

内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的滤波特性

庞绍芳^{1,2} 张中月¹ 屈世显¹

(¹ 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西 西安 710062)
² 西安科技大学理学院, 陕西 西安 710054)

摘要 设计了一种基于金属-介质-金属表面等离极化激元(SPPs)波导的内嵌十字形金属结构的圆形谐振腔,并应用时域有限差分算法数值研究了其滤波特性。结果发现,旋转后的十字形结构破坏了圆形空腔的共振模式,从而显现出新颖的滤波特性。内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的滤波特性依赖于十字形结构的旋转角度,相对于 $\theta=0^\circ$ 的内嵌十字形结构,当十字形结构旋转到某一特定角度时,透射光谱中仅有一个透射峰。此外,内嵌十字形结构圆形谐振腔的滤波特性还强烈地依赖于十字形结构的尺寸。这些结果有助于设计复合结构滤波器,满足特定的滤波需要。

关键词 光学器件;表面等离极化激元;时域有限差分算法;滤波器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.1123004

Filter Properties of Circular Cavity Embedded with Cross Metallic Structure

Pang Shaofang^{1,2} Zhang Zhongyue¹ Qu Shixian¹

(¹ School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)
² School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract A circular resonator embedded with the cross structure based on the metal-insulator-metal surface plasmon polaritons (SPPs) waveguide is designed. The filter properties of this composite resonator are numerically investigated by the finite-difference time-domain method. The results show that the rotated cross structure destroys the symmetry of the resonant mode of SPPs in the empty circular cavity, which results in novel filter function of the complex resonator. The filter function of a circular resonator embedded with the cross structure depends on the rotating angle of the cross structure. Compared to $\theta=0^\circ$ case, when the cross structure rotate to a certain angle, there is only one transmission peak in the transmission spectra. In addition, the filter properties of the composite resonator are strongly dependent on the cross structure size. These results will be helpful for designing composite filters with specific usage.

Key words optical devices; surface plasmon polariton; finite-difference time-domain method; filter

OCIS codes 230.5750; 230.7370; 230.7408

1 引言

表面等离极化激元(SPPs)是局域在金属表面的自由电子与入射光场的相互耦合所形成的一种沿着金属表面传播的电磁波,在垂直于金属表面方向

上,振幅以指数形式衰减,故 SPPs 可以突破传统光学中的衍射极限,从而应用亚波长结构的约束来引导光场,实现亚波长光学器件^[1-7]。由于基于 SPPs 的金属-介质-金属(MIM)的波导具有很好的模场

收稿日期: 2013-06-03; 收到修改稿日期: 2013-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(11004160)、教育部科学技术研究重点项目基金(108118)

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

导师简介: 屈世显(1962—),男,博士,教授,主要从事纳米结构中的输运行为、光学性质及等离子体激发、混沌动力学、理论与计算凝聚态物理、分子动力学与蒙特卡洛模拟、复杂系统及其动力学等方面的研究。E-mail: sxqu@snnu.edu.cn

(通信联系人)

限制效果和传播长度^[8],近年来,各种功能的 MIM 波导光学元件,例如分束器^[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。

亚波长光学器件中,滤波器是重要元件。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^[16]、矩形谐振腔滤波器^[17]和直腔形谐振腔滤波器^[18]。其中,圆形谐振腔有多个共振模式,当 SPPs 波耦合到谐振腔后,只有在谐振腔中形成共振的 SPPs 才能从谐振腔中耦合到出射波导中。当在圆形谐振腔中嵌入金属结构时,金属结构将改变空圆形谐振腔的振动模式,产生新的滤波特性。本文基于以上思路设计了在圆形谐振腔中内嵌十字形金属结构的 MIM 波导滤波器,并应用时域有限差分(FDTD)算法研究了其滤波特性。数值模拟结果表明,内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的滤波特性严重地依赖于十字形结构的旋转角度。在某些特定角度时,相比于 $\theta=0^\circ$ 的内嵌十字形结构圆形谐振腔,透射光谱中仅有短波长透射峰。此外,内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的滤波特性还依赖于十字形结构的尺寸。

