

# 内嵌对称扇形金属谐振腔的 MIM 可调谐等 离子体滤波器

杨宏艳<sup>1,2</sup>, 陈昱澎<sup>1</sup>, 肖功利<sup>3\*</sup>, 刘孟银<sup>1</sup>, 刘厚权<sup>1</sup>,  
滕传新<sup>1</sup>, 邓洪昌<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>, 徐荣辉<sup>1,2</sup>, 邓仕杰<sup>1</sup>, 苑立波<sup>1</sup>

<sup>1</sup>桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

<sup>2</sup>广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004;

<sup>3</sup>桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 广西 桂林 541004

**摘要** 采用有限元方法设计了一种基于金属-电介质-金属(MIM)的内嵌对称扇形金属块的纳米圆形谐振腔滤波器。研究发现,通过改变扇形共振角度、圆形谐振腔半径、耦合距离、共振腔内的介质折射率等主要参数可有效调节该结构的透射特性。该滤波器同时出现两个显著的共振峰,透射率最高可达76%,品质因子最高可达40,能高效实现可调谐双通道带通滤波功能。对结构参量进行调整和优化,相应的谐振波长可分布在近红外波段光纤通信的850 nm和1310 nm通信窗口。该结构为设计光通信领域下一代高性能微纳等离子体滤波器提供了重要的理论依据。

**关键词** 表面光学;有限元方法;圆形谐振腔;内嵌对称扇形金属块;等离子体滤波器

中图分类号 TN491

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1124001

## MIM Tunable Plasmonic Filter Embedded with Symmetrical Sector Metal Resonator

Yang Hongyan<sup>1,2</sup>, Chen Yupeng<sup>1</sup>, Xiao Gongli<sup>3\*</sup>, Liu Mengyin<sup>1</sup>, Liu houquan<sup>1</sup>,  
Teng Chuanxin<sup>1</sup>, Deng Hongchang<sup>1</sup>, Chen Ming<sup>1</sup>, Xu Ronghui<sup>1,2</sup>,  
Deng Shijie<sup>1</sup>, Yuan Libo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology,  
Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>2</sup> Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments,  
Guilin, Guangxi 541004, China;

<sup>3</sup> Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of  
Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

**Abstract** In this study, a nano-circular resonant cavity filter embedded with a symmetrical sector metal block based on metal-insulator-metal (MIM) is developed using the finite element method. It is found that by changing parameters such as the sector resonance angle, circular resonant cavity radius, coupling distance, and refractive index of medium in the resonant cavity, one can effectively adjust the transmissivity characteristics of the proposed structure. The filter shows two significant resonance peaks with the transmissivity up to 76% and quality factor to 40, which is suitable for efficiently achieving a tunable dual-channel bandpass filter. The parameters of the proposed structure are adjusted and optimized to enable the corresponding resonant wavelengths distributed in the 850 nm and 1310 nm optical communication windows of near-infrared band optical fiber communication. This structure provides an important theoretical basis for designing the next-generation high-performance nano-plasmonic filters in the field of optical communication.

收稿日期: 2020-01-31; 修回日期: 2020-02-24; 录用日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61765004, 61465004, 61535004, 61705050)、广西自然科学基金(2017GXNSFAA198164, 2016GXNSFAA380006)、广西自动检测技术与仪器重点实验室基金(YQ18110, YQ20115, YQ19108)、广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH201907, DH201804)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划(2020YCX5091)

\* E-mail: xgl.hy@126.com

**Key words** optics at surfaces; finite element method; circular cavity; embedded symmetrical sector metal block; plasmonic filter

