

doi:10.3788/gzxb20184704.0423003

# 基于表面等离子激元的口径耦合多功能 非对称半圆腔滤波器设计

王志爽, 张冠茂, 刘海瑞, 乔利涛

(兰州大学 信息科学与工程学院 现代通信技术研究所, 兰州 730000)

**摘 要:**采用口径耦合的方法构造了一种金属-介质-金属非对称结构滤波器,由两个半圆腔通过两个矩形口径与波导管相连形成.运用有限元法仿真计算获得了该结构的磁场、透射谱、带宽及边沿陡峭度分布曲线.研究表明,通过调节结构参数,滤波器的透射曲线出现明显的红移或蓝移现象,且曲线分布平滑,其通带透射比高达 0.95,阻带则具有平坦特性且透射比低至 0.001,通带、阻带均具有较宽的带宽.对滤波器进行结构参数优化,可以实现类似矩形滤波器的特性,在光通信波段的三个通信窗口能够实现通道选择的滤波功能.该滤波器在微纳光学器件集成尤其是光通信系统中有良好的应用前景.

**关键词:**表面等离子激元;非对称金属-介质-金属结构滤波器;有限元方法;半圆形谐振腔;口径耦合;传输透射谱

中图分类号:O43

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)04-0423003-8

## Design of the Aperture Coupled Multi-functional Asymmetric Semi-circular Cavity Filter Based on Surface Plasmon Polaritons

WANG Zhi-shuang, ZHANG Guan-mao, LIU Hai-ru, QIAO Li-tao

(Institute of Modern Communication Technology, School of Information Science and Engineering,  
Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** A metal-insulator-metal asymmetric structure filter is proposed based on the aperture coupled method, which is composed of two semi-circular cavities, a waveguide and two rectangular apertures connecting the semi-circular cavities and the waveguide. The finite element method is used to simulate and calculate its magnetic field distribution, transmission spectra, bandwidth and edge steepness distribution curves. The results show that the obvious red shift or blue shift phenomenon will be occurred in the transmission curve when the structure parameters are adjusted, and the transmission curve is very smooth. Its pass-band's transmittance can reach 0.95, its stop-band has the flat characteristics and the transmittance is as low as 0.001. Besides, its pass-band and stop-band all have a wide bandwidth. After optimizing the structure parameters, the filter can realize a similar function of the rectangular filter and the filtering function of channel selection of the three optical communication windows at telecommunication regime. The proposed filter can be well applied in the micro / nano optical integrated devices, especially in optical communication systems.

**Key words:** Surface plasmon polaritons; Asymmetrical metal-insulator-metal structure filter; Finite element method; Semi-circular resonance cavity; Aperture coupled; Transmission spectrum

**OCIS Codes:** 230.1150; 240.6680; 230.7408; 070.5753; 060.2330

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No.61631007)和中央高校基本科研业务费专项资金(兰州大学)(No. lzujbky-2015-K7)资助

第一作者:王志爽(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为表面等离子激元波导技术及其应用. Email: wangzhsh15@lzu.edu.cn

导师(通讯作者):张冠茂(1973-),男,副教授,博士,主要研究方向为光通信与光传感、微纳光子器件设计和光频表面等离子激元学及其应用. Email: zhanggm@lzu.edu.cn

收稿日期:2017-11-29;录用日期:2018-01-15

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

表面等离子激元(Surface Plasmon Polaritons, SPPs)是电磁波与金属表面的自由电子之间相互作用而形成的一种沿着金属-介质表面传播的电磁表面波,在垂直于界面方向上场以指数形式衰减.SPPs具有良好的局域特性,并能突破传统光学中的衍射极限,从而实现亚波长光学器件的集成<sup>[1-3]</sup>.

目前,基于 SPPs 的功能光学器件主要有介质-金属-介质(Insulator-Metal-Insulator, IMI)和金属-介质-金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)两种波导结构.相比于 IMI 波导结构,MIM 波导结构拥有更小的模式尺寸,可以将传播长度限制在微米量级<sup>[4]</sup>.基于 SPPs 的 MIM 波导已经在理论和实验研究方面取得了突破,被用于干涉仪<sup>[5-6]</sup>、分流器<sup>[7-9]</sup>、传感器<sup>[10-11]</sup>、全光开关<sup>[12]</sup>、滤波器<sup>[13-15]</sup>等.其中滤波器技术在微纳集成光学器件发展中至关重要.基于 MIM 结构的 SPPs 滤波器常见的耦合方式主要有直接耦合、边界耦合和口径耦合三种.直接耦合对应的滤波器一般为带通滤波器<sup>[16-18]</sup>;边界耦合对应的滤波器一般为带阻滤波器<sup>[19-21]</sup>,且这两种耦合方式构成的滤波器其带宽相对较窄.除此之外,由于 SPPs 波在金属中的趋肤深度约在 20 nm 左右,因此这两种耦合方式只有在耦合间距小于 20 nm 时才能获得有效的耦合.此外,其在耦合效率和器件制备上也存在不小的挑战.口径耦合构造的滤波器相对其他两种耦合方式来说可以提高耦合效率,并且通过改变耦合口径的宽度和高度可以调节耦合强度<sup>[22-25]</sup>.口径耦合即通过口径将共振腔与波导管连接起来,例如,加拿大 Alberta Edmonton 大学的 HAN Z 团队通过矩形口径耦合设计的环形滤波器<sup>[22]</sup>以及西南交通大学的 YAN Lian-shan 团队通过口径耦合设计的矩形腔滤波器<sup>[23]</sup>.在利用口径耦合构成的滤波器中,耦合口径除了可以调节耦合强度外,还可以通过调节耦合口径的高度来剔除波导管与共振腔之间的倏逝耦合,并提高器件的易制备性.基于 SPPs 滤波器的结构有矩形腔、矩形环腔、圆盘、圆环、梯形腔等形式,迄今为止还未见到半圆腔滤波器结构.在同等半径下,半圆腔相比于圆盘或圆环可以减小一半的结构尺寸,这有利于提高单位面积上集成光电路的集成密度.