2 结构和计算方法

图 1 为所设计的内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的结构示意图,该复合结构由两个一端封闭的 MIM 波导、一个半径为 R 的圆形谐振腔和一个十字形金属结构组成。圆形谐振腔的半径 R 固定为 300 nm,十字形结构的宽度 D 固定为 100 nm,长度分别为 L_1 和 L_2 ,十字形结构中心与圆形谐振腔中心 O 点重合。为了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^[19-20]。因为波导与谐振腔之间的耦合距离 w 只会改变透射系数的大小,几乎不改变透射峰的位置^[17],将 w

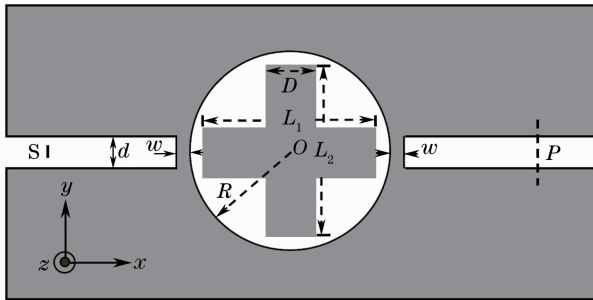


图 1 内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of circular cavity embedded with cross metallic structure

固定为 10 nm。为了研究十字形金属结构的旋转对透射光谱的影响,逆时针旋转十字形结构,将图 1 中边长 L_1 与 x 轴夹角定义为 θ 。整个结构在 z 轴方向的厚度固定为 200 nm。偶极子源 S 位于波导中心线上距离圆形腔圆心 O 点 900 nm 处,且以高斯脉冲形式沿 y 轴方向振动。图 1 中 P 位置(距离圆形腔圆心 O 点 800 nm)透射系数 T 定义为 $T = P_i/P_o$,式中 P_o 为无谐振腔、直接将两直波导连通时流过探测器的能流, P_i 为有谐振腔时,流过探测器的能流。模拟计算时, 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;在 x 方向、 y 方向和 z 方向的计算网格设为 $5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm} \times 5 \text{ nm}$,计算步长为 $6.74042 \times 10^{-18} \text{ s}$ 。

利用时域有限差分软件(XFDTD, Recom Inc.)数值模拟了图 1 结构的传播特性。图中所用金属为银,银的介电常数采用修正后的 Debye-Drude 模型^[21]:

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

式中无穷介电常数 $\epsilon_\infty = 3.8344$,静态介电常数 $\epsilon_s = -9530.5$,弛豫时间 $\tau = 7.35 \times 10^{-15} \text{ s}$,电导率 $\sigma = 1.1486 \times 10^7 \text{ S/m}$ 。

3 结果与讨论

图 2 给出了十字形金属结构($L_1 = L_2 = 500 \text{ nm}$)逆时针旋转($\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ 和 45°)时,内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的透射光谱。从图 2 可以看出,十字形金属结构旋转时,透射峰位置几乎没有移动,它们分别在 $\lambda = 0.460, 0.540, 0.630, 0.710, 0.800 \mu\text{m}$ 附近。但是,透射系数随着角度的变化发生了明显的变化。当 $\theta = 0^\circ$ 时,透射光谱中有 4 个明显的透射峰;当 $\theta = 15^\circ$ 时,在短波长处($\lambda = 0.540 \mu\text{m}$ 附近)出现了一个透射峰,透射光谱中有 5 个明显的透射峰,在其他透射峰位置处,透射系数比 $\theta = 0^\circ$ 时小;当 $\theta = 30^\circ$ 时,透射光谱中有三个明显的透射峰,与 $\theta = 0^\circ$ 和 15° 相比,长波长处的两个透射峰($\lambda = 0.630 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 0.800 \mu\text{m}$ 附近)消失;当 $\theta = 45^\circ$ 时,透射光谱中只有一个明显的透射峰($\lambda = 0.470 \mu\text{m}$),长波长处的透射峰全部消失。由于十字形结构的对称性,继续旋转角度 θ ,以上结果将发生与十字形结构对称性相对应的变化。由此可见,具有不同旋转角度的内嵌十字形结构圆形谐振腔具有不同的滤波特性,通过旋转十字形结构,可以实现对圆形谐振腔共振模式的再次滤波。