**OCIS codes** 240.6680; 250.5300; 260.3910; 310.6628

## 1 引 言

可调谐光滤波器是一种重要的光通信器件,能有效提高通讯容量,避免相邻信道间信息的干扰,故而在光通信领域有着广泛的应用。基于表面等离子体(SPP)的金属-电介质-金属(MIM)波导等离子体滤波器因具有尺寸小、结构简单、集成度高、频谱范围宽及约束性高等优点而广受研究者的关注<sup>[1-2]</sup>。SPP是光入射到金属与介质(通常是空气)界面上时电子和光子相互作用形成的电磁波混合态。该电磁波的显著特性是电磁能量的振幅在垂直界面上以指数形式衰减。SPP能突破传统的光学衍射极限,具有局域场增强、最小化尺寸及电场约束等性能<sup>[3-9]</sup>,可被制作成亚波长光学器件。近年来,依据波导结构的不同,表面等离子体滤波器被划分为两种典型的结构形式:金属-电介质-金属(MIM)结构和电介质-金属-电介质(IMI)结构。相较于IMI结构,MIM波导滤波器有更小的模式尺寸<sup>[10-14]</sup>,因而对其有很多研究,主要集中在实现各种功能的MIM波导光学元件,如滤波器<sup>[11-12]</sup>、耦合器<sup>[15]</sup>、折射率传感器<sup>[8]</sup>、逻辑门<sup>[16]</sup>、布拉格反射器<sup>[17-18]</sup>、马赫-曾德尔干涉仪<sup>[19-21]</sup>、解复用器<sup>[22-23]</sup>等。关于不同结构的MIM表面等离子体共振滤波器也得到广泛研究,如齿形波导滤波器<sup>[24]</sup>、等离子体劈裂环共振滤波器<sup>[25]</sup>、环形谐振腔滤波器<sup>[26-31]</sup>。2014年Chen等<sup>[25]</sup>提出了一种带有劈裂环结构的可调谐谐振器,其透射谱中出现4种共振模式,透射率最高可达43%。2018年祁云平等<sup>[8]</sup>提出了十字连通环形谐振腔滤波器,其透射谱中出现3种共振模式,通过优化谐振腔的各项参数,透射率最高达60%。2018年肖功利等<sup>[32]</sup>提出了一种内嵌矩形金属块纳米圆盘结构的等离子体滤波器,传输效率可达70%,最小插损为1.549 dB,但最大品质因子较低,只有12。尽管上述研究在结构设计、透射率及品质因子方面有了一定的提高,但是在品质因子和透射率方面仍然有一定的改进空间。基于以上分析,本文采用有限元法(FEM)设计了一种简单的可调谐的新型内嵌对称扇形金属块的谐振腔滤波器。利用所提结构的SPP产生的耦合效应,既能提高滤波器的透射率,又可提升品质因子。该滤波器可望在通信波段实现窄带可

调谐带通滤波。

## 2 模型建立与理论分析

图1为所提滤波器的二维平面示意图。该结构由2个矩形波导和1个内嵌对称扇形金属的纳米圆形谐振腔组成,设波导传播方向为X轴方向。其中,矩形波导宽度为 $w$ ,扇形金属块半径为 $r$ ,两扇形之间距离 $h=70$  nm,圆形谐振腔半径为 $R$ ,扇形金属块弧边对应的角度为 $\theta$ ,矩形波导和圆形谐振腔之间的耦合距离为 $d$ 。

在MIM波导中,设置 $w=50$  nm<sup>[33]</sup>,因为波导宽度远远小于入射光波长,其他模式的传输均被阻断,所以只能传播横向磁场的基模(TM<sub>0</sub>)。SPP的色散关系<sup>[34-35]</sup>可以表示为

$$\epsilon_{in}k_{z2} + \epsilon_m k_{z1} \coth\left(-\frac{ik_{z1}w}{2}\right) = 0, \quad (1)$$

$$k_{z1}^2 = \epsilon_{in}k_0^2 - \beta^2, k_{z2}^2 = \epsilon_m k_0^2 - \beta^2, k_0 = 2\pi/\lambda, \quad (2)$$

式中: $k_{z1}$ 和 $k_{z2}$ 为介质和金属的波数; $\epsilon_{in}$ 和 $\epsilon_m$ 为介质和金属的介电常数; $\beta$ 为传播常数; $k_0$ 为自由空间的波数; $\lambda$ 为入射电磁波在真空环境下的波长。

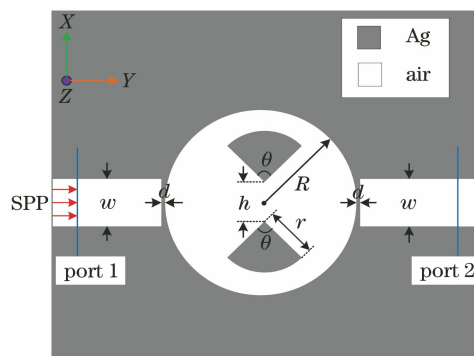


图1 所提滤波器在X-Y平面的示意图

Fig. 1 Schematic of proposed filter in X-Y plane

其中,金属的介电常数<sup>[33]</sup>采用Drude模型来表征:

$$\epsilon_m = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (3)$$

式中: $\omega$ 为入射光的频率; $\omega_p$ 为银等离子共振频率; $\gamma$ 为电子碰撞频率。需要指出的是,当光波的频率数量级大于等离子频率的数量级时,金属电子能带结构中电子带与电子带之间的跃迁会改变介电常数,所以需要对Drude模型进行指向性修正,一般