本文利用口径耦合构造了一种新型的非对称半圆腔 MIM 波导结构滤波器.通过与两种 MIM 波导结构的对比,分析研究了该结构滤波器的传输特性和优点.通过对结构参数的分析得到了结构参数变化对其传输特性的影响曲线.最后,利用结构参数与传输特性的关系得到了优化后的结构及其仿真结果.

## 1 结构设计与分析方法

如图 1, MIM 结构是通过两个矩形口径将两个半圆腔与介质波导管相连构成的非对称结构.其中半圆腔的半径为  $r$ , 矩形口径的宽为  $A$ , 半圆腔最底端与波导管的距离为  $d$ , 两半圆腔中心之间距离为  $D$ , 输入输出端口与半圆腔的距离为  $L$ , 波导管的宽度为  $W$ .  $L$  和  $W$  分别固定为 300 nm 和 50 nm, 为剔除半圆腔与波导管之间的倏逝耦合, 可将  $d$  固定为 50 nm<sup>[22]</sup>, 其余结构参数初始化为  $A = 40$  nm,  $r = 100$  nm,  $D = 200$  nm. 透射系数  $T$  定义为  $T = P_{out}/P_{in}$ , 其中  $P_{in}$  和  $P_{out}$  分别为输入和输出端口处的功率.

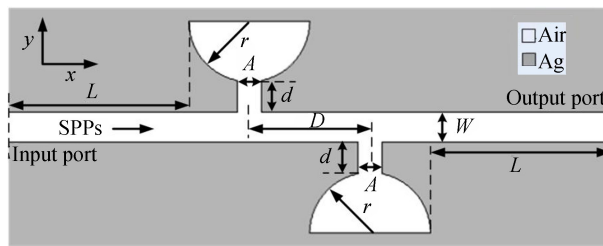


图 1 口径耦合非对称 MIM 滤波器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the aperture coupled asymmetric semi-circular cavity MIM filter

用有限元(Finite Element Method, FEM)仿真软件 COMSOL 分析计算此 MIM 结构的传输特性,其中填充介质选用空气( $\epsilon_{r-air} = 1.0$ ),金属选用银(Ag),其相对介电常数  $\epsilon_m$  采用标准 Drude 模型计算,即

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

式中,无穷相对介电常数取为  $\epsilon_\infty = 3.7$ , 等离子体频率  $\omega_p = 9.1$  eV, 电子碰撞频率  $\gamma = 0.018$  eV<sup>[26]</sup>. 同时,此

结构的边界条件设置为散射边界条件.

## 2 传输特性仿真结果分析

将单个半圆腔结构、对称半圆腔( $D=0$  nm)结构与设计结构的透射比曲线进行对比,三种结构尺寸均使用初始化的结构参数,其曲线对比如图 2.双半圆腔对称结构的透射率明显比单个半圆腔结构的透射率低,但阻带的带宽明显增大.当间距  $D$  增大为 200 nm 时,设计的非对称半圆腔结构下的透射谱线类似于矩形滤波器,与另外两种结构相比其透射曲线更加平滑,上升沿和下降沿更加陡峭,通带透射比更高且阻带具有平坦特性.另外,非对称半圆腔 MIM 结构滤波器相比很多结构滤波器<sup>[16-17,19-20]</sup> 具有透射率高、阻带透射率低且平坦、带宽较宽等优点,其主要滤波特性对比结果见表 1.

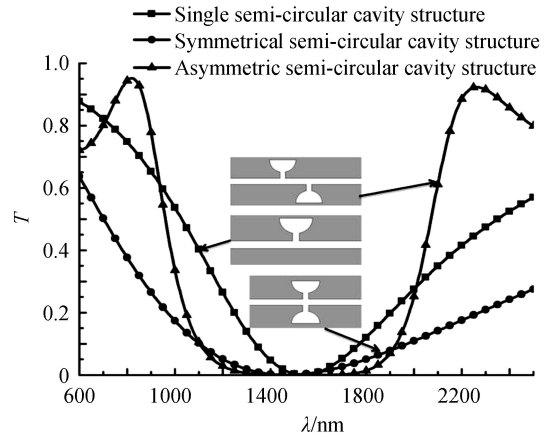


图 2 三种不同 MIM 结构滤波器透射谱线对比  
Fig.2 Comparison of the transmission spectra of the three different MIM structures