为研究内嵌十字形结构圆形谐振腔内的共振模

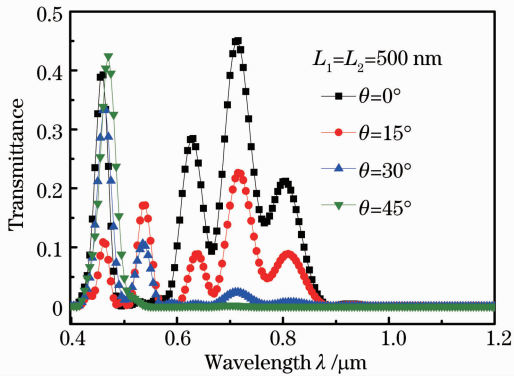


图2 不同旋转角度 θ 时，内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的透射光谱

Fig. 2 Transmission spectra of circular cavity embedded with cross metallic structure with different θ

式，分别计算了不同旋转角度时，各透射峰波长处磁场 H_z 分量的稳态分布。图3(a)~(d)为 $\theta=0^\circ$ 、透射峰波长 $\lambda=0.805, 0.715, 0.630, 0.460 \mu\text{m}$ 处磁场 H_z 分量的稳态分布。从图3(a)可以看出，当 $\lambda=0.805 \mu\text{m}$ 时，强磁场分布在十字形结构的4个顶点位置，圆形谐振腔中有两个SPPs波长。从图3(b)可以看出，当 $\lambda=0.715 \mu\text{m}$ 时，除在与波导相接的十字形结构的两个顶点处分布有较强磁场外，在十字形结构的4个角内也有较强的磁场分布，并且与圆形谐振腔发生了较强的耦合，在圆形谐振腔内有三个SPPs波长。当 $\lambda=0.630 \mu\text{m}$ 时，如图3(c)所示，强磁场除分布在十字形结构的4个顶点位置外，在十字形4个角内也有较强磁场分布，相比于图3(b)，该磁场更集中地分布于十字形的4个角内。当 $\lambda=0.460 \mu\text{m}$ 时，如图3(d)所示，强磁场除分布在十字形结构的4个顶点位置外，在十字形结构的角、边及圆形腔内表面均分布有较强磁场。图3(e)~(i)为 $\theta=15^\circ$ 、透射峰波长 $\lambda=0.810, 0.715, 0.640, 0.535, 0.460 \mu\text{m}$ 处磁场 H_z 分量的稳态分布。从图3(e)中可以看出，强磁场主要分布在十字形结构的顶点，该透射峰与图3(a)属于同一共振模式。当十字形结构旋转时，强磁场分布随之旋转，与右端波导的距离增加，从而导致透射系数减小。同理，图3(f)与图3(b)、图3(g)与图3(c)、图3(i)与图3(d)属于同一共振模式。但是图3(h)中的稳态磁场分布与其他图不同，强磁场没有分布在十字形结构的顶点，而是分布在十字形结构顶点的两侧。由于旋转的十字形结构破坏了空圆形谐振腔的共振模式，从而产生了新的共振模式。图3(j)是 $\theta=45^\circ$ 时，在仅有的一个透射峰($\lambda=0.470 \mu\text{m}$)处磁场 H_z 分量稳态分布，磁场间隔分布在十字形