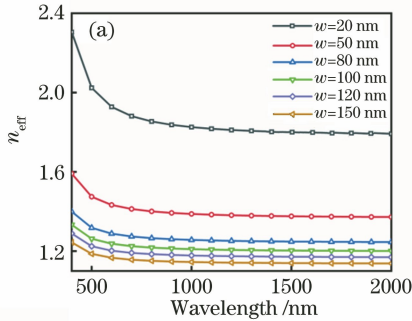
将(3)式中的 1 改为  $\epsilon_\infty$ 。 $\epsilon_\infty$  表示电磁波的频率接近于无穷大时金属的相对介电常数,也可以看成是一个固定的常数。修正后最终得到金属介电常数的色散关系<sup>[36]</sup>为

$$\epsilon_m = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma}, \quad (4)$$

式中: $\epsilon_\infty = 3.7$ ; $\omega_p \approx 1.38 \times 10^{16}$ ; $\gamma \approx 2.73 \times 10^{13}$ 。

电磁波在 MIM 结构中的传播满足色散方程<sup>[37]</sup>:

$$\tanh(k\omega) = \frac{-k(p\alpha_c + q\alpha_s)}{(k^2 + p\alpha_c)}, \quad (5)$$



式中: $k$  为波导中传播的电磁波波数。在 MIM 结构中由于其对称原因, $p = q = \frac{\epsilon_{in}}{\epsilon_m}$ , $\alpha_c = \alpha_s = [k_0^2(\epsilon_{in} - \epsilon_m) + k]^{\frac{1}{2}}$ 。通过求解波数  $k$ , 得到有效折射率  $n_{eff} = \text{Re}(\beta/k_0) = [\epsilon_m + (k/k_0)^2]^{\frac{1}{2}}$ , 由此得到波导中 SPP 传播的重要参数  $\lambda_{spp} = \lambda_0/\text{Re}(n_{eff})$ 。下述  $n_{eff}$  表示有效折射率的实部。图 2 为利用 MATLAB 软件计算的 MIM 光波导有效折射率与入射波长和电介质折射率的关系图。

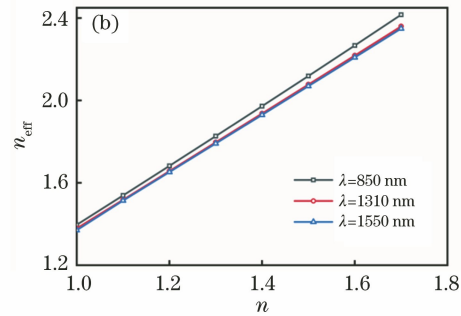


图 2 MIM 光波导参数关系模拟图。(a)有效折射率随波长的变化;(b)有效折射率随电介质折射率的变化  
Fig. 2 Simulated parameter relation of MIM waveguide. (a) Effective refractive index versus wavelength;  
(b) effective refractive index versus refractive index of dielectric medium

当  $TM_0$  在圆形谐振腔光波导内传播时,发生共振的条件为

$$k_{in} \frac{H_L^{(1)}(k_{in}R)}{H_L^{(1)}(k_{in}R)} = k_m \frac{J_L'(k_{in}R)}{J_L(k_{in}R)}, \quad (6)$$

式中: $H_L$  和  $J_L$  分别为第一类贝塞尔函数和第一类汉克尔函数; $J_L'$  和  $H_L^{(1)}$  分别为第一类贝塞尔函数和第一类汉克尔函数对宗量参数的导数; $L$  为共振模式数。

在仿真实验中,采用 FEM 模仿圆形谐振腔内部的电磁波传输特性。Port 1 为输入端口, port 2 为输出端口,则电磁波透射率为

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \left| \frac{H_{out}}{H_{in}} \right|^2, \quad (7)$$

式中: $P_{out}$  为从 port 2 输出的电磁波功率; $P_{in}$  为从 port 1 输入的电磁波功率; $H_{out}$  为从 port 2 处透射出去的沿  $Z$  轴的磁场强度; $H_{in}$  为从 port 1 处透射出去的沿  $Z$  轴的磁场强度。

### 3 结果与分析

当圆形谐振腔半径  $R = 225$  nm,波导宽度  $w = 50$  nm,波导与圆形谐振腔耦合距离  $d = 10$  nm,波导与谐振腔内部填充介质的折射率  $n = 1$  时,圆形谐振腔内部嵌入与不嵌入两个对称扇形金属块条件