表 1 不同滤波器传输特性的对比

Table 1 Comparison of the transmission characteristics of different filters

Structure	Transmittance/ max	Transmittance/ min	Max passband bandwidth/nm	Max stopband bandwidth/nm	Reference
Asymmetric semi-circular cavity	0.94	~0	>190	>700	/
Ring resonator	~0.57	~0.05	<150	<600	[16]
Nanodisk resonator	~0.82	~0	<60	/	[17]
Trapezoid resonator	~0.90	~0	<320	<40	[19]
Rectanglecavity	~0.95	~0.07	<200	<20	[20]

为了说明图 2 中传输曲线的特性,借助 SPPs 波在三种 MIM 波导结构中的磁场分布,如图 3、4.图 3(a)~(c)是单半圆腔结构在特定波长入射波下的磁场分布,SPPs 波沿波导管传输,在经过矩形口径时一部分波分流至半圆腔,如图 3(a).在此,可以将半圆腔和矩形口径看作“磁容器”,矩形口径的有效折射率大于半圆腔

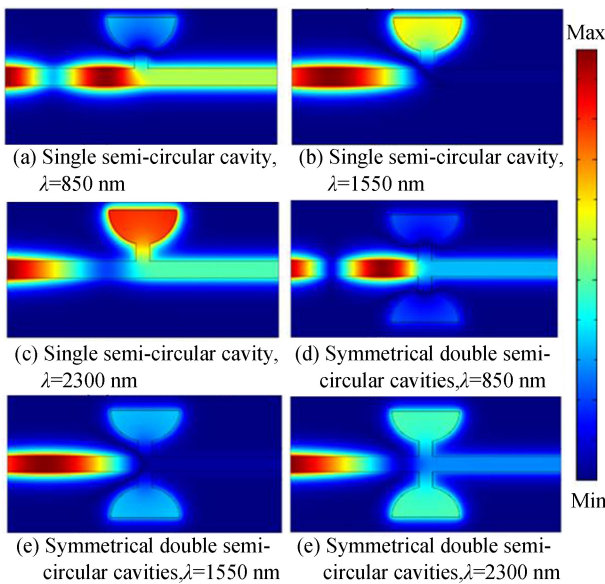


图 3 单半圆腔结构和双半圆腔对称结构在不同波长下的磁场分布对比  
Fig.3 Magnetic field distribution of the single semi-circular cavity structure and the symmetrical double semi-circular cavities structure at different wavelength

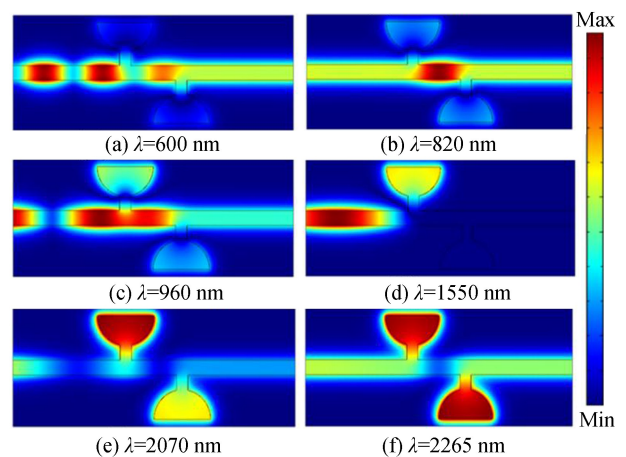


图 4 双半圆腔非对称结构滤波器在不同工作波长下的磁场分布  
Fig.4 Magnetic field distribution of the asymmetrical semi-circular cavities MIM structure filter at different wavelength

和空气的有效折射率,可以吸引位于其附近的磁场进入半圆腔.因此它可以使 SPPs 波的有效传播长度增大<sup>[27-28]</sup>.每当半圆腔的出射波与波导管中的传输波满足相位相消条件时,透射曲线将出现波谷,如图 3(b).当“磁容器”充磁到一定程度时,半圆腔的出射波与波导管中的传输波相互叠加输出,如图 3(c).对称半圆腔结构中 SPPs 波的传播类似于单半圆腔结构中 SPPs 波的传播,区别在于对称双半圆结构中 SPPs 波的传播在矩形口径处分为两路经矩形口径进入半圆腔,经过一定传播长度后,经两矩形口径出射的波与波导管中传输的波进行叠加,当满足相位相消条件时透射曲线出现波谷,如图 3(e),而当满足相位叠加条件时透射曲线出现波峰,如图 3(f).通过对比图 2 中单半圆腔结构与对称半圆腔结构的透射曲线,可以发现相同入射波长下对称半圆腔结构的透射率远小于单半圆腔透射率,有效地印证了“磁容器”的概念.