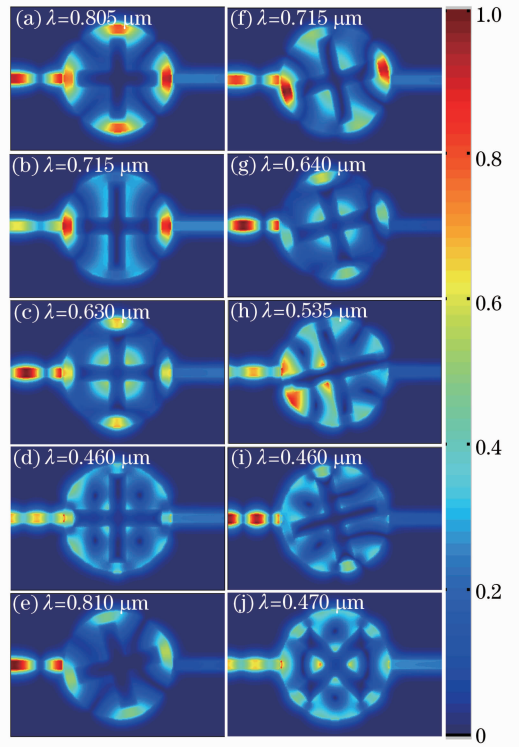


图3 内嵌十字形金属结构在不同角度、不同入射波长时，圆形谐振腔内的磁场 H_z 分量的稳态分布。

(a)~(d) $\theta=0^\circ$; (e)~(i) $\theta=15^\circ$; (j) $\theta=45^\circ$

Fig. 3 Steady state distribution of the H_z fields of circular cavity embedded with cross metallic structure for different angles and incident wavelengths. (a)~(d) $\theta=0^\circ$; (e)~(i) $\theta=15^\circ$; (j) $\theta=45^\circ$

结构的顶点、十字形结构的角和圆形腔的内表面。从图中可以看出，该透射峰与图3(d)和图3(i)属于同一共振模式。虽然它们属于同一模式，但是圆形谐振腔内强磁场相对于出射波导端口的的位置不同，从而导致了透射系数强烈地依赖于十字形结构的旋转角度。总之，从图3可以看出，内嵌十字形金属结构圆形腔的透射光谱严重地依赖于十字形结构的旋转角度。当十字形结构旋转时，由于十字形结构破坏了圆形谐振腔的共振模式，在透射光谱中出现了新的共振模式。

为研究内嵌十字形结构的尺寸对复合结构滤波特性的影响，固定了十字形结构的旋转角度 $\theta=45^\circ$ ，计算了十字形结构具有不同尺寸时，复合结构的透射光谱。图4给出了 $L_1=L_2=0, 100, 200, 300, 400, 500 \text{ nm}$ 时的透射光谱。 $L_1=L_2=0$ 相当于无十字形结构、而仅有圆形谐振腔的情况。此时，透射光谱中有4个明显的透射峰(分别在 $\lambda=1.125, 0.710, 0.545, 0.445 \mu\text{m}$)。当十字形结构的尺寸增

加到 $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$ 时,透射光谱中有 4 个透射峰(分别在 $\lambda = 0.715, 0.535, 0.460, 0.430 \mu\text{m}$)。当十字形结构的尺寸增加到 $L_1 = L_2 = 200 \text{ nm}$ 时,4 个透射峰出现在 $\lambda = 0.754, 0.545, 0.495, 0.450 \mu\text{m}$ 。与 $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$ 时相比, $\lambda = 0.750 \mu\text{m}$ 附近峰的透射系数减小, $\lambda = 0.530 \sim 0.550 \mu\text{m}$ 附近峰的透射系数也减小,可是 $\lambda < 0.500 \mu\text{m}$ 波长范围处峰的透射系数增加。当十字形结构的尺寸增加到 $L_1 = L_2 = 300 \text{ nm}$ 时,透射光谱中只有三个透射峰,它们分别在 $\lambda = 0.899, 0.585, 0.455 \mu\text{m}$ 处。其中 $\lambda = 0.899 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 0.585 \mu\text{m}$ 透射峰的透射系数相对较小,而短波长透射峰 $\lambda = 0.455 \mu\text{m}$ 处的透射系数较大。当十字形结构的尺寸增加到 $L_1 = L_2 = 400 \text{ nm}$ 和 $L_1 = L_2 = 500 \text{ nm}$ 时,透射光谱中只有一个明显的透射峰出现在 $\lambda = 0.460 \mu\text{m}$ 和 $\lambda = 0.470 \mu\text{m}$ 。由图 4 可以看出,内嵌十字形结构圆形腔的透射光谱严重地依赖于十字形结构的尺寸,当十字形结构的尺寸达到特定值时,仅有特定波长的光能通过该复合结构。