下的透射谱如图 3(a)所示。结果显示,两种结构的滤波器中均有两个共振峰。为了进一步研究嵌入金属块谐振腔内部共振模式的特性,引入滤波器的品质因子( $Q = \lambda_{res}/\omega_f$ ),其中  $\lambda_{res}$  为共振波长, $\omega_f$  为谐振峰的半峰全宽(FWHM)。共振峰 mode 1 在无内嵌对称扇形金属块下共振波长为 900 nm,透射率为 82%,FWHM 为 45 nm,品质因子为 20;在内嵌 90° 对称扇形金属块下共振波长为 1210 nm,透射率为 55%,FWHM 为 40 nm,品质因子为 30。共振峰 mode 2 在无内嵌对称扇形金属块下共振波长为 570 nm,透射率为 70%,FWHM 为 70 nm,品质因子为 8;在内嵌 90° 对称扇形金属块下共振波长为 850 nm,透射率为 35%,FWHM 为 21 nm,品质因子为 40。研究表明,与未嵌入对称扇形金属块相比,在嵌入对称扇形金属块条件下,当共振峰 mode 1 的 FWHM 减小 5 nm 时,品质因子增加 10;当共振峰 mode 2 的 FWHM 减小 49 nm 时,品质因子增加 32,并且这两种共振模式的共振峰谱线都出现了红移现象。图 3(b)、(c)和图 3(d)、(e)分别展示了两种结构滤波器在两种共振模式下的磁场强度分布。可以看出,在这两种模式下共振腔和狭缝中均存在很强的磁场分布,原因是它们在特定波长下激发 SPP 产生了耦合效应。因此 SPP 能够通过狭

缝传输到右侧波导,故形成两个透射峰。在谐振腔内嵌入的扇形金属块会束缚谐振腔内的共振电磁波能量,导致当共振条件满足(6)式时其 SPP 共振波长向长波方向移动。金属块的嵌入使谐振腔内损耗

增加,从而导致禁带透射率降低,共振峰 FWHM 变窄。根据品质因子公式可知,由于 FWHM 减小并且共振波长未发生偏移,品质因子显著提高,从图 3(a)可以看出,共振峰具有更加细锐的特征。

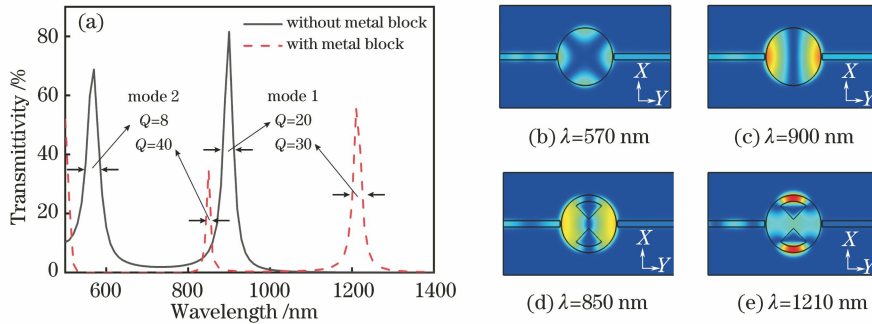


图 3 圆形滤波器的透射谱与磁场强度分布。(a)透射光谱图;

(b)(c)未嵌入扇形金属块的圆形滤波器的磁场分布;(d)(e)嵌入扇形金属块的圆形滤波器的磁场强度分布

Fig. 3 Transmittance spectra and magnetic field distributions in circular filter. (a) Transmittance spectrum; (b)(c) magnetic field distributions in circular filter without sector metal block; (d)(e) magnetic field distributions in circular filter with sector metal block

进一步探讨内嵌对称扇形金属块角度  $\theta$ , 波导与谐振腔之间耦合距离  $d$ , 圆形谐振腔半径  $r$  及介质折射率  $n$  对谐振峰波长和透射率的影响。首先探讨  $\theta$  对滤波器性能的影响,如图 4 所示。设置  $R = 225$  nm,  $d = 10$  nm,  $w = 50$  nm,  $\theta = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ$ 。如图 4(a)所示:随着  $\theta$  的增大,两个共振模式波长都出现了红移,其中 mode 2 红移比较明显,mode 1 显示出轻微的红移,表明  $\theta$  在一定波长范围内具有选频作用;随着  $\theta$  的增加,mode 2 的透射率出现了下降的趋势,而 mode 1 的透射率变动范围很小。mode 1 为谐振腔在 X 方向产生的法布里-珀罗(F-P)共振;mode 2 为内嵌