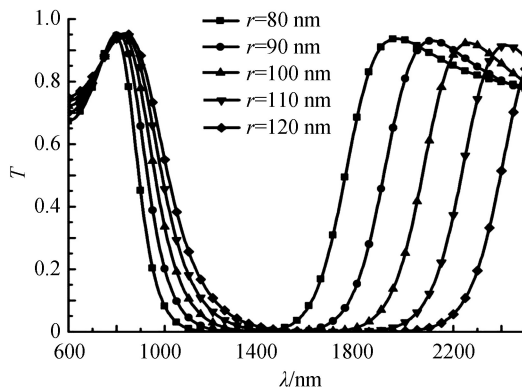
鉴于单半圆腔结构较高的透射比、对称半圆腔结构阻带宽以及 SPPs 波在不同结构中的传播特点,将  $D$  增加至 200 nm 以兼顾单半圆腔和对称半圆腔结构的优点.图 4 为选定透射率下对应波长处的磁场分布,其中对应的透射率图 4(a)近似为 0.72,图 4(b)、(f)分别对应透射谱短波和长波处通带透射率的峰值,其透射率近似为 0.95、0.92,图 4(c)、(e)近似为 0.5,图 4(d)近似为 0.在非对称半圆腔结构中 SPPs 波的传播类似于对称半圆腔结构,不同之处在于 SPPs 波沿波导管传输经过第一个矩形口径分流一部分进入第一个半圆腔,然后再经过传输距离  $D$  后经第二个矩形口径进入第二个半圆腔.借助 SPPs 波在非对称半圆腔结构中的传播路径,可以解释相较于单半圆腔结构及对称半圆腔结构阻带带宽拓宽的原因.对比图 4(d)和图 3(b)可以看到其磁场分布类似,此时第一个半圆腔的出射波与波导管中的传输波满足相位相消的条件.在满足相位相消条件前后,如图 4(c)、(e),第二个半圆腔的“磁容器”效应及其出射波与波导管中的波发生一定程度的相消干涉,由此可以拓宽阻带带宽.由图 3、4 磁场分布可以看出本文提出的结构达到了设计的预期,兼顾了单半圆腔结构和对称半圆腔结构滤波器的优点.

### 3 结构参数影响分析

为进一步了解所设计滤波器的特性,需分析结构参数  $r$ 、 $D$ 、 $A$  对传输特性的影响.由图 2 可知,设计的 MIM 非对称半圆腔结构滤波器的透射谱线类似于矩形滤波器,其具有通带透射率高和阻带平坦的特性,为更好地反映结构参数与通带和阻带的关系,定义带宽( $B_w$ ):通带带宽为短波处通带透射比大于 0.8 部分的谱线宽度(文中所述通带带宽均为短波处通带带宽),阻带带宽为透射比小于 0.05 部分的谱线宽度.另外,为了描述透射谱线上升沿和下降沿的陡峭度与结构参数的关系,不同于 CHEN Xi 的定义方法<sup>[29]</sup>,将陡峭度( $S_d$ )重新定义: $S_d = 0.6/S_w$ ,其中  $S_w$  为透射比 0.8 (0.2)到 0.2(0.8)之间的下降沿(上升沿)的谱线宽度,0.6 为透射比 0.8 与 0.2 之差, $S_d$  的单位为  $\mu\text{m}^{-1}$ .此时, $S_d$  可直观地反映上升沿和下降沿陡峭度的大小, $S_d$  越大,陡峭度越大.

#### 3.1 半圆腔半径 $r$ 对传输特性的影响

在所设计的 MIM 结构中只改变  $r$ ,其它参数保持初始值不变( $D = 200$  nm,  $A = 40$  nm),如图 5(a),随着  $r$  的增大,透射谱线出现明显的红移现象,且通带和阻带的带宽明显增大.图 5(b)显示了通带及阻带带宽与参数  $r$  的变化关系.通带的带宽随  $r$  的增大而增加较慢,但阻带的带宽则随着  $r$  的增大而增加较快.图 5(c)是参数  $r$  与透射谱线上升沿与下降沿陡峭度的关系,随着  $r$  的增大,下降沿的陡峭度减小,上升沿的陡峭度几乎不变.



(a) Relation between the transmission spectrum and parameter  $r$



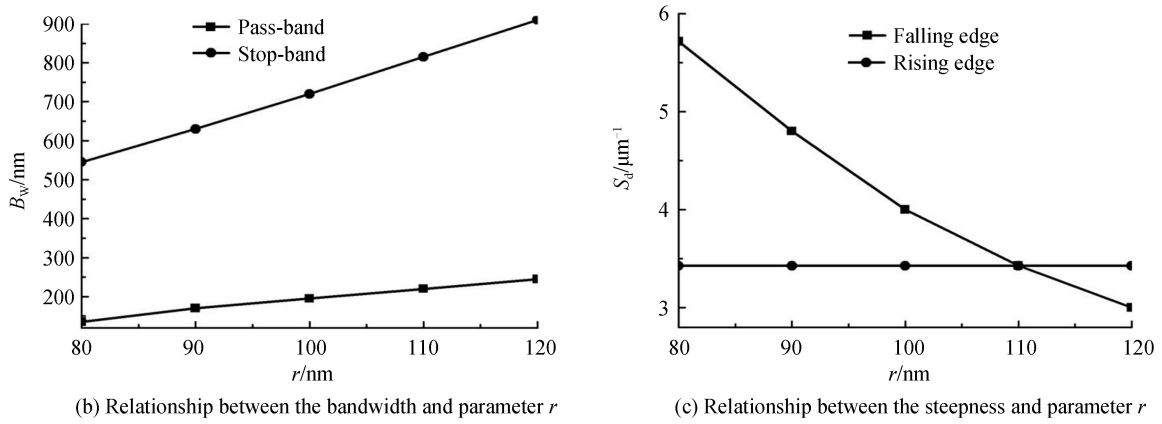


图 5  $D=200\text{ nm}$ ,  $A=40\text{ nm}$  时,参数  $r$  对滤波器传输特性的影响

Fig.5 Influence of parameter  $r$  on the transmission characteristics of the filter when  $D=200\text{ nm}$ ,  $A=40\text{ nm}$