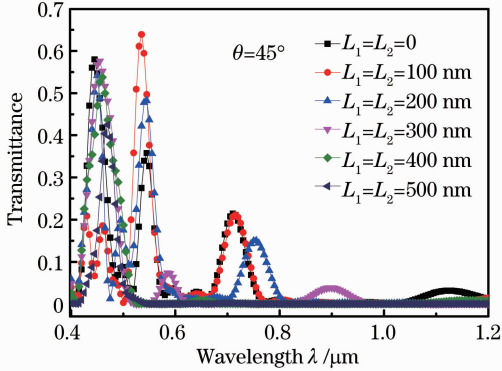


图 4 不同尺寸时,内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的透射光谱

Fig. 4 Transmission spectra of circular cavity embedded with cross metallic structure with different sizes

为深入研究内嵌十字形结构的尺寸对该复合结构共振模式的影响,计算了图 4 中各透射峰处的稳态磁场 H_z 分量的分布。图 5(a)~(d)为 $L_1 = L_2 = 0$ 时,透射峰 $\lambda = 1.125, 0.710, 0.545, 0.445 \mu\text{m}$ 处稳态磁场 H_z 分量分布,圆形腔中分别有 1、2、3、4 个 SPPs 波长。图 5(e)~(g)为 $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$ 时,透射峰 $\lambda = 0.715, 0.534, 0.460 \mu\text{m}$ 处稳态磁场 H_z 分量分布。由于十字形结构尺寸小,对空圆形腔磁场分布的破坏小,从图中可以看出,图 5(e)与图 5(b)、图 5(f)与图 5(c)属于同一共振模式。图 5(h)~(j)为 $L_1 = L_2 = 300 \text{ nm}$ 时,透射峰 $\lambda = 0.899, 0.585, 0.455 \mu\text{m}$ 处的稳态磁场 H_z 分量分布。从图中可以看出,它们分别与图 5(b)~(d)有

着类似的磁场分布,但是十字形结构削弱了长波长共振,从而使得透射光谱中只有在短波长范围有一个明显的透射峰。从图 5 可以看出,当十字形结构的尺寸比较小时,十字形结构的 LSP 与谐振腔内表面的 SPPs 耦合较弱,十字形结构不改变圆形谐振腔原有的共振模式,原有圆形谐振腔的共振模式依然存在,但是透射峰的位置和透射系数发生改变。随着十字形结构的尺寸增大,十字形结构的 LSP 与谐振腔内表面的 SPPs 耦合增强,十字形结构改变圆形谐振腔的共振模式。

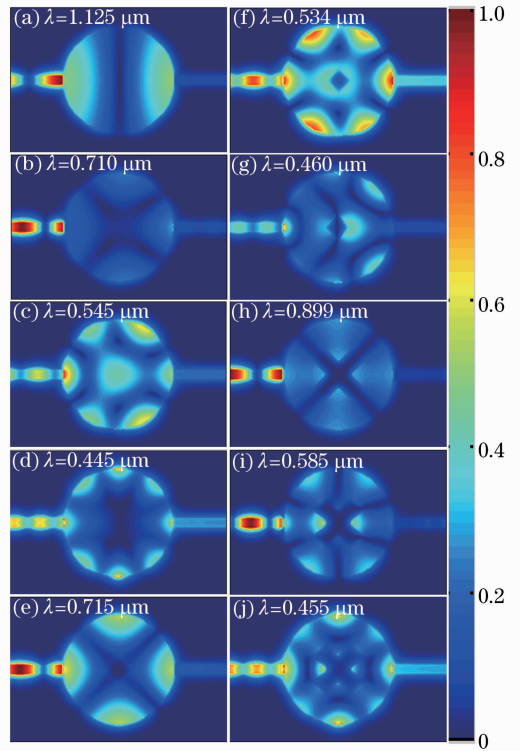


图 5 内嵌十字形结构在不同长度、不同入射波长时,圆形谐振腔内的磁场 H_z 分量的稳态分布。(a)~(d) $L_1 = L_2 = 0$; (b) $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$; (c) $L_1 = L_2 = 300 \text{ nm}$

Fig. 5 Steady state distribution of the H_z fields of circular cavity embedded with cross metallic structure for different θ and different incident wavelengths. (a)~(d) $L_1 = L_2 = 0$; (b) $L_1 = L_2 = 100 \text{ nm}$; (c) $L_1 = L_2 = 300 \text{ nm}$