金属角度较小时 X、Y 方向的 F-P 共振,当内嵌金属块角度增大时,Y 方向的共振逐渐截止,导致 mode 2 的共振峰逐渐降低。图 4(b)为不同  $\theta$  下圆形谐振腔内磁场强度的归一化分布图。内嵌对称扇形金属块后,光波从左侧波导耦合进入圆形谐振腔中,在圆形腔内形成了驻波,光波在腔内振荡,当特定波长满足相干加强的条件时,光在圆形谐振腔内加强后耦合到右侧波导中形成透射峰。以上结果表明,通过控制对称扇形金属块的角度  $\theta$  可以调节滤波器透射波长的大小,但随着扇形金属块角度  $\theta$  的增大,谐振腔内的损耗增加,透射率呈下降趋势。

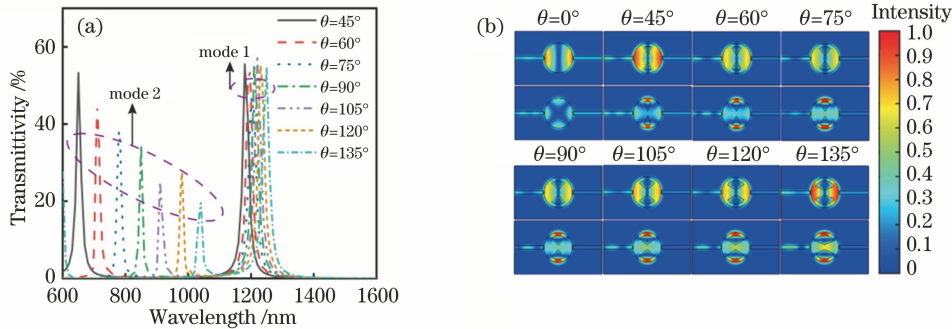


图 4 不同  $\theta$  下的透射谱和磁场强度分布。(a)透射谱;(b)磁场强度分布

Fig. 4 Transmittance spectra and magnetic field intensity distributions at different  $\theta$ .

(a) Transmittance spectra; (b) magnetic field intensity distributions

然后研究圆形谐振腔的半径  $R$  对滤波器滤波性能的影响,如图 5(a)所示,可以看出,随着半径  $R$  的增大,共振峰 mode 1 的中心波长发生红移,共振

峰 mode 2 的中心波长发生蓝移,两峰之间的禁带变宽,但是透射率并未发生明显变化。结果表明,可以通过控制圆形谐振腔的半径来调控禁带宽度。当

$R=225\text{ nm}$ ,  $\theta=90^\circ$ ,  $n$  为 1 时, 改变耦合距离, 结果如图 5(b) 所示。可以发现, 随着耦合距离的增加, 共振峰波长发生轻微的蓝移, 透射带宽减小, 透射率明显降低, 这是因为入射光波以倏逝波的形式进入

圆形谐振腔, 当耦合距离增加时, 能够耦合到谐振腔内的光波能量减小。因此可以在小范围内通过增加耦合距离来减弱透射强度, 以进一步增大滤波器的品质因子和半峰全宽, 提升滤波器的滤波性能。

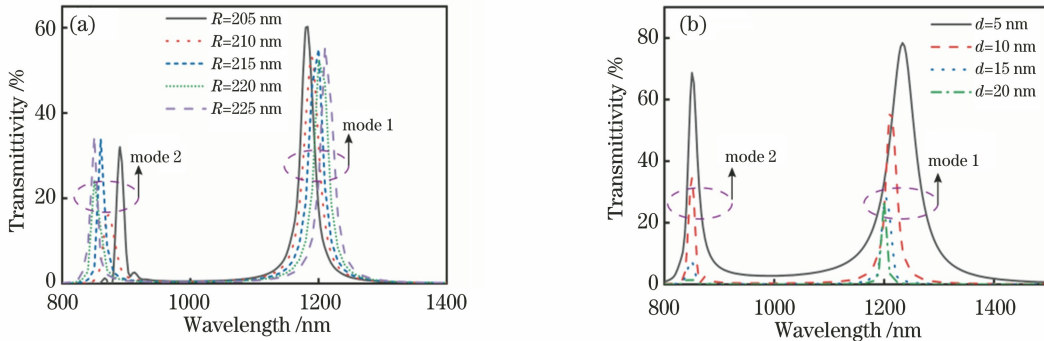


图 5 不同参数对共振峰的影响 (a) 谐振腔半径; (b) 耦合距离

Fig. 5 Effect of parameters on resonance peaks. (a) Resonator radius; (b) coupling distance