### 3.2 间距 $D$ 对传输特性的影响

在所设计的 MIM 结构中,只改变  $D$ ,其它参数保持初始值不变( $r=100\text{ nm}$ ,  $A=40\text{ nm}$ ),如图 6(a),随着  $D$  的增大,透射谱线出现红移.图 6(b)显示了通带和阻带的带宽与参数  $D$  的变化关系,由图可知,随着  $D$  的增大,通带的带宽减小,阻带的带宽缓慢增大.图 6(c)是参数  $D$  与透射谱线上升沿与下降沿陡峭度的关系,随着  $D$  的增大,下降沿的陡峭度增大,上升沿的陡峭度减小.

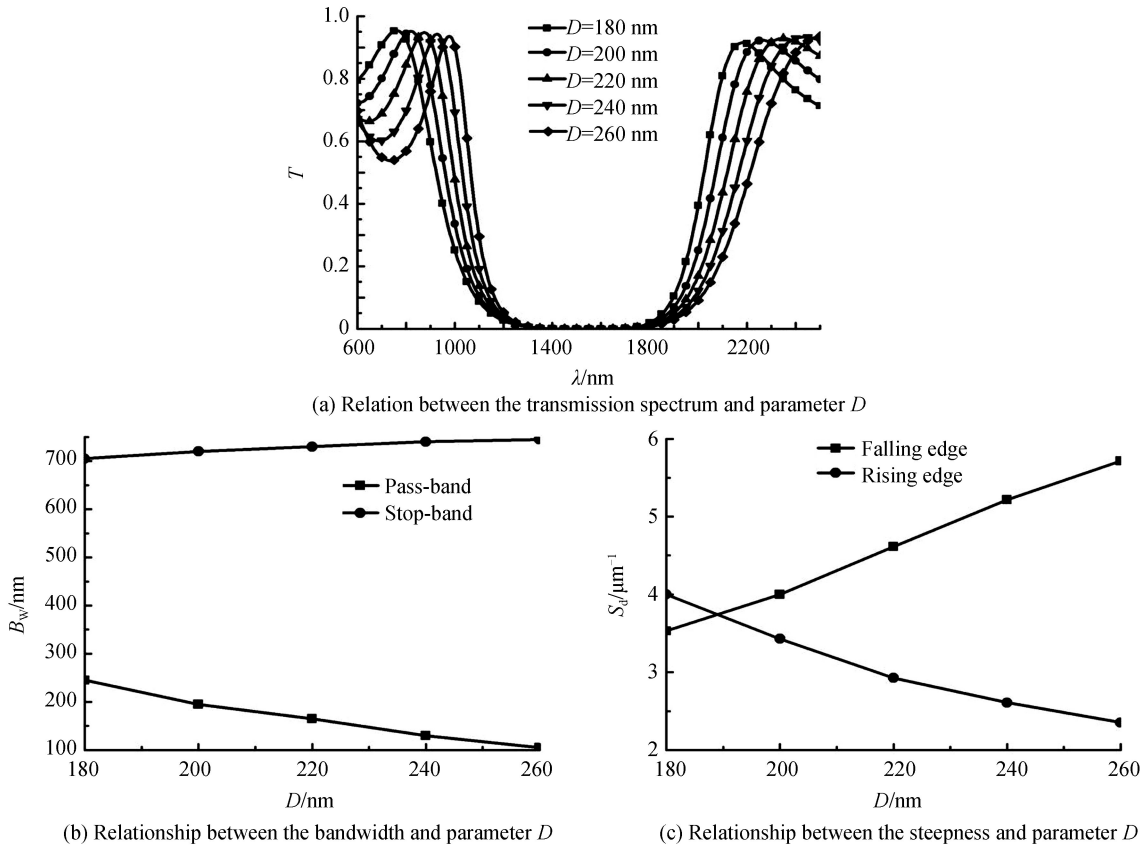


图 6  $r=100\text{ nm}$ ,  $A=40\text{ nm}$  时,参数  $D$  对滤波器传输特性的影响

Fig.6 Influence of parameter  $D$  on the transmission characteristics of the filter when  $r=100\text{ nm}$ ,  $A=40\text{ nm}$

### 3.3 口径宽度 $A$ 对传输特性的影响

在所设计的 MIM 结构中只改变  $A$  并保持其它参数初始值不变( $r=100\text{ nm}$ ,  $D=200\text{ nm}$ ),如图 7(a),随着  $A$  的增大,透射谱线出现蓝移.图 7(b)显示了通带及阻带的带宽与参数  $A$  的变化关系,由图可知,随着

$A$  的增大,通带的带宽减小,阻带的带宽基本维持不变.图 7(c)是参数  $A$  与透射谱线上升沿与下降沿陡峭度的关系,随着  $A$  的增大,下降沿的陡峭度缓慢增大,上升沿的陡峭度则缓慢减小.