4 结 论

应用时域有限差分算法研究了基于 MIM 波导的内嵌十字形金属结构圆形谐振腔的滤波特性。结果表明,当内嵌的十字形金属结构旋转时,十字形结构将会破坏 SPPs 在圆形谐振腔中的共振模式,从而产生新的共振模式。十字形金属结构尺寸的变化

同样会影响圆形谐振腔的滤波特性。当十字形金属结构具有某一旋转角度和长度时,透射光谱中只有一个短波长范围内的透射峰。这些结果将有助于设计复合结构滤波器,满足特定的滤波需要。

参 考 文 献

- 1 A L Falk, F H L Koppens, C L Yu, *et al.*. Near-field electrical detection of optical plasmons and single-plasmon sources [J]. *Nat Phys.*, 2009, 5: 475—479.
- 2 W L Barnes, A Dereux, T W Ebbesen. Surface plasmon subwavelength optics [J]. *Nature*, 2003, 424(6950): 824—830.
- 3 S I Bozhevolnyi, V S Volkov, T W Ebbesen, *et al.*. Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators [J]. *Nature*, 2006, 440(7083): 508—511.
- 4 Zhang Zhiyou, Du Jinglei, Li Min, *et al.*. Optimal design of superfocusing lens configuration based on surface plasmon polariton coupling plate [J]. *Acta Optics Sinica*, 2009, 29(9): 2524—2528.
张志友, 杜惊雷, 李敏, 等. 基于表面等离子体激元耦合相位板超聚焦透镜结构的优化设计[J]. *光学学报*, 2009, 29(9): 2524—2528.
- 5 Yun Bin Feng, Hu Guohua, Cui Yiping. Polymer micro-ring resonator filter with high quality factor [J]. *Acta Optics 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 Physica Sinica*, 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 Wang Jiaxian, Li Junjie, Wu Wenguang, *et al.*. Coupled-mode characteristics of coupled-microdisks and single microdisk cavity with an output waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106006.
王加贤, 李俊杰, 吴文广, 等. 耦合微盘及带输出波导的单微盘腔的耦合模式特性[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106006.
- 8 J A Dionne, L A Sweatlock, H A Atwater. Plasmon slot waveguides: towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization [J]. *Phys Rev B*, 2006, 3(3): 035407.
- 9 G Veronis, S Fan. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(13): 131102.
- 10 H Gao, H Shi, C Wang, *et al.*. Surface plasmon polariton propagation and combination in Y-shaped metallic channels [J]. *Opt Express*, 2005, 13(26): 10795—10800.
- 11 Z H Han, L Liu, E Forsberg. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons [J]. *Opt Commun*, 2006, 259(2): 690—695.
- 12 Z H Han, S L He. Multimode interference effect in plasmonic subwavelength waveguides and an ultra-compact power splitter [J]. *Opt Commun*, 2007, 278(1): 199—203.
- 13 A Hosseini, Y Massoud. Nanoscale surface plasmon based resonator using rectangular geometry [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 90(18): 181102.
- 14 G X Wang, H Lu, X M Liu, *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 X S Lin, X G Huang. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes [J]. *Opt Lett*, 2008, 33(23): 2874—2876.
- 16 T B Wang, X W Wen, C P Yin, *et al.*. The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator [J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 24096—240101.
- 17 B F Yun, G H Hu, Y P Cui. Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metal-insulator-metal waveguide [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(38): 385102.
- 18 Y H Guo, L S Yan, W Pan, *et al.*. A plasmonic splitter based on slot cavity [J]. *Opt Express*, 2011, 19(15): 13831—13838.
- 19 R D Kekatpure, A C Hryciw, E S Barnard, *et al.*. Solving dielectric and plasmonic waveguide dispersion relations on a pocket calculator [J]. *Opt Express*, 2009, 17(26): 24112—24130.
- 20 J L Liu, G Y Fang, H F Zhao, *et al.*. Plasmon flow control at gap waveguide junctions using square ring resonators [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(5): 055103.
- 21 H Gai, J Wang, Q Tian. Modified Debye model parameters of metals applicable for broadband calculations [J]. *Appl Opt*, 2007, 46(12): 2229—2233.

栏目编辑：韩峰