最后研究圆形谐振腔内介质折射率  $n$  对滤波器滤波性能的影响。当  $R=225\text{ nm}$ ,  $d=10\text{ nm}$ ,  $\theta=90^\circ$  时, 步长为 0.05 的 5 组透射率曲线如图 6(a) 所示, 可以看出, 随着介质折射率的增加, mode 1 和 mode 2 的中心波长都发生了明显的红移。图 6(b) 表明圆形腔内介质折射率的变化与共振峰波长中心的偏移几乎呈线性关系, 随着介质

折射率  $n$  的增大, 两个共振峰的波长均匀变化。由此可以看出, 在滤波器的基础上可以将所提设计应用在折射率传感器上, 相较于单峰的检测, 两个共振峰的存在能极大增强传感器的灵敏度。由图 6(b) 可以算出两个共振峰对应的折射率灵敏度, 分别为  $S_1=1200\text{ nm}/\text{RIU}$ ,  $S_2=900\text{ nm}/\text{RIU}$ , 其中 RIU 为折射率单元。

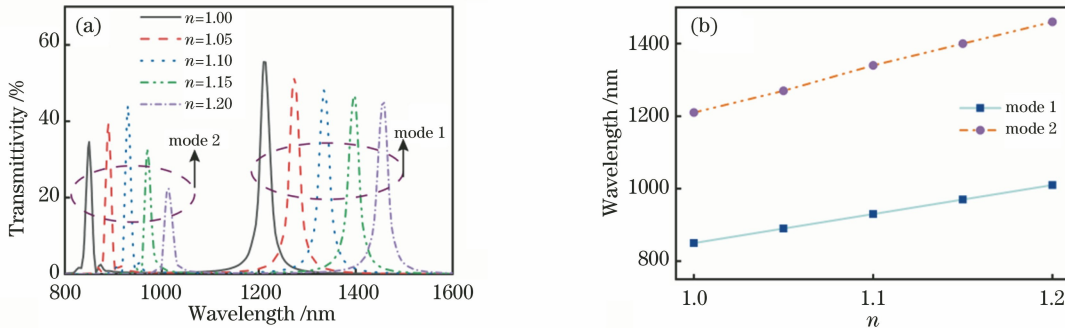


图 6 不同电介质折射率对滤波性能的影响。(a) 共振波长与透射率的关系; (b) 折射率与共振波长的关系

Fig. 6 Effect of refractive index of each medium on resonance performance. (a) Relationship between resonance wavelength and transmittivity; (b) relationship between refractive index and resonance wavelength

通过优化滤波器的参数结构,  $\theta=75^\circ$ ,  $n=1.09$ ,  $d=5\text{ nm}$ ,  $R=225\text{ nm}$  时, 可以有效调制该滤波器, 使其可以在近红外光纤通信的第一窗口 (850 nm) 和第二窗口 (1310 nm) 同时工作, 如图 7 所示。该研究结果为实现工作于光通信第一、第二窗口的双通道带通滤波器提供了一种切实可行的方法。

此外, 为了更好地比较 MIM 结构滤波器的性能参数, 选取了近年来报道的较为典型的带通滤波器进行比较, 如表 1 所示, 可以看出, 所提内嵌对称扇形金属块的带通滤波器不仅有较高的透射率还有极高的品质因子。该研究结果也可应用于传感领

表 1 所提滤波器与其他带通滤波器的参数比较  
Table 1 Parameter comparison between proposed filter and other bandpass filters

Filter	Transmittivity /%	Q	$S/(\text{nm} \cdot \text{RIU}^{-1})$
Filter in Ref.[8]	57		1500
Filter in Ref. [25]	42		
Filter in Ref. [32]	70	12	
Proposed filter	76	40	1200

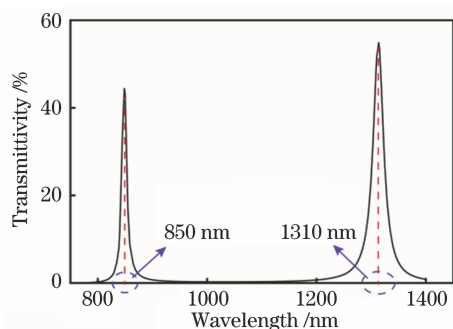


图7 滤波器在光纤通信第一、第二窗口工作时的结果

Fig. 7 Results for filter working in the first and second windows of optical fiber communication