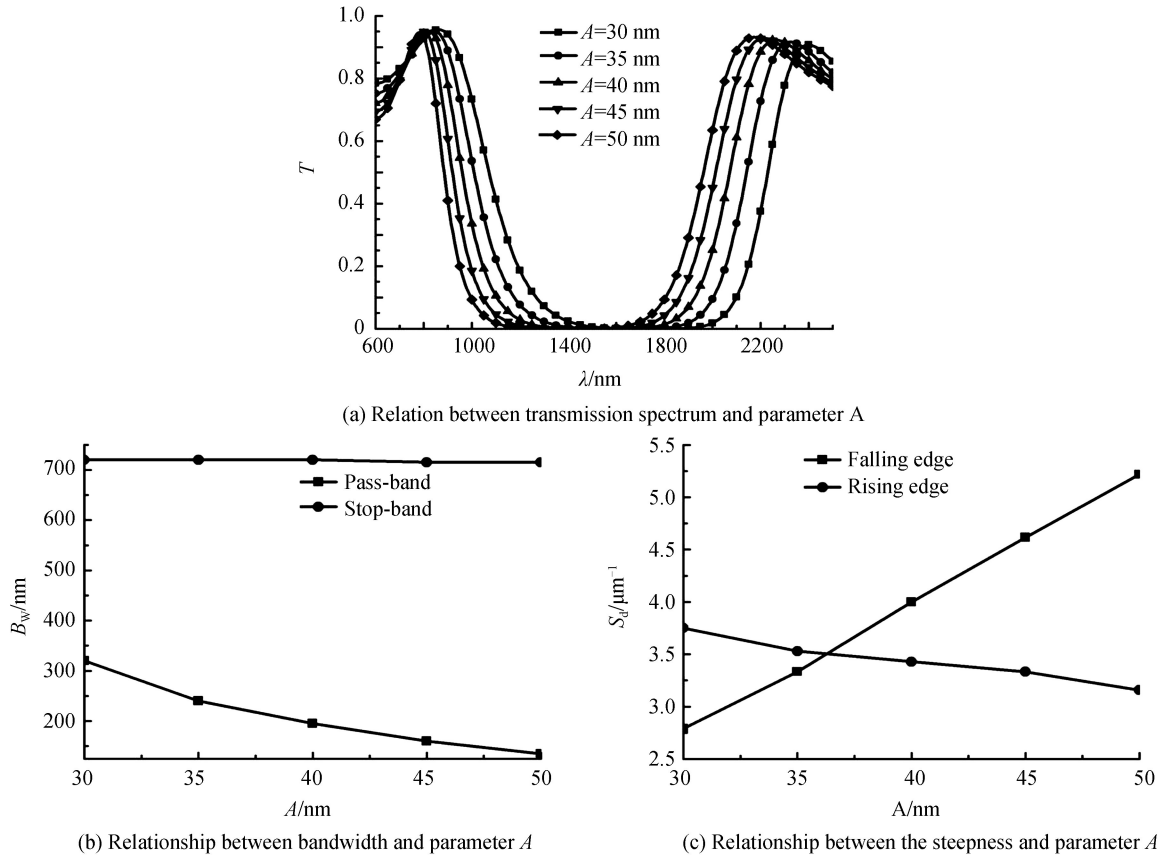


图 7 改变参数  $A$  保持其它结构参数不变( $r=100$  nm,  $D=200$  nm)对滤波器传输特性的影响

Fig.7 Influence of parameter  $A$  on the transmission characteristics of the filter when  $r=100$  nm,  $D=200$  nm

最后,对结构参数的改变引起透射曲线出现红移或蓝移现象及带宽变化的原因进行分析.随着参数  $r$  取值的增大,由于矩形口径和半圆腔构成的“磁容器”的面积增大,使得 SPPs 波的传播经历了更长的光程(有效传播长度增大),因此随着参数  $r$  的增大,相应的透射谱线出现红移.改变参数  $D$  只改变了两半圆腔中心位置的间距而没有对由矩形口径和半圆腔构成的“磁容器”进行改变.因此随着参数  $D$  的增大, SPPs 波的有效传播长度增大,透射曲线出现红移现象.而改变参数  $r$  比改变参数  $D$  出现更明显红移的原因在于:同等程度增大参数  $r$  和  $D$ ,两半圆腔面积增大引起 SPPs 波有效传播长度增大的程度远大于由参数  $D$  增大引起的程度.在相同入射波长下,结构的有效折射率随着结构参数  $A$  的增大而减小且共振波长随着系统有效折射率的增大而增大<sup>[28]</sup>.因此,随着结构参数  $A$  的增大,系统的共振波长向短波方向移动,透射谱线出现蓝移.

