massoud. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(18): 181102.
- 15 X S Lin, X G Huang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(23): 2877–2879.
- 16 Z H Han, E Forsberg, S He. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2007, 19(2): 91–93.
- 17 X Mei, X G Huang, J Tao, *et al.*. A wavelength demultiplexing structure based on plasmonic MDM side-coupled cavities [J]. *J Opt Soc Am B*, 2010, 27(12): 2707–2713.
- 18 H Lu, X M Liu, Y K Gong. Enhancement of transmission efficiency of nanoplasmonic wavelength demultiplexer based on channel drop filters and reflection nanocavities [J]. *Opt Express*, 2011, 19(14): 12885–12890.
- 19 X Luo, X H Zou, X F Li, *et al.*. High-uniformity multichannel plasmonic filter using linearly lengthened insulators in metal-insulator-metal waveguide [J]. *Opt Lett*, 2013, 38(9): 1585–1587.
- 20 J Tao, X G Huang, X S Lin, *et al.*. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with asymmetrical multiple-teeth-shaped structure [J]. *Opt Express*, 2009, 17(16): 13989–13994.
- 21 J H Zhu, Q J Wang, P Shum, *et al.*. A simple nanometric plasmonic narrow-band filter structure based on metal-insulator-metal waveguide [J]. *IEEE Trans Nanotechnology*, 2011, 10(6): 1371–1376.
- 22 L O Diniz, F D Nunes, E Marega, *et al.*. Metal-insulator-metal surface plasmon polariton waveguide filters with cascaded transverse cavities [J]. *J Lightwave Technol*, 2011, 29(5): 714–720.
- 23 X Y Zhang, T Zhang, A Hu, *et al.*. Controllable plasmonic antennas with ultra narrow bandwidth based on silver nano-flags [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 101(15): 153118.
- 24 A E Cetin, H Altug. Fano resonant ring/disk plasmonic nanocavities on conducting substrates for advanced biosensing [J]. *ACS Nano*, 6(11): 9989–9995.
- 25 Sergey I Bozhevolnyi. *Plasmonic Nanoguides and Circuits* [M]. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte Ltd, 2009. 10–13.
- 26 H Lu, X M Liu, D Mao, *et al.*. Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators [J]. *Opt Express*, 2010, 18(17): 17922–17927.
- 27 B F Yun, G H Hu, Y P Cui. A nanometric plasmonic waveguide filter based on Fabry-Perot resonator [J]. *Opt Commun*, 2011, 284(1): 485–489.
- 28 P B Johnson, R W Christy. Optical constants of the noble metals [J]. *Phys Rev B*, 1972, 6(12): 4370–4379.

栏目编辑: 韩 峰