域,有利于实现较高灵敏度的双通道传感。

## 4 结 论

提出了一种内嵌对称扇形金属块的圆形谐振腔MIM等离子体滤波器,采用有限元方法仿真并研究了对称扇形金属块的角度、圆形金属腔半径、波导与谐振腔耦合距离、谐振腔内介质折射率等主要参数对滤波器透射峰共振波长和透射率的影响。结果表明:在圆形谐振腔内嵌入对称扇形金属块可以有效减小两个共振峰的半峰全宽,品质因子得到极大提升,使滤波器的滤波性能得到提升;在 $R=225\text{ nm}$ 、 $d=5\text{ nm}$ 、 $\theta=90^\circ$ 、 $n=1$ 时,所提结构具有较好的滤波特性;经过参数优化,发现当 $\theta=75^\circ$ 、 $n=1.09$ 、 $d=5\text{ nm}$ 、 $R=225\text{ nm}$ 时,可以有效调制该滤波器,使其同时工作于近红外光纤通信的第一窗口(850 nm)和第二窗口(1310 nm),并且滤波器拥有极高的品质因子。研究结果为实现光通信领域下一代高性能微纳等离子体滤波器提供了重要的理论依据,有望在通信波段实现高效、窄带、可调谐的双通道带通滤波。

## 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] Gu B Y. Surface plasmon subwavelength optics: principles and novel effects[J]. Physics, 2007, 36(4): 280-287.  
顾本源. 表面等离子体亚波长光学原理和新型效应[J]. 物理, 2007, 36(4): 280-287.
- [3] Tong L M, Xu H X. Surface plasmons: mechanisms, applications and perspectives [J]. Physics, 2012, 41(9): 582-588.  
童廉明, 徐红星. 表面等离子体: 机理、应用与展望

[J]. 物理, 2012, 41(9): 582-588.