由第二节中对滤波器阻带拓展的解释及图 4 的磁场分布可知,该滤波器透射谱线的阻带是经第一个半圆腔出射的光波与主波导管中传输的光波发生相消干涉和第二个半圆腔吸收光波形成的.当参数  $r$  增大时,“磁容器”吸收更多的磁场能量,显然透射谱线的阻带带宽会明显增大;而在第一个“磁容器”未充满磁时,主波导管中可以传输更多光波到输出端口,因此透射谱线短波处通带带宽出现拓宽.当参数  $D$  增大时,其增加了主波导管中的光程,使输出端口在第一个“磁容器”充满磁前接收到的光波减少,因此随着参数  $D$  增大,透射谱线短波处通带带宽减小.当参数  $A$  增大时,耦合口径越宽,“磁容器”充磁越快,亦使输出端口在第一个“磁容器”充满磁前接收到的光波减少,因此随着参数  $A$  增大透射谱线短波处通带带宽减小.此滤波器透射谱线的阻带主要与由耦合口径和半圆腔构成的“磁容器”有关,因此改变参数  $D$  与  $A$  对透射谱线的阻带带宽影响不大.

## 4 结构参数优化仿真分析

从第三节中可以了解到参数  $r$ 、 $D$ 、 $A$  对透射谱线影响的不同作用.经过对比可以发现,参数  $r$  对透射谱线通带和阻带的带宽、上升沿的陡峭度及透射谱线的移动均有影响,而对下降沿的陡峭度影响不大.参数  $D$ 、 $A$  则对透射谱线通带的带宽、上升沿和下降沿的陡峭度及透射谱线的移动有影响,对阻带的带宽影响不大.基于上述结构参数对所设计的 MIM 结构滤波器透射谱线的影响规律,对滤波器结构和相应的仿真结果进行优化.设计 MIM 结构滤波器的目的是使其应用在光通信波段并兼顾光通信波段的三个通信窗口(850 nm, 1 310 nm, 1 550 nm),尤其是第二、三窗口.由此得到优化后的 MIM 结构滤波器的结构参数和透射谱线如图 8.其中,将可调参数设置为  $A=35$  nm、 $r=90$  nm、 $D=200$  nm 时,光通信波段中第一窗口位于此优化结构透射谱的通带,第二、三窗口则位于其透射谱的阻带区域,如图 8 中带正方形曲线所示.而将可调参数设置为  $A=50$  nm、 $r=50$  nm、 $D=150$  nm 时,优化结构具有更小的尺寸且光通信波段中第一窗口位于优化结构透射谱的阻带部分,第二、三窗口则位于其透射谱的通带,如图 8 中带圆形曲线所示.而将可变结构参数设置为  $A=45$  nm、 $r=70$  nm、 $D=250$  nm 时,光通信波段中第一窗口位于此优化结构透射谱的通带,第二、三窗口位于其透射谱的阻带.第三种优化结构有别于另外两种优化结构,其通带和阻带具有较窄的带宽且下降沿的陡峭度非常高,如图 8 中带三角形曲线所示.在这三种优化设计结构中,透射谱线的阻带都具有平坦的传输特性,透射率最低值接近 0.001.由此可以实现对光通信波段中三个窗口波道传输通断的选择性控制.

## 5 结论

本文运用有限元法数值仿真分析了基于口径耦合的 MIM 非对称半圆腔结构滤波器的传输特性.仿真结果表明所设计的滤波器具有通带透射率高(高达 0.95)、阻带平坦且透射率极低(低至 0.001)以及通带阻带带宽较宽等特性.此外通过结构参数的调节可以很容易实现传输透射谱线的移动(红移或蓝移),并对通带和阻带的带宽及上升沿下降沿的陡峭度进行调整.研究了结构参数变化对滤波器传输谱线、带宽和边沿陡峭度的影响关系,可作为改进此 MIM 结构滤波器性能的参考.最后给出了三种优化后的结构及其传输谱线,结果显示此系列滤波器可以实现对光通信波段的三个通信窗口(850 nm, 1 310 nm, 1 550 nm)通道选择的滤波功能.设计的 MIM 非对称半圆腔滤波器具有结构尺寸小、多功能与通道选择性调节等优点,可以用于微纳光学集成器件设计尤其是光通信技术中.

### 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] OZBAY E. Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions[J]. *Science*, 2006, **311**(5758): 189-193.
- [3] GRAMOTNEY D K, BOZHEVOLNYI S I. Plasmonics beyond the diffraction limit[J]. *Nature Photonics*, 2010, **4**(2): 83-91.
- [4] YUN Bin-feng, HU Guo-hua, CUI Yi-ping. Theoretical analysis of a nanoscale plasmonic filter based on a rectangular metal-insulator-metal waveguide[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2010, **43**(38): 385102.
- [5] 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.
- [6] FENG Jing, PACIFICI D. A spectroscopic refractometer based on plasmonic interferometry[J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, **119**(8): 083104.