- [4] Yu H K, Liu B D, Wu W L, et al. Surface plasmons enhanced light-matter interactions [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(14): 149101.  
虞华康, 刘伯东, 吴婉玲, 等. 表面等离子体增强的光和物质相互作用[J]. 物理学报, 2019, 68(14): 149101.
- [5] Ozbay E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions [J]. Science, 2006, 311(5758): 189-193.
- [6] Ohtsu M, Kobayashi K, Kawazoe T, et al. Nanophotonics: design, fabrication, and operation of nanometric devices using optical near fields[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2002, 8(4): 839-862.
- [7] Yan Y F, Zhang G M, Qiao L T, et al. Design on the convex ring MIM structure filter based on surface plasmon polaritons[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(2): 223002.  
闫云菲, 张冠茂, 乔利涛, 等. 基于表面等离子体激元的凸环结构金属-介质-金属滤波器设计[J]. 光子学报, 2019, 48(2): 223002.
- [8] Qi Y P, Zhang X W, Zhou P Y, et al. Refractive index sensor and filter of metal-insulator-metal waveguide based on ring resonator embedded by cross structure[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(19): 197301.  
祁云平, 张雪伟, 周培阳, 等. 基于十字连通形环形谐振腔金属-介质-金属波导的折射率传感器和滤波器[J]. 物理学报, 2018, 67(19): 197301.
- [9] Liu X, Tian J P, Yang R C. Study of the characteristics of a semi-ring surface plasmonic waveguide filter [J]. Journal of Quantum Optics, 2017, 23(2): 168-177.  
刘霞, 田晋平, 杨荣草. 一种半环形表面等离子体光波导滤波器的传输特性研究[J]. 量子光学学报, 2017, 23(2): 168-177.
- [10] Sun Y H. Research on propagation properties of nano-waveguide based on surface plasmon polaritons [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.  
孙叶华. 基于SPPs的纳米结构波导传输特性研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [11] Zheng G G, Su W, Chen Y Y, et al. Band-stop filters based on a coupled circular ring metal-insulator-metal resonator containing nonlinear material [J]. Journal of Optics, 2012, 14(5): 055001.
- [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] Yang H Y, Li J Q, Xiao G L. Decay and propagation properties of symmetric surface plasmon polariton mode in metal-insulator-metal waveguide[J]. *Optics Communications*, 2017, 395: 159-162.
- [14] Yang H Y, Li J Q, Xiao G L. A highly efficient surface plasmon polaritons excitation achieved with a metal-coupled metal-insulator-metal waveguide [J]. *AIP Advances*, 2014, 4(12): 127114.
- [15] Zhu B Q, Tsang H K. High coupling efficiency silicon waveguide to metal-insulator-metal waveguide mode converter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(10): 2467-2472.
- [16] Xiao G L, Xu J L, Yang H Y, et al. Multi-channel plasmonic logic-gate output light source based on sawtooth resonant cavity coupled with metal-waveguide structure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(12): 121301.  
肖功利, 徐俊林, 杨宏艳, 等. 基于锯齿共振腔耦合金属波导结构的多通道等离子体逻辑门输出光源[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(12): 121301.
- [17] Wang B, Wang G P. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(1): 013107.
- [18] Hosseini A, Massoud Y. A low-loss metal-insulator-metal plasmonic Bragg reflector[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23): 11318-11323.
- [19] Han Z H, Liu L, Forsberg E. Ultra-compact directional couplers and Mach-Zehnder interferometers employing surface plasmon polaritons [J]. *Optics Communications*, 2006, 259(2): 690-695.
- [20] Pu M B, Yao N, Hu C G, et al. Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21030-21037.
- [21] Kamada S, Okamoto T, El-Zohary S E, et al. Design optimization and fabrication of Mach-Zehnder interferometer based on MIM plasmonic waveguides [J]. *Optics Express*, 2016, 24(15): 16224-16231.
- [22] Yang B J, Zhou Y J. Wavelength filtering and demultiplexing devices based on ultrathin corrugated MIM waveguides [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(9): 874-880.
- [23] Azar M T H, Zavvari M, Arashmehr A, et al. Design of a high-performance metal-insulator-metal plasmonic demultiplexer [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2017, 11(2): 026002.
- [24] Wang R B. Research on Fano resonance effect and its sensing characteristics in MIM waveguide coupled resonator system[D]. Taiyuan: North University of China, 2017.
- 王瑞兵. MIM波导耦合谐振腔系统中 Fano 共振效应及其传感特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2017.
- [25] Chen J, Li Y D, Chen Z Q, et al. Tunable resonances in the plasmonic split-ring resonator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(3): 1-6.
- [26] Setayesh A, Mirnaziry S R, Abrishamian M S. Numerical investigation of tunable band-pass/band-stop plasmonic filters with hollow-core circular ring resonator [J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2011, 15(1): 82-89.
- [27] Mirnaziry S R, Wolff C, Steel M J, et al. Lasing in ring resonators by stimulated Brillouin scattering in the presence of nonlinear loss [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 23619-23633.
- [28] Zheng G G, Su W, Chen Y Y, et al. Band-stop filters based on a coupled circular ring metal-insulator-metal resonator containing nonlinear material [J]. *Journal of Optics*, 2012, 14(5): 055001.
- [29] Zhang X W, Gong H H. A new design of tunable high performance multi-channel optical demultiplexer based on MIM plasmonic ring resonators at telecommunication wavelengths [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(2): 160-164.  
张雪伟, 龚韩韩. 一种新型基于 MIM 等离子体环形谐振器的可调谐高性能多信道波分解复用器的设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(2): 160-164.
- [30] Rakhshani M R, Mansouri-Birjandi M A. Dual wavelength demultiplexer based on metal-insulator-metal plasmonic circular ring resonators [J]. *Journal of Modern Optics*, 2016, 63(11): 1078-1086.
- [31] Zhan S P, Li H J, Cao G T, et al. Theoretical analysis of plasmon-induced transparency in ring-resonators coupled channel drop filter systems [J]. *Plasmonics*, 2014, 9(6): 1431-1437.
- [32] 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.
- [33] Yang Y R. Numerical study of plasmonic filter based on metal-insulator-metal waveguide [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2016.  
杨韵茹. 基于 MIM 波导结构的等离子体滤波器的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [34] Zhu J H, Huang X G, Tao J, et al. Nanometric

- plasmonic refractive index sensor [J]. Optics Communications, 2012, 285(13/14): 3242-3245.
- [35] Lin X S, Huang X G. Tooth-shaped plasmonic waveguide filters with nanometric sizes[J]. Optics Letters, 2008, 33(23): 2874-2876.
- [36] Wu T S, Liu Y M, Yu Z Y, et al. The sensing characteristics of plasmonic waveguide with a ring resonator[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7669-7677.
- [37] Economou E N. Surface plasmons in thin films[J]. Physical Review, 1969, 182(2): 539.