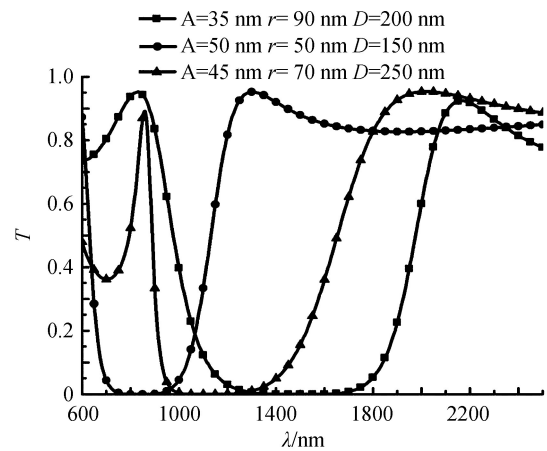


图 8 优化后的三种 MIM 结构滤波器的透射谱线  
Fig.8 Transmission spectra of the three optimized asymmetrical semi-circular cavity MIM filters

- [7] LIU J S, PALA R A, AFSHINMANESH F, *et al.* A submicron plasmonic dichroic splitter [J]. *Nature Communications*, 2011, **2**(1): 525-530.
- [8] VERONIS G, FAN S. Bends and splitters in metal-dielectric-metal subwavelength plasmonic waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(13): 131102.
- [9] YU Yue, SUN Chen, LI Jun-hao, *et al.* A plasmonic metal grating wavelength splitter[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, **48**(1): 015102.
- [10] SHI Yue, ZHANG Guan-mao, AN Hou-lin, *et al.* Controllable Fano resonance based on coupled square split-ring resonance cavity[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(4): 0413002.  
石悦, 张冠茂, 安厚霖, 等. 基于耦合开口方环共振空腔的可控法诺共振研究[J]. 光子学报, 2017, **46**(4): 0413002.
- [11] HAJEBIFARD A, BERINI P. Fano resonances in plasmonic heptamer nano-hole arrays[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(16): 18566-18580.
- [12] KRASAVIN A V, ZAYATS A V. Electro-optic switching element for dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(4): 241106.
- [13] ATALLA M R M, FARYAD M, LAKHTAKIA A. On surface-plasmon-polariton waves guided by the interface of a metal and a rugate filter with a sinusoidal refractive-index profile. Part II: high-phase-speed solutions[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2017, **29**(11): 3078-3086.
- [14] ZHONG Xiao-lan. A narrow-band subwavelength plasmonic waveguide filter with metal-insulator-metal Bragg reflector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(4): 537-541.  
钟晓岚. 金属-绝缘体-金属布喇格反射腔的窄带滤波研究[J]. 光子学报, 2011, **40**(4): 537-541.
- [15] LI Hong-ju, WANG Ling-ling, ZHANG Han, *et al.* Graphene-based mid-infrared, tunable, electrically controlled plasmonic filter[J]. *Applied Physics Express*, 2014, **7**(2): 343-352.
- [16] WANG Tong-biao, WEN Xie-wen, YIN Cheng-ping, *et al.* The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator. [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 24096-24101.
- [17] WANG Guo-xi, LU Hua, LIU Xue-ming, *et al.* Tunable multi-channel wavelength demultiplexer based on mim plasmonic nanodisk resonators at telecommunication regime[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3513-3518.
- [18] ZHANG Zhao, SHI Feng-hua, CHEN Yi-hang. Tunable multichannel plasmonic filter based on coupling-induced mode splitting[J]. *Plasmonics*, 2015, **10**(1): 139-144.
- [19] SONG Ci, QU Shi-nian, WANG Ji-cheng, *et al.* Plasmonic tunable filter based on trapezoid resonator waveguide[J]. *Journal of Modern Optics*, 2015, **62**(17): 1400-1404.
- [20] YUN Bin-feng, HU Guo-hua, CUI Yi-ping. Resonant mode analysis of the nanoscale surface plasmon polariton waveguide filter with rectangle cavity[J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(2): 267-275.
- [21] XIAO San-shui, LIU Liu, QIU Min. Resonator channel drop filters in a plasmon-polaritons metal[J]. *Optics Express*, 2006, **14**(7): 2932-2937.
- [22] HAN Z, VAN V, HERMAN W N, *et al.* Aperture-coupled MIM plasmonic ring resonators with sub-diffraction modal volumes[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(15): 12678-12684.
- [23] PENG Xiao, LI Hong-jian, WU Cai-ni, *et al.* Research on transmission characteristics of aperture-coupled square-ring resonator based filter[J]. *Optics Communications*, 2013, **294**(5): 368-371.
- [24] HAN Zhang-hua, BOZHEVOLNYI S I. Plasmon-induced transparency with detuned ultracompact Fabry-Perot resonators in integrated plasmonic devices[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(4): 3251-3257.
- [25] GUO Ying-hui, YAN Lian-shan, PAN Wei, *et al.* Transmission characteristics of the aperture-coupled rectangular resonators based on metal-insulator-metal waveguides[J]. *Optics Communications*, 2013, **300**(14): 277-281.
- [26] HAN Z, FORSBERG E, HE S. Surface plasmon Bragg gratings formed in metal-insulator-metal waveguides[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(2): 91-93.
- [27] GUO Ying-hui, YAN Lian-shan, PAN Wei, *et al.* Characteristics of plasmonic filters with a notch located along rectangular resonators[J]. *Plasmonics*, 2013, **8**(2): 167-171.
- [28] TAO Jin, HUANG Xu-guang, ZHU Jia-hu. A wavelength demultiplexing structure based on metal-dielectric-metal plasmonic nano-capillary resonators[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(11): 11111-11116.
- [29] CHEN Xi, ZHANG Ru, LANG Pei-lin, *et al.* Transmittance spectrum of surface plasmon polariton based filter with asymmetric double-ring resonator and switch[J]. *Journal of Modern Optics*, 2014, **61**(9): 716-720.